

Università degli Studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie
Ambientali

Dottorato di Ricerca in Georisorse e Geotecnologie - XIII Ciclo

Alberto Pistocchi

**IL RUOLO DELLA MODELLISTICA DELLE
GEORISORSE NEI PROCESSI DI
PIANIFICAZIONE TERRITORIALE**

Elaborato finale

Supervisor: Prof. P. Berry

Co-supervisors: Prof. A.G.Fabbri, Prof. P. Secondini

Alla nonna Letizia

A tutti quelli che da grandi faranno gli esploratori

IL RUOLO DELLA MODELLISTICA DELLE GEORISORSE NEI PROCESSI DI PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

Sommario

INTRODUZIONE E SCHEMA DEL LAVORO	14
CAPITOLO 1 - TERRITORIO E GEOGRAFIE DEL VOLTO DEL PIANIFICATORE	26
1- LO SGUARDO AL TERRITORIO.....	26
2- VISIONI DEL BENE E NATURA MULTICRITERIALE DELLE DECISIONI.....	30
3- MODELLI PER IL PLANNER ED AGIRE COMUNICATIVO.....	31
4- DIFFICOLTÀ DELL'AGIRE COMUNICATIVO.....	37
5- CONCLUSIONI PROVVISORIE.....	40
CAPITOLO 2 - PIANIFICAZIONE E CONOSCENZA	42
1-PREMESSE.....	42
2-PIANI "FISICI" E "STRATEGICI" NELLA CRISI DELL'URBANISTICA.....	46
<i>Nuovi scenari istituzionali</i>	46
<i>Pianificazione fisica e pianificazione strategica</i>	47
<i>Progettualità baconiana e pervasività della domanda di conoscenza dell'ambiente</i>	50
3-MODALITÀ DELL'ANALISI SCIENTIFICA E RAZIONALITÀ NELLA PIANIFICAZIONE AMBIENTALE.....	51
<i>Il tramonto della fisica matematica</i>	51
<i>Concezione del territorio ed uso culturale dei modelli</i>	54
4-LA TRAGEDIA DELL'INFORMAZIONE	61
5-PER CHE COSA, INFORMAZIONI? PROBLEMI E PROSPETTIVE DI UN "PARADIGMA GIS".....	65
CAPITOLO 3 - CARATTERISTICHE DELLA MODELLAZIONE GEOGRAFICA	72
1-PREMESSE.....	72
2-PRINCIPI DELLA MODELLAZIONE GEOGRAFICA.....	73
3-L'USO DEI GIS NELLA MODELLAZIONE: DA TECNOLOGIA A PARADIGMA.....	77
4-MODELLI DISPONIBILI PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE: UN TENTATIVO DI SISTEMATICA.....	83
5-LA SCELTA DEI MODELLI IN RELAZIONE AL PROBLEMA DI PIANO.....	92
CAPITOLO 4 – LA RICERCA GEOGRAFICA COME APPLICAZIONE CREATIVA DI MODELLI	107
1.PREMESSE.....	107
2- CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEI DIVERSI TIPI DI RAGIONAMENTI IN RELAZIONE ALLA PIANIFICAZIONE.....	109
<i>Modelli espliciti di sistemi fisici</i>	109
<i>Modelli non espliciti (conoscenza dei soli fattori rilevanti)</i>	111
<i>Il giudizio razionale</i>	112
3- LEVIATANO: LAND EVALUATION AND IMPACT ASSESSMENT THEORY AND OPERATION (A BENIGN UTOPIA?).....	114
CAPITOLO 5 –L'ECOLOGIA DEL PAESAGGIO COME METODO NELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE: RIFLESSIONI SU UN CASO DI STUDIO	118
1- L'USO DEI CONCETTI DELL'ECOLOGIA DEL PAESAGGIO NELLA PROGETTAZIONE.....	118
<i>Le origini dell'ecologia del paesaggio</i>	118
<i>'Concetti spaziali' e pianificazione territoriale</i>	119
<i>Le valutazioni dell'ecologia del paesaggio</i>	123
2- UN CASO DI STUDIO: IL COMPRESORIO CESENATE	125
<i>Introduzione: area di studio ed obiettivi</i>	125

<i>Il metodo utilizzato</i>	127
<i>Distribuzione e connessione dell'habitat naturale</i>	128
<i>Analisi dei possibili corridoi di flusso per organismi</i>	129
<i>Analisi del grado di esposizione a disturbi esterni dell'habitat naturale</i>	131
3- CONCLUSIONI.....	133
CAPITOLO 6 – MODELLAZIONE DI FENOMENI LE CUI LEGGI FISICHE SONO NOTE: CASE STUDIES.	134
1- MODELLAZIONE CARTOGRAFICA DEI FENOMENI DIFFUSIVO-AVVETTIVI: INTEGRAZIONE DI GIS E MODELLISTICA AMBIENTALE IN AMBIENTI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI SUL TERRITORIO.....	134
2- ANALISI GIS-BASED DEI FENOMENI IDROLOGICI PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE.....	142
<i>Premesse</i>	142
<i>Procedure di calcolo per la regionalizzazione del bilancio idrologico</i>	142
<i>L'erosione dei suoli</i>	148
<i>L'inquinamento diffuso</i>	152
<i>L'uso delle valutazioni nella pianificazione</i>	156
<i>Ringraziamenti</i>	156
3- MODELLAZIONE PREVISIONALE GIS-BASED DELL'INQUINAMENTO DI ORIGINE DIFFUSA DA FONTI AGRICOLE. UN CASO DI STUDIO.	158
<i>Introduzione</i>	158
<i>Finalità e metodologie</i>	159
<i>Descrizione del modello di erosione</i>	160
<i>Descrizione del modello di loading dei nutrienti</i>	166
<i>Conclusioni e sviluppi futuri</i>	171
4- MODELLAZIONE GIS-BASED DELLO SPANDIMENTO DI REFLUI ZOOTECNICI E DELL'INCIDENZA DELL'INQUINAMENTO CONSEGUENTE.....	174
<i>Introduzione</i>	174
<i>Modellazione per indicatori</i>	175
<i>Valutazione delle variabili E e P</i>	177
<i>Valutazione delle concentrazioni</i>	178
<i>Un caso di studio</i>	179
<i>Conclusioni e linee future di ricerca</i>	186
CAPITOLO 7 – LA MODELLAZIONE DI FENOMENI LE CUI LEGGI NON SONO NOTE: CASE STUDIES..	188
1- L'USO DI TECNICHE DI MODELLAZIONE PREVISIONALE PER L'UTILIZZAZIONE OTTIMALE DEI DATABASE SPAZIALMENTE DISTRIBUITI: APPLICAZIONE DI UN SISTEMA ESPERTO NEL CAMPO DELLA MAPPATURA DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO	188
<i>Discussion of the results</i>	195
2- MAPPATURA DELLA PROPENSIONE ALL'INNESCO DI INCENDI BOSCHIVI MEDIANTE FAVOURABILITY FUNCTIONS: UN CASO DI STUDIO	202
<i>Premesse</i>	202
<i>Aspetti metodologici e affidabilità: tecniche di integration modelling</i>	203
<i>Dati utilizzati e risultati</i>	206
<i>Conclusioni</i>	208
3- MODELLAZIONE DEL POTENZIALE MINERARIO PER L'ESTRAZIONE DI RAME NELLA REGIONE DI MAGONDI, ZIMBABWE.....	209
CAPITOLO 8 – IL GIUDIZIO RAZIONALE.....	218
.....	218
1- UN APPROCCIO GEOGRAFICO MULTICRITERIO PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE DA ATTIVITÀ ESTRATTIVE.....	218
<i>Introduzione</i>	218
<i>Descrizione dei fenomeni e valutazione degli impatti</i>	219
<i>La via per cave a cielo aperto</i>	222
<i>La valutazione e sovrapposizione dei vari impatti</i>	235
<i>L'uso degli indici complessivi di impatto a supporto delle decisioni</i>	239
<i>Conclusioni</i>	240
2- UN APPROCCIO-QUADRO INTEGRATO PER LA LOCALIZZAZIONE OTTIMALE DELLE ATTIVITÀ ESTRATTIVE E GLI USI DEL SUOLO INDESIDERATI	241
<i>Introduzione</i>	241
<i>Descrizione dell'area di studio e posizione del problema</i>	241
<i>I criteri adottati</i>	245
<i>Rappresentazione degli indicatori per i criteri scelti nel caso di studio</i>	252

<i>Tecniche di combinazione dei criteri</i>	254
<i>Conclusioni</i>	260
<i>Ringraziamenti</i>	261
3-PIANIFICAZIONE AMBIENTALE E SISTEMI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI: IL CASO DI SOGLIANO AL RUBICONE	262
<i>Introduzione</i>	262
<i>Identificazione dei problemi e formulazione delle domande in termini modellistici</i>	263
<i>La modellazione di primo livello e l'estrazione di indicazioni a supporto del piano</i>	264
<i>Conclusioni</i>	269
<i>Ringraziamenti</i>	270
4- Integrazione di GIS, simulatori stocastici di domanda e modelli fluidodinamici per la valutazione delle reti di distribuzione del gas e la pianificazione energetica nella città di Forlì	271
<i>Introduzione e descrizione generale del problema</i>	271
<i>Analisi e modellazione della domanda</i>	274
<i>Valutazione idraulica della rete</i>	278
<i>Valutazione multicriteriale degli scenari di progetto</i>	280
BIBLIOGRAFIA	282

Indice delle figure

FIGURA 1 – PERCORSI DENTRO AL LIBRO	23
FIGURA 2 – UN TRIANGOLO DI PROBLEMI.....	24
FIGURA 3 – LE 20 OPERAZIONI UNIVERSALI GIS (DA ALBRECHT, 1996).....	79
FIGURA 4- SCHEMA DI UTILIZZO DEI MODELLI IN UN DSS, CON LOGICA “TRADIZIONALE”.....	96
FIGURA 5 – UNA FLOW CHART PER LA PREVISIONE NUMERICA DELL’INQUINAMENTO DIFFUSO DI ORIGINE AGRICOLA	99
FIGURA 6- LA STESSA FLOW CHART DI , IN TERMINI DI MODELLAZIONE PER INDICI.....	99
FIGURA 7 – UNO SCHEMA DI PIANIFICAZIONE PARTECIPATA BASATA SULL’USO DI MODELLI (DA COMUNE DI CESENA, 2000)	101
FIGURA 8 – CONFRONTO FRA I MODELLI DI TIPO ESPlicitO E LE RETI DI INFERENZA (DA OPENSHAW, 1998B; MODIFICATO).....	112
FIGURA 9 – UN MODELLO DI GIUDIZIO RAZIONALE.....	114
FIGURA 10 - CARTA DELL’USO DEL SUOLO DELL’AREA DI STUDIO (CFR. TABELLA 7 PER IL SIGNIFICATO DEI CODICI).....	126
FIGURA 11 - ANALISI DELLA CONNETTIVITA’ DELL’HABITAT NATURALE (OGNI MACCHIA E’RAPPRESENTATA DA UN COLORE DIVERSO).....	129
FIGURA 12 - ANALISI DEI POSSIBILI CORRIDOI DI FLUSSO PER ORGANISMI.....	131
FIGURA 13 - ANALISI DEL GRADO DI ESPOSIZIONE A DISTURBI ESTERNI DELLE MACCHIE BOSCADE.	132
FIGURA 14 – GRAFICO DEL BILANCIO IDROLOGICO PER LA STAZIONE DI SOGLIANO.....	147
FIGURA 15 – BILANCIO IDROLOGICO: CALCOLO DELL’EVAPOTRASPIRAZIONE E DELL’INDICE DI ARIDITÀ.....	148
FIGURA 16 – BILANCIO IDROLOGICO: CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI DEFLUSSO, DEL RUNOFF E DELL’INFILTRAZIONE.....	148
FIGURA 17 – CALCOLO DELLA USLE.....	152
FIGURA 18 – CALCOLO DEI CONTRIBUTI D’AZOTO NEI SEDIMENTI, IN RUNOFF E IN INFILTRAZIONE	156
FIGURA 19- FLOWSHEET PER IL CALCOLO DI Q (VOLUME DEL DEFLUSSO SUPERFICIALE).....	162
FIGURA 20- FLOW SHEET DI CALCOLO DI F (TASSO DI DISTACCAMENTO DEL SUOLO).....	163
FIGURA 21 FLOW SHEET PER IL CALCOLO DI G (CAPACITÀ DI TRASPORTO DEL DEFLUSSO SUPERFICIALE)	164
FIGURA 22 - PERCORSO SEGUITO PER VALUTARE IL DEFLUSSO SUPERFICIALE (Q) E L’INFILTRAZIONE (F) PER EVENTO PIOVOSO.....	169

FIGURA 23 PERCORSO SEGUITO PER VALUTARE LA QUANTITÀ DI NUTRIENTI TRASPORTATI DAL SEDIMENTO.....	170
FIGURA 24- CALCOLO DELLE CONCENTRAZIONI DI N E P NEL RUNOFF.....	173
FIGURA 25- CALCOLO DELL'AZOTO E DEL FOSFORO TOTALI PRODOTTI DAL BACINO.....	173
FIGURA 26 – UNA POSSIBILE IPOTESI DI LAVORO SULLA DISTRIBUZIONE DELLE DOSI DI SPANDIMENTO.....	178
FIGURA 27 – LOCALIZZAZIONE DEGLI ALLEVAMENTI SUINICOLI E AVICOLI NELL'AREA DI STUDIO (NS. ELAB. DATI ARPAER-FC).....	179
FIGURA 28 - LOCALIZZAZIONE DEI TERRENI DI SPANDIMENTO DEGLI ALLEVAMENTI DI FIGURA 27 (NS. ELAB. DATI ARPAER-FC).....	180
FIGURA 29 – POLIGONI DI THIESSEN DEGLI ALLEVAMENTI NEI DUE CASI DI DISTANZA PESATA (A) E DI DISTANZA GEOMETRICA (B). I POLIGONI DI THIESSEN POSSONO ESSERE RITAGLIATI ESCLUDENDO DISTANZE PESATE SUPERIORI AI 5 KM (C) O 2,5 KM (D) DAGLI ALLEVAMENTI.	182
FIGURA 30 – POLIGONI DI THIESSEN (INTERROTTI A 5 KM) DEI TERRENI DI SPANDIMENTO CON SOVRAPPOSTI GLI ALLEVAMENTI. SI NOTA COME ALCUNI ALLEVAMENTI HANNO COME TERRENO PIÙ VICINO UN TERRENO A LORO DISPOSIZIONE, MENTRE ALTRI HANNO UN TERRENO NON A LORO DISPOSIZIONE (OGNI COLORE CORRISPONDE AD UN IDENTIFICATIVO DI TERRENO O ALLEVAMENTO).....	182
FIGURA 31 – MAPPA DEGLI SPANDIMENTI NOMINALI DI LETAME (A) E LIQUAME (B) (VALORI IN DECINE DI MC/HA). IN FIGURA È RIPORTATO IL CASO DI SOGLIA DI DISTANZA PARI A 5 KM.....	183
FIGURA 32 – FATTORI RELATIVI ALL'EROSIONE (NORMALIZZATI): A- FATTORE DI COPERTURA OTTENUTO DALL'INDICE NDVI; B- MAPPA DEL FATTORE T SECONDO L'EQ. (9).....	184
FIGURA 33 – MAPPA DELLA PIOVOSITÀ, OTTENUTA PER REGRESSIONE MULTIPLA DEI DATI RISPETTO A DISTANZA DALLA COSTA E QUOTA TOPOGRAFICA.....	185
FIGURA 34 – MAPPA DEI SITI PRIORITARI PER INQUINAMENTO DA REFLUI ZOOTECCNICI: A – AZOTO DA LIQUAMI; B – AZOTO DA LETAMI.....	186
FIGURA 35 – INCENDI CENSITI NEL COMUNE DI SOGLIANO AL RUBICONE (1994-1998).....	203
FIGURA 36- FATTORI CAUSALI UTILIZZATI NELLA VALUTAZIONE E SCHEMA DI CALCOLO.....	206
FIGURA 37 – PREDICTION RATES PER I VARI PREDITTORI.....	207
FIGURA 38- MAPPE DELLA PREDISPOSIZIONE ALL'INCENDIO SECONDO LE VARIE TECNICHE DI CALCOLO.....	208
FIGURA 39- UNITÀ LITOLOGICHE NELL'AREA.....	211
FIGURA 40 – MAPPA DELL'ANOMALIA AEROMAGNETICA.....	212
FIGURA 41 – DISTRIBUZIONE DELLE ANOMALIE DI FERRO (A), ZINCO(B) E RAME (C); LE MAPPE HANNO SOLO LO SCOPO DI FORNIRE UNA PRIMA VISUALIZZAZIONE E SONO FRUTTO DI INTERPOLAZIONI NEAREST NEIGHBOUR	212

FIGURA 42 – MAPPA DELL’ANOMALIA GEOCHIMICA DI RAME, VALUTATA PER KRIGAGGIO ORDINARIO DELLA LOG-TRASFORMATA DELLE CONCENTRAZIONI E SUCCESSIVA ANTITRASFORMAZIONE.....	213
FIGURA 43 – VARIOGRAMMA DELLA LOG-TRASFORMATA DELLA CONCENTRAZIONE DI RAME.....	213
FIGURA 44 – COEFFICIENTI DI AUTOKRIGABILITÀ (A) E CODISPERSIONE (B) DI VARIE SPECIE CHIMICHE CON IL RAME.....	214
FIGURA 45- VALIDAZIONE DELLA PREDIZIONE FATTA CON QUATTRO E SEI FATTORI	215
FIGURA 46 – DUE CASI DI ANALISI DI SENSITIVITÀ.	216
FIGURA 47 – ESEMPIO DI MAPPE DELLA PREDIZIONE: A=TEOREMA DI BAYES; B=CERTAINTY FACTORS; C= FUZZY-AND; D=FUZZY OR; E=FUZZY-SOMMA; F=FUZZY-PRODOTTO.....	217
FIGURA 48– SCHEMA CONCETTUALE DELL’APPROCCIO TRADIZIONALE E DI QUELLO ADOTTATO NEL PRESENTE STUDIO PER LA VIA.	220
FIGURA 49– CARTA DELL’USO DEL SUOLO E DELLE SORGENTI DI IMPATTO GENERATO DELL’ATTIVITÀ INDUSTRIALE.....	222
FIGURA 50– GRAFICO VOLUMETRICO DELLA ZONA DI INTERESSE E FRONTI DELLA CAVA VISTI DA UN OSSERVATORE POSTO A NORD – OVEST RISPETTO ALLA CAVA.	223
FIGURA 51– SCHEMA DI CALCOLO DELLA DIFFRAZIONE DOVUTA AD UNA BARRIERA (S = SORGENTE, R = RECETTORE).....	224
FIGURA 52 – VALORI, CALCOLATI SECONDO LA NORMA ISO 9613-II, DEL LEQA (DBA) NELLA ZONA DELLA CAVA	225
FIGURA 53– CARTA DELLA ZONIZZAZIONE ACUSTICA AI SENSI DELLA L. 447/95.....	226
FIGURA 54– SCHEMA DEL MODELLO BOX: ALL’INGRESSO (VELOCITÀ DEL VENTO E PORTATA IN MASSA DELL’INQUINANTE) SI ASSOCIA COME USCITA DEL MODELLO LA CONCENTRAZIONE DI QUEST’ULTIMO.....	227
FIGURA 55– MAPPA DELLA DISTRIBUZIONE DI POLVERE GENERATA DALLE ATTIVITÀ DI CAVA (CONCENTRAZIONI IN $\mu\text{G}/\text{M}^3$).....	227
FIGURA 56– EFFETTI INDOTTI DA VOLATE. DISTRIBUZIONE DEI VALORI MASSIMI DELLO PSEUDOVETTORE DELLA VELOCITÀ DI VIBRAZIONE DELLE PARTICELLE. I VALORI SONO ESPRESSI IN CM/S.	229
FIGURA 57– ZONIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO DEL TERRITORIO RISPETTO AI FENOMENI VIBRATORI SECONDO LA NORMA DIN STANDARD 4150.....	230
FIGURA 58– DISTRIBUZIONE DEI VALORI DEL LIVELLO DI PRESSIONE IN ARIA INDOTTI DA VOLATE (VALORI IN DB).....	231
FIGURA 59– SITUAZIONE DELLA BIOPOTENZIALITÀ TERRITORIALE (BTC) PRIMA DELL’INSEDIAMENTO DELLA CAVA. SULLA DESTRA È RAPPRESENTATA L’AMPIA MACCHIA BOSCHIVA INTERESSATA DALL’INSEDIAMENTO INDUSTRIALE (VALORI IN $\text{MCAL}/\text{M}^2/\text{ANNO}$).....	232
FIGURA 60– VISTA RAVVICINATA DELLA MAPPA DELLA BIOPOTENZIALITÀ TERRITORIALE (BTC) DOPO L’INSEDIAMENTO DELLA CAVA (VALORI IN $\text{MCAL}/\text{M}^2/\text{ANNO}$). SI NOTA CHE LA CAVA	

PROVOCA UN DRASTICO CALO DELLA BTC, CHE SI ESTENDE AL DI LÀ DEI CONFINI FISICI DEL SITO INDUSTRIALE CON LA LEGGE DI VARIAZIONE CONVENZIONALMENTE ASSUNTA.....	233
FIGURA 61– CONCETTO DI MACCHIA O ECOSISTEMA DEFINITO TRAMITE IL NUCLEO ED IL BORDO, E SCHEMA DELLA VARIAZIONE DEL VALORE DI BTC TRA DUE ECOSISTEMI ADIACENTI.....	233
FIGURA 62– SCHEMA DELLA GEOMETRIA DEL CAMPO VISIVO UMANO.....	234
FIGURA 63– VISUALIZZAZIONE VOLUMETRICA DELLA MAPPA DEI VALORI DEL RAPPORTO (ESPRESSO COME PERCENTUALE) TRA AREA OCCUPATA DALLA SUPERFICIE DI CAVA E AREA DEL CAMPO VISIVO UMANO (SI NOTI CHE, PER EVIDENZIARE LA VARIAZIONE DELL'INDICATORE, SI È EFFETTUATO UNO STRETCHING LINEARE DEI VALORI FRA LO 0 ED IL 3%).....	235
FIGURA 64– INDICI DI IMPATTO PER LE POLVERI CORRISPONDENTI A TRE DIVERSE CONCENTRAZIONI IN ARIA.....	236
FIGURA 65– IMPATTO AMBIENTALE GLOBALE OTTENUTO PER SOMMA PESATA DEI VALORI NORMALIZZATI DEGLI IMPATTI. I VALORI HANNO SIGNIFICATO ALL'INTERNO DI UNA SCALA DI CONDIZIONE RELATIVA, E NON ASSOLUTA; POSSONO PERTANTO ESSERE UTILIZZATI SOLO PER VISUALIZZARE LE AREE SOTTOPOSTE A MAGGIORE IMPATTO ALL'INTERNO DEL CONTESTO DI STUDIO.....	238
FIGURA 66– ESEMPIO DI EFFETTO DELLA MITIGAZIONE DELL'IMPATTO VISIVO ED ACUSTICO.....	239
FIGURA 67 – LOCALIZZAZIONE DELL'AREA E VISUALIZZAZIONE DEI GIACIMENTI DI INTERESSE PER LO STUDIO.	242
FIGURA 68- UNITÀ LITOLOGICHE PRINCIPALI: A)COMPLESSO CAOTICO DELLE "ARGILLE SCAGLIOSE" E TERRENI ARGILLOSO MARNOSI CAOTICI (CRETACEO-EOCENE); B)CALCARE A BRIOZOI DELLA FORMAZIONE DI S. MARINO E CALCARENITI (MIOCENE INFERIORE E MEDIO); C)MOLASSE CON SOTTILI INTERCALAZIONI MARNOSE DELLA FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA (MIOCENE); D) CALCARI MARNOSI, CALCARI MARNOSI ALT. A MARNE, MARNE CALCAREE E MARNE ARENACEE (MIOCENE MEDIO-EOCENE); E) ARGILLE, ARGILLE MARNOSE E MARNE ARGILLOSE (PLEISTOCENE- TORTONIANO); F) BLOCCHI E DETRITI ARENACEI SU ROCCE MARNOSE O SU "ARGILLE SCAGLIOSE" (OLOCENE); G) ALTERNANZE DI ARENARIE E MARNE DELLA FORMAZIONE MARNOSO- ARENACEA (MIOCENE); H) ALLUVIONI GHIAIOSO-SABBIOSE O SABBIOSE (OLOCENE); I) ALLUVIONI TERRAZZATE E TERRENI ALLUVIONALI DELLA PIANURA (OLOCENE-PLEISTOCENE); L) GESSI ED ALTRE ROCCE DELLA FORMAZIONE GESSOSO-SOLFIFERA (MESSINIANO); M) BLOCCHI E DETRITI CALCAREI (OLOCENE); N) CONGLOMERATI (MESSINIANO); O) MOLASSE IN ALTERNANZA CON ARGILLE SABBIOSE (PLIOCENE); P) DETRITI DI VARIA LITOLOGIA DERIVANTI DA ATTIVITÀ MINERARIA.....	243
FIGURA 69- SCHEMA PER IL CALCOLO DELLA LUNGHEZZA DELLE STRADE DI ACCESSO.....	246
FIGURA 70 – VINCOLI DA NORME NAZIONALI E REGIONALI: A- VINCOLI INDEROGABILI; B- VINCOLI DEROGABILI.....	249
FIGURA 71: A- AREE DISPONIBILI; B- LUNGHEZZA DELLE STRADE DI ACCESSO DA REALIZZARE; C- TEMPI DI PERCORRENZA; D – INDICE DI OPPOSIZIONE SOCIALE; E- INDICE DI QUALITÀ DELLA VEGETAZIONE; F- INDICE DI VISIBILITÀ.....	253
FIGURA 72: CRITERI RELATIVI ALLA LAND EVALUATION AGRICOLA (A-E) E MAPPA FINALE DI VALORE AGRICOLO (F)	254

FIGURA 73: AREE CONSIGLIATE PER LE ATTIVITÀ ESTRATTIVE SECONDO IL METODO TOPSIS (A) E IL METODO ADDITIVO (B); SI NOTI CHE IL PUNTEGGIO COMPLESSIVO, SENZA SIGNIFICATO IN TERMINI NUMERICI ASSOLUTI, È STATO NORMALIZZATO FRA I VALORI DI 0 E 1.	256
FIGURA 74: DISTRIBUZIONE DELLE DIFFERENZE DI PUNTEGGIO FRA LE DUE MAPPE.....	258
FIGURA 75 - SCOSTAMENTI DEL GIUDIZIO PER DIMINUZIONE DEL PESO DEL CRITERIO MINERARIO: A- DEL 20%; B- DEL 40% (CASO DEL METODO ADDITIVO).....	258
FIGURA 76 – NUVOLA DI DISPERSIONE DEI VALORI FRA IL GIUDIZIO ORIGINARIO E QUELLO “DEEP ECOLOGY”.....	259
FIGURA 77 – AREE GIUDICATE FAVOREVOLI IN BASE AL PUNTO DI VISTA “DEEP ECOLOGY”	260
FIGURA 78 – LOCALIZZAZIONE DELL’AREA.....	263
FIGURA 79-DELIMITAZIONE PER ESCLUSIONE DELLE ZONE POTENZIALMENTE URBANIZZABILI.	266
FIGURA 80- SITI IDONEI PER I LAGHETTI COLLINARI.....	268
FIGURA 81– SITI PRIORITARI PER LA LOTTA ALL’EROSIONE.....	268
FIGURA 82-SITI PRIORITARI PER LA LOTTA ALL’INQUINAMENTO DIFFUSO.....	269
FIGURA 83– ZONE FAVOREVOLI PER LA RICOMPOSIZIONE DI RETI ECOLOGICHE (IN BLU SONO RAPPRESENTATI I CORRIDOI A FONDO CIECO, IN ROSSO QUELLI CHE COLLEGANO MACCHIE DI HABITAT, RAFFIGURATE IN VERDE).....	269
FIGURA 84 – QUADRO DELLA CITTÀ DI FORLÌ CON SCHEMA DELLE RETI DI DISTRIBUZIONE DEL GAS.....	272
FIGURA 85 – ANDAMENTO DEI CONSUMI COMPLESSIVI ANNUI DI GAS(MC) NEGLI ANNI.....	273
FIGURA 86 – PREVISIONI DI SVILUPPO DELLA CITTÀ DI FORLÌ.....	273
FIGURA 87 – FLOW CHART DELLO STIMATORE DELLA DOMANDA	274
FIGURA 88 – SERIE DEI CONSUMI DISPONIBILI.....	275
FIGURA 89 – CURVE TERMICHE ESTREMANTI PER VARI LIVELLI DI PROBABILITÀ.....	276
FIGURA 90 – USO DEL PROCESSO STOCASTICO DELLA DOMANDA PER L’ANALISI DELLA DISTRIBUZIONE DEI GIORNI IN CUI VIENE ECCEDUTA LA POTENZIALITÀ DELLA RETE, IPOTIZZANDO DI ALIMENTARE QUEST’ULTIMA CON DUE SOLE DELLE TRE CABINE. LE LINEE ORIZZONTALI, CHE RAPPRESENTANO LA POTENZIALITÀ DI SERVIZIO IN ASSENZA DELLA CABINA DI CUI PORTANO IL NOME, CORRISPONDONO ALLE PORTATE LIMITE EROGABILI, VALUTATE CON LA SIMULAZIONE IDRAULICA DI CUI IN SEGUITO.....	276
FIGURA 91 – AUTOCORRELOGRAMMA EMPIRICO DEI CONSUMI GIORNALIERI.....	277
FIGURA 92 – CABINE DI RIDUZIONE E ATTRIBUZIONE DELLE AREE DI INFLUENZA.....	278
FIGURA 93 – SIMULAZIONE DELLA RETE DI IV SPECIE; SITUAZIONE ATTUALE (SINISTRA) E SITUAZIONE CON CONSUMI DA PRG 2015 (DESTRA).....	279

FIGURA 94 – SIMULAZIONE DELLA RETE DI V SPECIE; TRASFERIMENTO DELLA CABINA DI I SALTO A VILLA SELVA (SINISTRA) E SITUAZIONE ATTUALE (DESTRA), IN ENTRAMBI I CASI CON CONSUMI ATTUALI.....280

FIGURA 95 – ESEMPIO DI SIMULAZIONI PER IL CONFRONTO FRA DUE SCHEMI PROGETTUALI: COLLEGAMENTO DI UNA CABINA CON RETE MAGLIATA (SINISTRA) O MENSOLA (DESTRA)..... 280

FIGURA 96 –ESEMPIO DI TABELLA COMPARATIVA DI SINTESI FRA DUE INTERVENTI..... 281

Indice delle tabelle

TABELLA 1 – UNO SCHEMA DI CLASSIFICAZIONE FUNZIONALE DEI MODELLI.....	84
TABELLA 2- “TAYLORGRAMMA”, DA OPENSHAW, 1998 (MG=GEOGRAFIA MATEMATICA; SG= GEOGRAFIA STATISTICA; QG= GEOGRAFIA QUALITATIVA; GIS=GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS).....	84
TABELLA 3- LIVELLI DI APPROFONDIMENTO SUCCESSIVI PER ALCUNI TIPI DI ANALISI NELLA PIANIFICAZIONE AMBIENTALE.....	95
TABELLA 4 - AMBITI DI ANALISI AMBIENTALE E MODELLISTICA UTILIZZABILE (*=IMPLEMENTABILI SU FOGLIO ELETTRONICO; °=IMPLEMENTABILI SU VIUALIZZATORI DI SUPERFICI CONTINUE (ES. SURFER); +=IMPLEMENTABILI IN AMBIENTI DI CALCOLO INGEGNERISTICO (ES. MATLAB); ^= RICHIEDENTI SPECIFICI CODICI DI CALCOLO).....	104
TABELLA 5 - LIVELLI DI MODELLAZIONE DEI FENOMENI AMBIENTALI.....	105
TABELLA 6- UN ESEMPIO DI CLASSIFICAZIONE PER IL PROBLEMA DELLA SUBSIDENZA, SECONDO UNA SEMANTICA DISGIUNTIVA.....	109
TABELLA 7 - VALORI DI RESISTENZA AL FLUSSO DELLE VARIE CLASSI DI USO DEL SUOLO. IL PUNTEGGIO CRESCE CON LA RESISTENZA; IL VALORE -1 INDICA LE CLASSI INACCESSIBILI (BARRIERE), MENTRE IL VALORE ZERO SI RIFERISCE ALLE AREE-SORGENTE.....	127
TABELLA 8 – COEFFICIENTI DI REGRESSIONE MULTIPLA	144
TABELLA 9 – COEFFICIENTI CA, CV, CP	146
TABELLA 10 – FATTORE C.....	151
TABELLA 11- FONTI DI ORIGINE DIFFUSA : TERRENI DI SPANDIMENTO E SUOLI COLTIVATI	153
TABELLA 12 - FONTI LOCALIZZATE: POPOLAZIONE (METABOLISMO E DETERSIVI LIBERATI NELL’AMBIENTE CON GLI EFFLUENTI DOMESTICI)	154
TABELLA 13-STAZIONI PLUVIOMETRICHE E DATI DI PIOVOSITÀ ANNUA.....	165
TABELLA 14-PARAMETRI PEDOLOGICI UTILIZZATI PER IL MODELLO DI MORGAN & FINNEY (DA MORGAN, 1995).....	166
TABELLA 15 - PARAMETRI RELATIVI ALL’USO DEL SUOLO PER IL MODELLO DI MORGAN & FINNEY (DA MORGAN, 1995).....	166
TABELLA 16- PERDITA DI SUOLO ANNUALE STIMATA CON IL MODELLO DI MORGAN & FINNEY.....	166
TABELLA 17 – MATRICE DI CORRELAZIONE FRA LE CONCENTRAZIONI (SONO SOTTOLINEATE LE CORRELAZIONI PIÙ ALTE).....	214
TABELLA 18– EFFETTI MATERIALI INDOTTI DALL’ATTIVITÀ ESTRATTIVA.....	221
TABELLA 19 – QUANTITÀ DI PARTICOLATO SOLIDO EMESSE IN ARIA DALLE PIÙ SIGNIFICATIVE SORGENTI DELLA CAVA SORGENTI.....	226

TABELLA 20– COEFFICIENTI, OTTENUTI CON ANALISI DI REGRESSIONE, DELLA LEGGE DI DECADIMENTO DELLA VELOCITÀ, DI VIBRAZIONE DELLA PARTICELLE, CON LA DISTANZA SCALATA [12].	229
TABELLA 21– CONCENTRAZIONI IN ARIA AMMESSE PER LE POLVERI.	235
TABELLA 22– VALORI DELL’INDICE D’IMPATTO CORRISPONDENTI ALLE CONCENTRAZIONI DI POLVERI NELL’ARIA.	236
TABELLA 23– VALORI DI SUPERIORITÀ DI IMPORTANZA	237
TABELLA 24– MATRICE DEI CONFRONTI A COPPIE.	237
TABELLA 25– PESI NORMALIZZATI.	237
TABELLA 26– CRITERI E RELATIVI PESI USATI PER LA VALUTAZIONE AGRONOMICA DEI TERRENI.	251
TABELLA 27 – SCALA DI QUALITÀ DELLE TIPOLOGIE DI VEGETAZIONE NELL’AREA.	252
TABELLA 28 – VALORI DI IMPORTANZA RELATIVA NELL’ANALISI GERARCHICA DI SAATY (METODO DEL CONFRONTO A COPPIE).	256
TABELLA 29 – MATRICE DEL CONFRONTO A COPPIE FRA I CRITERI.	256
TABELLA 30 – PESI DEI CRITERI DERIVANTI DALLA MATRICE DEL CONFRONTO A COPPIE DI TABELLA 29.	256
TABELLA 31 – PESI ASSEGNATI NELL’ANALISI DI SENSITIVITÀ.	258
TABELLA 32 – MATRICE DEI CONFRONTI A COPPIE DA UN PUNTO DI VISTA “DEEP ECOLOGY” (DA CONFRONTARSI CON TABELLA 29).	259
TABELLA 33 – QUADRO DEI PROBLEMI E FORMULAZIONE DELLE DOMANDE IN TERMINI MODELLISTICI.	264
TABELLA 34 – CRITERI PER LA DEFINIZIONE DEL TERRITORIO POTENZIALMENTE URBANIZZABILE. IN CASO DI SOVRAPPOSIZIONI, CONTA IL GIUDIZIO PIÙ RESTRITTIVO.	267
TABELLA 35- CRITERI PER LA LOCALIZZAZIONE OTTIMALE DEGLI INTERVENTI DI GESTIONE AMBIENTALE.	267
TABELLA 36– CARATTERISTICHE DELLE TRE “STAGIONI” INDIVIDUATE.	275
TABELLA 37– STATISTICHE DESCRITTIVE DEI DATI ANALIZZATI.	275

Introduzione e schema del lavoro

Oggi da più parti ci si interroga sulle relazioni che intercorrono fra la pianificazione territoriale e la conoscenza delle risorse naturali o georisorse. Il termine “georisorse”¹ è qui usato per designare le risorse caratterizzate:

- da un aspetto territoriale/geografico (distribuzione spaziale come caratteristica fondamentale), per cui il territorio può essere classificato utilizzando come criterio una o più georisorse opportunamente definite (si pensi alle carte dei rischi, degli impatti, della distribuzione di determinate grandezze, delle classi litologiche, pedologiche, di uso del suolo...);
- dalla non-controllabilità da parte dell'uomo, se non in piccola parte, della loro produzione e del loro rinnovo (si pensi alle acque sotterranee, il cui tasso di ricarica naturale è un fattore limitante per lo sfruttamento);
- dall'essere risultato di processi che possono (entro certi limiti) essere compresi e previsti (si pensi alla modellistica previsionale dell'inquinamento);
- dall'organizzarsi secondo strutture, che possono essere identificate e valutate (come ad esempio l'identificazione di reti ecologiche e la stima delle proprietà biogeografiche da esse espresse);

Si tratta di una definizione estremamente generale, che ingloba tutte - o quasi – le variabili “fisiche” dell'ambiente nel quale la città si colloca: l'atmosfera, le acque superficiali e sotterranee, il suolo, gli ecosistemi, le risorse minerarie... il territorio stesso, inteso come spazio utilizzabile, è georisorsa per eccellenza, godendo delle proprietà sopra ricordate.

Il discorso che il titolo del lavoro suggerisce parrebbe ovvio: la pianificazione territoriale deve sempre tenere conto dei vincoli ambientali imposti alla localizzazione delle attività umane, e ne trae le proprie conseguenze sul piano progettuale.

In realtà gli anni più recenti, contro ogni speranza tecnocratica, hanno fatto emergere in modo drammatico la problematicità della conoscenza e del controllo delle georisorse, ed hanno affinato una sensibilità per la coevoluzione della società umana e del suo contesto fisico, che oggi richiede di definire i comportamenti e le scelte sulla base di una specifica razionalità.

Mentre finora ci si è concentrati sull'acquisizione di conoscenze secondo i dettami della ricerca scientifica, è oggi necessario spostare l'attenzione sul loro uso nella soluzione dei problemi.

La pianificazione territoriale si presenta come contesto in continua evoluzione, e ha per oggetto sistemi di incredibile complessità; ma nasce storicamente come pianificazione della città (o urbanistica) in un territorio visto come serbatoio a sé stante– e spesso serbatoio *illimitato*- di risorse.

In anni passati si è assistito allo spostamento del fuoco dall'urbanistica alla pianificazione territoriale: ad un *modello christalleriano* di città isolata al centro di un territorio sostanzialmente omogeneo e indistinto, si è gradualmente sostituita una visione del sistema urbano inserito in reti e contesti, dapprima individuati da prerogative socioeconomiche, e successivamente anche dalle strutture ecologiche su cui l'insediamento si appoggia. Tuttavia, è difficile parlare di una vera pianificazione

¹ Si ripropone qui la definizione, oggi comunemente accettata, per cui le georisorse sono tutti gli elementi geografico-fisici che costituiscono l'ambiente nel quale si sviluppa la società umana e che rappresentano per essa, di conseguenza, risorse da gestire. Fra le georisorse rientra anche lo spazio fisico e il territorio. Si sottolinea, rispetto a definizioni più restrittive, la generalità del termine, che include oggetti di interesse tradizionale per l'urbanistica, le scienze ambientali e naturali, la geografia e l'ingegneria. Si sottolinea che alcune georisorse – come il paesaggio percepito e il paesaggio storico-culturale - sono oggetto di analisi tradizionalmente ‘umanistiche’, altre di analisi ‘scientifiche’, ma che il concetto contemporaneo di georisorse supera queste definizioni ormai obsolete. In merito basti citare la L. 349/86(?), che include fra le componenti della V.I.A. sia gli aspetti fisici, sia quelli socioculturali ed economici, a conferma dell'avvenuta transizione a punti di vista ‘olistici’.

ambientale fino agli anni Sessanta, benché esperienze come la leggendaria Tennessee Valley risalgano anche ai decenni precedenti (P.es. Cannata, 1986).

In Italia, poi, si è manifestato un certo ritardo rispetto ad altri paesi nel recepire le istanze di tutela dell'ambiente, e questa situazione è stata a volte aggravata da una legislazione poco "pratica" e spesso tardiva, che ha limitato in maniera pesante lo sviluppo di una gestione ordinaria dell'ambiente al di fuori della logica del contingente e dell'emergenza.

Oggi è impossibile pensare ad ogni attività di pianificazione, senza considerarne i risvolti ambientali: la motivazione alla tutela dell'ambiente viene:

- da un lato, dalla sopravvivenza dell'integrità fisica del territorio e dei suoi ecosistemi, e
- dall'altro, dalla appetibilità di quel territorio dal punto di vista della localizzazione di attività economiche, e dalla qualità della vita in generale.

Si può quindi affermare che l'istanza della tutela ambientale diventi pervasiva, benché si manifestino nei suoi riguardi atteggiamenti ed obiettivi di piano differenti.

Il piano territoriale non è più condizionato solo dalle variabili socioeconomiche dell'insediamento antropico, ma è sempre più uno strumento con cui si fissano regole volte alla razionale utilizzazione delle georisorse. Il paradigma della gestione delle georisorse ha una rilevanza nello spostare i termini della pianificazione:

- dal progetto di forme urbane secondo gli schemi, relativamente arbitrari, della "progettazione ortogonale"(cfr. Mumford, 1968; Friedmann, 1987),
- alla successiva pianificazione territoriale già attenta al contesto di area vasta e sistemi fisici della città,
- alla valorizzazione degli stock naturali del territorio, e delle attività umane ad essi associate.

Gli stock delle georisorse, la loro sensibilità e vulnerabilità, e il tasso del loro consumo compatibile diventano *un criterio fondamentale di valutazione delle politiche e dei piani*.

Tuttavia, i temi della pianificazione territoriale non si esauriscono nella gestione delle georisorse, e rimangono apparentemente irrisolte ampie fasce di sovrapposizione e di conflitto di interessi fra lo sviluppo della comunità locale e la tutela ambientale. E' a tutt'oggi problematico il rapporto fra quella pianificazione che si interessa di chiarire e sfruttare le opportunità economiche del territorio, e quella che si interessa di dare i vincoli generali di sostenibilità a questo sfruttamento. Entrambe le forme e funzioni della pianificazione rientrano nella definizione del tutto generale di azione nel dominio pubblico, data da Friedmann (*cit.*):

"La più ampia definizione della pianificazione come forma di razionalità tecnica è la seguente:

I. La pianificazione mira a collegare la conoscenza scientifica e tecnica alle azioni in un dominio pubblico.

In questa definizione la pianificazione non è assorbita interamente dalla conoscenza o dall'azione, ma serve piuttosto da legame tra di esse: il suo compito specifico è quello di rendere la conoscenza scientifica e tecnica utile a specifici attori del dominio pubblico."

Negli ultimi anni, si è osservata anche in Italia una crescente diffusione delle tecnologie dell'informazione nella gestione del territorio (Ciancarella *et al.*, 1998). L'uso di questi strumenti è però quasi sempre limitato all'automazione dei processi di analisi e di supporto alle decisioni di tipo tradizionale: un esempio tipico è l'impiego dei sistemi informativi geografici fatto dai Comuni per la stesura degli elaborati dei piani regolatori generali. Alcuni autori stigmatizzano i rischi di questo usare strumenti nuovi in modo vecchio (p.es. Monti, 1999)

Allo stesso modo, pressoché a tutti gli altri livelli della pianificazione e del controllo del territorio, le tecnologie dell'informazione geografica largamente disponibili non hanno ancora spinto i pianificatori ad una riflessione sulle loro effettive potenzialità, e sul nuovo paradigma di pianificazione che da esse è reso attuabile.

Si può ritenere che la nuova pianificazione possa avvalersi, a parità di costi di analisi e acquisizione dei dati, di strumenti di modellistica e di supporto alle decisioni che forniscono un'informazione a valore aggiunto, rispetto alle elaborazioni tradizionali, per la discussione su base "scientifica" delle scelte

Nel lavoro che segue si adotta un'ipotesi di lavoro secondo cui le scelte che poggiano su questo tipo di valutazioni sono più facilmente condivisibili, in quanto si esplicitano al pubblico i motivi che consentono di definire un obiettivo e le strategie per perseguirlo; inoltre, quando sia necessario introdurre passaggi discrezionali nel processo di decisione (e questo accade praticamente in *ogni* decisione) la base "scientifica" consente di fissare i vincoli elementari - di tipo generalmente *physical*, materiale- a partire dai quali le varie alternative, cui dà origine la natura discrezionale della decisione, devono essere soppesate e confrontate assumendo le valutazioni scientifiche come base di discussione.

Il pianificatore deve possedere quindi un *paradigma di riferimento* per l'azione conoscitiva, l'attuazione di strumenti di analisi e di valutazione scientifica, e la "delimitazione del punto di vista", ovvero l'esplicitazione dei limiti e delle incertezze associati al modello della realtà che l'analisi delle georisorse propone in ciascun caso di applicazione; la validazione, infine, del modello stesso con conoscenze e dati diversi da quelli usati per costruirlo.

L'azione di analisi e di descrizione delle georisorse è quindi un passo essenziale del processo di formazione delle decisioni, la cui rilevanza etica è non solo legata alla efficacia, efficienza ed economicità dei risultati delle scelte (che pure rimane una delle principali motivazioni), ma anche alla "educazione" del pubblico coinvolto nel processo di decisione, che deve trovare, nell'analisi e nell'informazione scientifica "a valore aggiunto" prodotta, una utile base di discussione che consenta di pervenire ad una "azione comunicativa" (Habermas, 1981), da cui si pensa possa meglio scaturire un piano che incarni i valori politici della giustizia.

In questi ultimi anni è apparso sempre più chiaramente che la partecipazione del pubblico alle decisioni sui beni comuni -come quelli dell'ambiente e del territorio- non è trascurabile, in quanto solo con essa possono trovare espressione i "saperi" non formalizzati, ma ugualmente di essenziale importanza, che non hanno posto nelle discipline tradizionali dell'ingegneria delle georisorse e del territorio.

Da tempo ormai le più significative scuole di pianificazione territoriale e di ingegneria delle georisorse dedicano crescente attenzione al problema di come inglobare nei processi di stima quelle valutazioni dei vari attori sociali coinvolti, che trovano raramente espressione in termini quantitativi, oggettivi e ripetibili. Da questo tipo di riflessioni ha tratto la sua origine quell'insieme di metodologie che va sotto il nome di analisi multicriterio, che in varie classi di problemi oggi sostituisce la tradizionale impostazione di analisi costi-benefici o le procedure di ottimizzazione ingegneristica, ed è recepito anche nel cuore della normativa tecnica, p.es. con il regolamento di attuazione della Legge quadro sui lavori pubblici, n. 109/94, che prescrive fra l'altro lo studio della "fattibilità" (*sic*) ambientale di ogni opera pubblica.

In tutto questo, un ruolo essenziale rivestono le tecnologie dell'informazione, ed in particolare i GIS (geographic information systems) o SIT (sistemi informativi territoriali). Benché alcuni autori

sottolineino l'obsolescenza del termine (Chung e Fabbri, 1999), si è scelto di riproporre questa designazione, vista la capacità evocativa e sintetica che in Italia ancora conserva.

Le scuole di stampo urbanistico hanno dedicato numerose ricerche allo studio dei GIS e del loro ruolo nella formazione delle decisioni sul territorio, ma ancora non si è pervenuti ad una sistemazione definitiva della materia.

Inoltre, le riflessioni sono nate molte volte in seno a gruppi "non tecnici", che –fatti salvi alcuni casi in cui si è fatto effettivamente uso accoppiato e non banale di strumenti cartografici e potenzialità analitiche di GIS e altre tecnologie affini: si veda Cecchini, 1997; Secondini, 2000 - poco si sono soffermati sulle tecniche di rappresentazione quantitativo-previsionale dell'ambiente e delle georisorse, preferendo affrontare temi più tradizionali di progettazione urbana e territoriale, e quindi, in ultima analisi, perseguendo l'inglobamento, nel processo di piano, di informazioni "soggettive", fondate più sulle classiche procedure di analisi qualitativa e morfologica delle discipline architettoniche che su vere e proprie elaborazioni quantitative a supporto alle decisioni (p.es. Alessio *et al.*, 1999).

Nella formazione dei piani regolatori generali dei Comuni, l'utilizzo dell'informazione geoambientale avviene all'interno di un contesto poco incline all'invenzione di soluzioni in base a rapporti di causa ed effetto fra i fenomeni indagati in modo rigoroso.

Ad esempio, se vengono studiati in dettaglio tutti gli aspetti di vincolo di tipo geologico e idrologico, analisi ormai presente alla base di ogni piano, difficilmente poi quest'ultima è in grado di fornire elementi direttamente spendibili nella normativa. I vincoli sull'impermeabilizzazione dei suoli vengono sempre fissati sulla scorta dell'analisi, ma con elementi di discrezionalità incontrollata, e senza fare espliciti i limiti di validità delle ipotesi adottate nel prendere le decisioni. Sarebbe più utile, in merito all'esempio citato, valutare gli effetti sulle portate dei corsi d'acqua dei diversi scenari di impermeabilizzazione dei suoli ai fini della prescrizione di volumi di laminazione da realizzare contestualmente all'edificazione, ma questo di rado viene fatto su base sistematica e alla scala dell'analisi territoriale.

Un altro esempio, sempre più ricorrente, viene dall'applicazione delle valutazioni di impatto ambientale nei campi più disparati: quasi sempre si ricorre a scale di giudizio del tutto soggettive, ed oltretutto con scarso controllo sulla scelta dei punti di vista dei decisori, mentre sarebbe possibile ricorrere nella generalità dei casi per lo meno a modelli di *screening* per quantificare tutti gli effetti fisici delle azioni di progetto sui comparti ambientali.

D'altro canto, le scuole di stampo ingegneristico hanno prodotto nel tempo numerosi strumenti di analisi, ma si sono poco occupate di definire le *condizioni di applicabilità "culturale" degli stessi*: riflettere su quali strutture organizzative, climi socioculturali e problematiche di pianificazione da discutere consentano effettivamente di usare in modo proficuo i modelli, e valutare se e quali di essi possono essere usati direttamente al livello delle decisioni sul territorio.

Molti modelli matematici di fenomeni reali sono infatti utili solo in casi di studio sperimentali, quando si faccia una raccolta di dati *ad hoc* che presenterebbe costi insostenibili se fosse da estendere a casi di studio di interesse reale.

Un esempio classico di questo sono i modelli per la descrizione degli acquiferi, che di rado sono alimentati da dati sufficienti ad una seria taratura e validazione, ed oltre tutto sono spinti a livelli di complessità matematica e concettuale difficilmente comprensibile dai non addetti ai lavori. Generalmente, l'*input* e l'*output* dei modelli sono complessi, *time consuming* e dispendiosi, per cui i pianificatori normalmente non sono invitati a effettuare valutazioni previsionali per lo studio dei fenomeni fisici. E' però da ricordare che, anche quando i modelli applicabili sarebbero semplici e gestibili, la barriera culturale che si è stabilita ostacola l'applicazione di analisi avanzate per il piano.

In generale, si può dire che non ci sia più molto da inventare nel campo della modellistica matematica dei fenomeni ambientali: la vera difficoltà, oggi, è nell'applicare i modelli. I motivi di tale difficoltà sono da ricondurre a:

- scarsa copertura del territorio con informazioni affidabili e aggiornate
- scarsa capacità da parte degli enti territoriali di organizzare i dati in *database* già orientati alla costruzione di modelli previsionali (i *database* sono troppo generici e non sono pensati in partenza per soddisfare un'esigenza definita di analisi e predizione del comportamento del territorio, ma piuttosto *general pur pose*)
- scarsa conoscenza empirica dei fenomeni (p.es. nel settore dell'inquinamento elettromagnetico o dell'inquinamento idrico diffuso da fonti agricole e urbane)
- scarsa capacità di formulare i problemi in modo razionale, e di conseguenza di fornire loro delle soluzioni basate su analisi ad esse orientate
- scarsa capacità di stabilire un legame fra le rappresentazioni di calcolo e le rappresentazioni di comunicazione dei risultati (ovviamente, la percezione di un risultato da parte del tecnico o dello scienziato è diversa da quella del *planner* e ancora diversa da quella del pubblico, dello *stakeholder*: a ciascun livello occorre fornire una rappresentazione comprensibile del problema scientifico, e al contempo occorre garantire coerenza e realismo pratico alle varie forme di rappresentazione).

Oggi è necessario affermare che le innovazioni nella pianificazione ambientale non possono derivare dall'implementazione di nuove tecniche matematiche o dallo sviluppo di nuovo software applicativo, bensì dall'uso corretto del patrimonio già disponibile: siamo ormai in possesso dei metodi per caratterizzare i fenomeni, siamo in grado di analizzare i dati e di valutarne l'affidabilità.

Abbiamo anche a disposizione numerose tecniche formali per implementare su calcolatore ragionamenti sempre più simili a quelli della mente umana nel mondo reale, anche in contesti difficilmente descrivibili in termini di fisica matematica.

In passato, si è cercato di sviluppare sistematiche *descrizioni della realtà* (Feyerabend, 1996): si è ipotizzato che ogni tipo di dato, indipendentemente dal suo costo, potesse essere acquisito; si è cercato di mettere a punto modelli di grande complicazione in casi sperimentali molto particolari e assolutamente non generalizzabili ad aree più vaste.

Pochissimo la ricerca si è concentrata *sull'uso*, prima che sulla produzione incondizionata, di questi modelli, mentre la pianificazione territoriale richiede con crescente urgenza una fondazione razionale delle prassi e delle politiche ambientali, che non può derivare da altro che dalla corretta rappresentazione e previsione delle georisorse e dei loro processi.

Non ci servono equazioni "vere", che esprimano la realtà, ma solo strumenti "comodi"², e la possibilità di calibrarli con la conoscenza di dati della realtà in modo da poterli usare per estrarre risposte. Indubbiamente, per esempio, un modello lagrangiano diffusivo-avvettivo descrive meglio la propagazione di un inquinante in atmosfera, rispetto al più semplice schema gaussiano, ma non si può ignorare che in realtà solo quest'ultimo ha una applicabilità effettiva nella gran parte dei casi di interesse pratico per la pianificazione.

² Lungi dal ritenere che l'affermazione smascheri alcunché di sconosciuto, è evidente però che la lezione di molti notevoli scienziati e filosofi della scienza circa la natura convenzionale delle descrizioni matematiche, in pratica, non è stata spesso per nulla recepita dalle scuole più 'hard' delle *engineering sciences*. Un'eccellente discussione in proposito è reperibile in Beven, 1996.

Si deve a proposito ricordare come gli indirizzi recenti per la ricerca scientifica e tecnologica nell'Unione Europea superino l'idolo dell'originalità in sé, restituendo rilevanza all'aspetto di spendibilità pratica dell'innovazione.

Dunque non solo la ricerca pura ha un suo spazio, ma accanto ad essa è da considerare del pari la ricerca dimostrativa, che consiste nell'applicare a nuovi casi di studio, a livello dei quali emergano proprietà significative di sistema, tecniche e metodologie i cui principi sono ben noti e consolidati, ma delle quali non si conosce ancora l'applicabilità e l'utilità nel *problem solving* del mondo reale.

Accettato che la pianificazione pone problemi di uso, e non di nuovo sviluppo, di strumenti analitici (i quali devono essere presi dal patrimonio esistente, ma - in modo originale- integrati e adattati ai termini dei problemi territoriali), occorre valutare in quali forme i modelli e gli strumenti di analisi previsionale possano essere integrati nei processi di piano, e non esserne semplici supporti a decisioni, motivate diversamente, in occasioni circoscritte.

Il problema fondamentale della modellistica e dell'analisi delle georisorse è di dare una buona rappresentazione della realtà: una rappresentazione, cioè, che consenta di sviluppare previsioni e al contempo di individuare le variabili critiche da tenere sotto controllo per garantire la sostenibilità delle scelte. I modelli devono essere visti nella pianificazione come base della razionalità delle scelte, e servono a fondare un contesto di corretta comunicazione fra i vari attori sociali. Non è possibile in alcun modo adottare un punto di vista tecnocratico sull'uso dei modelli nella pianificazione: non solo perché nella gestione della *polis* è difficile automatizzare e irrigidire i rapporti fra problemi e soluzioni entro schemi ingegneristici formalizzati, ma anche perché, perfino nei casi in cui sono applicabili, i modelli non hanno la capacità predittiva adeguata per diventare fonti normative.

La funzione precipua dei modelli previsionali è nel supportare una costruzione sociale della conoscenza dei sistemi fisici, che scongiuri le drammatiche aporie della comunicazione sui "temi paura" dell'ambiente (Luhmann, 1983) – che portano a sindromi come la NIMBY, la NIABY, la NOPE e la BANANA: Lober, 1995³- e l'estremo opposto di un liberismo inconsapevole nello sfruttamento dissennato delle risorse.

Alla luce di quanto detto, assume interesse la valutazione delle modalità con cui i modelli previsionali possano essere utilizzati nella formazione del piano quali strumenti di supporto alle decisioni, in modo da rendere quest'ultimo effettivamente migliore, cioè dotato di una difendibilità razionale più ampia in quanto maggiormente capace di legare le decisioni sulle risorse naturali alla comprensione dei loro processi e dei loro equilibri.

Ci sembra in particolare che una buona base di partenza sia data dal "paradigma cartografico" emerso dalla diffusione dei GIS e che si può riassumere con il fatto che oggi sempre più "modellizzare" un sistema ambientale coincide con il rappresentarlo in termini di cartografia numerica.

Discutere i requisiti grazie ai quali la cartografia non rimane solo rappresentazione di percezioni o dati bruti, ma può rivestire un carattere previsionale, è un passo essenziale per chiarire il paradigma cartografico.

Mediante la cartografia, i sistemi fisici possono essere descritti da molti punti di vista, inglobando nel modello contributi interdisciplinari accomunati, nella diversità tecnica e sostanziale dei ragionamenti, da una rappresentazione unitaria che si appoggia alla natura spazialmente distribuita delle grandezze.

³ NIMBY= Not In My Back Yard; NIABY= Not In Anyone's Back Yard; NOPE=Not On Planet Earth; BANANA= Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anyone. È chiaro il climax di intransigenza irrazionale dell'opposizione alle trasformazioni del territorio.

In virtù di questo comune metodo di rappresentazione (la *regionalizzazione*) si possono operare sovrapposizioni fra criteri derivanti dalle diverse forme di indagine sul territorio, e si possono estrarre proprietà emergenti che ciascun livello disciplinare, da solo, non è in grado di cogliere (si veda p.es. la discussione circa il caso di studio sulla localizzazione ottimale delle attività estrattive, *infra*).

La modellistica previsionale per il piano fa di necessità riferimento esplicito al territorio “reale”, con i suoi luoghi specifici identificabili in modo univoco: i modelli da essa usati sono necessariamente cartografici.

Inoltre, la modellistica per il piano è necessariamente una modellistica valutativa: esprime una previsione che è al contempo un giudizio sul territorio, sia per quanto riguarda il suo comportamento “spontaneo”, sia circa i “rimedi”. I modelli per il piano sono più metafore della realtà che pretese di schematizzazione ingegneristica, e nascono per essere usati come base di discussione più che come fonte tecnocratica di “verità”. Un indirizzo generale per l’uso di modelli nella pianificazione dovrebbe essere di usare modelli più semplici, più legati ai dati, ma usarli più spesso (cfr. Cecchini, 1997).

Ad ogni livello di pianificazione, emergono problemi e priorità che modificano, in misura più o meno marcata, le prerogative per cui un modello è o non è “buono”. In generale, si può affermare che la modellistica delle generazioni attuali è solo in parte adatta all’impiego nella pianificazione, mentre occorre riferirsi a schemi – concettuali, ma anche computazionali – direttamente inseribili nelle procedure, e gestibili con le tecnologie, propri della pianificazione, e in particolare i software di cartografia numerica o GIS.

Lo scopo del lavoro che segue è di raccogliere le idee per la costruzione – anche sistemando concetti già espressi in vari ambiti disciplinari– di una teoria geografica della modellistica previsionale.

Il termine “geografica” si riferisce alla proprietà essenziale per cui la modellistica è considerata nella sua capacità di produrre descrizioni del territorio. Innanzitutto, questo implica che i modelli geografici siano modelli a parametri distribuiti. Inoltre, essi devono potersi riferire a punti ed oggetti nello spazio, compiutamente identificabili. Devono infine essere descritti in termini tali da spiegare non tanto l’esistenza o la consistenza, quanto le relazioni fra questi oggetti. Si tratta quindi di modelli essenzialmente comparativi, che – postulata l’esistenza/rilevanza di un fenomeno (operazione complessa, questa, di riduzione cartografica del reale, come discusso nel capitolo 2)– tendono a descrivere non solo la sua intensità assoluta, ma anche – e soprattutto – gli aspetti relativi della sua distribuzione spaziale.

P.es. è difficile quantificare il rischio di frana in un punto, mentre è più semplice dire se un punto è più a rischio di un altro, e stabilire una scala del rischio relativo di più punti: una mappa. Ovviamente, la scala di intensità relativa del rischio ha senso se si conosce anche la rilevanza assoluta del fenomeno, rilevanza che è però sufficiente caratterizzare in termini qualitativi (l’area indagata è/non è franosa).

L’aspetto previsionale – e non meramente descrittivo – della modellistica geografica è ciò che ha più strettamente a che fare con la sua utilizzabilità nella pianificazione: la classificazione si basa sempre su una descrizione dell’oggetto classificato (come è tipico della classificazione nel senso tradizionale), ma a questa fa seguire il giudizio circa quale tipo di comportamento l’oggetto è suscettibile di seguire.

Il lavoro discute in dettaglio il fatto che *ogni cartografia, ogni modellazione previsionale deve assumere il carattere di una classificazione del territorio per poter essere utilizzata nella pianificazione*. Si passano in rassegna i metodi con i quali può essere realizzata una classificazione del territorio nel caso dei problemi più ricorrenti riguardo alle georisorse. Questo porta ad una

sistematizzazione dei metodi di modellistica, che vengono ricondotti a poche classi generali di ragionamenti formalizzati con cui possono essere costruite virtualmente tutte le classificazioni necessarie per la pianificazione territoriale. La teoria dei modelli geografici esposta nel lavoro è accompagnata da una serie di esempi applicativi che sviluppano casi di studio originali, inquadrati in forma unitaria nel capitolo 4 e dettagliati singolarmente nei capitoli 6, 7 e 8.

A monte di questa teoria, e ad essa funzionalmente collegata, si sviluppa una riflessione sulle forme che la pianificazione oggi assume, e che portano alla maturazione delle esigenze di modellistica geografica. Si discutono gli spunti di carattere etico ed epistemologico connessi alla produzione di nuove immagini del territorio che sono richieste da un quadro della pianificazione in mutamento, e differenziate in due livelli distinti – anche se sinergici – che vengono chiamati il livello della pianificazione fisica e il livello della pianificazione strategica.

Il capitolo 1 raccoglie gli spunti di carattere più generale circa l'immaginazione geografica e il ruolo del pianificatore.

Il capitolo 2 sviluppa la teoria dei due livelli di pianificazione e mette in evidenza il legame fra questa differenziazione funzionale della pianificazione e lo sviluppo della modellistica geografica, soprattutto in relazione alle teorizzazioni scientifiche sui GIS e le loro applicazioni.

Il capitolo 3 espone la teoria, qui brevemente abbozzata, della modellistica geografica riprendendo i temi del capitolo 2. In questo capitolo non sono contenuti tutti gli aspetti algoritmici di applicazione pratica per la costruzione dei modelli per la pianificazione. A tal fine si rinvia ai capitoli da 4 a 8.

Il capitolo viene invece sviluppato in relazione al quadro generale dei problemi che si pongono nella pianificazione territoriale circa le risorse naturali, al quale si associa il quadro delle strategie modellistiche con l'indicazione di cosa possa essere effettivamente sviluppato all'interno dei software cartografici.

Il capitolo 4 e i capitoli 6-8 hanno lo scopo di chiarire l'applicazione pratica della modellazione cartografica nella pianificazione, attraverso alcuni esempi. Non si tratta di esempi necessariamente originali, anche se tutti sono stati pubblicati in lavori recenti di ricerca. L'obiettivo cui si è guardato è invece di fornire una panoramica complessiva rappresentativa delle reali esigenze della pianificazione.

Il capitolo 5 discute, preliminarmente alla trattazione dei casi di studio, il paradigma dell'*ecologia del paesaggio* in relazione alla pianificazione territoriale. È opinione di chi scrive che l'*ecologia del paesaggio* rappresenti al momento l'arena scientifica più rilevante per la produzione e l'applicazione di analisi integrate dei sistemi fisici ed antropici, per la sua natura geneticamente interdisciplinare e l'uso olistico che viene di regola fatto dei vari apporti dell'idrologia, della geomorfologia, dell'ecologia, della geobotanica e delle discipline estetico-progettuali.

Il lavoro ha più l'obiettivo di sollevare domande e problemi che quello di dare risposte. In un contesto in cui l'innovazione è sempre più legata alla applicazione creativa, e sempre meno alla produzione di nuove tecnologie e nuovi strumenti, ci sembra che l'atteggiamento del "*professionista riflessivo*" (per riprendere il titolo del rilevante lavoro di Schön, 1984) sia ormai un requisito fondamentale per occuparsi di pianificazione territoriale. Al contempo, è la gamma delle problematiche considerate, più che lo sforzo di trovare risposte sistematiche, che facilita la sostenibilità delle decisioni in un dibattito in cui la verità è costruita discorsivamente e non viene mai data dall'alto. Siamo in una fase di profonda revisione dei paradigmi operativi del pianificatore, e molte implicazioni etico-politiche ed epistemologiche di questa revisione richiedono un approfondimento cui il lavoro qui presentato spera di dare un contributo.

La sfida oggi è nel legare le acquisizioni teoriche al *problem solving* del mondo reale. Per questo si è scelto non di sviluppare un singolo argomento in profondità, con ricerca di tipo “verticale”, ma di privilegiare l’indagine “orizzontale” sulle connessioni, sulle contaminazioni e sulla migrazione delle idee fra le diverse discipline cui oggi viene chiesto di cooperare in maniera sempre più stretta nella pianificazione.

Questa scelta di fondo si riflette anche nel carattere “epiciclico” della narrazione, nella quale si ritorna su alcuni temi in vari punti e da diverse angolazioni. Ci si aspetta che il lettore possa essere interessato ad uno dei tre livelli di lettura riportati in Figura 1 , o alla loro interconnessione.

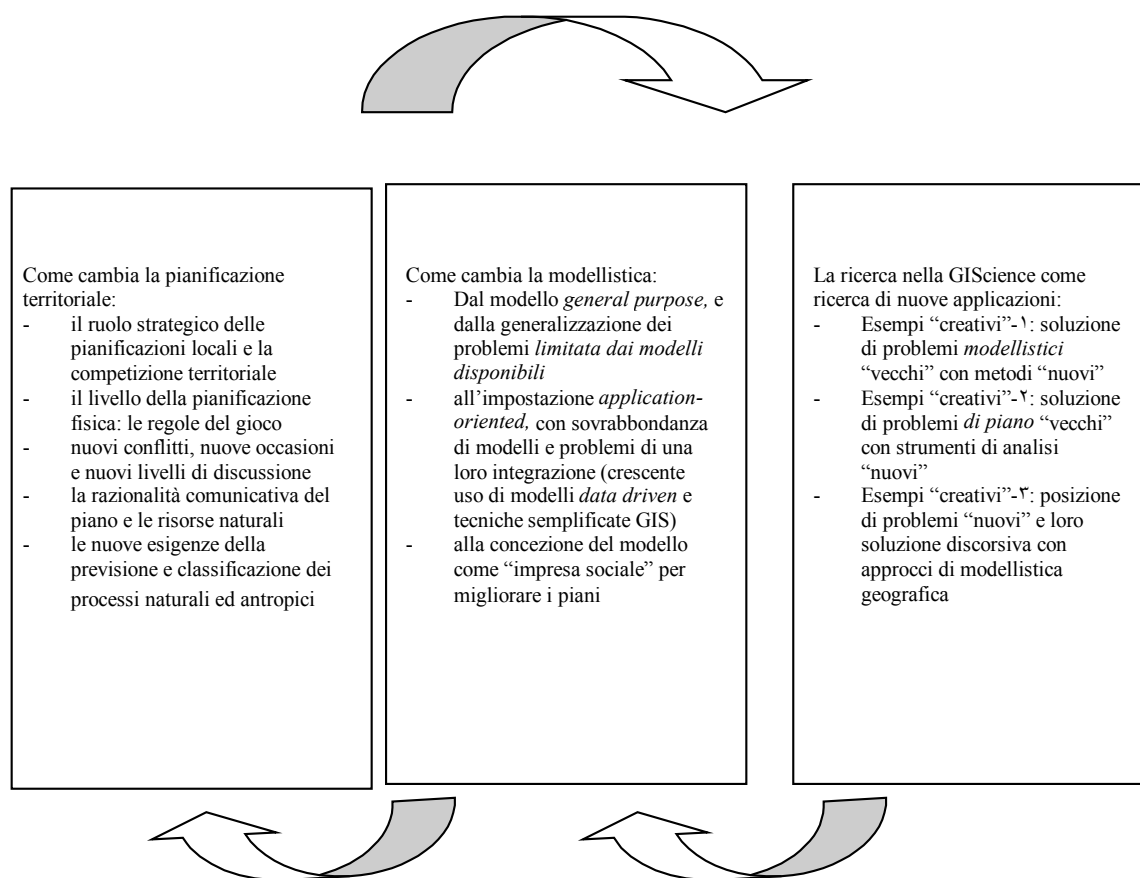


Figura 1 – percorsi dentro al libro

Un'ipotesi di lavoro che si è assunta, come ricordato, è che la tecnologia per l'elaborazione dei dati sia oggi del tutto sufficiente a coprire le esigenze della pianificazione. Ovviamente, questa è solo un'ipotesi di lavoro, che non vuole disconoscere la rilevanza di campi di sviluppo quali il calcolo parallelo, le logiche e i linguaggi di cartografia dinamica, formalizzazioni computazionali capaci di simulare in maniera più realistica il funzionamento dei ragionamenti umani (come delineato dal paradigma del *Soft Computing*: Zadeh, 1994), della percezione del tempo e dello spazio di tipo non euclideo-newtoniano, sistemi di modellazione "aperti" ed integrazione dinamica di diversi modelli, sistemi multiscalarari di raccolta ed elaborazione dei dati, sistemi GIS distribuiti e *web-based*, etc.

Indubbiamente, molto ancora rimane da fare a livello di scienza dei calcolatori e tecnologie dell'informazione. Tuttavia, siamo anche di fronte ad una situazione in cui la realtà è meno rapida ad acquisire le innovazioni di quanto queste siano a riprodursi.

La "folle corsa" verso sistemi più potenti e più realistici non può continuare indefinitamente, dal momento che oggi abbiamo già ciò che serve per rappresentare "bene" (cioè accettabilmente in modo da poter controllare le deformazioni della rappresentazione e le incertezze dei calcoli e delle previsioni) i sistemi ambientali.

Il problema è – anche, ma forse soprattutto- incominciare a riflettere sulle applicazioni.

Nel parlare di integrazione dei modelli previsionali, si osserva oggi nel mondo della ricerca un eccesso di enfasi per gli aspetti tecnologici: le librerie di modelli, i sistemi in grado di gestire più codici, etc. Nella realtà, invece, si hanno sempre maggiori esigenze di integrazione disciplinare fra gli specialisti e

di comunicazione dei risultati scientifici al pubblico. La metafora del mondo come *spaceship* è utile per ricordarci che stiamo per raggiungere il limite della capacità di carico del pianeta: è urgente incominciare a governare i processi dell'interazione uomo-ambiente con la ragion pratica, imperfetta ma certo anche molto sottoutilizzata, che abbiamo accumulato. Non c'è più tempo per perfezionare i quadri di controllo della navicella, è ora di riprendere la rotta prima che sia troppo tardi.

La modellistica non consente di prevedere tutto, e non può più essere pensata come uno specchio della realtà. Si deve riconoscere, con Couclelis e Liu (2000), cosa è il *pattern*, prevedibile, e cosa il *noise*, imprevedibile, e cercare di sfruttare il primo per guidare razionalmente scelte del resto sempre incerte nella pianificazione e gestione del territorio e dell'ambiente. Occorre invece chiarire come l'uso dei modelli non sia un fatto meramente scientifico, ma anche – e, oggi, soprattutto- una costruzione sociale, difficile e problematica (Couclelis, 2000).

Occorre esplicitare a che livello sia appropriato l'uso di un modello, e quale delle risposte possa venire dallo specialista, quale solo da una discussione improntata alla razionalità comunicativa.

Il lavoro vive sulla dialettica fra tre soggetti tematici: il pianificatore, il processo di piano e i modelli previsionali. Si pone un problema di tipo scientifico (una teoria della *modellistica previsionale appropriata* per la pianificazione), uno di tipo sociale/operativo (una teoria delle modalità, dei livelli e dei processi di pianificazione che consentono di pervenire a *decisioni razionali* in materia di risorse naturali e sviluppo sostenibile) ed uno di tipo epistemologico (qual è il *valore della "verità" narrata dalle rappresentazioni modellistiche* del territorio). L'intreccio è schematicamente rappresentato in Figura 2.

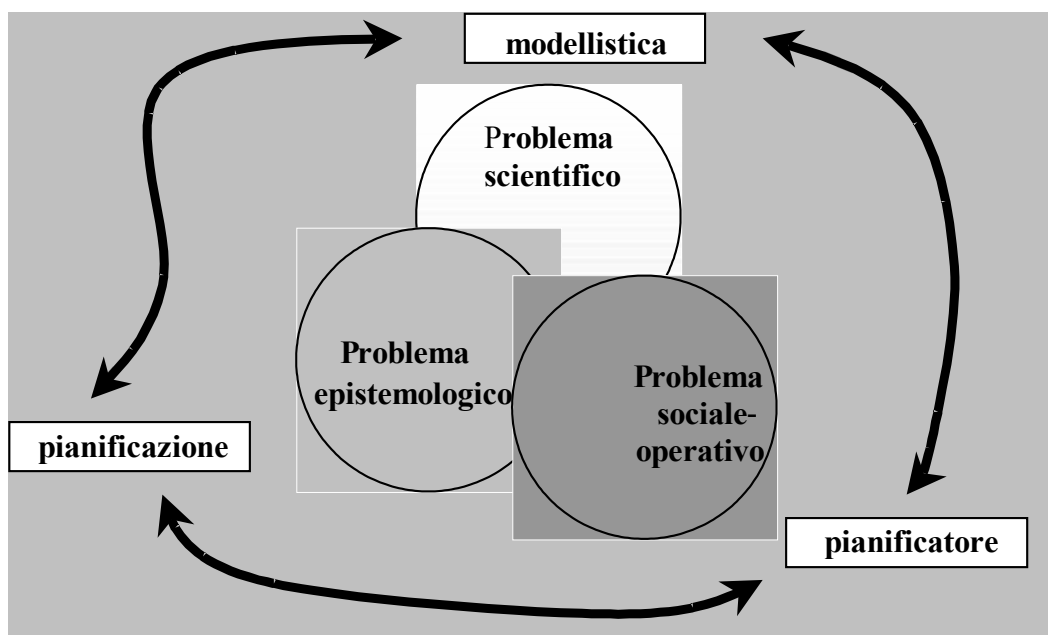


Figura 2 – un triangolo di problemi

I riferimenti metodologici per lo sviluppo del lavoro sono molteplici: dagli studi relativi alla diffusione e all'uso delle tecnologie GIS (Secondini, 1993; Masser e Campbell, 1995; Ciancarella *et al.*, 1999), alla teoria della pianificazione (Simon, 1957; Faludi, 1973; Lynch, 1984; Friedmann, 1987; Mazza, 1987), alle formalizzazioni dell'analisi multicriterio (p.es. Munda, 1995; van Herwijnen, 1999; Malczewskij, 1999), all'approccio-quadro delle *favourability functions* (Chung e Fabbri, 1993, 1999).

Ma a questi filoni metodologici si deve aggiungere senz'altro il pensiero ecologico, e in particolare quello dell'ecologia del paesaggio (Naveh, 1982; Forman e Godron, 1986), per la visione del territorio come insieme complesso di strutture e processi, la cui comprensione è essenziale per definire le strategie, e il cui studio scientifico è anche spunto per il progetto e i suoi *spatial concepts* (Zonneveld, 1991).

Il lavoro è ispirato ad una completa intersettorialità: dal momento che si è accettato di definire le georisorse come l'insieme delle risorse naturali "fisiche" del territorio, si devono adottare via via gli strumenti di indagine più opportuni, calandoli nel contesto e fornendo loro i requisiti e le formulazioni necessarie dell'ingegneria dei sistemi ambientali. Sullo sfondo, come problema ancora irrisolto, sta l'ideale regolativo dei modelli che integrano le visioni delle *human* e delle *(bio)physical sciences*. Siamo in una fase in cui, come si è detto, ci sembra più serio porsi domande che darsi risposte, e si è lasciato il tema dell'integrazione transdisciplinare per future linee di ricerca.

Nel proliferare di studi specialistici, si è cercato di ricostruire, in un contesto estremamente dinamico e nel quale è facile che sorgano confusioni terminologiche e incomprensioni fra diverse tradizioni culturali, la "struttura che connette" l'uso dei GIS, la lettura ecologica del paesaggio e una teoria procedurale (ma anche sostantiva) della pianificazione.

Nell'invocare comprensione da parte del lettore per uno sforzo sperimentale, e come tale continuamente perfezionabile, desidero ringraziare tutti coloro che hanno permesso lo sviluppo di questa ricerca: il prof. Piero Secondini, del Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale dell'Università di Bologna, per la mole di spunti e di materiale scientifico messi a disposizione, oltre che per la disponibilità intellettuale e l'amicizia dimostratami; il prof. Andrea G. Fabbri, dell'International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) di Enschede, NI, per il fondamentale indirizzo e il finanziamento delle mie trasferte in Olanda durante il dottorato; il prof. Tsehaie Woldai, il dott. Davide Geneletti, la dott. Paola Napolitano dell'ITC, la dott. Lucia Luzi del CNR-IRSS di Milano, l'ing. Stefano Bagli del DICMA, l'ing. Silvio Simani e il prof. Sergio Beghelli dell'Università di Ferrara con cui ho condiviso lo sviluppo di alcuni dei casi di studio presentati; il prof. Paolo Berry, il prof. Guido Gottardi, il prof. Roberto Bruno, il prof. Fulvio Ciancabilla, con i quali ho in più occasioni collaborato, insieme a tutti i docenti del Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali (DICMA) dell'Università di Bologna, presso il quale ho svolto il dottorato di ricerca, per il sostegno scientifico e logistico, e il clima di libertà intellettuale con cui hanno accompagnato i miei sforzi; i laureandi del prof. Paolo Berry del DICMA, nel corso delle cui tesi di laurea altri dei casi di studio sono stati sviluppati, e in particolare l'ing. Dante Neri, che ha anche collaborato estesamente con me alle ricerche di carattere applicativo discusse al capitolo 8; il dott. Massimo Andretta (Centro Ricerche Ambientali della Montecatini, Ravenna) per gli spunti di riflessione e la personale disponibilità a utili confronti in molte circostanze.

I dati utilizzati per i casi di studio sono stati forniti prevalentemente da ARPA Emilia Romagna, Ufficio Cartografico e Geologico della Regione Emilia Romagna, Comune di Sogliano al Rubicone e CIS s.p.a. di Forlì.

Infine desidero ringraziare la piccola Enrica del paesaggio per tutto il resto.

Capitolo 1 - Territorio e geografie del volto del pianificatore*

1- Lo sguardo al territorio

“(...)Allora Marco Polo parlò: -La tua scacchiera, sire, è un intarsio di due legni: ebano e acero. Il tassello sul quale si fissa il tuo sguardo illuminato fu tagliato in uno strato del tronco che crebbe in un anno di siccità: vedi come si dispongono le fibre? Qui si scorge un nodo appena accennato: una gemma tentò di spuntare in un giorno di primavera precoce, ma la brina della notte l’obbligò a desistere.(...) La quantità di cose che si potevano leggere in un pezzetto di legno liscio e vuoto sommergeva Kublai; già Polo era venuto a parlare dei boschi d’ebano, delle zattere di tronchi che discendono i fiumi, degli approdi, delle donne alle finestre...

Dal momento in cui ho scritto questa pagina mi è stato chiaro che la mia ricerca dell’esattezza si biforcava in due direzioni. Da una parte la riduzione degli avvenimenti contingenti a schemi astratti, con cui si possano compiere operazioni e dimostrare teoremi; e dall’altra parte lo sforzo delle parole per rendere conto con la maggior precisione possibile dell’aspetto sensibile delle cose.”

Così Italo Calvino, nelle *Six Memos for the next millennium* (1984), si esprimeva a proposito della esattezza.

Quale esattezza si può richiedere a una rappresentazione del territorio? In che misura una riduzione degli avvenimenti a schemi astratti, ancorché possibile, è auspicabile? E quanto di quel maledetto aspetto sensibile delle cose, nemico di ogni *mathesis universalis*, è possibile catturare con le povere tecnologie avanzate che abbiamo a disposizione?

Ogni volta, di fronte al territorio, abbiamo veramente a che fare con un tutto, di cui difficilmente riusciamo a distinguere le essenze elementari: ciò che debba essere trattenuto e *cartografato*; e ciò che invece debba essere lasciato al turbine dell’individuo, insieme al correre dei pensieri, dei rimandi di una interminabile ricapitolazione: al *non pubblico*⁴.

“ La critica fondamentale che i postmoderni muovono alla scienza sociale riguarda la natura degli oggetti da essa studiati: essi affermano che non esiste un mondo oggettivo e semplicemente dato “là fuori” che aspetti di essere [...] descritto dalla scienza. Gli oggetti che studiamo non ci pervengono con attributi intrinseci che hanno una loro logica con cui ci suggeriscano come studiarli. Al contrario, le cose che studiamo sono tali proprio perché noi decidiamo di dar loro un certo e particolare nome. [...] Le cose sono studiate mediante un processo di necessaria selezione di alcuni attributi rispetto ad altri che vengono ignorati, cosicché la forma degli oggetti è discursively constructed”. (Yapa, 1998, trad. nostra con lievi modifiche).

Anche nelle scienze dell’ambiente e del territorio, così come nelle scienze sociali, si pone lo stesso problema della *discursive construction* degli oggetti di conoscenza. Il dominio delle scienze del territorio rappresenta una regione di confine fra un sapere geografico-fisico e uno umanistico che convivono nello stesso quadro descrittivo. Il primo si avvale di modelli tecnico-scientifici del territorio e dell’ambiente, mentre il secondo richiede l’assunzione di punti di vista spesso non *falsificabili*, e ricorre dunque a modelli non-scientifici *sensu* Popper.

* Il capitolo è apparso, con lievi modifiche, in Secondini, P. (cur.), “Un laboratorio per la pianificazione”, CLUEB, Bologna, 2000.

⁴ Si accetta qui l’impostazione di Friedmann (1987), che individua nel ‘pubblico’, eminentemente, il dominio in cui si esplica la pianificazione. Come si vedrà, si trascura però –nel dominio della pianificazione fisica- la tradizione della pianificazione ‘radicale’ orientata alla trasformazione sociale, e ci si appoggia implicitamente alla tradizione, di tipo illuministico, della ‘riforma sociale’, affiancata ed integrata dall’ ‘apprendimento sociale’ (ibid.).

In effetti, la domanda generale cui deve rispondere la pianificazione territoriale è talmente complessa da non poter essere descritta entro definizioni precise. Chi si occupa di *planning* è abituato a prendere in prestito strumenti e punti di vista propri di altri campi del sapere e della tecnica: politica economica, scienze ambientali, ingegneria, architettura, sociologia... Mentre ormai è condiviso questo approccio multidisciplinare ai problemi, spesso è la “struttura che connette” (Bateson, 1979) ciò che sfugge: al tecnico, al *practitioner* della pianificazione, così come al cittadino e all’amministratore che ne richiedono l’opera. La pianificazione attende ancora, in questo senso, di arricchirsi di un supporto teorico adeguato.

E tuttavia il *logos* della pianificazione territoriale è sempre un discorso pragmatico, orientato al soddisfacimento di bisogni. Dal grado di soddisfacimento di determinati bisogni proviene la sola validazione del piano.

Nel seguito, ci si riferirà in particolare alla pianificazione ‘fisica’ dello spazio. In questo contesto, le scienze a cui si richiede l’esplicazione di conoscenza utile per le decisioni sono per lo più quelle di tradizione politecnica. A dispetto dei metodi quantitativi che correntemente si invocano, tuttavia, anche in esse il modo di definire l’oggetto-territorio non è univoco. Non si tratta tanto, qui, di una schizofrenia fra percezione ‘umanistica’ del luogo e descrizione delle proprietà fisiche dello spazio, quanto di una profonda e non rimovibile difficoltà nel formulare una rappresentazione della realtà, anche nei suoi aspetti più ‘oggettivi’, che invece ci viene richiesta quando si devono pianificare gli usi futuri delle georisorse.

Una rappresentazione della realtà dell’ambiente e del territorio non è mai banale: non solo perché la modellazione (matematica e cartografica) dei fenomeni fisici risente di una grande incertezza, dovuta sia alla difficoltà nel misurare le grandezze coinvolte, sia a quella necessariamente imprecisa schematizzazione di un fenomeno che ogni modello rappresenta: un altro importante motivo di difficoltà si evidenzia, un po’ per colpa e un po’ per umana finitudine, nel selezionare gli attributi degli oggetti di studio (ovvero nello stesso delimitare ‘oggetti’) e il punto di vista da cui guardarli. C’è un rischio, elevato e non ignorabile, di dare della realtà un’immagine distorta, e dunque di *mentire scientificamente*, dando descrizioni che non comprendono alcuni degli aspetti essenziali. E proprio in questa natura di immagine che possiede la nostra descrizione scientifica stanno i suoi pericoli, se dovrà essere poi utilizzata per decisioni sui beni della collettività e delle generazioni future. Una carta o un modello, volenti o nolenti, è sempre una *geografia del volto del ricercatore*, come testimonia il personaggio del racconto di Borges⁵, che passa la vita a disegnare la mappa del mondo per accorgersi infine di non aver prodotto che il proprio ritratto.

Ritorna, anche in questa forma, l’interrogativo su quali siano i fondamenti etico-metodologici dell’agire nella pianificazione: in quale posizione si trova il *planner* rispetto alla figura del tecnocrate con il suo *know-how* specialistico, ed all’altra, all’opposto estremo, del buon amministratore, ancorché privo di strumenti “oggettivi”, di metodologie specifiche e universalmente condivise, che l’orientino nella sua attività?

Non di rado il ruolo del *planner* è ad una frontiera: ad esso viene richiesto di proporre una visione della realtà che consenta non solo di dare risposte a interrogativi tecnico-pratici, ma anche di evidenziare quali punti di debolezza – metodologici, conoscitivi, etici? – connotino quelle risposte.

Nel produrre un piano si pone costante il dilemma di quali punti di vista adottare, di quali ascoltare delle numerose voci che parlano al progettista. Ad Husserl, nella *Crisi delle scienze europee (1936)*, dobbiamo la dimostrazione di come la scienza si sia progressivamente, e drammaticamente, allontanata dal *dominio della vita*. Chi la interpreterebbe nel senso che è *necessario rinunciare alla visione del piano come mero processo di razionalità scientifica?* Si tratta qui di una proprietà essenziale del piano,

⁵ J.L. Borges, “Epilogo”, in “Tutte le opere”, I, tr.it. Milano, Mondadori, 1984, p.1267. La suggestione è tratta da Farinelli, F., 1992. Tesi di Dottorato di Ricerca in Georisorse e Geotecnologie, XIII ciclo, 1998-2000

ovvero la capacità di farsi carico di bisogni concreti. Non è da una *performance* esclusivamente politecnica che emerge questa proprietà.

Potremmo dover riammettere, nel salotto buono delle decisioni sostenibili, quelle presenze scomode che esprimono approcci meno razionali⁶ ma una maggiore aderenza al contesto su cui si interviene: i semplici cittadini su cui ricadono gli effetti delle scelte di piano, inseriti in sistemi sociali (quali li descrive Luhmann (1983), ad esempio), nei quali spesso conta non un *logos*, ma un *mythos*, un discorso allegorico-percettivo, al contempo storico e soggettivo (si veda al proposito la lettura di Dematteis (1995) della modellazione geografica come processo di inferenza analogica).

In quanto segue, si accetta l'idea –oggi ancora abbastanza popolare– che la pianificazione fisica del territorio sia un'attività necessaria dell'uomo, in quanto modo normale di occuparsi di sistemi complessi. Questa posizione non è scontata, ed anzi possono esserle mosse varie critiche. Alcuni sostengono che esistano meccanismi naturali di compensazione degli effetti, grazie ai quali è sufficiente lasciare che le “leggi interne al sistema” agiscano per ottenere una situazione sostenibile, o uno “stato stazionario”. All'origine teorica di questo punto di vista si incontra il celebre argomento di Adam Smith, o della “mano invisibile”, per cui, dal perseguire gli attori del dominio pubblico ciascuno il suo proprio tornaconto, si perviene alla massimizzazione del benessere collettivo. Il piano sarebbe una forma di decisione propria della modernità: in passato si avevano realizzazioni altissime e miglioramenti sostanziali delle condizioni di vita, senza alcun bisogno degli attuali processi di pianificazione, quasi sempre farraginosi ed inefficaci: ora si ricorre a piani e altri strumenti di decisione, strutturati con una specifica giurisprudenza e prassi tecnica; tuttavia questo fatto deve essere guardato come accessorio, determinato da una concatenazione di eventi di cui la storiografia conserva la traccia. Non c'è ragione di pensare che la prassi della pianificazione sia necessaria ed irrinunciabile. A critiche simili si perviene sia da un punto di vista liberistico in economia, sia da un pensiero utopistico e ‘radicale’, che sottolinea l'importanza del ruolo politico di comunità locali rispetto alla decisione gerarchica (ad esempio in Mumford, 1938)⁷.

Questi argomenti hanno una loro ragion d'essere. La loro forza è sempre più evidente soprattutto nel contesto della pianificazione dei servizi, ma anche in quello della pianificazione fisica e della gestione delle georisorse. Quello che ci fa propendere, nonostante tutto, per la necessità di pianificazione e di processi di decisione strutturati anche ad un livello centrale, è l'osservazione delle dinamiche in atto nel consumo del territorio. Di fronte al degrado ambientale, termine generale per una realtà dai mille aspetti, non ci sembra che si possa più sperare nelle capacità di omeostasi spontanea e di controllo in retroazione del sistema: gli stimoli e gli impatti su di esso assumono sempre più un carattere pervasivo, e non possono essere inquadrati che a partire da uno sguardo interdisciplinare coordinato, se si vuole attuare una capacità di controllo adeguata. Quasi tutte le istanze chiedono di essere affrontate alla scala globale, con un approccio ponderato, condiviso e frutto del dialogo fra attori dai diversi punti di vista. Al contempo, si manifesta la necessità di intelligenza capillarmente diffusa ed ancorata al livello locale di decisione, che possa fornire il “supplemento d'anima” per la gestione ed il controllo di dinamiche altrimenti insostenibili. Un'articolazione sussidiaria fra ‘centro’ e ‘periferie’ per le decisioni, sul modello, per esempio, delle teorie dei sistemi di ecosistemi (Naveh, 1982), pare un paradigma promettente per il futuro, contrapponendo ad una *deregulation* una interpretazione innovativa, non positivista, del piano. In questa prospettiva, risulta però necessario il riconoscimento della centralità delle istanze di qualità ambientale in ogni tipo di pianificazione fisica, che quindi è necessariamente una pianificazione ‘orientata’. Dal fronteggiare o meno queste istanze dipende non una spesso

⁶ A questo proposito, si parla spesso di razionalità strumentale contrapposta alla razionalità comunicativa. Si ritornerà nel seguito sull'argomento.

⁷ In quest'ultimo caso, più che di critica alla pianificazione si tratta di critica ai processi decisionali sui quali spesso si basa la pianificazione territoriale contemporanea. Il tema della necessità della pianificazione viene, del resto, quasi sempre affrontato intendendo con essa le procedure e le metodiche oggi – e da alcuni decenni – in uso.

vagamente definita “sopravvivenza del pianeta”, ma anche una più concreta permanenza delle forze e delle occasioni di sviluppo di ogni compagine territoriale, nel breve-medio periodo: si comprende allora il necessario ruolo della pianificazione territoriale in una prospettiva politica, ecologica ed economica.

Ricadute sempre più frequenti di questo concetto vengono ritrovandosi a livello istituzionale: per esempio, un recente documento di indirizzo urbanistico dell’Emilia Romagna afferma che “ *si tratta di definire una strategia di coevoluzione programmata fra sviluppo economico, territorio e risorse ambientali, per inserire più direttamente l’ambiente fra le determinanti dello sviluppo.*” (Regione Emilia Romagna, 1998).

Si deve osservare che le teorie del *laissez-faire* sull’ambiente e il territorio mostrano in molti casi la debolezza di discipline che partono da specifici punti di vista settoriali (per esempio una teoria economica). Pertanto, esse difficilmente riescono ad inglobare quei correttivi che solo un approccio multicriteriale ed interdisciplinare riesce a garantire⁸.

Le scienze del territorio - da intendersi contemporaneamente come (1) scienze della rappresentazione e modellazione dei fatti geografico-ambientali e (2) come teorie e metodi della (buona) pianificazione territoriale – devono dunque tendere a definire strumenti e atteggiamenti intellettuali orientati al *problem solving* in un’ottica complessiva. Le regole che scaturiscono da un processo di pianificazione possono assumere il linguaggio e gli strumenti di specifiche discipline (e in particolare dell’economia), così come determinati paradigmi interpretativi possono rifarsi ad apparati disciplinari definiti (teorie estetiche, sociologiche, ecologiche, economiche e fisico-matematiche), ma la riflessione di fondo deve essere necessariamente orientata alla complessità, e metodologicamente informata ad un “empirismo eclettico”.

In un tale approccio, la *mediazione linguistica*, richiesta sia negli scambi fra tecnici di discipline differenti, sia nell’interazione dei tecnici con il pubblico, costituisce un altro ruolo di cui la pianificazione si deve fare carico, perché efficaci sinergie fra diversi apporti siano effettivamente possibili. Seguendo il *Cratilo* di Platone, il linguaggio non è pura tecnica di designazione convenzionale delle cose, e nemmeno prodotto di una loro incontrollabile azione causale, ma corrisponde alla scelta consapevole di uno strumento intelligente con cui l’uomo si avvicina alla conoscenza della realtà. Gli “artefici dei nomi” assegnano alle cose nomi diversi in ragione della sapienza che ciascuno di essi possiede. In questo spirito, la mediazione linguistica può essere guardata, regolativamente, come la funzione maieutica (ci si passi la risonanza ancora platonica) che il pianificatore deve rivestire nell’esplicitare il massimo di sapienza posseduta dalla società e distribuita in vario grado fra gli attori sociali coinvolti, con il chiaro obiettivo di estrarre dialetticamente, come frutto di concertazione, il nome più appropriato per ciascuna cosa. Ad un *worte zu finden* demiurgico del tecnico isolato si sostituisce così la funzione colloquiale, arguta ma benevola, di un socratico mediatore che cerca la verità insieme ai compagni di viaggio. Si può accettare, perciò, che esistano persone dedicate a questo lavoro, ossia professionisti del *planning*. Se finora in Italia questi professionisti sono venuti a coincidere con i progettisti – gli ingegneri, gli architetti ... - oggi è chiara l’esigenza di una nuova *reflective practice*, che sia in grado di collocarsi al giusto posto fra le attività conoscitive/scientifiche e quelle comunicative, organizzative e gestionali, consapevole del proprio ruolo, dei propri strumenti e dei propri limiti. Se la ricerca e la riflessione teorica già da tempo si sono

⁸ L’esempio dell’economia dell’ambiente è emblematico: solo con l’apporto di altre discipline (ecologia, ingegneria di processo, teoria dei sistemi...) si è potuti pervenire ad una sintesi, il cui asserto fondamentale è la necessità di trasformare in costi interni al bilancio aziendale quelli che fino ad ora sono stati considerati costi esterni della collettività (come il consumo di georisorse ‘gratuite’: aria, sottosuolo...). Pur rispettando i formalismi, il linguaggio e gli strumenti dell’economia tradizionale, questo inquadramento riesce a fronteggiare le domande attuali a quella inaccessibili.

dedicate a questo tema, tuttavia nella pratica i *planner* spesso mancano di una preparazione adeguata ad abbracciare efficacemente i problemi del territorio nella loro realtà complessa.

Le tecnologie dell'informazione, e in particolare i sistemi informativi geografici o territoriali, aprono la strada ad un approccio al processo di piano nel quale la conoscenza del sistema fisico ed economico gioca un ruolo essenziale (Secondini, 1999). Nel quadro delle nuove tecnologie di informazione geografica, sono infatti sempre più fruibili i contributi degli specialisti di settore nel contesto delle valutazioni del territorio sotto determinati profili, e quindi è sempre più evidente lo scopo di sintesi richiesto al lavoro del *planner*, che da tutte queste valutazioni deve estrarre un indirizzo di piano, o più in generale di decisione.

Ma accanto ad una maggiore possibilità di conoscenza si hanno più frequenti (e più consapevoli) occasioni di comunicazione fra istituzioni, tecnici e cittadini, che offrono una via di accesso del pubblico non specialista alle basi di decisione sull'ambiente e il territorio.

L'acquisizione di conoscenze e la possibilità di una loro comunicazione sono fortemente sinergiche e prefigura no un mondo in cui il *planner* ha il compito di sintetizzare e rendere disponibili e condivise le informazioni, conducendo sulla base di esse ad un *agire comunicativo* (Habermas, 1981) i vari componenti della società. In tale senso, si può interpretare anche la pianificazione fisica come agente di risanamento della politica (Mazza, 1990). L'azione della pianificazione mira, in questa prospettiva, alla concertazione *di un bonum*, ancorchè non *optimum*, che rappresenta la decisione accettabile per la collettività.

Questo è un modello al quale la realtà sempre più spesso sembra guardare, e l'intento delle pagine che seguono è di metterne in luce, a grandi linee, alcune problematicità e criticità.

2- Visioni del bene e natura multicriteriale delle decisioni

Alla base di ogni attività di pianificazione c'è, per quanto vaga ed implicita, un'idea di "bene". Questa aria vaga ed implicita non è attribuito casuale, poiché riflette la difficoltà di una teoria normativa (Lynch, 1974) in questo ambito. La pratica del *decision making*, nella storia, ha sempre evidenziato le enormi difficoltà dell'attuazione delle "idee-valore" – il sistema etico di riferimento - nelle scelte di piano: se determinate idee-valore, come la giustizia distributiva e la parità di opportunità iniziali, sembrano largamente condivisibili, è meno chiaro e ancor meno condiviso quali debbano essere la forma dello strumento di piano (la cui natura è sempre normativa) e la struttura del processo decisionale, tali da garantire *a priori* la possibilità di concretizzazione di queste idee-valore. Mentre i valori sono sempre espliciti, manca al pianificatore un breviario che gli definisca ad ogni passo quale sia la scelta moralmente –*politicamente*- corretta. Ad azioni discutibili secondo alcuni sistemi etici possono corrispondere risultati di attuazione dei valori, mentre non sempre azioni moralmente ineccepibili secondo uno specifico codice comportamentale portano al bene della collettività.

Semberebbe, per così dire, che al bene sommo, unico e assoluto, il *planner* debba sostituirne uno più domestico: dopo la *perte d'auréole* cui costringono i commerci dell'amministrazione e del progetto, non si tratta più di promuovere principi etici ed affermazioni morali che delineino teoricamente una società più giusta, ma di escogitare occasioni di concertazione, meccanismi di compensazione, metodi di confronto fra le alternative di scelta che portino ad un effettivo vantaggio del maggior numero di personalità coinvolte nella decisione, senza che troppi di essi ne siano penalizzati, ossia ad un *ottimo paretiano*.

La fonte di valore delle scelte di piano è, in questa prospettiva, un bene "minore", dai confini sfumati e dal nitore offuscato: un bene che ha perso la sua imperativa *esattezza* a favore di una *molteplicità*, per riprendere la dialettica del Calvino dei *Six Memos*:

“A differenza della letteratura medievale, che tendeva ad opere che esprimessero l’integrazione dello scibile umano in un ordine e in una forma di stabile compattezza, [...]i libri moderni che più amiamo nascono dal confluire e dallo scontrarsi di una molteplicità di metodi interpretativi, modi di pensare, stili di espressione. Anche se il disegno generale è stato minuziosamente progettato, ciò che conta non è il suo chiudersi in una figura armoniosa, ma è la forza centrifuga che da esso si sprigiona, la pluralità dei linguaggi come garanzia di una verità non parziale.”(Lezioni Americane, 1984)

Potremmo pensare che il bene della pianificazione territoriale debba essere chiaramente definito, come disegno generale, nella mente dei *planners* e nella struttura delle opzioni etiche della società in cui essi operano. Tuttavia, la stringente istanza di *‘una pluralità di linguaggi come garanzia di una verità non parziale’* diviene criterio di scelta e fornisce una diversa e irrinunciabile interpretazione del bene, intrinsecamente connessa al carattere comunicativo (e alla necessità di farsi carico del soddisfacimento di bisogni concreti) richiesto al piano.

Il bene non si definisce nell’ambito di una riflessione filosofica individuale, ma risulta da un processo sociale di comunicazione e discussione/confronto in cui la virtù essenziale non è il rigore eroico di Achille, ma la conciliante e calcolatrice *prudence* di Ulisse (Achache, 1996).

Il bene della pianificazione territoriale è quindi un valore “pratico”, la cui definizione ha natura interattiva, dipendendo strettamente dal confronto e dagli scambi fra le parti. Se da un lato è necessario che i vari attori del processo sociale assumano un “comportamento etico” (Gunn e Vesilind, 1986; cit. in Secondini, 1999), dall’altro la definizione del bene ha natura di scelta di compromesso, la cui positività è basata su valutazioni multicriteriali, e le cui implicazioni, all’atto del progetto di piano che discende da questa definizione, prefigura no, come precisato, un *ottimo paretiano*, e mai un mondo ideale. Se poi si accetta l’ipotesi socratica che il male è frutto di ignoranza e che ogni persona cui sia data la cognizione del bene non può non perseguirlo (Munda, 1995), si comprende quale ruolo sia da affidare alla conoscenza del territorio per la costituzione del comportamento etico degli attori coinvolti nel processo sociale che genera il piano. In una visione del bene come valore “debole” e frutto di confronto sociale, quindi, l’analisi del territorio su base scientifica⁹ costituisce un punto di partenza irrinunciabile, perché la discussione che porta al compromesso si fonda su conoscenze e su informazioni che tutti condividano, e che consentano di “tarare” le posizioni iniziali degli attori coinvolti, eliminando gli ‘atteggiamenti malvagi’ che derivano –socraticamente- dall’ignoranza.

Al profilo etico del pianificatore si mostra intrecciato, con le sue esigenze e problematicità, il profilo epistemologico e metodologico: il *planner* deve essere in grado di comunicare informazioni sia al livello della conoscenza scientifica del sistema territoriale, sia al livello della *meta-conoscenza*, ossia della definizione del punto di vista, dei paradigmi e della loro discussione problematica, della affidabilità e delle criticità associate a quella conoscenza. L’idea regolativa cui guardare è, in questo caso, il modello di livello superiore cui si è accennato.

3- Modelli per il *planner* ed agire comunicativo

Nel corso dei secoli, vari modelli culturali hanno definito la natura ed il compito del *planner*: Dal *sapiens geometricus*, che conosce il funzionamento della macchina della natura, all’artista alla ricerca di armonie sublimi e mirabili, all’onesto e illuminato amministratore della cosa pubblica e del benessere dei cittadini. In ciascun caso, il pianificatore ha un ruolo al di fuori di normali professioni e mestieri, e la sua figura si delinea su tipi ideali di persona-guida: da lui ci si aspettano scelte e decisioni ‘buone’ e ‘giuste’. Il *planning* è stato spesso interpretato in chiave “etica”, come attività politica ed educativa che contiene forti principi normativi ispirati ad idee-valore. In altro contesto, il

⁹ Non si intende qui approfondire la definizione di descrizione scientifica, che -come si può immaginare- apre vasti e complessi capitoli della filosofia della scienza contemporanea.

funzionalismo concepisce il *planner* come l'inventore di soluzioni (estetico)-funzionali, che scaturiscono da un know-how specifico ed esclusivo, e le cui scelte derivano da un'ottimizzazione tecnica e pratica e non da scelte di campo morali. Ciascuno dei due punti di vista, fa notare Lynch (1974), necessariamente contiene concetti ed elementi di valutazione dell'altro: non si può definire la funzionalità di un piano se non in riferimento a specifici valori (impliciti o espliciti), così come non si può dare un piano che non applichi valori e principi normativi per l'assolvimento di funzioni riconosciute come necessarie per la collettività, e che non consideri fra i principi normativi espliciti criteri di soddisfacimento di bisogni.

Ovunque si tratti di applicare un modello culturale, sia esso normativo, sia funzionalista, il *planning* si presenta come *techne* positiva, e talvolta addirittura impositiva (si veda in questo, p.es., Mumford, 1968), di un *know-how*, di un sapere istituzionale e specifico da parte di una classe professionale¹⁰. Questa tecnicità, pur collocando il *planner* su un binario diverso, benchè parallelo o con frequenti intersezioni, rispetto alla società civile, consente comunque una vasta libertà di atteggiamenti e posizioni intellettuali.

Se pare impossibile ridurre il *planning* ad ordinaria attività amministrativa, è pure evidente che le mutate condizioni del contesto spingono ad una modifica della prassi del piano, indirizzando alla perdita dell'aura tecnocratica in favore di un ruolo pubblico definito dal paradigma della pianificazione comunicativa. Questo paradigma non impone necessariamente una perdita di specificità tecnica: in esso è richiesta al *planner* una capacità di trovare risposte a domande per le quali non si presenti una formulazione chiara e distinta, e allo scopo mettere a punto una metodologia – evidentemente “tecnica” – di valutazione delle decisioni sulla base della conoscenza-comunicazione delle “condizioni del contesto”. E' di questo rappresentativo l'enorme impulso ricevuto dalle tecniche di analisi multicriterio e di *decision support*.¹¹

Le “condizioni del contesto” non sono da limitare allo stato delle variabili socio-economiche e fisiche del territorio, ma comprendono anche l'azione che la società esercita sul pianificatore: ad un ‘territorio al plurale’ (Lanzani, 1991) corrispondono obiettivi diversificati, e si incontra una polverizzazione della struttura delle preferenze ch'è come minimo disorientante. Mentre il pianificatore era un tempo al servizio di un'unica volontà decisionale (un sovrano, la Chiesa, una classe sociale...) e pertanto era in grado di riferire a quest'ultima le valutazioni di natura tecnica, oggi alla completa dispersione delle volontà e dei sistemi valoriali fa riscontro una mutata domanda per il piano: non solo come raggiungere un obiettivo, ma quale delle diverse istanze privilegiare.

Del resto, la complessiva tecnicizzazione della società (Heidegger, 1936) ha come effetto immediato l'atomizzazione e la mutua non-fungibilità dei saperi: questo, pur consentendo di comprendere sempre meglio gli aspetti di dettaglio dei vari sistemi studiati dalla civiltà umana, lascia scoperto il ruolo della sintesi, e difficilmente fa pervenire ad analisi e progetti sinfonici e integrati. La caratteristica, a sua volta ‘tecnica’, delle figura di sintesi, dei ‘generalisti’, è allora da individuare nella capacità di fornire una risposta alla domanda circa *i criteri di scelta*.

Il fatto della coesistenza di interessi conflittuali e a priori paritetici viene illustrato in maniera molto fertile dalla pubblicazione del Club di Roma del 1974, *Goals for the Mankind*, curato da E. Laszo. Per quanto datata in molti suoi punti, l'opera evidenzia due aspetti fondamentali:

- (1) ogni comunità (politica, religiosa, economica...) è portatrice di obiettivi;
- (2) questi obiettivi, spesso irriducibilmente conflittuali, richiedono un terreno di confronto che, se non è adeguatamente dialettico e comunicativo, rivela criticità che affliggono l'intero insieme degli

¹⁰ Lo stesso movimento dell'*advocacy planning*, che in anni non remoti concretamente ha promosso il modello del *planner* impegnato, al di fuori della sua torre d'avorio, in un'azione solidale con le parti deboli della società, in realtà è spesso leggibile come atteggiamento del “fare perché si è i soli a poterlo fare”.

¹¹ Pur senza voler spegnere vividi entusiasmi, pare chiaro che l'oggettività di cui a volte si fregiano queste tecniche non è che un'idea regolativa.

attori coinvolti e può portare all'esplosione del sistema: non ci si può salvare da soli, e il fallimento di una 'comunicazione' fra gli attori può risultare in una perturbazione che fa divergere irrimediabilmente il sistema da uno stato di equilibrio potenzialmente accettabile per tutti.

In quest'ottica, il *planner* deve diventare sempre più un "comunicatore" capace di portare i diversi "saperi" al confronto: conoscenze, percezioni del sistema territoriale, ma anche istanze, *goals* che in qualche modo condizionano le prime. La 'tecnicità' irrinunciabile di questo ruolo è del supportare e promuovere un *agire comunicativo*, la cui cifra è l'*atteggiamento etico* come specificato, che consenta il compromesso fra gli attori su base il più possibile vasta di condivisione. I suoi strumenti sono la teoria delle decisioni e l'analisi multicriterio, intesi come tecniche e procedure per valutare in modo partecipativo e condivisibile le alternative, e non come procedimento standardizzato per trovare soluzioni. La concezione che anima questo tipo di pianificazione supera le categorie di funzionalità e normatività: il pianificatore deve perseguire uno scopo etico nella promozione di decisioni condivise, partecipate e ispirate all'idea dell'ottimo paretiano; allo stesso tempo, non sono dati a priori indirizzi di valore, ma solo specifiche sul *tipo* di percorso per giungere a decisioni di cui, per così dire, si riconosce a posteriori la corrispondenza con opzioni etiche di fondo. Il processo di piano si ispira a quel 'valore-non-valore' (o 'valore-più-che-valore') che è la libertà (Givone, 1994), la cui sostanza è nel porre le condizioni per concretizzare altri valori.

Ad un modello di 'razionalità strumentale' (Habermas, 1981; cfr. anche Friedmann, 1987), nel caso tanto dei 'funzionalisti' quanto dei 'normativi', si sostituisce così il paradigma dell'*agire comunicativo*. La teoria dell'*agire comunicativo* viene presentata da Habermas in un'opera dallo stesso titolo nel 1981. In essa, si descrive il nocciolo della teoria con l'intuizione che "*nella comunicazione linguistica è incorporato un telos di intesa reciproca*" (Habermas, cit.). Accanto a questa intuizione, ritenuta fondamentale, l'Autore sottolinea l'esistenza di una distinzione fra il '*sistema*' (ovvero il complesso delle relazioni di tipo politico ed economico) e il '*mondo della vita*' (di husserliana memoria) nel quale si dipana la storia dell'individuo. Mentre il primo ambito è governato dall'*agire strumentale* e dalla sua razionalità (ovvero dall'*agire in vista di uno scopo*), nel secondo deve trovare spazio l'*agire comunicativo*, con una razionalità autonoma e differente. L'*agire comunicativo* è quell'interazione fra individui che mira al superamento della '*dogmatica del contesto*' (*ibid.*), propria dell'ermeneutica, per la quale non è possibile spingersi dietro il *ruolo* degli attori coinvolti nei processi sociali (Restaino, 1997), e che costringe dunque ad accettare come date le posizioni del dialogo. Una interazione comunicativa si appoggia ad un concetto *metaermeneutico*, poiché cerca di comprendere e superare i condizionamenti che portano gli attori ad assumere un ruolo definito, riportando la comunicazione alla forma, non corrotta dall'assunzione di ruoli, nella quale ognuno degli interlocutori è consapevole razionalmente della sua piena libertà (*ibid.*). Questo modello di interazione, vicina alle esigenze del mondo della vita, ha una sua giustificazione nel potere liberatorio rispetto ad un '*sistema*' (il complesso politico-economico) che sempre di più tende ad assumere compiti non suoi e a usurpare il dominio del '*mondo della vita*'. Se il '*sistema*' ha un suo ambito di definizione legato alle esigenze della riproduzione materiale, oggi si assiste ad un suo indebito intervento nei contesti della tradizione culturale, dell'integrazione sociale mediante valori e norme, della socializzazione delle generazioni in crescita. Lo stato e la società si sono resi autonomi rispetto al '*mondo della vita*' strutturato in maniera comunicativa, e sono diventati *supercomplessi*, minacciando di una 'colonizzazione interna' quest'ultimo (Habermas, cit.). La teoria dell'*agire comunicativo* difende la razionalità occidentale, pur da intendere in senso non solo strumentale, per la capacità che essa ha di riconoscere la *struttura comunicativa* di molti ambiti, nei quali invece si assiste ad una indebita colonizzazione del '*sistema*'. In base alla teoria dell'*agire comunicativo*, si concepisce un pianificatore come catalizzatore di "reazioni sociali", come creatore di consenso sulle scelte attraverso la comunicazione, la condivisione dell'informazione, la relativizzazione e valutazione multicriteriale dei punti di vista. Tutto questo

dovrebbe essere perseguito mirando alla valorizzazione del *'sistema della vita'* e al superamento dei ruoli, in modo da incorporare nei processi di decisione quella *struttura fine* del sistema valoriale di una società che si basa sulle irriducibili esigenze dei singoli.

Da queste osservazioni si intuisce quanto delicato sia il problema dei rapporti fra il pianificatore e il pubblico:

"I teorici dell'azione comunicativa vedono il planner come un attore nel mondo piuttosto che come osservatore ed esperto neutrale : essi non solo impostano il loro lavoro sull'idea che il planner abbia il compito di fare uso della conoscenza per gestire la società, ma spesso si interrogano anche sulla possibilità effettiva del planner di esercitare questo potere"(Innes, 1995; trad.nostra).

La natura di questa concezione del *planning* porta ad enfatizzare la pratica sociale e a studiare l'azione del pianificatore come fenomeno i cui riflessi sui risultati decisionali sono estremamente importanti:

"L'informazione che ha influenza [sulle decisioni] è quella che è socially constructed nella comunità dove è utilizzata[...].I processi sociali trasformano l'informazione in conoscenza dotata di significato, e la conoscenza in azione. Da un punto di vista professionale, tuttavia, conosciamo poco riguardo allo sviluppo e alle conclusioni di questi processi. Se i professionisti si occupassero di dare forma effettiva a questi processi anziché di seguire le regole della ricerca scientifica, avrebbero un potere e una capacità discrezionale ben maggiore di quanto sia legittimo in base alle norme sulle decisioni pubbliche. Se poi la conoscenza che fa differenza è costruita attraverso un processo in cui il pianificatore non è solo uno fra gli attori, ma è la guida e il gestore, pone e contestualizza domande ed orienta l'attenzione, allora i principi morali per questo pianificatore divengono ancor più essenziali"(ibid.).

E' opportuno sottolineare, per inciso, che agire comunicativo e costruzione partecipativa del piano non sono aspetti necessariamente connessi: potremmo anzi dire che l'aspetto della partecipazione diretta dei cittadini è marginale nella visione *'habermasiana'*, o *'comunicativista'*, del processo di piano, mentre è stato più chiaramente presente nell'*advocacy planning* e in altre analoghe concezioni che hanno enfatizzato i contenuti di democrazia e lotta per la giustizia, nonché nei movimenti storici radicali (Friedmann, 1987). Pur sfruttando il concorso di *'saperi'* diversi e non formalizzati, l'agire comunicativo non sempre vuole rinunciare alla specificità del tecnico, ma lo valorizza come figura indispensabile per rilevare il portato di questi *'saperi'* e codificarli nelle procedure di analisi e valutazione. In questo, il piano non è frutto tanto della partecipazione del pubblico, quanto della premeditata -e a suo modo tecnocratica- supervisione, con evidenti funzioni di indirizzo, del pianificatore: è questi che muove i fili della comunicazione e dei processi di *apprendimento sociale*.

E' rilevante come questo tipo paradigmatico assuma per dato l'assetto politico e il rapporto di forza che regge la società, e miri alla soluzione di problemi in senso contingente e non radicale.

La costruzione sociale dell'informazione riveste qui un significato estremamente importante sia sotto il profilo etico, sia sotto quello metodologico. E' urgente definire le regole per costruire e presentare al pubblico modelli concettuali dei fenomeni attorno ai quali si prendono decisioni. Occorre valutare (1) come e fino a che punto il *planner* è in grado di deformare la realtà imponendo la propria visione nello svolgere le funzioni di indirizzo ricordate; (2) con quali modalità consentire l'interazione fra i cittadini, portatori di saperi e di istanze, e la compagine dei tecnici e degli amministratori; (3) con quali mezzi controllare gli *'errori'* connessi con ciascuna assunzione, la loro amplificazione nel corso del processo di piano, la loro influenza sulle decisioni assunte.

Questi spunti per rintracciare un possibile paradigma del *planning* nascondono comunque un certo imbarazzo di fronte al persistere di due opposti punti di vista sulla natura di questa attività.

Secondo il primo di essi la pianificazione, in quanto progetto, rimane un atto creativo irriducibilmente differente dalla costruzione di teorie scientifiche: in questa, l'intuizione del ricercatore è asservita, come spunto euristico, alla routine delle verifiche di ipotesi, di concetti e di asserzioni nel quadro di

una teoria generalmente accettata (almeno nei periodi di ‘scienza normale’-cfr.Kuhn, 1962, e anche Gillies, 1993).

La creatività che si manifesta come progettualità ha invece una *inerzia* nel guardare la realtà, un porsi di fronte ad essa che non presuppone ancora un dibattito sui punti di vista, una verifica delle asserzioni in rapporto a paradigmi, ma solo una *critica* nel senso proprio della storia dell’arte: un’analisi del valore espressivo – tale anche in quanto *valore funzionale*- del progetto. Nel momento in cui la matita si posa in un punto del foglio bianco, alla condizione dello spazio vuoto che, liberamente, può divenire ogni tipo di scenario, si sostituisce un meccanismo la cui strutturazione fa seguito, nel dominio della *necessità*, ad un inizio capricciosamente arbitrario, *casuale*. Monod ci ricorda che è possibile interpretare tutta la storia dell’evoluzione biologica in base a questa dialettica di caso e necessità (Monod, 1942), mentre Bateson(1979) evidenzia in proposito lo stringente parallelismo fra mente e natura, entrambi da guardare come ”grandi processi stocastici”. Nella ricerca scientifica la creatività rappresenta un motore di progresso, per quanto – talora, e nel senso della teoria dei sistemi - ‘catastrofico’¹². Il ricercatore, tuttavia, conserva una condizione di *apertura al futuro* delineando solo un nuovo “programma di ricerca” (Lakatos, 1970). Fino a quando il nuovo programma di ricerca non ha dato vita ad un condiviso paradigma, nessuna variazione al sistema della scienza viene apportato. Invece, nella pianificazione territoriale il gesto creativo configura (altrettanto ‘catastroficamente’) un “idolo baconiano” che pregiudica l’evoluzione dei processi attorno ad un tema decisionale: la proposta progettuale non ammette confutazioni, ma solo alternative: crea un ‘orizzonte di speranza’ (E.Bloch,1959) che non può essere cancellato da nessuna controproposta. Una scelta può essere scartata, ma non può esserne confutata la legittimità di esistenza e di permanenza fra le alternative sempre possibili.

Un altro punto di vista, dissentendo sull’interpretazione del *planning* come arte, sostiene che l’opera del pianificatore e quella dello scienziato siano fra loro molto simili, commerciando essenzialmente con ciò che potremmo definire *agnizione*: l’atto con cui si compie il riconoscimento di una realtà nascosta sotto mentite spoglie. Essa è il frutto di un percorso –il più delle volte guidato da un misterioso disegno del destino- nel quale si impara a mettere da parte le pregiudiziali apparenze e ad aprirsi agli indizi della vera natura delle cose, natura spesso improbabile alla quale occorre avvicinarsi con lo spirito del ricercatore che mette alla prova le proprie congetture sulla base dell’esperienza. Alla luce di questa interpretazione, il *planner*, così come lo scienziato, deve guardare il territorio come oggetto di esperienza scientifica, congetturando circa le possibilità di un certo piano, ma tenendo presente che l’insieme dei vincoli espressi dalla limitatezza della risorsa prefigura l’*agnizione* (pena un progetto irrealizzabile o fallace) della vera natura del territorio medesimo. Quest’ultimo possiede una propria essenza che suggerisce le forme di piano possibili o *compatibili*, e deve essere guardato come il padrone delle regole del gioco, che è compito del *planner* scoprire. Il punto di vista si accorda con quella posizione filosofica che si è soliti definire empirismo, e che ha avuto fino a giorni non lontani diversi sostenitori fra i filosofi della scienza. Per essa, l’esperienza costituisce la norma e il criterio della ricerca (Abbagnano,1993). L’attività cruciale del ricercatore consiste nel mettere alla prova la realtà per estrarne regolarità e coincidenze dalle quali estrarre –indurre – relazioni di causa ed effetto fra i fenomeni. Oggi l’approccio neopositivista ed empirista ha perduto l’originario interesse, soprattutto per i più recenti orientamenti della epistemologia determinati dalle ‘rivoluzioni scientifiche’ del nostro secolo. In particolare, e senza entrare in profondità in questo complesso tema della filosofia della scienza, si è propensi a riconoscere che ogni empirismo è in realtà ‘*carico di teoria*’ (Duhem, 1906), e che quindi, come già osservato, non esiste in realtà un mondo oggettivo che attende di essere descritto, ma ogni rappresentazione risente pesantemente dell’elaborazione originale dell’osservatore.

¹² Si può definire, a livello puramente euristico, una funzione catastrofica come una funzione di una o più variabili il cui andamento cambia radicalmente nel volgere di una variazione minima delle variabili in prossimità di determinati punti critici.

La visione del territorio che detta le regole del gioco può apparire del pari superata, poiché ogni progetto, in questo simile ad ogni osservazione scientifica, è ‘carico di teoria’, e rappresenta un asserto *non verificabile* (Popper, 1934) in sé, ancorché *confermabile*¹³. Le “regole del gioco” del territorio, che ogni progetto *deve* supporre, sono sì rivelate da una *agnizione*, da un riscontro ‘empirico’ di vocazioni e di dinamiche territoriali, ma questa *agnizione* non è mai fondata su certezze, e deve sempre supporre un apparato *metafisico* (*sensu* Popper) regolativo che la inquadri. Il ‘*passare dalla conoscenza all’ascolto*’ presuppone l’invenzione di regole sintattiche che si accordano solo entro certi limiti con i ‘linguaggi’ osservabili del territorio, e non possono essere che confermate provvisoriamente, in attesa di una teoria più potente e preferibile. Anche nel campo della pianificazione territoriale, dunque, vale il *caveat* popperiano:

“La base empirica della scienza oggettiva non ha in sé nulla di ‘assoluto’. La scienza non posa su un solido strato di roccia. L’ardita struttura delle sue teorie si eleva, per così dire, sopra una palude. E’ come un edificio costruito su palificate. Le palificate vengono conficcate dall’alto, giù nella palude, ma non in una base naturale o ‘data’, e il fatto che desistiamo dal conficcare le nostre palificate più a fondo non significa che abbiamo trovato un terreno solido: semplicemente, ci fermiamo quando [...] riteniamo che, almeno per il momento, i sostegni siano abbastanza stabili per sorreggere la struttura” (Popper, cit. in Gillies, 1993, con nostre lievi modifiche).

La rappresentazione del territorio, ancor più che degli altri oggetti di ricerca, non è la riproduzione di un’osservazione non mediata. Il territorio come produttore di conoscenza non deve essere confuso con l’inferenza teorica derivante da specifiche assunzioni di modello.

“E’ difficile convincere la gente che l’Equatore e il Meridiano Zero non esistono, quando sono consolidate celebrazioni nautiche come il “Crossing of the Line” [...] Benché il mondo occidentale sembri aver sposato l’idea di un reticolato sistematico globale nel quale ogni luogo può essere rappresentato con le sue coordinate, sembra che ci sia stato un sorprendentemente modesto interesse da parte delle civiltà orientali nel tracciare griglie e reticolati nelle loro mappe del mondo. [...] Ci sono stati molti modi in cui i confini esterni dello spazio della mappa sono stati indicati. L’apparentemente semplice idea di porre una griglia rettangolare attorno alla mappa è una caratteristica relativamente moderna. Essa ha lo scopo, in termini moderni, di fare un’affermazione circa la coerenza e completezza di quanto è interno al limite di demarcazione, e di separarlo dallo spazio circostante. (Woodward, 1995; trad. nostra).

Per questo, il pianificatore ha l’obbligo di serietà, su un piano scientifico, di esplicitare i confini della propria concezione, oltre che di validarla con il termine di paragone dei bisogni da soddisfare. Il piano, poi, vale all’interno di una costruzione delimitata, e cessa di interessare al di fuori di essa.¹⁴

Il secondo dei punti di vista ora espressi, dopotutto, ci pare più convincente. Da una parte la pianificazione si basa su una analisi del territorio oggetto di progettazione, la cui natura si può ritenere del tutto simile a quella di ogni analisi scientifica, e caratterizzata dall’intento di *agnizione*. La critica dell’empirismo neopositivista nella scienza porta però a riconoscere che il ruolo di *teoria* (cioè di sistema di congetture e asserzioni volte a spiegare la realtà) è in questo caso svolto dal *progetto*. Al proposito, si deve tenere presente la sostanziale differenza rispetto alle teorie scientifiche: mentre queste vogliono spiegare determinati fenomeni, il progetto deve invece decidere sul diritto di esistenza di un fenomeno rispetto ad un altro, dando una risposta alle esigenze espresse, in varia forma e con diverso potere, dalle varie parti della società.

Secondo il Wittgenstein delle *Ricerche Filosofiche*, “*il senso di un’espressione è dato dal suo uso nell’ambito di un gioco linguistico*” (Gillies, 1993), dove per ‘gioco linguistico’ si intende ogni attività sociale nella quale l’impiego del linguaggio svolge un ruolo essenziale. Nell’ambito della

¹³ Sulla differenza fra falsificabilità e confermabilità, cfr. Gillies (1993).

¹⁴ Si pensi, come una specie di monito, ai patetici esiti del tardo Comte e della sua religione dell’umanità, come all’icona di una pianificazione che deborda dalla sua cornice.

pianificazione territoriale, si incontrano continuamente occasioni di ‘giochi linguistici’, e la definizione dei termini del ‘bene’ ha, come si è cercato di evidenziare, le tipiche prerogative di uno di questi. Il *planner* ha spesso, a quanto sembra, il compito di guidare alla definizione del ‘bene’, attraverso i processi sociali da cui essa deve emergere. In questi termini, la ‘teoria’ di cui è carica l’ ‘osservazione’ alla base del piano ha bisogno di una delimitazione morale, poiché solo da una scelta del pianificatore può derivare la possibilità di attuazione, con il piano, di determinati valori. Il valore è legato al riconoscimento sociale di un bisogno dell’individuo, e questo riconoscimento avviene attraverso la comunicazione. Pertanto, compito essenziale del *planner* è di dotarsi di un punto di vista tale da favorire il riconoscimento dei bisogni espressi, e quindi di adottare solo quella teoria (quel progetto) che consenta di interpretare i fenomeni del territorio dando simultaneamente significato alle espressioni del bisogno¹⁵. Ancora una volta, appare chiaro che la conoscenza e l’azione devono essere dotate di una fondazione in cui i termini del bene (l’etica) e del vero (l’epistemologia) sono finemente miscelati.

Infine, anche sulla scorta di G.Campos Venuti (1986), si può affermare che le varie interpretazioni della figura del *planner* rispecchiano differenti percezioni di bisogno in varie epoche: una sorta di consonanza fra storia della città -del territorio- e storia dell’ ‘urbanista’. La visione del professionista comunicativo si ancora ad un contesto storico in cui il territorio è visto come una risorsa limitata destinata ad alternative d’uso antagoniste, e per la cui allocazione è necessaria un’analisi multicriterio. L’istanza ambientale, così perentoriamente emersa negli ultimi decenni, rappresenta una significazione frutto anch’essa di *giochi linguistici*, e trova spazio solo in parallelo con una pratica della pianificazione territoriale che ha saputo –in alcuni e determinanti casi – accogliere espressioni di bisogno che in altri sistemi, e con altri punti di vista, non avrebbero avuto ascolto.

4- Difficoltà dell’agire comunicativo

Le ultime osservazioni espresse si possono così concludere: (1)La pianificazione territoriale condivide alcuni aspetti propri della visione scientifica del mondo, e in particolare l’applicazione di congetture, asserzioni e *modelli* ai fenomeni reali. (2)La pianificazione territoriale, rispetto alla ricerca scientifica, utilizza una tipologia diversa di ciò che si chiama *teoria* (e cioè un insieme di ipotesi fra loro in qualche modo coerenti fino a prova contraria, compatibilmente con il teorema di Gödel): questa tipologia di teoria è il *progetto*. (3)Così come la scienza sottopone a discussione le proprie teorie, ricavandone, in qualche modo, una fondazione, così anche il progetto dovrebbe essere sottoposto ad una analisi che consenta di fare affermazioni sui limiti di “affidabilità” (*epistème*) dei suoi metodi, o sulle sue ragioni di sussistere: ciò che si intende con *delimitazione del punto di vista*; (4) Il progetto porta in sé ipotesi non sul modo di essere delle cose, ma sul loro *dover essere*. In relazione a questo aspetto, occorrerebbe fondare il progetto non solo da un punto di vista *epistemologico*, ma anche *etico*. In altri termini, occorrerebbe stabilire come la scelta di un certo tipo di processo di piano corrisponde al perseguimento di un ‘bene’, quali ne siano i promotori e quali i destinatari; quale, infine, sia il rapporto fra il *planner* e questi ultimi.

Alla visione corrente, in ogni periodo storico, del sistema territoriale si associa in modo più o meno preciso, ma comunque evidente, un certo tipo di paradigma¹⁶ del *planning*. Essenzialmente, il riconoscimento del paradigma scientifico che sottende una certa prassi di piano è funzionale alla delimitazione del punto di vista del pianificatore. In questo si può ravvisare il punto di partenza per l’auspicata fondazione epistemologica del *planning*.

Nel corso degli anni, ad una visione del territorio come spazio di interazioni essenzialmente socio-economiche, pur condizionate da fattori fisici, si è progressivamente sostituita quella di un *sistema*

¹⁶ Per quanto concerne la nozione di paradigma, il riferimento all’opera di T.Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*(1962) fornisce un indispensabile punto di partenza.

complesso regolato da delicati quanto sofisticati meccanismi di controllo. In taluni casi, questa visione è stata portata alle estreme conseguenze, come nel caso della *Gaia Ipotesi* di J. Lovelock (1979) che vede la Terra come un unico organismo capace di adattarsi alle modifiche delle condizioni indotte da agenti naturali ed, entro certi limiti, antropici. A questa visione del territorio come sistema complesso può corrispondere il paradigma della pianificazione come processo interattivo (che sfrutta le possibilità di un *'apprendimento sociale'*, attraverso un confronto fra sapere tecnico e sapere non formale ma basato sull'esperienza, ancorato al senso comune, nell'applicazione collettiva di una conoscenza all'azione). Questo processo consente di utilizzare tutta l'informazione disponibile rinunciando ad esclusioni a priori in nome di punti di vista tecnocratici troppo schematici. Per fare proprio questo tipo di paradigma, la pratica del *planning* si dovrebbe riferire al *pensiero complesso*. Per quanto spesso si parli con disinvoltura di teorie della complessità, ci sembra più corretto riferirci a una semplice idea regolativa di pensiero complesso, in quanto non si tratta di una congettura o ipotesi su fenomeni sistemici, ma di un semplice suggerimento per guardare questi ultimi con occhi meno ingenui, contro le eccessive semplificazioni delle teorie stesse, e dei modelli (Morin, 1990).

Nel costituire un modello del sistema territoriale, e quindi nel definire quali categorie di informazione abbiano diritto di cittadinanza nel quadro dell'analisi territoriale, è essenziale quel fenomeno, così attentamente studiato dagli epistemologi e storici della scienza contemporanei, che si chiama *migrazione delle idee*. E' forse superfluo ricordare che non pochi dei concetti con cui si affronta oggi il territorio risalgono a formalizzazioni originate dalla biologia, e particolarmente dall'ecologia¹⁷. Il punto di vista *olistico* è un portato dell'ecologia à la Odum (1982), per quanto se ne possano riconoscere germi nel pensiero organico di Mumford (cfr. Bettini, 1996). I concetti relativi all'equilibrio di un sistema, poi, derivano dalla termodinamica, e largo uso, a proposito e a sproposito, si è fatto di concetti della termodinamica del non equilibrio (Prigogine, 1967). Che queste idee abbiano portato ad una concezione del territorio dotata di sue peculiarità, pare abbastanza certo. Quello che potrebbe essere interessante descrivere è il paradigma di *planner* che ad essa corrisponde. Sembrerebbe che ad un paradigma dell'invenzione di soluzioni se ne sia avvicinato uno del controllo di processo. La peculiarità dei paradigmi della pianificazione territoriale sta nel fatto che ad un modello (particolare) di conoscenza, quale emerge dalle riflessioni sul ruolo 'teorico' del progetto, corrisponde necessariamente un modello dell'azione. *Al sistema complesso come oggetto di ricerca risponde in modo, si vorrebbe dire, necessario il paradigma pratico dell'azione comunicativa*. La complessità del sistema, la sua non-prevedibilità (a meno di ipotesi estremamente cogenti), la difficoltà di un approccio riduzionistico come quello determinato da ogni punto di vista ancorato ad una specifica disciplina, sono tutti elementi che conducono ad una forte limitazione delle possibilità di una soluzione tecnocratica. Nell'incertezza, la decisione deve essere frutto di una discussione che consenta di ridurre al minimo la forzatura derivante da interessi di parte.

Il modello dell'agire comunicativo non è un punto di arrivo, ma una frontiera di dibattito, e deve ancora risolvere notevoli difficoltà, legate alla sua base partecipativa ed al ruolo del pianificatore come guida dei processi sociali di condivisione dell'informazione e di raggiungimento di compromessi. Una prima possibile critica al modello, per esempio, riguarda la natura sempre ideologica della comunicazione e la presenza della struttura semiologica dei *miti* (Barthes, 1957) dietro ogni comunicare sociale. Riportiamo un esempio:

“Sono dal parrucchiere, mi viene portato un numero di Paris-Match. Sulla copertina, un giovane negro vestito con l'uniforme francese fa il saluto militare, con gli occhi verso l'alto, fissati certo su una piega della bandiera tricolore. Questo è il senso dell'immagine. Ma, per quanto ingenuo, vedo bene ciò che essa mi vuole significare: che la Francia è un grande impero, che tutti i suoi figli, senza distinzione di colore, servono fedelmente sotto la sua bandiera, e che per i detrattori di un preteso

¹⁷ Bertalanffy, uno dei padri della moderna teoria dei sistemi, era un ecologo
Tesi di Dottorato di Ricerca in Georisorse e Geotecnologie, XIII ciclo, 1998-2000

colonialismo non c'è risposta migliore dello zelo di questo negro nel servire i suoi pretesi oppressori"(R.Barthes, *Mithologies*, 1957, trad.it. Einaudi, 1974).

Non si vuole qui discutere la critica dell'ideologia specificamente espressa in questo passo. Quello che preme è sottolineare come ogni messaggio che circola nella società sia composto di un significante, un significato, e –secondo la definizione di Barthes - una *significazione*. Questa significazione, che è il modo di coesistenza di significato e significante nel contesto particolare in cui essi vengono recepiti, è il cuore del *mito*. Essa è la sola componente del messaggio che sia 'consumata' dalla fruizione. Il significato e il significante sono sempre evidenti (*'il mito non nasconde nulla'*. Ibid.). La significazione, in quanto deformante ogni volta il significato e il significante, impedisce che la comunicazione sia neutra, e portatrice di soli contenuti 'oggettivi'. La comunicazione che riguarda le basi di decisione sull'ambiente e il territorio, in particolare, risente molto pesantemente di questa peculiarità. Indubbiamente, questa prima obiezione al paradigma dell'agire comunicativo è forte: occorre che il pianificatore "comunicativo" sia dotato di consapevolezza critica del potere deformante, nei confronti del messaggio che egli esprime, da parte del contesto in cui lo stesso viene recepito, o della sua significazione. La mancanza di questa consapevolezza mina alla radice l'atteggiamento comunicativo e la sua natura metaermeneutica.

Al modello dell'agire comunicativo si può anche obiettare l'influenza delle tecnologie dell'informazione sui contenuti e sul loro utilizzo sociale; la compagine degli attori della comunicazione che si configura attraverso la rete informatica mostra notevoli difficoltà nel rappresentare le effettive istanze della società, rischiando di vincolarsi al rispetto di ruoli fittizi, alla maniera dei *roleplaying games* (Maldonado, 1997). Se Barthes mette in guardia nei confronti della deformazione indotta dal fatto stesso di comunicare in un contesto, Maldonado descrive la deformazione supplementare, o la specificità della deformazione dei messaggi, quale si verifica in una società che comunica attraverso le tecnologie informatiche. Per questo Autore, l'esistenza di un *medium* come Internet, che consente di dialogare senza esplicitare l'identità degli interlocutori, porta alla riduzione di ogni messaggio a *chiacchiera*.

"Nel gergo informatico, il rapporto colloquiale reso possibile da un canale Internet Relay Chat è soprannominato chiacchiera. Nel linguaggio comune, la chiacchiera è considerata come un modo futile, superficiale e inconcludente[...] di dialogare tra le persone. Questo senso, e non a caso, è presente nella chiacchiera informatica. Si può legittimamente supporre che i suoi effetti, in particolare quando le questioni che si discutono sono politiche, possano essere devastanti. Infatti, la chiacchiera può rivelarsi [...] una fonte di fastidio e addirittura di disamoramento dei cittadini nei confronti della politica"(*ibid.*).

La *chiacchiera* è una comunicazione sviluppata senza impegno, che non associa all'esito di un confronto una scelta di interesse collettivo. Nella *chiacchiera*, gli interlocutori non rappresentano i propri ruoli *reali*, ma esprimono identità fittizie. Nel proporre un paradigma di agire comunicativo, non si possono ignorare le difficoltà di una comunicazione oggi non più –almeno in certo senso- *convalidabile*. La partecipazione del pubblico alle decisioni che passa interamente per i mezzi informatici non è affidabile in quanto non consente di mettere in luce le reali esigenze ed i reali interessi della società.

Un altro tipo di difficoltà del paradigma dell'azione comunicativa deriva dal fatto che la società, costituita in realtà da più sistemi sociali distinti non mutuamente fungibili, non è necessariamente in possesso dei requisiti che consentano di affrontare razionalmente temi come la difesa dell'ambiente (Luhmann, 1983). La minaccia ambientale –ma questo vale in fondo per ogni questione di pianificazione territoriale- viene infatti recepita come uno stimolo diverso da ciascuno dei sistemi (economico, scientifico, religioso...) che compongono la società. A seconda della eccessiva o scarsa risonanza che riceve questo tema, le risposte sono estremamente diversificate e non sempre assicurano

una comunicazione fra i sistemi. La comunicazione deve essere intesa come un processo fondante la società:

“La comunicazione è un’operazione esclusivamente sociale. Al livello di questo tipo specificatamente sociale di comunicazione non c’è né input, né output. L’ambiente si può rendere percettibile solo attraverso l’irritazione o il disturbo della comunicazione, e questa deve quindi reagire a se stessa. [...] Possiamo di conseguenza formulare più rigorosamente la questione del condizionamento ecologico e delle minacce ecologiche della vita sociale, ponendoci il problema delle condizioni alle quali fatti e cambiamenti dell’ambiente sociale trovano risonanza nella società”(Luhmann, cit., tr.it. F. Angeli).

In generale, si pone il problema di come la società possa essere effettivamente in grado di produrre una partecipazione del pubblico alle scelte sull’utilizzo del territorio e delle georisorse: come deve l’azione comunicativa del pianificatore rapportarsi alle diverse espressioni dei sistemi sociali interagenti?

“Resta degna di attenzione l’indicazione di Habermas che una società acentrica non possa assicurarsi una razionalità propria, bensì debba consegnarsi alla razionalità dei sottosistemi del suo sistema funzionale. [...] Naturalmente, la razionalità sociale non può consistere né nella proiezione della razionalità dei singoli sistemi funzionali (ad es. della scienza), né nel suo totale rifiuto come irrazionale. Essa deve essere pensata in qualche modo libera da posizioni.”(*ibid.*)

Fino ad ora la razionalità scientifica ed economica è stato l’unico tipo di guida ai processi di piano. In un nuovo paradigma della pianificazione territoriale, occorre esplicitare la razionalità adottata rispetto alle altre, espresse in varie forme dagli attori sociali coinvolti.

Infine, prima di lasciare queste riflessioni ancora così poco risolutive, mette conto ricordare la raccomandazione di Ortega y Gasset circa il fatto che la massa è sostanzialmente incapace di prendere decisioni, e si rende comunque necessario un ruolo di guida che scavalchi i processi di *compromise building*:

“In un buon ordinamento delle cose pubbliche, la massa è quella che non può agire da se stessa. Questa è la sua missione: essa è venuta al mondo per essere diretta, influenzata, rappresentata, organizzata, fino a cessare di essere massa, o per lo meno ad averne l’aspirazione” (Ortega y Gasset, 1930, tr. It. Il Mulino).

Nel contesto di un allargamento delle occasioni di decisione e di una crescente attenzione ai “saperi” non formali, è essenziale la consapevolezza del carattere di guida e *problem solver*, per nulla facilitato dalla partecipazione del pubblico alle scelte (e anzi appesantito di una valenza educativa essenzialmente politica), che il ruolo del *planner* riveste.

5- Conclusioni provvisorie

Una fondazione etica ed epistemologica della pianificazione territoriale dovrebbe fornire le indicazioni per l’azione del *planner* in modo critico e aperto: è impensabile una teoria chiusa che dia già soluzioni circa i valori da perseguire e i metodi per concretizzarli nel progetto. Mentre in passato l’istanza (‘tecnocratica’) della risoluzione di problemi contingenti per conto di una volontà decisionale pressoché unica consentiva al pianificatore di limitarsi in un ruolo ingegneristico, ora è sempre più stringente la domanda di piani che conducano a un *ranking* delle priorità da soddisfare, e quindi di un pianificatore che si ponga il problema di guidare gli attori sociali coinvolti nel piano ad un compromesso che non può essere predefinito ma deve scaturire dall’agire comunicativo. Il moderno, stando alle osservazioni di Heidegger (op.cit.), si presenta come *l’epoca dell’immagine del mondo*, in cui ad ogni raffigurazione si associa una effettiva realtà, e non solo una ipotesi di realtà. Questo spunto aiuta il pianificatore a mettersi in guardia dalle difficoltà della rappresentazione del territorio nei suoi vari aspetti¹⁸, e tuttavia a utilizzare la rappresentazione, la cartografia, i sistemi di supporto alle decisioni, analisi e interpretazione dei dati come strumenti di creazione del consenso e di costruzione

¹⁸ Si veda a questo proposito Farinelli, F., cit. alla nota 1.

del compromesso, previa la delimitazione del punto di vista e l'esplicitazione di un 'intervallo di confidenza' delle assunzioni fatte, non solo statistico ma anche metodologico. Fermo restando che il dominio dei valori della pianificazione è solo quello di ambito pubblico, e che essa prescinde da ogni assunzione circa il wittgensteiniano *enigma* dell'individuo, una possibile verifica della validità degli assunti del piano è prodotta applicando il concetto kantiano del *regno dei fini*: le soluzioni progettate devono garantire che ogni individuo, pur potendo essere giunto a soluzioni diverse se fosse stato al posto del decisore, possa giustificarle in base al proprio sistema personale di valori. La cosa dovrebbe essere estesa, in senso regolativo, anche allo sguardo che le generazioni future potrebbero avere sulle decisioni prese oggi (Rawls, 1971).

Quanto fin qui osservato non conduce –ahimè– ad alcuna conclusione, e anche le conclusioni provvisorie che si è tentato di delineare denunciano come ogni teoria, al modo della teoria scientifica di cui parlava Neurath, sia *'una nave che non si può tirare in secco, ma che occorre riparare durante la navigazione, in mare'*. La tentazione delle discipline quantitative e progettuali, che devono trovare soluzioni pratiche, è sempre di cercare metodi semplificati per ottenerle. Una *reflective practice* ci mette innanzitutto in guardia da questa tentazione nel campo della pianificazione territoriale.

Capitolo 2 - Pianificazione e conoscenza

1- Premesse

Da più parti ci si interroga sull'effetto che dovranno e potranno avere le mutazioni di punto di vista di questi anni sullo stile e sugli esiti del prendere decisioni. Ci sembra che sia da segnalare qualche importante elemento di novità almeno nei contesti seguenti:

- l'emergere dell'istanza ambientale in termini pervasivi, e al contempo la consapevolezza che lo sviluppo sostenibile non è conseguenza "normale" dei percorsi di *decision making*, ma richiede sforzi consapevoli e specificamente orientati per perseguirlo, forzandovi le tecnologie e i mercati, anche considerando che la scelta del *planner* verso l'ambiente non è data in modo univoco e necessario come priorità, ma deve essere temperata in un *planner's triangle* ai cui vertici stanno le istanze ecologiche, di equità sociale e di crescita economica (Campbell, 1996)
- il riconoscimento che la pianificazione non possa essere unitaria, se non forzando le proprie letture del reale ad un'arbitraria riduzione di complessità (Dematteis, 1995), ma richieda di essere articolata su più livelli mutuamente sussidiari, tenendo distinti i vincoli di sostenibilità delle scelte dalle valutazioni strategiche e dalle decisioni di valore socioeconomico
- il (conseguente, ci pare) riconoscimento della necessità di un livello autonomo di pianificazione che "dia le regole" entro le quali deve potersi muovere la pianificazione tradizionale
- la crisi delle concezioni razional-comprenditive della pianificazione, sostituite semmai, negli slanci più ottimistici, da visioni di pianificazione comprensiva basata sulla costruzione del consenso (Innes, 1996), che richiede un modello di pianificazione discorsiva anche per la necessità di ridurre al minimo il fraintendimento dell'interesse dei gruppi sociali (Taylor, 1998).

Un altro aspetto rilevante, inoltre, che emerge negli ultimi tempi, è la necessità di rifondare la pianificazione nel suo ruolo di "dire la verità al potere" (Friedmann, 1987). Alla condizione postmoderna corrisponde infatti, come ormai ampiamente riconosciuto, l'esigenza di legittimare le scelte caso per caso, in relazione alla specificità del contesto e senza poter fare appello a sistemi valoriali di carattere generale ed astratto (Lyotard, 1978). La condizione postmoderna in politica è essenzialmente una condizione di ricerca discorsiva della legittimazione (*ibid.*). La possibilità che la legittimazione sia di tipo machiavellico richiede la messa a punto di criteri generali per la valutazione della qualità dei piani (Baer, 1997).

La logica razional-comprenditiva (quale è caratterizzata ad es. in Mazza, 1987), che integra *physical* e *social planning* in una visione lineare e in diagrammi di flusso deterministicamente deduttivi, è sottoposta già da tempo a critiche radicali legate prima di tutto alla difficoltà di definire il bene comune in cui i conflitti socio economici devono, di principio, essere riassorbiti e ricomposti.

La legislazione italiana, dagli anni '80 alla fine degli anni '90, ha recepito il corpo delle direttive CEE riguardo alla tutela ambientale: l'obiettivo di elevati standard di protezione degli ecosistemi e della salute umana non ammette deroghe. Si tratta di un vincolo che ogni azione di piano deve rispettare: un vincolo pervasivo e strutturante i processi decisionali. Tutto ciò ha evidenti riflessi sulla pianificazione: "L'ambiente, e cioè il contesto in cui si pongono, vanno affrontati e risolti i problemi di organizzazione dello spazio, è già una presenza nella prassi pianificatoria, [...] con una progressiva maggiore attenzione ai risvolti ambientali della pianificazione territoriale. Non a caso la prima manifestazione esplicita di questa relazione è l'espansione di basi descrittive accurate delle caratteristiche delle forme del territorio e della loro "idoneità insediativa" e "capacità insediativa" in relazione ai problemi di tutela e valorizzazione dell'ambiente" (Secondini, 1998).

Quasi tutti gli atti di pianificazione del territorio spostano radicalmente il fuoco (almeno in linea di principio) verso la gestione delle risorse naturali e delle esternalità delle scelte politiche, che avviene

con l'uso di metodologie e standard pian piano integrati nel processo decisionale (p.es. la Valutazione di Impatto Ambientale, gli Ecobilanci e l'Audit Ambientale, le procedure IPPC e l'adozione delle Best Available Techniques, BAT, i programmi di Agenda 21 locale), come testimoniato p.es. dalla L.5/1995 della Regione Toscana o dalla L.20/2000 della Regione Emilia Romagna riguardo alla pianificazione e tutela del territorio. Si tratta di una prospettiva di ampiezza limitata, e pienamente contestualizzata nel carattere del postmoderno, rispetto alle aspirazioni della pianificazione al disegno di una società migliore, come ancora si pensava nei decenni precedenti a dispetto delle numerose e radicali revisioni critiche di questo punto di vista (p.es. Altshuler, 1965). Oggi il piano è sempre più legato al contingente. L'oggetto di piano deve sottostare a definizioni chiare e distinte, rifuggendo la tentazione di ricondurre i vari passi operativi ad una visione di sistema complessivo "chiuso". E' un problema, ed un problema che deve essere compiutamente formulato per poter accedere alla legittimazione attraverso la discussione politica.

E tuttavia, nel momento in cui le istanze di corretta gestione e di tutela delle risorse naturali entrano nell'orizzonte di attesa della pianificazione territoriale a tutti i livelli, esse forniscono materia sostantiva per la produzione di scenari utopistici (nel senso di predizioni sul futuro frutto di immaginazione sociale: cfr. Baczkó, 1978) i cui contenuti politici ed etici trascendono il campo, ampio ma delimitato, dei rapporti fra uomo ed ambiente per estendersi in una visione complessiva della società. Ne sono esempi il pensiero ecologista (p.es. Commoner, 1972) e la sua "fusione" con le antecedenti utopie organiche della città (Geddes, 1911; Mumford, 1968), lo sviluppo della economia dell'ambiente, la ricerca della sostenibilità dello sviluppo, legata alle iniziative di Agenda 21. Già attorno alla metà del XX secolo, tuttavia, è evidente una tendenza, pur se con toni ed obiettivi completamente diversi, a trarre indicazioni di carattere antropologico e politico da considerazioni sui sistemi fisici e biologici (p.es. Monod, 1942; Theilard de Chardin, 1955).

Le questioni su dove vada la pianificazione convergono oggi con quelle su quali rappresentazioni della realtà, quali modelli debbano essere usati per giustificare le decisioni. I modelli della ricerca sono tipicamente orientati alla cattura delle essenze dei fenomeni fisici, mentre i modelli della pianificazione devono effettuare previsioni utili a discernere gli effetti delle scelte sugli equilibri del territorio.

La crisi delle valutazioni ingegneristiche (costi-benefici) e la difficoltà dell'analisi multicriterio, soprattutto quando essa viene letta come tecnica formale di *problem solving*, mettono in luce l'esigenza di un passaggio concettuale essenziale: dalla oggettività scientifica, alla razionalità (di cui è rilevante soprattutto l'aspetto comunicativo: Habermas, 1981; Innes, 1996) della valutazione e del piano.

I modelli servono se ed in quanto aiutano a porre la razionalità delle decisioni: a produrre della realtà un giudizio razionale, pur riconoscendovi un carattere irriducibilmente soggettivo.

Il piano è la linea guida per la soluzione di un problema che deve essere ben formulato per poter essere affrontato con tecnologie appropriate: in tal senso, si può parlare di una rilevanza assoluta del *physical planning*.

Dematteis (1995) illustra il ruolo della "immaginazione geografica" come modellistica della realtà basata essenzialmente sulla inferenza analogica: "[...]la metafora funziona come modello di inferenza analogica capace di trasferire ad A idee ed implicazioni normalmente associate a B (e viceversa), a partire da un rapporto di analogia fra A e B la cui estensione è originariamente solo intuita, ma non prevedibile né descrivibile con esattezza. La difficoltà di definire rigorosamente gli oggetti di studio della geografia può, almeno in parte, essere messa in relazione con la sua natura essenzialmente metaforica. In questi casi l'imprecisione che viene sovente rimproverata ai concetti generali in uso nella geografia può rivelarsi scientificamente utile, in quanto consente l'accesso a problematiche che sfuggono a enunciati più definitivi" (*ibid.*).

McHarg (1969) ha mostrato come la "lettura" del territorio, delle sue forme e dei suoi processi sia base fondamentale per la progettazione ambientale. In un contesto di dissoluzione delle arti, in cui la

ridondanza di possibilità creative, in assenza di “poetiche” e “correnti” nel classico significato, genera un arbitrio pressoché assoluto, la scienza conserva il ruolo di una possibile *weltanschauung* progettuale.

Lober (1995) richiama l’attenzione sul fatto che distinguere i fenomeni naturali e trarne le conclusioni corrette per la pianificazione spesso origina una nuova tecnocrazia che disegna dall’alto piani poi poco praticabili, a causa di fattori socioeconomici (qual è l’opposizione sociale all’attuazione di determinati progetti) che non sono stati adeguatamente compresi e modellizzati. L’autore sottolinea invece l’importanza di accoppiare le analisi di tipo socioeconomico a quelle di carattere tecnico-ambientale, proprie delle scienze naturali, preliminarmente alla presa delle decisioni. L’esigenza di una integrazione stretta fra modelli delle scienze naturali e modelli del comportamento umano è comunque pervasiva, e rappresenta la frontiera della modellistica ambientale (Couclelis, 2000). Oggi non ha rilevanza una modellistica che non sia suscettibile di uso nella pratica, considerando non solo le variabili di uno spazio fisico “sperimentale”, ma anche le variabili sociali e comportamentali che interagiscono con esse.

Nel contributo che segue si afferma la tesi che la classificazione del territorio sia l’unica forma di analisi che realmente produca un significato per la pianificazione. Si afferma anche che la classificazione possa e debba essere fatta con una consapevolezza critica, la cui assenza impediva finora una utilizzazione in profondità degli strumenti modellistici: la classificazione del territorio è anzi la forma che il modello previsionale prende per essere utilizzato nella pianificazione, divenendo lo strumento con il quale si concretizza, sul tavolo della discussione, la conoscenza delle risorse naturali ai fini delle scelte di piano.

Secondo Kay (2000) la complessità dei sistemi ambientali - che manifestano comportamenti auto-organizzativi - non sempre può essere affrontata in termini di modellazione/previsione secondo la scienza tradizionale: piuttosto, spesso si richiede che gli scienziati assumano il ruolo di narratori che descrivono l’insieme delle possibili evoluzioni del sistema, in una *narrative* di futuri realizzabili. Questo viene fatto allo scopo di informare i decisori circa le possibili opzioni ecologiche, i vantaggi e le incertezze, e le possibilità tecniche di influenzare ciò che accade nel paesaggio. L’Autore riporta alcuni esempi, presi dall’ecologia e dall’ecologia del paesaggio, di *narratives* rilevanti per la pianificazione.

La classificazione del territorio, attività principale cui è finalizzata la modellistica per la pianificazione, è operazione narrativa: uno schema di classificazione deve essere sufficientemente ampio e flessibile da consentire un discorso sui possibili, e non un solo scenario di comportamento. Non inutilmente, quindi, ci si rivolge sempre di più a tecniche che consentono di mappare “propensione”, “predisposizione” e possibilità, più che proprietà di tipo univoco, ed a logiche di tipo *fuzzy* più che di tipo booleano (presente/assente).

Riflettendo sulle modalità con cui possono essere prodotte classificazioni, si risale ai criteri con cui la conoscenza “scientifica” delle risorse naturali può essere effettivamente utile ed utilizzabile per rendere le decisioni “razionali” basandole su una più ampia condivisione. Nell’esprimere i nostri argomenti, si è partiti dall’analisi di come oggi si stiano separando i livelli tradizionali della pianificazione (la “pianificazione strategica”) da nuovi e specifici livelli di tutela delle risorse naturali e dei loro equilibri (la “pianificazione fisica”).

I due livelli denunciano due anime del *planning*, fra loro complementari, che usano ragionamenti diversi e fanno riferimento a due diverse culture della conoscenza.

La nuova pianificazione ha l'opportunità di fondere, contaminare variamente queste razionalità, allo scopo di pervenire ad una sintesi, contestualizzata a seconda degli obiettivi specifici, ma che consenta di mantenere una capacità di comprensione delle risorse naturali, delle loro forme e dei loro processi, senza cadere in tecnicismi.

Ci sembra che sia giunto il momento di aprire una discussione seria circa l'interdisciplinarietà. Oggi non si può ignorare che sono disponibili molti strumenti di valutazione quantitativa nella pianificazione delle risorse naturali. Mentre finora il *planner* ha "fatto fare" analisi, eventualmente per prescindere, ma comunque per validare *ex post* o, nei migliori dei casi, rettificare alcuni scenari di piano (Mazza, 1987), ci sembra ora necessario che la pianificazione entri nel dettaglio di come la modellistica previsionale e lo studio quantitativo delle risorse naturali possano integrare la prassi progettuale, accompagnando la pianificazione ai livelli opportuni.

Con Mazza (*ibid.*), riconosciamo che solo la conoscenza che è stata assimilata, che è entrata nel patrimonio culturale della comunità, può essere usata per costruire il piano, mentre ciò che vi si aggiunge come analisi *ad hoc* ne è semmai la giustificazione *a posteriori*.

Si può oggi affermare che le procedure di ricerca delle scienze ambientali (e segnatamente la modellistica previsionale) sono in larga misura entrate a far parte della "cassetta degli attrezzi" non solo del pianificatore, ma anche di diversi gruppi di attori sociali coinvolti dalle scelte di piano (si pensi a come molti gruppi ambientalisti oggi siano in grado di produrre documentazioni con vero e proprio *status* scientifico; si veda in proposito anche Feyerabend, 1996), e che quindi possono essere concepite, e praticate, attività di pianificazione in cui si usa la conoscenza delle risorse naturali come euristica per il progetto. Una implementazione di tal genere richiede, comunque, una costruzione sociale complessa e laboriosa (King e Kraemer, 1993), e la soluzione di problemi nelle tre culture del pubblico, dei decisori e degli scienziati, con il conseguente bisogno di rendere condivisi la credibilità, la capacità di considerare l'incertezza, l'utilità ai fini della decisione e la chiarezza dei modelli e delle tecniche di analisi adottate da ciascuno (Rejeski, 1993).

Finora in Italia la modellistica previsionale, come forma di espressione della conoscenza scientifica delle risorse naturali, ha compiuto enormi progressi in termini di capacità strumentali, mentre ancora siamo di fronte a ritardi addirittura gravi (se letti in termini di perdita di opportunità e di danni/impatti ambientali evitabili) per quel che riguarda la diffusione nella pratica della pianificazione degli opportuni sistemi di supporto alle decisioni. Questi ritardi sono ascrivibili essenzialmente:

- all'incapacità della modellistica ambientale di uscire dal ristretto cerchio delle attività speculative, per mettersi decisamente ed apertamente al servizio del *problem solving* nel mondo reale
- alla scarsa sensibilità culturale della pianificazione per gli strumenti di analisi quantitativa delle risorse naturali, se non in ristretti ambiti sperimentali o con esiti più estetizzanti che operativi
- alla scarsa attenzione per l'individuazione delle *forme appropriate* che la modellistica deve assumere per essere utile e spendibile nella pianificazione, conseguente alle difficoltà di dialogo fra il livello della ricerca scientifica e quello della prassi progettuale.

Oggi la conoscenza è quasi sempre sintetizzabile in termini modellistici, e di conseguenza occorre studiare le modalità in cui i modelli matematici, e in generale i ragionamenti formalizzati sulle risorse naturali, possono essere correlati alla razionalità del piano

Ai fini del discorso in oggetto, è essenziale però che venga ripensato, anche sulla scorta delle innovazioni istituzionali recenti, il rapporto fra la pianificazione creativa e la pianificazione normativa/di vincolo.

Attraverso la disamina delle caratteristiche oggi assunte, o assumibili, dai due livelli di pianificazione, si discutono i passaggi concettuali fondamentali che prefigura no un uso generalizzato della previsione sul comportamento dei sistemi ambientali come base di discussione democratica delle scelte.

2- Piani “fisici” e “strategici” nella crisi dell’urbanistica

Nuovi scenari istituzionali

Nei decenni passati, si è verificato uno spostamento del fuoco della pianificazione: dalla città (con esigenze socioeconomiche e insediative: standard, infrastrutture e servizi materiali, *decoro*), al territorio e all’ecosistema antropizzato (esigenze di sostenibilità; *landscape* in senso olistico: Odum, 1982; Naveh, 1982).

E’ innegabile che la pianificazione territoriale e i suoi strumenti tendano a un assetto irriducibile alle categorie tradizionali: il nuovo quadro della pianificazione in Italia ha alla sua base entità affatto nuove rispetto al precedente (quello disegnato dalla Legge Urbanistica del 1942)¹⁹. L’istituzione delle Autorità di bacino (L.183/89) e delle Autorità di ambito ottimale (L. 36/1994 e D.Lgs. 5 febbraio 1997, n.22), con il compito di occuparsi delle scelte di gestione del territorio sulla base di vincoli ambientali, richiede nuovi strumenti di piano che partano direttamente dalla conoscenza dei sistemi fisici e del loro funzionamento.

Si configura un livello di pianificazione definito, ineditamente, “*conoscitivo, normativo e tecnico-operativo*” (L.183/1989).

Si può parlare, a partire da questa innovazione, di una pianificazione relativa essenzialmente al sistema ambientale, che si svolge al livello di unità territoriali funzionali, accanto all’altra che, pur richiedendo aggiornamenti e innovazioni in risposta ai molti cambiamenti degli ultimi anni (tanto sul piano metodologico quanto su quello dei contenuti), mantiene il carattere dell’urbanistica tradizionale, ed affronta problematiche quali le strategie di sviluppo economico, i trasporti, l’istruzione, i servizi sociali ecc.

La pianificazione può separare nettamente i vincoli fisici sovraordinati (sull’uso delle risorse e l’allestimento di servizi ambientali) da scelte strategiche, irriducibilmente contingenti e “soggettive”, come quelle politiche, economiche e culturali: le Autorità hanno il compito istituzionale di garantire elevati standard di protezione degli ecosistemi e della salute umana, che prefigura no un vincolo pervasivo, strutturante i modi di assumere decisioni a tutti gli altri livelli di pianificazione. Esse governano un contesto autonomo per la pianificazione e gestione delle risorse naturali. Si presentano quindi come entità *super partes*, concettualmente orientate all’interesse collettivo anziché alla regolazione dei rapporti di forza nel sistema politico locale. Il livello geografico a cui operano è tale da consentire la gestione dei problemi che trascendono i confini strettamente amministrativi.

La L.142 del 1990 sull’ordinamento delle autonomie locali, d’altra parte, attribuisce ai Comuni e alle Province il compito di curare gli interessi del proprio territorio e della comunità, prefigurando un assetto in cui le città competono fra loro per acquisire determinati ruoli socio-economici e i benefici ad essi associati²⁰. Gli enti locali hanno il compito di costruire l’attrattività, in certo modo, *commerciale*

¹⁹ Il contesto istituzionale è ancora piuttosto dinamico e incompleto: l’analisi che segue riguarda forse più un dover essere che uno stato di fatto. Molte delle proprietà generali sotto descritte potranno trovare smentite e controesempi nella prassi corrente.

²⁰ Per una discussione circa il carattere di questa pianificazione, si veda ad es. Crocioni, 1999.

del luogo (il *marketing* urbano e territoriale: cfr. ad es. Ave, 1995): l'indirizzo sul territorio che questi Enti esercitano deve guardare ad un obiettivo di qualità della vita, *sensu lato*, più che di salvaguardia dell'ambiente.

Agli enti locali è richiesta una notevole capacità creativa, che si concretizza nel definire *utopie*, visioni di sviluppo futuro del territorio. Le condizioni di sostenibilità di questo sviluppo dovrebbero essere fissate dalle Autorità, che devono, per così dire, approvare le utopie degli enti locali, contemperandole al livello, di scala più vasta, della tutela e gestione dell'ambiente.

“Le utopie sono uno dei luoghi, talvolta il luogo privilegiato in cui si esercita l’immaginazione sociale, ove vengono accolti, elaborati e prodotti i sogni sociali individuali e collettivi.”(Baczko, 1978).

L'utopia, come forma narrativa propria dell'occidente a partire, in particolare, dall'Illuminismo, *“si impone come un modo di parlare dell'avvenire e di visualizzarlo, sostituendosi a modalità antiche di una tradizione secolare, quale la profezia o l'astrologia”* (Découflé, 1975; cit. in Baczko, *id.*). Un aspetto precipuo delle utopie degli enti locali è che esse mirano a definire uno scenario il cui criterio di miglioramento della realtà attuale è ancorato a considerazioni sui valori.

La pianificazione degli enti locali, che affronta essenzialmente tematiche di tipo socioeconomico, produce un *racconto urbanistico* (Secchi, 1984) la cui natura è utopistica. Alle modalità di questo racconto corrispondono diversi modi in cui i gruppi sociali pensano al territorio. In tal modo, il racconto esprime in forma ambigua, confondendo le concatenazioni logiche e del desiderio con quelle della realtà, la visione progettuale della trasformazione (*ibid.*).

Alle Autorità non viene richiesta tanto una attitudine creativa - progettuale, quanto una precisa comprensione dei meccanismi di funzionamento dei sistemi naturali e degli effetti delle diverse azioni su di essi.

Chiameremo, per chiarire le idee, il primo livello della “pianificazione fisica”, e il secondo livello della “pianificazione strategica”²¹.

Pianificazione fisica e pianificazione strategica

La pianificazione fisica definisce non una progettazione innovativa del territorio, ma la cornice entro la quale la pianificazione strategica si sviluppa, senza poter trascendere i vincoli fissati dalla prima sul consumo di risorse naturali²².

Al livello della pianificazione fisica si discute e si adotta una definizione operativa dello sviluppo sostenibile, che diviene una griglia per la valutazione delle scelte della pianificazione strategica: ciò che provoca un effetto *non sostenibile* sulle risorse naturali non deve in alcun modo essere previsto al livello dei progetti o piani strategici.

La pianificazione fisica è, in questo senso, *assoluta*, non agendo in una scena di attori socio-economici fra i quali debba essere raggiunto un equilibrio: il piano fisico costituisce la cornice dei vincoli

²¹ Le definizioni qui usate sono diverse da altre correntemente adottate in altri contesti (p.es. Secondini, 1998; Crocioni, 1999; Geertman, 1999). Occorre del resto farsi carico, anche nel trovar parole, della novità delle prospettive che il mutato quadro istituzionale consente di esplorare.

²² Si deve notare che le Regioni, nel quadro ora descritto, si collocano ad un livello intermedio, avendo sia un ruolo di pianificazione fisica, sia uno di pianificazione strategica. Si tratta di un nodo di collegamento, forse necessario, che consente di mediare le istanze, talora conflittuali, degli altri due livelli di piano. Ad esempio, la pianificazione delle attività estrattive, che costituisce un ambito di frontiera fra la pianificazione fisica (in quanto relativa all'uso razionale di risorse ambientali limitate) e la pianificazione strategica (in quanto le attività estrattive sono un'attività industriale importante per lo sviluppo) viene ancora gestita dalle Regioni: le Autorità di bacino possono imporre vincoli, ma non dare indirizzi strategici di sviluppo economico.

obbligatorie per il piano strategico, e i vincoli non sono fissati sulla base di scelte di campo soggettive, ma su uno studio e una comprensione dei fenomeni di stampo scientifico.

È importante sottolineare che i piani fisici sono caratterizzati dalla notevole rilevanza, ai fini delle scelte e degli indirizzi, della comprensione dei fenomeni e dei processi che interessano le risorse naturali. Questa svolge il duplice ruolo di *definire i vincoli generali*, e di *suggerire scelte e modalità di specifici interventi*. La conoscenza dell'ambiente è in tal senso essenziale per verificare la sostenibilità del piano, secondo un modello operativo in cui si apprende in itinere qual è il tasso di consumo del territorio compatibile con i processi naturali.

I piani fisici e i piani strategici si differenziano sostanzialmente riguardo al ruolo che nei due casi riveste l'analisi. Per seguire la distinzione di Wyatt (1999), se il piano strategico ha una connotazione riconducibile alla *tradizione del design* - la progettazione con tutti i suoi aspetti creativi e soggettivi - il piano fisico ha un legame strettissimo con la *tradizione analitica* - lo studio degli oggetti del piano per la "deduzione" delle soluzioni appropriate ai problemi da essi sollevati.

Le scelte dei piani fisici dovrebbero avere *un basso livello di interferenza con gli interessi dei cittadini e con le attività economiche*, essendo scelte di vincolo generale e di indirizzo allo sfruttamento razionale delle risorse naturali, in base a principi largamente condivisibili e a partire dalle previsioni sul comportamento dei sistemi ambientali.

Il piano, pur potendo creare o prefigurare opportunità, non si interessa del controllo del gioco, ma si limita a dargli regole; si risolve in pura gestione razionale delle risorse naturali, ed è basato, con diverse gradazioni di formalizzazione, su procedure di valutazione degli effetti delle scelte dei singoli in termini di compatibilità territoriale: dal prendersi cura degli equilibri ambientali, comprendendo le modalità secondo cui l'azione dell'uomo può apportare disturbi, il piano fisico trae la sua legittimazione e la sua accettabilità/difendibilità politica.

Il ricorso a modelli interpretativi essenzialmente scientifici, che esprimono una conoscenza previsionale assunta a base della razionalità della discussione politica, è preso a garanzia dell'imparzialità socio-economica delle indicazioni del piano fisico.

La pianificazione fisica è diretta alla creazione di assetti d'uso del suolo appropriati, cioè all'individuazione delle localizzazioni ecologicamente ottimali rispetto agli equilibri con i processi naturali (si veda p.es. Cannata, 1986, 1993): essa mira ad un progressivo adattamento di strutture e processi antropici e naturali che coesistono. Questi sono oggi del tutto interconnessi, e l'insieme è *un sistema complesso*. Alla complessità del sistema, intesa come "complessità organizzata", può essere opposto solo un approccio che si faccia esplicitamente carico degli aspetti sistemici, e ricorra a schemi integrati di modellazione dei processi umani e naturali (Couclelis, 2000), facendone uso per costruire *narratives* del futuro possibile (Kay, cit.).

La complessità del contesto si manifesta nell'atto di prendere decisioni:

- sulla localizzazione di attività - che richiedono una stima del consumo di risorse, compatibilmente con i vincoli, e una valutazione dei costi e dei benefici *sensu lato* (localizzazione ottimale);
- sulle azioni da far seguire ad effetti prevedibili (rischi naturali, rischi industriali, impatti ambientali) da mitigare;
- sulla gestione delle esternalità conseguenti a date azioni dell'uomo;
- sullo sfruttamento (o la tutela), e sulle modalità di gestione delle risorse naturali dopo averle valutate (in termini di forma, qualità, quantità, disponibilità, capacità di carico degli ecosistemi e delle risorse...).

In questi casi, la pianificazione fisica ha il mandato di promuovere o attivare l'adattamento e l'integrazione di processi della società umana con processi naturali.

Accettato il ruolo del pianificatore come "regolatore" in un sistema complesso (Couclelis, 1984; Couclelis e Liu, 2000), si richiede un sistema di controllo adeguato (monitoraggi e modellistica

previsionale, *sensu lato*): la pianificazione fisica *parte dall'analisi* come unica condizione della sua razionalità; l'analisi necessariamente si colloca a monte delle scelte, condizionandole in una maniera non trascurabile.

I piani strategici possono invece agire sugli assetti socio-economici esistenti, e tentare di modificarli in nome di obiettivi di vario genere (Mazza, 1987), come la competitività insediativa, l'equità, la qualità della vita urbana. Le loro sono essenzialmente scelte politiche. Mazza (*ibid.*) argomenta che in questa pianificazione l'analisi non può essere *alla base* del piano, ma necessariamente segue (corroborata) determinate ipotesi di scenario. Secondo l'Autore, un processo di piano è descrivibile in termini degli elementi di analisi (inventari o resoconti), diagnosi (definizioni o riconoscimenti), prognosi (politiche formali) e del programma di intervento (politiche reali): e *“nella pratica dei piani gli elementi realistici che li compongono, quando sono presenti e riconoscibili, si connotano, di massima, indipendentemente gli uni dagli altri. In altre parole, la loro identità, se è data, non è definita in quanto anello della concatenazione formulata dal paradigma storico. [...Essi] sono innanzitutto elementi autonomi, la cui concatenazione in un modello del tipo razional-comprendente è possibile, ma non necessaria per dare loro identità”* (*ibid.*).

Da questa interpretazione deriva l'indipendenza della giustificazione di ciascuna parte del piano: l'analisi è giustificata in termini di una sua fondatezza e credibilità scientifica; la diagnosi e la prognosi possono invece essere validate solo in base al giudizio che se ne può dare *“in termini di significatività politica e di realtà e credibilità tecnica”* (*ibid.*).

Anche in termini logici e temporali, la diagnosi non *produce* una politica formale, ma piuttosto trae giustificazione dalla sua capacità di diventare un *“programma politico di governo”* (*ibid.*).

In definitiva, il legame fra l'analisi e il piano è genericamente negato, salvo ripresentarsi in termini invertiti per cui il piano, sotto certe circostanze, richiede una sua giustificazione *a posteriori*, per il fatto di avere scelto, fra i tanti problemi che la realtà – interrogata – può esibire, quelli particolari che assumono in un contesto rilevanza politica. In tal caso, la giustificazione viene ricercata nelle analisi, il che nega radicalmente un processo di *inferenza* delle politiche dall'analisi.

La pianificazione strategica, anzi, spesso ha mostrato di essere pesantemente penalizzata, nel produrre innovazioni, ogni volta che si è cercato di dare vincoli “scientifici” all'analisi, come denunciato da alcuni autori (p.es. Mintzberg, 1994; trad. it. nostra: *“poiché analisi non è sintesi, la pianificazione strategica non è la formazione delle strategie[...] non c'è livello di elaborazione in grado di rendere le procedure formali capaci di creare strategie innovative. In definitiva, il termine pianificazione strategica ha dimostrato di essere un ossimoro”*).

Il nuovo quadro istituzionale deve soddisfare l'urgenza di un contesto autonomo di riconoscimento dei vincoli ambientali, da individuare su base analitica di tipo scientifico, e quindi con il contributo essenziale di *expertise* specialistica, e non con decisioni e scelte di campo *a priori* del *planner*. Nemmeno nel caso della pianificazione fisica, tuttavia, l'analisi configura una procedura di *decision making* automatica: l'osservazione del territorio è – in quanto osservazione scientifica – carica di teoria (Duhem, 1906), e dunque il progetto non può mai essere neutrale rispetto alla personale lettura compiuta dall'analista.

Non si può pensare perciò di utilizzare il contesto della pianificazione fisica per la produzione di soluzioni tecnocratiche (“dall'alto”): in esso, piuttosto, le valutazioni scientifiche servono a ricondurre ad una razionalità comunicativa la discussione pubblica sui problemi individuati e la ricerca, all'altro livello di pianificazione, di strategie che li contemperino con le istanze di sviluppo socioeconomico della comunità. La conoscenza delle risorse naturali e dell'ambiente produce un quadro di riferimento

entro cui costruire prospettive strategiche, a partire dall'accettazione di vincoli sovraordinati sull'uso delle risorse.

Che il modello della pianificazione ai due livelli – fisico e strategico- porti fino in fondo questa corrispondenza fra conoscenza razionale del territorio e formazione comunicativa (“partecipativa”) delle decisioni, è ancora da verificare (si vedano al proposito King e Kraemer, 1993). Ci sembra tuttavia che esso rappresenti una buona ipotesi di lavoro per una ricerca delle modalità con le quali la conoscenza scientifica e la previsione del comportamento dei sistemi ambientali possano e debbano essere importate nel processo decisionale.

Progettualità baconiana e pervasività della domanda di conoscenza dell'ambiente

Dematteis (1995) pone il problema se esista una progettualità geografica, ovvero se sia possibile tradurre le conoscenze scientifiche direttamente in tecniche di progettazione territoriale. A tal fine, l'Autore distingue fra una “*geografia “normale”, che si limita a registrare lo stato delle cose e le conseguenze di decisioni già prese*”, e lo sguardo intrinsecamente progettuale della geografia che rappresenta “*ciò che di nuovo sta emergendo dal territorio e su cui si può realisticamente intervenire in date circostanze per imprimere eventualmente ai processi in atto una direzione piuttosto che un'altra.*”(ibid.)

Per agire come corretta base di discussione delle scelte, il piano fisico deve produrre una classificazione, concretizzata in una mappa, delle limitazioni, e per converso delle “possibilità” e “opportunità”, di uso del territorio. La produzione di una mappa dovrebbe informarsi ad una geografia progettuale come detto. Individuare zone a differenti proprietà, caratterizzando le strutture e i processi del *paesaggio*²³, possiede però già un germe di *progettualità baconiana*, che fonda sulla comprensione della natura la capacità dell'uomo di valorizzarla in termini appropriati; e proietta dall'ambito strettamente fisico verso la pianificazione strategica, cui importa la costruzione di una immagine possibile del territorio, cogliendo le opportunità da esso offerte.

In tal senso – e solo in tal senso- si può dire che la pianificazione strategica trae spunto dall'analisi, in un processo di induzione delle soluzioni progettuali.

Le forme del territorio, in questo caso, non sono più solo oggetto di studio scientifico, ma diventano condensatrici di attenzione, creatrici di materiale simbolico con cui esprimere i vari obiettivi della società.

La pianificazione strategica ha la possibilità di recepire i vincoli dati dalla pianificazione fisica non come semplici limitazioni ad istanze di per sé antagoniste ai processi tutelati da questi vincoli, ma come suggerimenti di nuovi *spatial concepts* (Zonneveld, 1991) che aiutano a pervenire ad una progettazione di strutture del territorio efficaci ed efficienti nell'uso delle risorse naturali.

La lezione di McHarg, circa il ruolo della scienza e del “metodo ecologico” nel progettare, rimane di incontestabile attualità: l'apprendimento dei meccanismi del sistema ambientale è la chiave di reinterpretazione del territorio. All'idea della città e del territorio sostenibili si associa un paradigma del “progettare con la natura” che, dalle analisi della pianificazione fisica, gradualmente si estende come spunto creativo alla pianificazione strategica (si veda a tal proposito McHarg, 1969).

²³ Il paesaggio è divenuto un livello di analisi essenziale nella pianificazione fisica: l'ecologia del paesaggio (Troll, 1939) si occupa degli aspetti di coesistenza e co-organizzazione spaziale dei processi naturali, e può quindi essere identificata con lo studio dei sistemi di ecosistemi (Ingegnoli, 1993). L'argomento, che richiede una disamina più ampia, è qui semplicemente accennato, trascendendo i limiti del discorso in questione. Si rinvia al capitolo 5 per qualche ulteriore spunto al riguardo.

Ai due livelli della pianificazione emerge dunque un rapporto diverso tra analisi e decisione, che rivela aspetti complessi ma che consente una migrazione delle idee: grazie a questa dialettica di analisi e progettazione, fra i due livelli di piano si verifica una *contaminatio* che risulta in una diffusione capillare delle istanze di conoscenza scientifica dell'ambiente per il controllo della sostenibilità delle azioni di piano.

L'uso dell'analisi delle risorse naturali nella pianificazione territoriale ha consentito di creare spazio per nuovi paradigmi di tecnica urbanistica: per esempio, oggi è in crescente sviluppo l'impiego di metodi di ecologia urbana nella redazione dei piani provinciali e comunali, strumenti a vocazione eminentemente strategica (Alberti *et al.*, 1994). La sottoscrizione della Carta di Aalborg (ICLEI, 1994) per l'implementazione delle Agende 21 locali da parte di molte municipalità indica l'importanza attribuita ormai in vari contesti alla comprensione del sistema fisico nel quale si colloca la città, anche per progettare un'utopia strategica innovativa. Il ruolo del piano strategico è ormai anche – *more suo* – conoscitivo.

Considerando i vincoli legati alle risorse naturali, come un dato di progetto, il piano strategico può agire progettualmente, prefigurando nuove centralità legate al soddisfacimento di complessi e diversificati bisogni emergenti (es. usi ricreativi e naturalistici, valori di pura esistenza etc.; si veda p.es. Pearce e Turner, 1989). In tal senso i due livelli della pianificazione sono sussidiari, e– attraverso una comunicazione razionale– gli obiettivi di ciascun livello possono essere temperati in una “carta unica del territorio” (p.es. Regione Emilia Romagna, 2000) che a partire dalla “libertà negativa” dei piani fisici faccia uso della propria “libertà positiva”²⁴.

3- Modalità dell'analisi scientifica e razionalità nella pianificazione ambientale

Il tramonto della fisica matematica

Anche se la pianificazione fisica ha per oggetto un dominio che tipicamente si assegna alla ricerca scientifica, lo sguardo che essa ha sui sistemi studiati non è quello del ricercatore. La pianificazione, in questo simile alla politica (p.es. Feyerabend, 1996), si interessa della definizione di ciò che deve essere, e non di ciò che è. Occorre perciò chiedersi quale tipo di conoscenza dei sistemi fisici si deve perseguire ai fini della pianificazione territoriale. Oggi è crescente la domanda di analisi quantitativa nella gestione delle risorse naturali, nella ideazione e formazione dei piani. Se il piano è la linea guida per la soluzione di un problema, che deve essere ben formulato per poter essere affrontato con tecnologie appropriate, allora i modelli della pianificazione devono assecondare un passaggio concettuale essenziale dalla oggettività scientifica, retaggio della fisica matematica, alla razionalità della valutazione basata su di essi. Emerge, nelle sue molteplici sfumature, l'esigenza di una specifica base di razionalità per la produzione di soluzioni a problemi che non possono essere risolti con logica specialistica. I modelli, e le tecniche che consentono di utilizzare i risultati di questi ultimi in termini formali nel processo di piano, servono se ed in quanto aiutano a porre la razionalità delle decisioni. Questa razionalità richiede di essere comunicativa più che strumentale (Habermas, 1981), contrapponendosi alla logica razional-comprendente (Mazza, 1987), di tipo *top-down*, che in passato ha suggestionato molta pianificazione (ad es. McLoughlin, 1969; Kent, 1964). Ogni decisione, basandosi

²⁴ La suggestione, tratta da Berlin (*Four Essays on Liberty*: Oxford Univ. Press, 1969), è dovuta a Secondini, 2000. Tesi di Dottorato di Ricerca in Georisorse e Geotecnologie, XIII ciclo, 1998-2000

su una valutazione delle conseguenze di una scelta, richiede di riferirsi a modelli interpretativi che consentano di collegare cause ed effetti.

Le scienze fisiche, cui si è guardato per molti anni come ad un paradigma unificatore in epistemologia (cfr. ad es. il fiscalismo di Neurath e Carnap; per una discussione in proposito si rinvia a Gillies, 1993), hanno percorso uno sviluppo per cui sono oggi lontano dal poter esprimere uno sguardo olistico sui sistemi oggetto del piano.

Pare evidente che ben pochi dei fenomeni possano essere rappresentati secondo la fisica matematica, nella quale si inquadrano i modelli previsionali classici delle scienze fisiche. Molti dei fatti geografici che interessano il piano sono troppo complessi per essere descritti gestibilmente mediante equazioni a derivate parziali.

Si può pensare, per esempio, ai processi geologici o biologici, quasi sempre descrivibili tutt'al più in termini statistici; ma in fondo ogni pretesa legge fisica – quando si cala nel dominio delle applicazioni – trova tante smentite nelle osservazioni, da non poter essere considerata neppure una verità pratica.

In effetti, le sole previsioni di supporto alla pianificazione compiute con successo si riferiscono a casi sperimentali, in condizioni controllate.

Il concorso di tutte le altre discipline (e oggi, in particolare, quelle biologiche e le scienze umane) non è una possibile opzione, ma un requisito necessario per conseguire una conoscenza dei fenomeni che sia effettivamente utile per la pianificazione (Coculelis, 2000; Costanza, 2000).

Si pensi ad esempio alla necessità di identificare non solo i vincoli di tipo ambientale, ma anche quelli connessi all'accettabilità sociale delle scelte, ai fini dell'ubicazione dei *locally unaccepted land uses* quali discariche, impianti a rischio industriale etc. (Lober, 1995). Non esistono più punti di vista disciplinari privilegiati, ma ogni fenomeno deve essere caratterizzato in base al metodo che empiricamente fornisce i risultati migliori in termini di previsione.

Non si può nemmeno invocare un principio di autorità, se non per singoli –ed operativamente molto limitati– aspetti settoriali, perché la conoscenza delle risorse naturali viene costruita con il concorso dialogico di tutte le scienze: *“Ogni parte della scienza è periferica, e [...] l'appello alla conoscenza degli esperti non è un argomento valido”* (Feyerabend, 1989).

La pianificazione deve poter fare buone previsioni, disinteressandosi del fatto che i modelli da essa usati siano una buona approssimazione della realtà (Beven, 1996): la conoscenza scientifica è utile non in quanto riesce a riprodurre fedelmente la struttura fine dei fenomeni, ma in quanto riesce a dare suggerimenti corretti –buone previsioni– al pianificatore.

Le scienze dell'ambiente e del territorio, concentrandosi sullo studio sempre più approfondito degli strumenti di analisi per migliorare le capacità di previsione dei fenomeni naturali, hanno prodotto modelli via via più complessi, senza preoccuparsi delle loro effettive possibilità di applicazione.

Anziché promuovere iniziative di affinamento di modelli, già inapplicabili per le eccessive richieste di informazione in ingresso, occorre ora concentrarsi sul problema di come utilizzare i modelli esistenti per sfruttare le conoscenze ordinariamente disponibili a fini di previsione.

Oggi abbiamo già virtualmente tutti gli strumenti di calcolo per il supporto alle decisioni. Il problema è di scegliere lo strumento più adeguato volta per volta, o una sintesi di più strumenti.

Si può parlare a tal proposito di un esaurimento dei problemi classici della ricerca. I nuovi orientamenti²⁵ hanno incominciato a porre al centro della ricerca il *problem solving*: sono da privilegiare progetti che consistano in dimostrazioni dell'applicabilità di metodologie, possibilmente per la soluzione di problemi sollevati direttamente dall'utente finale della tecnologia.

La dicotomia fra *science* e *technology* è resa obsoleta dalla ridondanza di metodi con i quali può essere oggi utilizzata la conoscenza: si pensi alla sovrabbondanza di software di calcolo scientifico.

²⁵ Quali ad esempio sono sanciti dai bandi del Quinto Programma Quadro dell'Unione Europea sulla ricerca scientifica e tecnologica, 1999-2004.

Conseguentemente emergono istanze di integrazione delle tecnologie esistenti, anziché di nuovo sviluppo.

Si deve contrapporre al *model making* una sperimentazione di nuove soluzioni ai problemi attraverso l'integrazione dei saperi e l'esplorazione delle sinergie nell'interpretazione, modellazione e previsione dei fenomeni.

Si deve compiere un passaggio dalla teoria (intendendo con ciò la ricerca nelle scienze applicate che ha prodotto tecnologie al di fuori del contesto in cui esse dovevano essere impiegate) alla pratica (il supporto alle decisioni): occorre saper descrivere e prevedere solo quegli aspetti che direttamente interessano per la pianificazione, ovvero le conseguenze aggregate, risultanti su scala necessariamente grossolana, di azioni dell'uomo, che consentono di classificare il territorio in base alle sue opportunità e limitazioni d'uso.

Il percorso seguito dalla modellistica ambientale assomiglia ai pensieri, raccontati da Italo Calvino, del signor Palomar, che lentamente passa dal fascino della deduzione al riconoscimento che i modelli devono rendersi trasparenti fino a scomparire:

La costruzione di un modello era dunque per lui un miracolo d'equilibrio tra i principi (lasciati nell'ombra) e l'esperienza (inafferrabile), ma il risultato doveva avere una consistenza molto più solida degli uni e dell'altra. In un modello ben costruito, infatti, ogni dettaglio dev'essere condizionato dagli altri, per cui tutto si tiene con assoluta coerenza [...] Per molto tempo il signor Palomar si è sforzato di raggiungere un'impassibilità e un distacco tali per cui ciò che conta è solo la serena armonia delle linee del disegno: tutte le lacerazioni e contorsioni e compressioni che la realtà umana deve subire per identificarsi al modello dovevano essere considerate accidenti momentanei e irrilevanti. Ma se per un istante egli smetteva di fissare l'armoniosa figura geometrica disegnata nel cielo dei modelli ideali, gli saltava agli occhi un paesaggio umano in cui le mostruosità e i disastri non erano affatto spariti e le linee del disegno apparivano deformate e contorte. Quel che ci voleva allora era un sottile lavoro d'aggiustamento che apportasse graduali correzioni al modello per avvicinarlo a una possibile realtà [...]. La regola del signor Palomar a poco a poco era andata cambiando: adesso gli ci voleva una gran varietà di modelli, magari trasformabili l'uno nell'altro secondo un procedimento combinatorio, per trovare quello che calzasse meglio su una realtà che a sua volta era sempre fatta di tante realtà diverse, nel tempo e nello spazio.

[...]ciò che i modelli cercano di modellare è pur sempre un sistema di potere; ma se l'efficacia del sistema si misura sulla sua invulnerabilità e capacità di durare, il modello diventa una specie di fortezza le cui spesse muraglie nascondono quello che c'è fuori. Palomar che dai poteri e contropoteri s'aspetta sempre il peggio ha finito per convincersi che ciò che conta veramente è ciò che avviene nonostante loro: la forma che la società va prendendo lentamente, silenziosamente, anonimamente, nelle abitudini, nel modo di pensare e di fare, nella scala di valori. Se le cose stanno così, il modello dei modelli vagheggiato da Palomar dovrà servire a ottenere dei modelli trasparenti, diafani, sottili come ragnatele; magari addirittura a dissolvere i modelli, anzi a dissolversi.[...] (Calvino, 1983)

Questa dissoluzione del modello apre una ferita insanabile nella sempre meno chiara linearità del processo di piano: da una parte la modellistica rivela il suo carattere mediatore e a volte mistificatorio attraverso una arbitraria compressione della realtà; dall'altra, resta ormai difficile "pronunciarsi sui rimedi", in quanto la rinuncia al modello impedisce di sincerarsi che essi non "provochino guasti ed abusi maggiori e che, se saggiamente predisposti da riformatori illuminati, possano poi essere messi in pratica senza danno dai loro successori: forse inetti, forse prevaricatori, forse inetti e prevaricatori insieme" (*ibid.*).

Concezione del territorio ed uso culturale dei modelli

L'ipotesi di lavoro che si intende proporre descrive la cartografia/classificazione del territorio come forma specifica di predizione che consente l'integrazione di modellistica e pianificazione. A quest'ultima serve infatti uno strumento che consenta, in qualche modo, di *pronunciarsi sui rimedi*, lasciando però indietro la compressione della realtà provocata dalla modellistica "forte". La diffusione di una consapevolezza delle potenzialità di analisi oggi disponibili, e quindi della necessità di acquisire i dati secondo modalità adeguate, dovrebbe favorire la razionalità complessiva dei processi di piano, sfuggendo però alla tecnocrazia della fisica matematica.

L'intelligenza artificiale – intesa qui in un senso molto ampio²⁶ – consente, rispetto alla fisica matematica, di rappresentare in termini formali (e quindi gestibili con un calcolatore) *una vasta classe di ragionamenti di tipo causa-effetto, che servono come base di predizione del comportamento di sistemi territoriali*, di modo che la possibilità di discutere le questioni di piano a partire dalla simulazione degli effetti delle diverse alternative si estende virtualmente ad ogni problema che coinvolge le risorse naturali. In questi ragionamenti la modellazione è "debole", cerca di intuire e prevedere regolarità in modo non rigido, soprattutto con l'intento di esplorare i possibili comportamenti dei sistemi territoriali.

Le regole utilizzate sono riconducibili a logiche booleane (*rule-based*: Burrough, 1996; Lober, 1995) o al *soft computing* (Zadeh, 1994).

E' già da tempo disponibile la formalizzazione di procedure che consentano di prendersi carico degli aspetti più tipici del modo di ragionare dell'uomo (*ibid.*):

- imprecisione (Zadeh, 1965, 1994);
- incertezza (ad es. Zadeh, 1994; Chung e Fabbri, 1993, 1999);
- apprendimento e procedimento intuitivo (ad es. Openshaw & Openshaw, 1997).

Il passo fondamentale che chiude una fase di modellazione e apre quella della sua discussione ai fini di prendere decisioni razionali è la *classificazione del territorio* in base al modello. Seguendo Mazza (cit.) si può dire che questo passaggio coincide, nel contesto della pianificazione strategica, con la *diagnosi*, come precedentemente osservato.

Ad oggi, sono disponibili metodologie di classificazione/diagnosi derivanti da molti e diversificati ambiti disciplinari. Esse possono essere tuttavia ricondotte, in senso del tutto generale, a tre grandi categorie:

- metodologie basate sulla conoscenza di un modello esplicito di funzionamento del sistema (p.es. le simulazioni di processi fisici, basate su modelli matematici con i quali prevedere gli effetti delle attività antropiche, o dei fenomeni naturali su di esse, o l'identificazione e valutazione di strutture a comportamento noto);
- metodologie basate sulla conoscenza dei soli fattori significativi per il funzionamento del sistema, ma non delle regole della loro interazione (p.es. classificazioni probabilistiche ai fini dell'analisi del rischio di calamità naturali);
- metodologie basate su giudizi di valore espressi a livello tecnico e giustificabili in termini razionali (p.es. giudizio d'impatto ambientale, localizzazione ottimale di determinate attività antropiche in base ad analisi multicriterio).

La caratteristica per cui la classificazione è rilevante ai fini della pianificazione è la sua spazialità, che si manifesta nella rappresentazione cartografica.

²⁶Oggi il termine pare superato, dal momento che non si desidera più, come in passato, pervenire a soluzioni automatiche – 'oggettive' – ma solo a metodi per chiarire a soggettività razionali quali sono i termini reali delle scelte. L'uso del termine è fatto quindi a puro scopo di sintesi.

Una carta geografica può essere, sotto opportune ipotesi, costruita come un modello previsionale (si vedano Chung e Fabbri, 1993, 1999): è uno strumento che restituisce la predizione di comportamento del territorio al modellista, cui spetta la scelta dei processi e delle forme da rappresentare e il riconoscimento delle relazioni tra essi, mediante l'intuizione di regolarità e concatenazioni causali²⁷. La cartografia numerica consente di inserire le mappe che rappresentano vari aspetti tematici del territorio in un ragionamento formalizzato di tipo causa-effetto, dal quale con opportuni passaggi analitici scaturiscono carte di *output*.

Queste ultime costituiscono uno strumento di predizione del comportamento del territorio rispetto ad una prefissata azione: un tipo, ogni volta concettualmente diverso, di modello previsionale.

Si allarga così la definizione di modello, da quella tradizionale di calcolo matematico venendo a comprendere tutte le logiche e le regole sintattico-semantiche che permettono la trasformazione e l'interpretazione dei sistemi formalizzati (Dematteis, cit.; De Mauro, 1982).

Se la cartografia deve essere considerata come strumento di predizione, nel quale si esplica e si mette alla prova il fondamento di razionalità del piano, è necessario dedicare una notevole attenzione alle modalità con cui si possono costruire *database* già orientati a fornire risposte specifiche a domande di previsione di conseguenze per la giustificazione delle scelte.

Nei ragionamenti formalizzati di tipo causa-effetto si fa uso dell'informazione in modo nuovo rispetto ai processi di decisione tradizionali nella pianificazione: la raccolta dei dati e le analisi devono essere svolte all'interno di un'*attitudine alla previsione del comportamento del territorio*.

L'insieme di mappe in un GIS è un modello del territorio, serve per compiere previsioni allo scopo di portare la discussione su un piano "politicamente" corretto (nel senso che ha alla sua base scelte largamente condivise basate su discussioni razionali e orientate al bene della collettività), e non deve costituire un archivio *general purpose* tipico delle logiche razional-comprehensive.

Molte rappresentazioni di quest'ultimo tipo, ancora presenti nelle analisi di molti piani, sfuggono a questo concetto e non consentono affatto di fare previsioni (anche al di là della loro affidabilità): non sono altro che visualizzazioni di oggetti cui non è associato un preciso significato. Ad esempio, in alcuni piani territoriali si riportano inventari dettagliatissimi di infrastrutture, servizi di telecomunicazione etc., che però non vengono poi utilizzati ad uno scopo previsionale (ad es. a classificare le aree sottoposte a pericolo di inquinamento elettromagnetico, o a stimare i fabbisogni idrici insoddisfatti e le misure di risparmio della risorsa).

La conoscenza e la capacità di rappresentazione del territorio è condizione della razionalità del piano, che deve dare una giustificazione delle sue scelte. Non si dà pianificazione (fisica) senza questa componente. Occorre essere in grado, se si vuole perseguire questa razionalità, di validare la mappa

²⁷ Un paradigma interessante viene dai casi di mappatura del potenziale minerario (Chung e Fabbri, 1993; Bonham Carter, 1996). In questi casi, praticamente è impossibile conoscere a priori le probabilità di occorrenza dei giacimenti minerari utili: l'unico modello possibile è quello prodotto dal giudizio di un esperto, che giudica le combinazioni dei vari tipi di dati in modo da evidenziare le aree a maggiore predisposizione per incontrare un giacimento. La descrizione dei fenomeni fisici viene condotta in modo sistematico: si raccolgono dati di tipo geofisico, geochimico, geologico... Ogni tipo di dati viene elaborato in maniera 'oggettiva', con tecniche standard che consentono a tutti gli operatori di ottenere gli stessi risultati. Tuttavia, la mappa finale che classifica il territorio in base alla *favourability* per i giacimenti minerari è diversa a seconda del peso che ogni esperto assegnerà a ciascun tipo di dato, e delle regole che egli utilizzerà per combinare i vari tipi. Il compito dell'esperto non è di individuare una procedura 'oggettiva' (il che equivarrebbe a dimostrare che esista un metodo migliore degli altri, e sempre preferibile, per combinare i dati), ma di giustificare razionalmente la scelta (sempre soggettiva) da lui compiuta. Nel contesto della mappatura del potenziale minerario, esiste un criterio molto chiaro di validazione della mappa di *favourability* prodotta dall'esperto: se nelle zone giudicate favorevoli vengono trovati giacimenti minerari, la predizione è buona, altrimenti non lo è. Chung e Fabbri (1998) sottolineano che una forma di validazione deve essere fatta anche durante il processo di modellazione e non solo a posteriori sulla base delle risultanze di nuove indagini. Questo è richiesto al fine di garantire trasparenza e consistenza al processo di modellazione.

esattamente come si validerebbe un modello di previsione “tradizionale”: controllando se le risposte che essa fornisce sono corrette, verificandole con casi noti di riferimento.

La validazione di un giudizio consiste nel riconoscere la sua capacità di tenere conto di tutti gli aspetti rilevanti ai fini della decisione, e questa capacità – nei casi complessi come le valutazioni di impatto ambientale- può essere verificata solo nel tempo. Si può in generale affermare che un giudizio è valido, quando fornisce una corretta base di discussione: quando cioè consente di pervenire a *verità pratiche*, o scelte corrette.

Quello che si configura è una modellistica “debole” che serva a mettere in forma razionale e problematica i termini dei problemi, per discuterne i rimedi.

Il modello cartografico, come ogni classificazione del territorio, è predizione, anche se i meccanismi della sua inferenza sono prevalentemente di tipo analogico e non deduttivo (Dematteis, cit.).

Alla cartografia si estende così una riflessione del pensiero scientifico sui modelli: ogni carta è una scarnificazione dei fenomeni che mira a catturarne gli aspetti essenziali nascosti sotto una coltre di combinazioni contingenti.

Tuttavia, il mondo è letto dalla geografia attraverso una riduzione cartografica (Farinelli, 1992), una proiezione fatta dal soggetto, il quale nel suo agire è “*non parte, ma presupposto dell’esistenza del mondo*” (Wittgenstein, cit. in Farinelli, *id.*), ed è quindi una *proposizione* nel senso wittgensteiniano di immagine, irrimediabilmente soggettiva, della realtà (*ibid.*; cfr. anche Heidegger, 1951).

Le regole cui si sottopone questa riduzione soggettiva del mondo nella cartografia, sempre secondo Farinelli (cit.) possono essere identificate nelle seguenti:

- la designazione è “il rappresentante” dell’oggetto: “*il suo ruolo consiste nel far coincidere alla lettera le parole con le cose, e non viceversa, nel sostituire cioè alle imprevedibili e indisciplinabili metafore del discorsivo linguaggio quotidiano le prevedibili e disciplinate corrispondenze biunivoche tra cose e parole che regolano ogni linguaggio tecnico*” (*ibid.*);
- nella riduzione ad immagine, una cosa c’è o non c’è, secondo una logica rigidamente binaria (questo, si noti, è un punto estremamente problematico che si pone ad ogni classificazione del territorio: solo – e in modo parziale- la logica *fuzzy* cerca di rimuovere l’ostacolo di costringere transizioni graduali in giudizi e confini netti);
- infine, anche in virtù delle regole precedenti, la rappresentazione cartografica rimuove ogni questione sull’essenza delle cose, riducendone l’esistenza “*a pura e semplice presenza, sprovvista di ogni ontologica risonanza*” (*ibid.*).

In tal senso, nessun modello cartografico può aspirare al realismo ontologico, ma solo ad un “realismo pratico” nel senso del “pronunciarsi sui rimedi” di cui si è detto: “*La logica simbolica cartografica è così innanzitutto la logica dell’esclusione e della rinuncia alla totale espressione del sensibile, perché cosciente, dato che la sua funzione è quella della rappresentazione, che la totalità che importa afferrare sarebbe comunque irriducibile alla giustapposizione del complesso degli elementi di cui è composto il reale, ma riguarda invece il rapporto tra questo e le coordinate [...] che presiedono alla sua interpretazione*” (*ibid.*)

La cartografia è uno dei linguaggi della rappresentazione, ma ha natura paradigmatica ed assume la pretesa di essere la lingua privilegiata del piano. Ogni linguaggio, si è visto, è una visione del mondo: è un mondo che lo spirito mette fra sé e gli oggetti (W.Humboldt, cit. in Heidegger, 1951). Secondo questo Autore, nella tecnica – che ha un vero carattere antropologico (*ibid.*) in quanto impone una autonoma concezione dell’uomo – parla una pretesa di dominio. Questo aspetto è stato potenziato enormemente con le scoperte della fisica contemporanea, che ha dimostrato come la tecnica è co-determinante del conoscere, secondo il principio di Heisenberg. In precedenza, la fisica aveva assunto punti di vista di estremo riduzionismo (cfr. Planck: è reale ciò che si lascia misurare; *ibid.*) che

affermavano l'onnipotenza del modello meccanico. Heidegger sottolinea come la volontà di dominio della tecnica opera particolarmente attraverso il linguaggio, e finisce per identificare quest'ultimo con l'informazione. La conoscenza delle risorse naturali, che deve essere incorporata nella pianificazione fisica, mostra anch'essa di trascendere i limiti della sola informazione. La definizione dell'informazione come entità numerica ha un significato solo nel momento in cui si trova un senso a questa astrazione nel collocarla all'interno del processo di produzione di decisioni.

L'informazione non è che un modo comodo, in certe circostanze, di rappresentare la conoscenza che dei fenomeni si può avere.

L'integrazione delle fasi della pianificazione in un contesto analitico e informativo prevede:

- da un lato, un'umanizzazione degli strumenti di supporto alle decisioni, che devono consentire la gestione di ragionamenti il più possibile flessibili ed aperti a contributi interdisciplinari e a diverse semantiche;
- dall'altro, uno sforzo di formulazione dei problemi in maniera "chiara e distinta" per poter mettere alla prova le diverse soluzioni possibili con metodi e valutazioni razionali.

Del primo processo sono complessivamente significativi gli sforzi per portare l'analista e il pianificatore all'uso delle tecnologie dell'informazione in modo "*user friendly*", disaccoppiando gli aspetti fino a poco tempo addietro indissolubili della formulazione del modello e della programmazione di codici di calcolo: oggi è possibile usare in modo del tutto flessibile e creativo ambienti di modellazione che non richiedono alcuna esperienza di programmazione (p.es., con diversi gradienti di generalità e a diverso livello di flessibilità, SWARM, STELLA, EcoBeaker, DESERT, MatLab, Excel).

Il secondo processo è più lento e complesso, e se ne possono vedere le avvisaglie, oltre che in alcune esperienze di pianificazione fisica recente (p.es. i piani di riassetto idrogeologico richiesti alle Autorità di Bacino dal D.L. 180/1998), nel crescente interesse per indici prestazionali – il cui cambiamento viene monitorato e usato come criterio di giudizio dell'efficacia dei piani – relativi alle varie dimensioni del sistema urbano, proposti in vari contesti (p.es. Bettini, 1996).

Gli oggetti geografici, significazione di un certo linguaggio, richiedono che esso sia considerato criticamente. Talora i linguaggi formalizzati, come quelli delle scienze fisiche, vengono prescelti perché ritenuti più "oggettivi". Tuttavia nella pianificazione territoriale spesso sono meno mistificatori linguaggi non tecnici, e del resto la crescente consapevolezza della rilevanza politica di alcune analisi scientifiche ha portato ad espliciti indirizzi, come ad es. la richiesta di sintesi non tecniche da allegare alle relazioni di impatto ambientale.

Un'indubbia potenzialità della cartografia come predizione è nel suo carattere di comunicazione grafica che, in molti contesti, non presuppone strumenti culturali superiori a quelli che gli attori condividono, per essere recepita. Pur presentando un meccanismo di riduzione della realtà e significazione, che deve essere considerato criticamente, la cartografia "parla a tutti" e si configura come un "esperanto" (Schot e Dijst, 2000).

Dobbiamo sviluppare fino in fondo il rapporto fra le metodologie analitiche e le questioni di gestione delle risorse naturali, raccogliendo con le dovute cautele l'istanza di una *computational human geography* che muova "*dalla relativa oscurità della struttura interna dei dati alla questione più generale di come gli uomini comprendono la variazione geografica*" (Goodchild, cit. in Secondini, 1998). Occorre considerare le rappresentazioni modellistiche della realtà nel loro esprimere una *riduzione cartografica* condivisibile come base di discussione razionale.

Nella nostra interpretazione, da una parte l'umanizzazione dei modelli consente di far loro esprimere proiezioni soggettive anche non specialistiche; dall'altra, l'uso allargato di concetti modellistici del territorio favorisce un atteggiamento razionale per produrre giustificazioni alle scelte, letture creative dei vincoli riconosciuti dall'analisi della pianificazione fisica, e atteggiamenti complessivamente più comunicativi (*sensu* Habermas, 1981) nella discussione politica.

Mentre l'accessibilità odierna delle tecniche di calcolo consente già di risolvere alcuni problemi molto specifici, l'*uso culturale* dei concetti che queste rendono disponibili può essere di importanza ancora maggiore.

A tutt'oggi esiste un imbarazzo di fronte ai modelli, che contrasta il loro largo impiego nel supporto alle decisioni. L'innovazione tecnologica e i nuovi strumenti di analisi oggi largamente disponibili hanno invece la potenzialità di indurre una modifica profonda nel processo di piano: anche se è praticamente importante che la modellazione di un fenomeno sia effettuata da un operatore esperto, è attraente l'idea di portare i progettisti (che quasi mai sono esperti di modellistica, per quanto ne facciano necessariamente uso) e gli utenti del piano (amministratori e pubblico) a "giocare" con i modelli: *"La visualizzazione al computer ha sostituito le avanzate capacità di riconoscimento delle strutture possedute dal complesso occhio-cervello dell'uomo, per molti aspetti del lavoro deduttivo che caratterizza l'analisi scientifica tradizionale. [Le innovazioni tecnologiche] mirano a rendere la modellistica più facile, più largamente utilizzabile, e più partecipe del carattere di impresa collaborativi di quanto avesse mai potuto essere nell'approccio tradizionale"* (Coucletis, 2000; tr.it. nostra).

Occorre procedere ad una "mitigazione" dei modelli e ad un loro addomesticamento per l'uso nei ragionamenti quotidiani, senza perdere in capacità di interpretazione razionale dei fenomeni. In questo modo, si può praticare l'esplorazione di nuove possibilità di gestione e utilizzo del territorio.

La pianificazione può fare uso proficuo dei modelli vedendoli come "mondi artificiali" che funzionano con loro proprie regole, imposte dal modellista sulla base dell'osservazione del reale.

Questa proprietà prefigura strumenti estremamente flessibili, con i quali il pianificatore può simulare gli scenari che potrebbero discendere da diverse scelte progettuali (Besussi, 1997). La messa a punto di un modello nella pianificazione ha lo scopo fondamentale di "vedere che cosa può succedere", il che presuppone un atteggiamento politico, come si è detto, e non tecnocratico:

"Costruire/creare un mondo artificiale, artificializzare, significa definire della relazioni tra ciò che già si sa e ciò che si vuole conoscere, e questa attività non può non essere sottoposta a continue e recursive riflessioni sul senso del passaggio da una lingua ad un'altra. E' l'apertura di un dialogo tra soggetti differenti. In questo senso i mondi artificiali si candidano ad essere una potenziale arena cognitiva-comunicativa tra più soggetti". (ibid.)

Se l'esplorazione è facilitata da tecnologie avanzate, che alterano il modo stesso di costruire i modelli (Coucletis, 2000), occorre non sottovalutare le difficoltà in ordine agli aspetti cognitivi, di *interpretabilità* e *utilizzabilità* dei risultati come base di discussione.

Il ragionamento geografico, definito di "inferenza analogica" nei termini visti, si basa innanzitutto sulla definizione – e la conseguente delimitazione di validità- di una corrispondenza fra modello e realtà. Questa corrispondenza viene istituita nella forma dell'*abduzione* (Peirce, 1980, cit. in Besussi, *id.*; cfr. anche Eco, 1980, e Dematteis, 1995), ovvero un processo di intuizione creativa.

L'opposizione prima delineata fra i modelli della fisica matematica, "forti", e una classe sfumata di "ragionamenti formalizzati", modelli "deboli", rivela due punti di vista fra i quali si muove la ricerca sulla pianificazione: da un lato, il controllo del sistema attraverso una sua descrizione quantitativa che aderisce ad un'idea di pianificazione positivista/tecnocratica (Besussi, *id.*); dall'altro, il procedere per metafore, analogie ed estrapolazioni qualitative che sfruttano le somiglianze formali o di processo fra diversi sistemi. Quest'ultimo modo della ricerca è meno atipico di quanto non si sia portati a credere, anche nelle scienze fisiche più *hard*. Si rinvia a Boyd e Kuhn, 1983, per ulteriori approfondimenti.

La dialettica fra i due punti di vista della fisica matematica e della cartografia rivela aspetti di notevole ricchezza intellettuale e complessità, che aiutano a porre una discussione, quanto mai aperta e vivace, sul supporto alle decisioni.

I ragionamenti formalizzati sono più generali e flessibili della ristretta sottoclasse delle equazioni della fisica matematica, le quali possono essere impiegate solo in pochi casi particolari. Tuttavia, essi sono ancora una approssimazione parziale del corretto modo di argomentare della pianificazione: in primo luogo, le tecniche formali di *problem solving* e di supporto alle decisioni richiedono di avere chiarito esattamente tutti i termini del problema. Questo non sempre è possibile nel caso delle risorse naturali. Che cos'è esattamente, ad esempio, un impatto ambientale?

Inoltre, la valutazione formale deve essere condizionata da criteri prudenziali (essenzialmente fondati su considerazioni etiche: ad esempio la conservazione dello stock per le generazioni future- cfr. Bartolommei, 1995; Rawls 1971) in presenza di informazione che risulta sempre insufficiente per la previsione, e che quindi genera sempre incertezze.

Oggi sono disponibili tecniche formali di giudizio (quelle appartenenti alla famiglia della *multicriteria analysis*, basate su logiche “tradizionali” (p.es. VanHerwijnen, 1999) o fuzzy (p.es. Munda, 1995)) che talora sono pensate e presentate come alternativa alla discussione democratica. E' però soprattutto il ragionamento associato alla discussione sui fenomeni, e l'uso corretto (interdisciplinare e non in forma chiusa) della loro conoscenza, al di là dei fatti algoritmici, a configurare una razionalità del piano.

Il motivo fondamentale per cui si fa uso degli strumenti di analisi e supporto alle decisioni è il miglioramento dei processi decisionali, e non direttamente la ricerca di una soluzione, nello stesso modo in cui la funzione delle valutazioni di impatto ambientale non è tanto nel valutare gli impatti di per sé, quanto nel migliorare la qualità delle decisioni (Ortolano e Sheperd, 1995).

In tutti i casi in cui si ricorre a “procedure”, è fondamentale riconoscere l'importanza del processo politico/discorsivo che affianca i ragionamenti tecnici degli analisti (*ibid.*). Mentre è teoricamente disponibile qualche metodo per la simulazione di quasi tutti i fenomeni fisici, resta il problema di come fare della simulazione un uso effettivamente vantaggioso per migliorare i piani.

Nessuna previsione effettuata in modo esclusivamente tecnocratico e “dall'alto” ha molte possibilità di essere recepita come indicazione di partenza su cui progettare e discutere scenari di trasformazione del territorio.

Queste considerazioni chiedono di rivedere il concetto stesso di previsione, nel senso che “*fare una buona previsione significa sondare i confini delle possibilità e valutarne le probabilità nell'ambito del fattibile*” (Couclelis, 1997, cit. in Besussi, *id.*).

Si sottolinea che razionalità ed oggettività di un modello sono due aspetti completamente differenti. La ricerca si è a lungo concentrata sulla proprietà di oggettività dei metodi di analisi. È ormai chiaro che una oggettività è in molti casi non solo impossibile, ma neppure desiderabile. Ad esempio, la mappatura dei fattori di rischio da calamità naturali si appoggia ad un giudizio razionale, ma soggettivo, dell'esperto. Il ricorso a tecniche puramente oggettive (ovvero univocamente individuate e ripetibili con lo stesso risultato indipendentemente dall'operatore) non consente di inglobare nella mappa tutte le indicazioni che sarebbero presenti nel rilievo di un buon esperto.

E' innanzitutto la sua capacità di selezionare e riprodurre nel *database* le caratteristiche effettivamente significative per un fenomeno, a conferire razionalità al modello. Con le analisi quantitative, tuttavia, l'esperto consegue indicazioni su quali fattori effettivamente spiegano i fenomeni, e verifica la bontà del modello concettuale che sta dietro alla mappa che produce.

Gli oggetti osservati vengono collocati in relazione al territorio: sono sempre frutto di una rappresentazione. Non sempre si ha a che fare con oggetti chiari e distinti, che possano contare su secoli di definizioni e approfondimenti metodologici delle discipline che li indagano. Se questa proprietà è vera nel caso delle scienze naturali, oggi assumono rilevanza ai fini del piano rappresentazioni di oggetti “non scientifici” (p.es. Kliskey, 1998; Hunziker e Kienast, 1999), che pure devono essere incluse nella base di razionalità del piano. Ma anche nei casi in cui la rappresentazione è meno problematica, poggiando su una riflessione teorica ed una assimilazione culturale più lunga, non ci si può dimenticare che gli stessi oggetti rivestono diverse caratteristiche, a seconda delle applicazioni per cui sono considerati (ora punti, ora poligoni, ora reti, ora oggetti non euclidei...).

L'analisi del luogo nella pianificazione deve lasciare spazio all'espressione del pubblico e all'inglobamento di saperi non scientifici (ad esempio, il quadro di indici di qualità di Seattle include grandezze poco “accademiche”, come il numero di salmoni nei corsi d'acqua - si veda Bettini, 1996). Il grado di partecipazione del pubblico e la capacità di integrare i suoi “saperi” non scientifici sono due buoni indicatori del carattere “partecipabile” del piano: della capacità di distaccarsi dal governo tecnocratico dei fatti fisici per valorizzare la discussione e la condivisione delle scelte nelle comunità locali.

La diffusione di un paradigma unificatore come quello dei GIS dovrebbe essere affrontata con la consapevolezza di non imporre in ogni *problem solving* un nuovo formalismo metodologico, ma di creare un contenitore semivuoto, nel quale i concetti a priori veramente rilevanti sono pochi e molto generali. I GIS, infatti, producono mappe, e accettano quindi procedure qualunque di analisi, purché i risultati possano essere rappresentati, ed abbiano rilevanza operativa, sotto forma di mappa. I modelli oggi sono del tutto generali, e devono essere definiti e precisati di volta in volta sia nelle assunzioni teoriche (ontologia, regole di comportamento o “fisica”, struttura spaziale e logica del modello, secondo Smyth, 1998 – cit. in Couclelis e Liu, 2000), sia nella definizione computazionale. In prospettiva, si può dire che i GIS hanno un potenziale di generalizzazione delle funzioni di modello, che non deve essere imbrigliato in formalizzazioni troppo strette, dal momento che veramente i GIS consentono di attuare la modellistica nella sua natura più generale di “*cornice nella quale organizzare la conoscenza*” (Couclelis, 2000).

Feyerabend, in *Contro il Metodo* (1975), ha mostrato che il procedere in modo scientifico è in realtà una pesantissima limitazione alle innovazioni. La pianificazione, come processo di governo delle innovazioni, non può sposare una metodologia rigorosamente codificata, e quindi non può adottare un gergo esclusivamente tecnico. Molte analisi di contesti aziendali o di fasi di sviluppo economico mettono in luce il ruolo giocato dal pensiero laterale nel produrre innovazioni (De Bono, 1967). Si può ipotizzare che nella pianificazione l'uso eclettico e a volte, al limite, superficiale, di certi molto seri concetti scientifici possa produrre innovazioni e risultati di grande interesse.

Il progresso nasce, come da varie parti sottolineato, da concezioni “aperte” del mondo, nelle quali la conoscenza non è mai unitaria. E' piuttosto una conoscenza disarmonica, che privilegia un mondo polimorfo e polisemico, lungi dal ricondurre ad un unico modello la realtà. Essa rifugge ogni concezione del mondo (Feyerabend, 1996). In passato, la scienza è stata assunta da molti come il metodo privilegiato di analisi del mondo, “per la sua straordinaria capacità di produrre risultati” (ibid.). Il pericolo che si corre accettando questo punto di vista è che la realtà sia vista attraverso le leggi che si suppone valgano nel governarla, e devono essere sempre verificate. Invece, la pianificazione ha

bisogno di un sapere che affermi, con Aristotele (seguendo ancora Feyerabend, 1989), che “naturale è ciò che si verifica sempre, o *quasi* sempre”.

La miscela di apporti connotati – anche linguisticamente- da discipline diverse garantisce una elevata diversità – e quindi informazione (*sensu* Shannon, 1948) al contesto, consentendo occasioni notevoli di creatività. Questa esigenza di pluralismo nella pianificazione introduce ad un altro problema sollevato da Feyerabend (1989; 1996): l'importanza che i concetti e le idee che si usano siano dotati di “autoprotezione” dall'abuso che ne potrebbe essere fatto, e quindi di punti di vista espressi insieme alla delimitazione della loro validità. Occorre in particolare provvedere ad una pianificazione autoprotetta dall'abuso dei suoi contenuti “scientifici”. Le tecniche di rappresentazione del territorio possono fare uso di punti di vista specialistici, ma la decisione sul territorio non può mai essere giustificata da una prospettiva che si astragga dal contesto della razionalità comunicativa: “*La critica democratica della scienza appartiene alla natura stessa della conoscenza*” (Feyerabend, 1996). La teoria ha spesso una funzione di orientamento della pratica, ma è pericoloso cedere alla tentazione di ritenere che la pratica debba discendere dalla teoria (*ibid.*; cfr. anche Beven, 1996). Se la conoscenza del territorio deve essere la base della pianificazione fisica, occorre allora seguire una teoria scientifica nella prassi di piano, ma una teoria scientifica *filosoficamente sofisticata* (Feyerabend, 1989) che consenta di porre un fondamento epistemologico ed etico adeguato a questa base. Il fondamento etico ha a che fare con le indicazioni circa sostenibilità, pari opportunità, libertà ecc. consentite dal piano. Il fondamento epistemologico individua i limiti e l'affidabilità dei modelli (*sensu lato*) utilizzati e delle politiche che ne possono essere influenzate. In particolare, occorre ricordare che il risultato è il criterio ultimo di valutazione di una decisione, e che molte scelte sono determinate sia dalla guida di un fondamento teorico, sia da quella che Polanyi (cit. in Feyerabend, 1996) definisce “conoscenza tacita”. Il ruolo che la conoscenza dell'ambiente e del territorio nella pianificazione dovrebbe assumere sempre di più è quello di rendere le scelte ben fondate sotto questi due aspetti prevenendo esiti machiavellici della valutazione.

4- La tragedia dell'informazione

Negli anni più recenti, si è assistito in Italia ad un movimento quasi paradossale:

- da una parte, sempre più diffusi appaiono i sistemi informativi geografici nella gestione ordinaria del territorio;
- dall'altra, le misure volte alla conoscenza del territorio e dell'ambiente non solo non sono state sviluppate di pari passo, ma addirittura hanno perso quella accessibilità che, almeno per alcune componenti del sistema ambientale, era garantita fino ad anni recenti (si pensi alla scomparsa degli *Annali Idrologici*, pubblicati fino a pochi anni or sono).

Generalmente si è osservata una più o meno marcata perdita di conoscenze e di capacità di controllo sul territorio, che solo lentamente viene recuperata in questi anni.

Occorre anche osservare che i dati richiesti da nuove esigenze conoscitive (per esempio i dati di qualità delle acque, dopo la L. 319/76, o dell'aria, dopo i decreti sull'inquinamento atmosferico del 1983 e del 1988) non sono stati acquisiti sistematicamente da strutture *ad hoc* – in un contesto di decentramento amministrativo non di rado caotico, dopo la L. 616/77 – come invece era accaduto con i Servizi Idrografico e Geologico in epoca precedente.

Oggi i livelli locali di pianificazione dispongono in genere di dati frammentari e incompleti.

L'accentuarsi dei pericoli da calamità naturali, in questi ultimi decenni, non è che una spia del consumo di risorsa-territorio che si è protratto con ritmi follemente accelerati, in assenza di una conoscenza approfondita e di valutazioni serie a supporto delle decisioni sull'ambiente.

Il chiaro indirizzo all'acquisizione di un quadro conoscitivo ambientale di dettaglio, oggi generalmente recepito, non ha ancora avuto modo di dare i suoi frutti.

Non di rado, poi, si verifica che gli Enti di controllo ambientale e gestione territoriale predispongano costose reti di telemisura, che però non sono quasi mai in grado di fornire i dati per i quali sono state progettate, a causa delle grandi difficoltà di manutenzione e gestione. Lo stato normale della risposta da una rete di misure sembra essere quello di *“dato non disponibile”* (Marletto, 1999: comunicazione personale).

Se in linea di principio è possibile concepire sistemi di acquisizione delle informazioni spaziali molto sofisticati, il funzionamento operativo di questi sistemi richiede una organizzazione, una specializzazione del personale, una disponibilità finanziaria e una *forma mentis* del gestore che difficilmente si incontra nella maggior parte degli Enti preposti alla raccolta ed elaborazione di dati sull'ambiente.

Alla penuria di produzione dei dati, si deve purtroppo affiancare l'ulteriore difficoltà della loro circolazione: per quanto, anche a termini di legge, le informazioni sull'ambiente debbano essere pubbliche, oggi molti Enti scaricano sugli utilizzatori dei dati una parte dei costi sostenuti (anche a spese pubbliche) per acquisirli, provocando una barriera all'accesso all'informazione.

Questo fenomeno è stato chiamato *“tragedy of the information commons”* (Onsrud, 1996) in analogia con la celebre analisi di Hardin (1968) sui beni senza mercato: se un ente pubblico impone un costo per la fornitura dei propri dati, progressivamente tutti gli altri enti pubblici che hanno a che fare con esso tenderanno ad imporre le loro tariffe, con il risultato che la circolazione di dati, e con essa lo sviluppo della conoscenza e del controllo sull'ambiente, andrà incontro ad una drastica diminuzione.

E' superfluo sottolineare che un siffatto fenomeno rappresenta il frutto di uno dei grandi errori commessi dalla pubblica amministrazione, non solo in Italia, con l'obiettivo di *“aziendalizzare”* la struttura e le prestazioni di quelli che sono intrinsecamente servizi pubblici (Onsrud, op. cit.).

Il danno non è solo espresso da una riduzione delle possibilità di sviluppo della conoscenza, ma anche dalla limitazione ai controlli democratici sulle scelte di piano: se non tutti hanno accesso ai dati, allora è molto più difficile portare la conoscenza alla base delle discussioni.

Tuttavia, non è solo di mancanza di dati che la gestione dell'ambiente e del territorio in Italia soffre, ma anche del modo in cui essi vengono utilizzati.

A tutti i livelli della pianificazione, si nota ancora una ben scarsa consapevolezza delle potenzialità dell'analisi spaziale e della modellistica di previsione per l'amministrazione ordinaria del territorio.

Le analisi scientifiche sono spesso pensate come un vezzo accademico, che solo in poche circostanze, e per motivi specifici e circoscritti, può trovare applicazioni pratiche.

Gli Enti solitamente non possiedono banche di dati progettate appositamente per rendere utilizzabile l'informazione ambientale nei sistemi di supporto alle decisioni.

I dati vengono accumulati quasi sempre come una ricchezza in sé, spesso senza sottoporli ad analisi di accuratezza, e quindi perdendo il controllo sugli errori ad essi associati: in questo modo vengono prodotte rappresentazioni della realtà (grafici, mappe di interpolazione, sintesi di dati etc.) sulla cui affidabilità e significatività nessuno ha fatto valutazioni.

Una causa rilevante di questa situazione è da ravvisare nella difficile comunicazione fra tecnici e pianificatori di diverse estrazioni, che intralcia la gestione di fenomeni ambientali che richiederebbero un approccio interdisciplinare. Alcune discipline sono in grado di dare indicazioni sulla base di dati, ma non entrano nel merito del modo nel quale questi sono stati acquisiti (è ad esempio tipico di molte scuole di ingegneria ambientale il trascurare l'argomento delle analisi chimiche e biologiche per concentrarsi sul dimensionamento degli impianti di depurazione *date* le grandezze di progetto – si pensi che nel corso di laurea in ingegneria per l'ambiente e il territorio di molte sedi universitarie non sono previsti insegnamenti di laboratorio).

Viceversa, altre discipline forniscono gli strumenti per l'analisi dei dati, ma spesso secondo protocolli che finora hanno incontrato difficoltà a diffondersi (un esempio significativo è quello della geostatistica, che finora è usata più a livello di ricerca scientifica – come una specie di “curiosità” – che non per la pratica corrente della cartografia).

Su queste basi, poco o nulla si può ricavare per indirizzare la pianificazione. Questo è tanto più grave quando le scelte sono conflittuali e ad una scelta sbagliata è associato un costo non trascurabile.

Sarebbe invece necessario che si effettuassero misure e controlli avendo già in mente che tipo di utilizzo verrà fatto del dato per simulare e prevedere il comportamento del territorio.

Le osservazioni che si raccolgono dovrebbero, in altri termini, obbedire ad una teoria o ad un paradigma di funzionamento dei sistemi territoriali, secondo relazioni matematiche delle quali dobbiamo stimare i parametri, ma supponiamo di conoscere la struttura generale.

Chiaramente, il procedimento è interattivo, nel senso che la registrazione delle osservazioni può indurci a modificare le nostre ipotesi: se non possiamo indulgere, oggi, a teorie in forma chiusa, sul modello del metodo scientifico classico (troppo schematico, nella sua ciclicità di osservazione-teoria-verifica, per la comprensione dei sistemi ambientali), è però importante abbandonare lo sguardo *naïf* sul territorio che ci caratterizza.

La modellazione si distingue dalla più tradizionale rappresentazione per una consapevolezza che i dati sono sempre troppo pochi, e che è necessario approfondire le analisi con il solo criterio di essere ragionevolmente certi che la nostra conoscenza produrrà indicazioni corrette sulle conseguenze di azioni date.

E' necessario uno schema concettuale condiviso, per far sì che l'acquisizione dei dati, la costruzione dei database e la conoscenza a priori possano essere utilizzati per dare indicazioni serie alla pianificazione. Queste indicazioni si concretizzano come predizioni sul comportamento del territorio, e le predizioni devono essere accompagnate dalla dichiarazione delle ipotesi che le sottendono, e dei limiti della loro affidabilità.

Da alcuni anni si sta parlando di un sistema informativo nazionale sull'ambiente (SINA) che renda possibile la circolazione di tutte le informazioni ambientali disponibili presso i vari enti che si occupano di misurazioni e raccolta dei dati (Dosi,1998).

Il progetto, ambizioso e nato in connessione con quello, pure assai ambizioso, della rete di informazione ambientale europea (EIONet), è ancora ai primi livelli di attuazione, e, nonostante siano trascorsi già oltre dieci anni dalla sua ideazione, molto tempo sarà necessario prima che esso possa essere pienamente operativo.

Il Sistema informativo e di monitoraggio ambientale nasce come area di programma nella legge finanziaria 1988, con l'obiettivo di creare uno strumento finalizzato alla circolazione dell'informazione sullo stato dell'ambiente e la tutela delle aree a rischio mediante il coordinamento degli enti interessati. Viene allora realizzato il modulo centrale, e vengono contestualmente fornite le prime indicazioni sui protocolli di comunicazione dei dati dalle reti di monitoraggio in fase di attuazione.

Nel successivo piano triennale di tutela ambientale(1989-91) il SINA appare come Programma Operativo a valenza trasversale rispetto agli altri piani operativi orientati ai singoli aspetti ambientali della pianificazione centrale. Il programma è organizzato in azioni di realizzazione, integrazione e sviluppo dei sistemi informativi e delle reti di monitoraggio per Regioni, Amministrazione centrale ed enti pubblici, nonché potenziamento del modulo centrale.

Si prefigura così un sistema informativo in cui i dati acquisiti con le reti di monitoraggio confluiscono a nodi regionali, e da lì al livello centrale. Le reti di monitoraggio hanno il compito di accertare la consistenza e le dinamiche dei “fattori di stato” dell'ambiente, seguendo così anche gli effetti indotti dalle politiche adottate. Vengono definite le regole per la gestione del flusso di informazioni sullo stato

dell'ambiente, mentre non si danno standard adeguati per consentire un controllo dei "fattori di pressione".

I fattori di pressione sono fra l'altro riconosciuti dal SINA come dato proveniente da altri Enti (ISTAT, INPS...) rispetto alle Amministrazioni Regionali e locali responsabili delle reti di monitoraggio (Dosi, op.cit.).

Non è previsto invece nessun controllo esplicito dei "fattori di risposta", cioè della reazione alle contromisure a difesa dall'inquinamento.

La struttura di questo primo momento di sviluppo appare quindi fortemente centripeta, con "ritorni" verso le Regioni di informazione elaborata, previsti solo in linea teorica dal Modulo Centrale.

Il piano triennale di tutela ambientale 1994-96 distingue aree territoriali programmate e settori d'intervento, fra i quali si colloca il SINA, definito fra le 'azioni strumentali per l'ambiente'. Anche se non vi sono sostanziali modifiche nella visione architeturale del sistema, compaiono fra le iniziative i Progetti Interregionali, gestiti da gruppi di Regioni, i cui risultati saranno eventualmente da estendere alle altre Regioni e fatti propri dal SINA.

Compaiono quindi le premesse operative per un ripensamento dell'architettura del sistema in senso meno centripeta e maggiormente distribuito fra i nodi regionali della gestione delle informazioni ambientali. L'istituzione dell'Agenzia Nazionale di Protezione dell'Ambiente (ANPA), nel 1994, è seguita dall'attribuzione a quest'ultima delle competenze sul SINA.

Accanto all'ANPA, la strutturazione delle agenzie regionali di prevenzione e ambiente (ARPA) prefigura la necessità di definire metodologie di valutazione ed acquisire conoscenze in merito allo stato dell'ambiente per poter esercitare ruoli di supporto e di orientamento per i responsabili delle decisioni amministrative. Risulta naturale quindi che quasi tutte le regioni si orientino per attribuire alla propria Agenzia le competenze sull'informazione ambientale.

A questa nuova configurazione non risponde più il progetto architeturale del SINA come originariamente concepito, per cui si tende oggi a ridisegnare il SINA come una struttura di rete distribuita, in cui i nodi regionali sono su un livello gerarchico omogeneo, e si tende a responsabilizzare, per la gestione dell'informazione d'ambito, chi sarà poi anche il suo utilizzatore diretto. Si prospetta anche un'integrazione delle funzioni ed una sussidiarietà fra centri d'eccellenza o centri tematici per argomenti diversi, dialoganti in una rete che comunque deve coprire l'intero territorio nazionale.

Questa nuova visione del SINA corrisponde più da vicino al disegno della rete unitaria della pubblica amministrazione (RUPA), progettata in questi ultimi anni per consentire la gestione di ogni tipo di informazione di interesse pubblico, e favorirne la circolazione fra gli enti (*ibid.*).

In Italia, al momento, sono disponibili informazioni sull'ambiente e il territorio che derivano da varie fonti, spesso non coordinate, con frequenti carenze, anche drammatiche se si pensa all'uso che di queste informazioni dovrebbe essere fatto, e alle conseguenze sulla pubblica sicurezza e sulla qualità dell'ambiente che possono avere decisioni basate su una scarsa conoscenza.

Si prefigura un futuro in cui l'acquisizione dei dati (per es. da reti di monitoraggio e telecontrollo, da telerilevamento aereo e satellitare) e la loro analisi dovranno essere strettamente collegate.

I dati verranno a confluire subito in una cornice che consentirà di fornire informazione a valore aggiunto derivante dalla loro analisi, e ci si avvicinerà ad un modello di gestione in tempo reale di sistemi complessi, nei quali spesso i meccanismi di *feedback* e omeostasi naturali sono divenuti insufficienti a causa degli interventi antropici, e per cui è quindi necessario un "supplemento d'anima" regolatrice fornito appunto dall'informazione e dalle sue tecnologie.

5- Per che cosa, informazioni? Problemi e prospettive di un “paradigma GIS”

Sono stati richiamati i vari modelli proposti per la gestione della rete SINA e la regolazione dei rapporti fra gli utenti, a testimonianza dell'interesse dell'argomento e dell'importanza di una rete di informazione per assolvere ai compiti di governo, pianificazione e gestione operativa in campo ambientale.

Ogni soluzione richiede agli enti determinate caratteristiche quanto a dotazione di strumenti di acquisizione dei dati (monitoraggio e tecniche di analisi, in pratica coincidenti in larga parte con le piattaforme GIS e modellistiche disponibili) e a struttura organizzativa.

Sui GIS oggi alcuni adottano una prospettiva formale (GIS come un nuovo modo di inquadrare i problemi territoriali), altri una prospettiva strumentale (GIS come una tecnologia aggiornata che però non modifica la sostanza della pianificazione territoriale). In questo contesto pare utile sviluppare il punto di vista secondo cui il GIS configura un nuovo paradigma per le scienze del territorio (Secondini, 1992) nel senso che *“il concetto di GIS sta alle scienze del territorio come la tavola periodica degli elementi sta alla chimica: esso fornisce la struttura di riferimento per l'analisi sistematica del sito”* (Morain, in Secondini, *ibid.*).

Il “paradigma GIS” pone alla base del supporto alle decisioni la cartografabilità, o rappresentabilità di un problema in termini di georisorse.

Per i vari livelli di pianificazione, sono richiesti modelli del territorio molto diversi, benché dotati di un carattere comune. Occorre, innanzitutto, prendere in considerazione le difficoltà di reperimento dei dati, cioè di “conoscibilità” pratica degli oggetti di rappresentazione, nello scegliere la modellistica previsionale cui ricorrere.

Ciascun caso ammette una affidabilità della previsione variabile, e ciascun modello ha una possibilità di diffusione, legata alla complessità della sua formulazione e alla richiesta che esso ha di conoscenza del territorio, per poter dare delle risposte.

Nel proliferare delle normative e delle competenze, è giustamente urgente che si acquisiscano dati “di base”, e che se ne fornisca una rappresentazione cartografica, ma questo sforzo risulta inutile se non si sviluppa l'intero modello culturale e operativo del “paradigma GIS”, nel quale l'analisi e il progetto sono in relazioni, per così dire, di causa ed effetto sulla base della comprensione delle risorse naturali e del territorio.

Questo richiede una disponibilità delle pubbliche amministrazioni a confrontare le proprie scelte, e gli scenari che da esse derivano, sulla base dell'elaborazione dell'informazione di base in indici significativi, di definizione trasparente e condivisibile, che servano come metro di efficacia e di sostenibilità ambientale delle decisioni (Secondini, 1998).

Oggi l'uso dei sistemi informativi geografici risulta ormai generalizzato nella pubblica amministrazione italiana, ma solo a scopi di rappresentazione dei dati in forma tradizionale, nonostante la diffusione di software di basso costo e di facile utilizzo.

Questo basso livello di consapevolezza della tecnologia e delle sue potenzialità per l'analisi e il controllo dell'ambiente denuncia un ritardo rispetto ad altri paesi, ma giova ricordare che la diffusione dei GIS è sempre accompagnata da una scarsa definizione degli strumenti e delle finalità che caratterizzano la tecnologia e il suo uso scientifico.

L'idea di collegare basi di dati e rappresentazione cartografica degli stessi ha già qualche decennio. Risale, per esempio, al 1968 la proposta di Brounstein (cit. in Secondini, 1992; trad. nostra): *“Dal*

momento che i pianificatori e gli amministratori locali sono abituati a lavorare con le mappe, si possono sviluppare tecniche efficaci per associare graficamente i dati alle mappe, sia in input, sia in output?”.

Fra gli anni '60 e '70 si sviluppano ad Harvard i primi software di cartografia (CAD) mentre in Canada si costruisce una sorta di sistema informativo nazionale con l'obiettivo di accorpate l'informazione sul territorio, e renderne possibile la cartografia, per identificare le aree più idonee ai vari tipi di destinazione d'uso del suolo (*ibid.*). Negli anni '60 si formano anche i primi modelli concettuali dell'informazione territoriale: è il caso della matrice geografica di Berry (1963, in Secondini, *op.cit.*), con la quale l'Autore propone di rappresentare i dati georeferenziati. In questo modello si costruisce una tabella con colonne corrispondenti ciascuna ad una collocazione spaziale (x,y) significativa, e righe riportanti per ogni collocazione un attributo quantitativo o qualitativo. Ogni matrice di questo tipo ritrae un'istantanea del territorio rappresentato dai propri punti geografici significativi. Nel modello è assente ogni informazione topologica - e quindi ciò che maggiormente è proprio delle rappresentazioni cartografiche. La topologia compare nella mappa di tipo raster: una matrice in cui le righe e le colonne identificano la cella spaziale (e quindi le coordinate) di un pixel -il "punto" dell'informazione secondo Berry- e ad ogni cella si assegna un valore dell'attributo che può essere cartografato (*ibid.*).

Ai primi sviluppi della tecnologia è seguita una fase di maturazione che ha permesso di porre domande - e talora trovare risposte- in ambiti di crescente complessità: dal modo in cui gli uomini concepiscono lo spazio e il tempo, a come descrivere fenomeni essenzialmente dinamici e non euclidei, alle molteplici realtà viste dalle prospettive di diversi gruppi socioculturali (Couclelis, 1999): *“Per ragioni storiche, l'attuale generazione di GIS incorpora la visione dello spazio di un numero ristretto di discipline applicative: cartografia, CAD, architettura-pianificazione territoriale e rilevamento. Da queste, ha ereditato una notevole base di geometria euclidea, analitica e computazionale, e un'ontologia duale dello spazio, fatto di campi continui di variabili (nei contesti legati al rilevamento) da un lato e di oggetti individuali dall'altro (nei contesti legati all'architettura e alla pianificazione territoriale), mentre l'aspetto temporale, che era spesso assente nelle discipline di partenza, è stato abbondantemente trascurato fino a tempi non lontani, ed è sovente in quadrato come un'aggiunta dell'ultimo minuto”*(*ibid.*, traduzione nostra).

Oggi permangono le difficoltà dei sistemi informativi geografici tradizionali nel trattare gli aspetti dinamici del territorio e dei fenomeni ambientali, per i quali sarebbe necessaria una stretta relazione fra il database e i modelli di previsione e simulazione dei sistemi fisici interessanti (ogni forma di cartografia, in quanto rappresentazione bidimensionale di un attributo, consente di coglierne la distribuzione spaziale, ma non il suo evolvere nel tempo: è un'istantanea della situazione) (si veda Burrough, 1996; Secondini, 1998).

Gli approcci più comuni al problema sono nella direzione del fornire una sequenza di istantanee dei fenomeni (*map spreadsheet*), che diano conto degli aspetti evolutivi. Tuttavia esistono filoni di ricerca dedicati alla formulazione di nuovi modelli quadridimensionali dei database spaziali, per quanto spesso si tratti di schemi soltanto concettuali (Couclelis, *ibid.*).

Ma altre limitazioni nei modelli tradizionali hanno a che fare con la tipologia della rappresentazione cartografica: in particolare, la bidimensionalità e la difficoltà nel rappresentare spazi relativi e non metrici, come gli spazi relazionali (Couclelis, 1999). Infine, sfide aperte rimangono la rappresentazione di oggetti non del tutto definiti (parzialmente possibile grazie alla *fuzzy logic* di Zadeh, 1965; Bellmann e Zadeh, 1971), e di oggetti non "scientifici", ma rilevanti per la percezione quotidiana e sociale dei fenomeni (Kuhn, 1995), così come dello spazio sociale (Secondini, 1998) e del tempo "reale", non-newtoniano (Couclelis e Liu, 2000), che consente di integrare nel modello previsionale, a differenza delle rappresentazioni tradizionali, un *“agente capace di anticipazione e memoria”*, che funge da regolatore e può essere impiegato per riprodurre gli effetti di politiche e decisioni contingenti (*ibid.*).

In generale, la necessità di arricchire la piattaforma informativa dei GIS con un modulo in grado di fornire supporto alle decisioni (soprattutto nella prospettiva di utilizzare il GIS come cornice di conoscenza e di condivisione dell'informazione, all'interno della quale confrontare le diverse istanze, contrapposte o comunque non completamente conciliabili) deriva dall'esigenza di valutare le conseguenze di ogni decisione, ed esplicitarne i vincoli e gli obiettivi, inglobando nella descrizione quanto più possibile degli aspetti probabilistici e *fuzzy*.

L'orizzonte della ricerca sembra essere quello dei modelli integrati di sistemi naturali ed umani (Couclelis, 2000), mentre oggi si tende a incorporare nei GIS un gran numero di modelli di tipo tradizionale, soprattutto per quanto riguarda la previsione dei sistemi fisici, che genera disorientamento nella pianificazione: esistono ad esempio solo tre equazioni fondamentali per le acque sotterranee, mentre i modelli di flusso e trasporto sono oltre 1000 (GIS/EM4, WG sessions, 2000)!

Non può non colpire, nell'inorganico dinamismo che caratterizza le scienze del territorio rispetto a quelle fisiche tradizionali, il limite di una scarsa convergenza nell'implementare sistemi di informazione geografica in grado di produrre rappresentazioni cartografiche pienamente significative delle informazioni contenute nei *database* ad esse associati.

Le istanze di standardizzazione, integrazione e intercambiabilità dei modelli di calcolo all'interno delle diverse piattaforme GIS non producono, per ora, ambienti compatti nei quali coordinare tutti i passaggi dei complessi e interattivi processi di raccolta e organizzazione dei dati, modellazione, presentazione e discussione delle alternative. Il mondo dei GIS si presenta ricco di sfumature, ad elevata diversità, e favorisce un uso creativo della tecnologia consentendo al momento la massima flessibilità metodologica.

Un recente sviluppo del "paradigma GIS" è da riconoscere nella *geographical information science* (Goodchild, 1992). La scienza dell'informazione geografica "è la scienza dietro la tecnologia; considera le questioni fondamentali sollevate dall'uso dei sistemi e delle tecnologie; è la scienza richiesta per tenere la tecnologia sul filo del rasoio; è un campo multidisciplinare: molte discipline contribuiscono a queste questioni (cartografia, geodesia, fotogrammetria...: oggi dovremmo estendere questo elenco ad includere aree come la psicologia cognitiva, la geostatistica...)[...]. Che questioni solleva la scienza dell'informazione geografica (o le tecnologie geografiche in generale)? Questioni di rappresentazione: la superficie terrestre è infinitamente complessa. Occorre decidere come acquisirne l'informazione, come rappresentarla in un sistema digitale, come campionarla (e dove), quali formati dei dati utilizzare; quali criteri usare per scegliere una rappresentazione; come stabilire l'accuratezza di una rappresentazione, e delle previsioni e decisioni basate su quella rappresentazione[...]; come conseguire una compatibilità della rappresentazione con il modo in cui la gente effettivamente pensa il mondo; questioni circa la relazione fra la rappresentazione e gli utenti: dal momento che la gente pensa il mondo in termini differenti da una macchina, come possiamo rendere le rappresentazioni con il computer più simili a come la gente pensa? Come la gente ragiona, apprende, comunica circa il mondo geografico? E come può essere reso più intelligibile l'output di un'analisi GIS?[...] Come influiscono i metodi di visualizzazione sull'interpretazione dei dati geografici? E questioni sugli strumenti di analisi: qual è la natura dell'intuizione umana, e come essa può essere migliorata da strumenti GIS; quali strumenti di analisi sono richiesti per supportare tipi specifici di decisioni prese con l'uso dei GIS? E come possono i metodi di analisi essere presentato agli utenti in modo che essi possano effettivamente scegliere fra questi metodi?" (Goodchild, 1998; trad. nostra con lievi modifiche).

Se invociamo il "criterio del libro" (Kuhn, 1970) per la valutazione dei periodi di scienza normale e delle rivoluzioni scientifiche, dobbiamo prendere atto che oggi la letteratura (e in particolare la

manualistica) su GIS e scienza dell'informazione geografica individua uno spettro estremamente ampio di interessi (Longley *et al.*, 1999; Burrough e Mc Donnell, 1998; ITC, 1999):

- la progettazione e valutazione dei database management systems (DBMS)
- lo studio di più efficienti strutture e formati dell'informazione geografica, soprattutto in vista di dati nello spazio tridimensionale e nel tempo
- la modellazione dei processi fisici, con particolare riferimento al tridimensionale e ai fenomeni *time dependent*
- la geostatistica e il controllo dell'incertezza, l'analisi degli errori e della loro propagazione nella modellazione
- la costruzione di sistemi di supporto alle decisioni con l'uso di algebre cartografiche multicriteriali (e in particolare quelle bayesiane e fuzzy) e di tecniche di 'intelligenza artificiale'
- le modalità e limitazioni per la diffusione dei GIS nelle pubbliche amministrazioni e nelle imprese
- l'uso dei GIS nel dibattito pubblico e nella pianificazione partecipativa
- l'accesso ai dati geografici
- le questioni cognitive e di percezione dei fatti geografici.

Si è di fronte ad uno sviluppo in mille direzioni, che si autorichiamo periodicamente ad una (a volte leggermente forzata) unità, come testimoniano i molti convegni finalizzati alla "sintesi", alla "review" metodologica, alla produzione di *summae* come il citato "big book about GIS" (Longley *et al.*, 1999) nel quale confluiscono punti di vista rappresentativi pressoché di tutto l'universo GIS.

È un fatto che la scienza dell'informazione geografica si voglia presentare sempre più come disciplina autonoma: i GIS non sono considerati solo come tecnologie per sviluppare attività appartenenti al corpo tradizionale di altre discipline (geologia, idrologia, urbanistica...) ma hanno *status a sé* (il "fare GIS" ha le sue numerose riviste internazionali, e c'è più dialogo a volte fra ricercatori di estrazione molto diversa, accomunati dall'uso dei GIS, che fra tecnici della stessa disciplina che usano tecnologie diverse).

Del resto, per ovvi motivi pratici oggi non è possibile pensare ad un mondo senza GIS e senza cartografia numerica, per cui in pratica la scienza dell'informazione geografica rischia di essere una "scienza di tutto" priva di specificità, mentre le operazioni di analisi spaziale si diffondono in tutti i campi.

Secondini (1998) richiama l'attenzione sul fatto che, al di là del fascino dell'ipotesi di GIS come scienza autonoma, nei fatti l'utilizzo dei GIS è stato, almeno in Italia, pressoché esclusivamente strumentale, pur collocandosi "nel contesto di una sequenza incrementale di formazione di conoscenze" (*ibid.*) che può prefigurare uno spostamento della tecnica della pianificazione dalla redazione di analisi sotto forma di "inventari e resoconti" (Mazza, cit.) ad un progressivo inglobamento di simulazioni e modellazioni previsionali, con la produzione ed utilizzazione di "informazione a valore aggiunto" che dovrebbe rendere più ponderate e razionali le decisioni.

Ciò che si configura a partire dall'accettazione del GIS come scienza è una potenzialità enorme per indagini interdisciplinari, grazie al comune linguaggio dell'analisi spaziale, e assume crescente rilievo l'indagine su cosa possa essere ottenuto nelle applicazioni pratiche e nell'effettivo miglioramento del processo decisionale grazie all'uso dei GIS e della previsione pare un fecondo ambito di ricerca.

Lo strumento-GIS si propone come "un potente integratore di capacità di descrizione, di interpretazione e di modellazione [...] dei fenomeni territoriali. Ma il concetto di integrazione non deve essere limitato alla connessione di archivi di dati eterogenei [...] e di capacità di elaborazione. Esso ha, a nostro avviso, una valenza più profonda. La base di conoscenze che in esso si attiva mette

in relazione il disegno politico più generale e lo strumento di piano, gli strumenti di pianificazione complessivi a diverse scale [...]; gli strumenti orientati alla pianificazione territoriale e a quella ambientale [...]; la pianificazione complessiva e la pianificazione di settore[...], la formazione del piano e il controllo di attuazione del piano”(Secondini, 1998).

La fondazione della “scienza dell’informazione geografica”, che pure è ancora incompiuta e lascia aperti molti varchi di debolezza teorica ed operativa (*ibid.*), dovrebbe coerentemente ancorarsi allo studio delle relazioni fra conoscenza e pianificazione.

Accanto agli argomenti più “tradizionali” derivanti dalle scienze fisiche e dalla scienza dell’informazione, riveste quindi oggi un interesse rilevante per la ricerca l’uso che ne viene fatto nella formazione di decisioni di interesse pubblico, e quindi i riflessi politici della diffusione delle tecnologie geoinformatiche.

Il ruolo della personalità e delle organizzazioni viene inquadrato nel processo di formazione del piano, acquisendo una nuova importanza (Campbell e Masser, 1995; Ciancarella *et al.*, 1998).

L’evoluzione della tecnologia si svolge in parallelo con una presa di coscienza delle sue potenzialità che si può inquadrare nei tre momenti del *determinismo tecnologico*, del *razionalismo manageriale* e dell’*interazionismo sociale* (Campbell e Masser, 1995).

Attraverso questi tre approcci, si è passati da una concezione delle organizzazioni come sovrastrutture di un progresso tecnologico, che costituiva la variabile indipendente nelle traiettorie del loro sviluppo, ad una valutazione più attenta delle modalità e delle dinamiche con cui una tecnologia incontra o meno successo nella sua diffusione. In questo secondo caso, la tecnologia viene vista nella sua “*costruzione sociale all’interno di ogni organizzazione, piuttosto che come neutrale configurazione di attrezzature*” (Campbell, 1999; tr.it. nostra).

In Ciancarella *et al.* (1998) si trova una discussione puntuale circa la diffusione dei GIS nelle amministrazioni locali italiane. Vengono messe in luce le difficoltà e le situazioni tipiche di utilizzo della tecnologia, mostrando quasi sempre che il GIS serve per risolvere problemi “vecchi” in modo automatico, ma senza particolare innovazione metodologica.

Si rileva peraltro una complessità di situazioni in cui molte delle caratteristiche dell’uso del GIS dipendono dalla specificità del contesto. Un tipo di operazione che pare relativamente diffuso è quello dell’*overlaying* di mappe, che pur essendo segnale di un primo manifestarsi di usi analitici, e non solo di gestione dati, dei GIS, lascia intendere che vi siano atteggiamenti di “determinismo geografico” che possono portare a letture semplicistiche dei problemi di piano (*ibid.*). Pare invece evidente che il passaggio ad un uso dei GIS per fornire domande non programmate a priori, come deve essere possibile ogni volta che si fa uso dell’informazione ambientale in un contesto di pianificazione partecipativa, richiederà ancora tempi lunghi, anche legati alla necessità di gestire non solo informazioni *di stock*, ma anche informazioni *di flusso* (*ibid.*).

Secondini (1992) propone di classificare le fasi dell’adozione dei GIS nelle pubbliche amministrazioni come:

- (1) una fase “di assistenza”, in cui essi sono visti come uno strumento di supporto per l’organizzazione e la rappresentazione dei dati e delle informazioni;
- (2) una fase “di consulenza”, in cui il sistema fornisce anche informazioni ‘a valore aggiunto’ rispetto a quelle di partenza;
- (3) una fase “di comunicazione”, in cui il GIS viene utilizzato per la circolazione dell’informazione e il controllo interattivo dei fenomeni da essa rappresentati.

Benché l’inquadramento abbia un valore fenomenologico, e non predittivo, possiamo comunque affermare che la maggior parte degli enti italiani si trovano nella prima fase di utilizzo dei GIS.

Per arrivare alla terza fase (come prefigura to dagli ultimi sviluppi del progetto SINA), è necessaria una piena consapevolezza delle potenzialità dei GIS nella modellazione dei fatti geografici.

Alla rappresentazione ingenua delle risorse naturali, attraverso un semplice inventario, occorre sostituire una rappresentazione *modellistica* del territorio, capace di caratterizzarne processi e strutture. In questo modo è possibile produrre cartografia effettivamente capace di prevedere dinamiche e comportamenti. In tal senso, la visione modellistica del territorio si fonda su un paradigma di conoscenza – (pianific)azione, in cui l’analisi è fondamento ed euristica per il progetto.

Si impone una profonda revisione dei metodi e dei contesti, dovuta alla diffusione nella ricerca – e quindi ad una maggiore definizione metodologica- della modellistica *GIS-based* dei fenomeni fisici e della valutazione ambientale: la mappa costituisce un giudizio e una predizione dei fenomeni territoriali, e non più solo una visualizzazione (Fabbri e Chung, 1999).

I “sistemi esperti”, che negli anni ’80 erano visti come l’orizzonte della ricerca nelle “geosciences” in analogia a quanto già si era verificato in settori industriali di punta (Yatabe e Fabbri, 1988), lasciano il passo sempre più di frequente ai “sistemi di supporto alle decisioni”, a riaffermazione dell’irriducibilità dell’intuizione e della razionalità umana: i software non risolvono i problemi, ma possono servire a studiare in modo più chiaro le situazioni oggetto di piano (Wyatt, 1999).

Il GIS è ancora da guardare come uno *strumento di valutazione della scarsità della risorsa territorio* (Secondini, 1992), dal momento che consente sempre più realisticamente l’integrazione di tutte le informazioni di tipo socioeconomico e ambientale, facendo emergere attraverso le analisi e la produzione di informazione a valore aggiunto proprietà delle georisorse diversamente inaccessibili. È una cornice di chiarificazione delle idee e di loro collegamento logico, che parte da informazioni dettagliate e spazialmente distribuite per sintetizzare una conoscenza razionale (comunicabile e giustificabile) anziché percezioni soggettive.

Non è una tecnologia in grado di fornire soluzioni automatiche ai problemi, ma uno strumento capace di visualizzare i contenuti di conoscenza disponibili, che supportano il giudizio per ogni decisione – entro margini di incertezza variabili – sulle conseguenze.

L’ambiguità del mondo dei GIS – polimorfo ed ossessionato dall’unità di una scienza dell’informazione geografica; sovraccarico di tecnologie ma alla costante ricerca di una loro “mitigazione” in rappresentazioni *user-friendly*; orientato a coinvolgere le discipline più specialistiche e a integrarle, e allo stesso tempo preoccupato della partecipazione del pubblico, della rilevanza pratica delle analisi per il *problem solving*; per potenziare l’intuizione degli oggetti geografici e formalizzare ragionamenti di tipo causa-effetto...- riflette in fin dei conti la tensione fra l’immaginazione del *design* e il rigore dell’*analysis*, dovendo da una parte mantenere la decisione “*rigorosa, giustificabile, ripetibile, controllabile e consensuale*” (Wyatt, 1999), e dall’altra evitare di inibire la pianificazione rendendo troppo complicate le questioni (*ibid.*).

Il GIS dovrebbe applicarsi come strumento di analisi ai problemi reali, sia di tipo *close-ended*, che ammettono soluzioni identificabili in modo rigoroso, sia di tipo *open-ended*, che possono essere distinti in problemi “viziosi”, “sfumati”, “intuitivi” o “maligni” (Rickards, 1988; cit. in Wyatt, *id.*). In questo secondo caso, la soluzione non è affatto a portata di mano, e a volte è necessario prendere la decisione e verificare solo a posteriori se la scelta è stata giusta (“problemi maligni”); altre volte non esistono soluzioni (“problemi viziosi”); oppure le soluzioni possono non avere attributi chiaramente identificabili (“problemi sfumati”); oppure, semplicemente, la soluzione può derivare da un’intuizione creativa, come nell’esempio proposto da Ackoff (1978) in cui si risolve il problema dei lunghi tempi di

attesa davanti all'ascensore appendendo alla parete uno specchio in cui la gente si guarda beatamente, e rimuovendo così il fatto stesso dell'attesa vista come problema (Wyatt, *id.*).

Se c'è una rilevanza per la pianificazione nella diffusione del "paradigma GIS", ci sembra che questa debba essere riconosciuta nella possibilità di *trattare i problemi in una cornice razionale*, favorendo prima di tutto la discussione sulla natura di ciascuno di essi e la possibilità di affrontarlo con le metodologie e gli apparati disciplinari (o interdisciplinari) appropriati.

Capitolo 3 - Caratteristiche della modellazione geografica

1- Premesse

Nel seguito si farà coincidere, per praticità, la modellistica geografica con quella che si realizza nei sistemi informativi geografici (GIS). Questa riduzione, ovviamente, non è del tutto giustificata, ma di fatto nella realtà chi si occupa di modellistica geografica tende a fare uso pressoché esclusivamente di GIS, richiamando alle problematiche della *geographical information science* e al rapporto oggi indissolubile fra la disponibilità di tecnologie, il loro uso creativo per la ricerca in geografia e il nuovo sviluppo delle stesse. Alla *geographical information science* e alla rilevanza del “paradigma GIS” per la pianificazione territoriale si è dedicato un paragrafo del capitolo precedente.

I sistemi informativi geografici sono qui di seguito intesi come programmi che comprendono funzioni di *database management*, di visualizzazione e di analisi dei dati georeferenziati, ovvero riferiti a precise coordinate spaziali e caratterizzati da prefissate relazioni topologiche. Ci si chiama quindi fuori dal dibattito –testimoniato da una vasta letteratura di qualche anno fa– sui rapporti fra sistema informativo geografico, sistema informativo territoriale e sistema informativo ambientale (si veda p.es. Secondini, 1992), e sulla definizione del GIS (p.es. Chung e Fabbri, 1999; Chan e Williamson, 1999).

In un sistema informativo geografico i dati possono essere di tipo tabellare, raster e vettoriale. Non ci si dilungherà in questa sede nella discussione di queste nozioni, ma risulta necessario ricordare che una mappa raster consiste in una copertura della regione da rappresentare mediante celle elementari (pixels, ovvero PICTURE ELEMENTS; si parla anche di voxels, ovvero VOLUMETRIC PIXELS in tre dimensioni) ad ognuna delle quali è assegnato il valore dell’attributo corrispondente al tematismo della mappa. In formato numerico, una mappa raster può essere vista come una matrice in cui ad ogni elemento corrisponde una locazione spaziale, e mediante la quale il *continuum* spaziale è discretizzato mediante le sole locazioni corrispondenti alle celle stesse della matrice. Il concetto di mappa raster deriva storicamente da quello delle matrici spaziali di Berry, proposto nel 1963, di cui rappresenta l’evoluzione consentita dai mezzi di rappresentazione resi disponibili dagli elaboratori elettronici (*ibid.*).

Una mappa vettoriale è una mappa nella quale gli oggetti (linee, punti, poligoni...) che rappresentano le entità del tematismo sono rappresentati *mediante* le loro coordinate spaziali, cioè l’indicazione della posizione (x,y) di ciascun punto significativo, e il legame geometrico fra due punti (p.es. collegamento con un segmento, con un arco di cerchio, assenza di collegamento...).

I dati tabellari possono essere associati alle entità rappresentate nelle mappe, costituendo in questo caso attributi di detti oggetti, oppure essere dati che non si riferiscono direttamente ad entità georeferenziate, ma costituiscono un elemento dell’informazione geografica irrinunciabile (per es. si può pensare di avere una mappa della litologia di superficie, ed una tabella che associa ad ogni classe litologica la porosità media).

Mentre la tradizione di ricerca delle *engineering sciences* adotta come strumenti per risolvere i problemi modelli matematici basati su complesse equazioni differenziali a partire da relativamente pochi dati (a causa del costo degli stessi: si pensi alle prove *in situ* e di laboratorio per la caratterizzazione di un acquifero), la caratteristica delle analisi basate sui GIS è quella di utilizzare

equazioni e metodi semplici, ma di lavorare con dati molto abbondanti e spazialmente distribuiti (anche grazie alla disponibilità di questi ultimi in formati sempre più economici: per esempio, i rilievi aerei e satellitari).

Inoltre, la possibilità di gestire variabili di tipo logico, numerico e descrittivo permette di considerare come “dati” un insieme molto più ampio di informazioni rispetto ai parametri (numerici) classici della modellistica fisico-matematica.

In base al tipo di ragionamento supportato, che può essere di tipo variabile fra l'argomentazione discorsiva e il procedimento numerico deduttivo, possono infatti essere usati per la predizione del comportamento del territorio tematismi quali la classe di uso del suolo, la copertura vegetale etc. Si capitalizza sulla disponibilità di molti dati e processabili simultaneamente anziché su una struttura dell'*explanans* molto sofisticata e concettualmente sviluppata. La comprensione teorica dei fenomeni richiesta è comunque notevolmente spinta, ma *molto meno formalizzata* rispetto ai modelli tradizionali. Inoltre, a questa attitudine *data-driven* della analisi GIS corrisponde un'enfasi per ciò che effettivamente è misurato e noto (da cui si vuole estrarre tutta la conoscenza disponibile), e non simulato; questo è particolarmente interessante se si pensa che quasi sempre i risultati dei modelli vengono utilizzati da persone che non hanno chiara coscienza dei limiti di validità di questi ultimi.

Obiettivo di quanto segue è sviluppare una riflessione sulle modalità con cui l'uso dei GIS consente di diffondere il ricorso alla modellistica (*sensu lato*) nella pianificazione territoriale, nella convinzione che l'utilizzo appropriato di un modello consenta di pervenire ad una razionalità comunicativa dei processi di piano che ne garantisca capacità di *problem solving* superiori a quelle normalmente osservate. Anche se vale il *caveat* contro valutazioni esclusivamente strumentali della *performance* della pianificazione, che rischia in tal modo di divenire cinica (Baer, 1997), è indubbio che la capacità di risolvere problemi sia la prova finale della qualità del piano.

Il punto di vista che si intende sostenere è che *la maggior parte dei fenomeni interessanti dal punto di vista della pianificazione territoriale siano gestibili attraverso procedure di predizione nella forma di una classificazione del territorio, e non attraverso una modellazione di tipo tradizionale.*

Si argomenta che, già oggi, virtualmente tutte le operazioni modellistiche che si richiedono per prevedere i fenomeni di interesse per la pianificazione territoriale possono essere sviluppate all'interno dei GIS.

Si vuole qui mostrare come possano essere opportunamente costruite carte tematiche, in modo che costituiscano classificazioni previsionali di diretta utilità per il pianificatore e l'amministratore.

2- Principi della modellazione geografica

La pianificazione territoriale deve basarsi su quel particolare modello della realtà che è la carta, cioè una immagine *statica* di proprietà distribuite nello spazio. Questo aspetto non pone un vincolo preciso al tipo di fenomeni che possono essere studiati, ma richiede che lo studio sia finalizzato alla classificazione del territorio. La classificazione porta in sé questo carattere statico, in quanto è il riconoscimento di uno stato di cose.

Fin qui si è lasciato piuttosto vago il termine. Dovendola definire preliminarmente allo sviluppo del discorso, diremo che *la classificazione del territorio è il riconoscimento ad ogni punto dello spazio di un attributo il cui valore è rilevante per la pianificazione.*

Riconoscere che l'obiettivo della modellistica geografica consiste nella classificazione significa superare il concetto di mera simulazione, che è solo uno fra i molti possibili mezzi di classificazione.

La classificazione non intende riprodurre forme e processi in modo avalutativo, ma ne dà un giudizio specificamente orientato alle decisioni, anche se queste possono non essere rese esplicite al momento della classificazione. I passaggi della classificazione, che pure sono quasi sempre dati per ovvi, nascondono in modo sottile il meccanismo della *riduzione cartografica*, descritto da Farinelli (1992) in base alle tre regole della corrispondenza biunivoca fra rappresentazione e realtà assunta dal modello, del principio del terzo escluso per cui un oggetto o esiste, o non esiste nella rappresentazione, e del trascurare la riflessione sull'essenza delle cose, per limitarsi all'apparenza fenomenica, come è stato esposto al capitolo 2.

Anche se non sempre nella forma della simulazione, *la classificazione produce una previsione sulla realtà*: ascrive ad un punto od oggetto, attraverso il giudizio, un comportamento tipologico. La differenza rispetto alla previsione delle simulazioni è però che in questi casi la previsione riguarda una possibilità, una propensione, e mai un'affermazione consequenziale, per quanto ipotetica. Il passaggio della modellistica dalla simulazione alla classificazione avviene lungo un gradiente di complessità epistemologica, cui si associa da un lato un "indebolimento" delle affermazioni e una inferenza più flessibile e meno formalizzata, e dall'altro un'estensione delle procedure modellistiche, quali ad esempio la validazione delle predizioni o l'analisi preliminare dei dati, anche al di fuori di contesti rigidamente fisico-matematici.

La classificazione come modellistica geografica poggia su una visione *del territorio come oggetto di modellistica*, la cui essenza è di studiare quest'ultimo al fine di costruire una struttura argomentativa che permetta di fare una previsione sul suo comportamento.

Ad esempio, possiamo porci il problema generico di analizzare l'inquinamento di un suolo in una certa area dove è avvenuto il versamento di idrocarburi da un serbatoio perdente. La modellistica tradizionale è orientata a mettere a punto una simulazione del sistema che riproduca i valori di concentrazione osservati, ponendoli in relazione alle cause che si può supporre li abbiano prodotti. Questo viene fatto tipicamente con modelli di trasporto degli inquinanti e delle reazioni chimiche e biologiche significative. La simulazione taglia sulla realtà affermazioni "forti": *se* supponiamo di non intervenire sulla sorgente inquinante, *allora* la concentrazione di inquinante nel punto P dopo 1 anno sarà X. La classificazione produce invece affermazioni "deboli": il punto P è/non è a rischio di contaminazione. In P possono verificarsi, oppure è difficile che si verifichino, concentrazioni superiori a un certo valore. Tuttavia, mentre la simulazione è generica sulle conseguenze, la classificazione contiene già in sé una richiesta di azione: *discute i rimedi*.

La classificazione prende la simulazione come uno fra i possibili (e, nel caso specifico, uno dei più interessanti) metodi per affermare se un punto dell'area è o non è inquinato, richiede o non richiede bonifica, è o non è a rischio, ma mira soprattutto a mettere in relazione la conoscenza e l'azione. Il metodo con il quale si effettua la previsione non è rilevante in termini epistemologici, e viene scelto su base esclusivamente pragmatica (quello che consente di discutere meglio i rimedi). I modelli previsionali distribuiti costruiti a partire dalle equazioni della fisica matematica con i metodi classici (differenze finite, elementi finiti etc.) si collocano solo come un tassello nel quadro descrittivo generale. Essi si usano se ed in quanto l'analisi lo richiede. Nell'esempio, anziché ricorrere a modelli idrodinamici complessi, potremmo riferirci a un'ipotesi di percorso medio dell'inquinante, con una sua velocità rappresentativa. Oppure, ricorrere ad un modello classificativo come il DRASTIC (USEPA, 1987), con il quale selezionare le aree richiedenti intervento prioritario.

Ciò non riproduce la realtà, ma può dare indicazioni ugualmente utili sul comportamento del territorio e sui rimedi.

L'affermazione sul comportamento della realtà e l'affermazione sulle azioni conseguenti hanno *status* epistemologici molto diversi. La predizione che si può ottenere con la modellistica tradizionale può essere molto più "forte" di quella che si ottiene con la classificazione, ma il punto essenziale è che la prima *non è abilitata a discutere i rimedi*, per il fatto che considera un comportamento schematico del solo sistema materiale, mentre la classificazione contiene un giudizio, con il quale è in grado di incorporare il punto di vista dei diversi gruppi sociali coinvolti nella decisione.

I dati necessari per far "girare" un modello basato su equazioni differenziali sono difficilmente disponibili. In assenza di un'accurata rappresentazione dei parametri e delle condizioni iniziali/al contorno, l'uso di modelli complicati pare superfluo e poco significativo. Anche una dettagliata analisi statistica dei dati ed uno scrupoloso *sensitivity assessment* non possono nulla contro la sostanziale mancanza di dati.

Un modello ad equazioni differenziali può essere ritenuto valido solo dopo essere stato calibrato, e anche in questo caso permangono molti dubbi sulla sua attendibilità per le previsioni fino a che non si verificano le condizioni per una validazione (ovvero l'occorrenza reale di un fenomeno preventivamente simulato).

Beven (1996) sottolinea che la maggior parte dei modelli distribuiti (il suo discorso è riferito all'idrologia, ma la cosa può essere generalizzata a tutte le descrizioni dei sistemi ambientali) è basata su assunzioni che è noto siano false, e quindi ricadono nella categoria definita da Morton (1993; cit. in Beven, *id.*) dei "*mediating models*", modelli che servono a scopi specifici, i cui parametri possono bensì riflettere l'intuizione di una legge fisica, ma contengono elementi più o meno arbitrari, e possono pertanto avere valori diversi a seconda dello scopo e della situazione per cui il modello è usato (Beven, *ibid.*). Questo tipo di modelli ha una reale capacità predittiva, sotto opportune ipotesi, ma non può dare luogo, nella descrizione dei sistemi fisici, ad una struttura teorica completamente sviluppata. In particolare, è difficile compiere una calibrazione e una validazione su variabili distribuite, non essendoci misure "di controllo" adeguatamente distribuite, e quindi dovendo fare affidamento sulla rispondenza dell'output globale del modello alle osservazioni (p.es. nel caso dell'idrologia la rispondenza degli idrogrammi simulati a quelli osservati). In tal senso, la modellistica distribuita rimane un problema *transcientifico* (*ibid.*). Per questi motivi, Beven propone che i modelli distribuiti effettivamente utilizzabili debbano essere più semplici degli attuali, e basati su *dati raccolti a scale adeguate* (fra i quali sono da privilegiare i segnali telerilevati, che riflettono misure distribuite, anche se al momento con non sufficiente affidabilità). "*L'approccio corrente alla modellistica distribuita physically based, in cui le equazioni della fisica valide alla piccola scala vengono usate a scale maggiori, sotto l'ipotesi che i cambiamenti di scala possano essere trattati con l'uso di parametri "efficaci", deve essere sostituito da un approccio che riconosce in modo molto più esplicito le limitazioni del processo di modellazione*" (*ibid.*; trad. nostra).

In questo contesto, Beven richiama l'attenzione sull'importanza di un uso simultaneo di molti modelli, accompagnato da un processo di selezione per falsificazione, basata sulla rispondenza ai dati osservati, dei vari modelli. Un punto di vista simile, nel contesto della mappatura della *favourability* del territorio rispetto ai fenomeni franosi, è espresso da Chung e Fabbri, 1999: solo la verifica del modello che meglio riproduce i dati in validazione consente di scegliere la predizione "migliore". Ovviamente, ciò presuppone che si stabilisca una misura, necessariamente relativa, di *performance* dei modelli, che consenta di stabilire la scala di qualità della rispondenza dei modelli ai dati (Beven, cit.): "*L'approccio suggerito prende spunto direttamente dalla nozione di equifinalità, o indecidibilità fra le diverse descrizioni della realtà operate dai modelli. [...] La conferma di un modello o di una teoria è una questione di quanto essi siano empiricamente adeguati. [...] Pare necessario accettare, tuttavia, che ci*

sono molte descrizioni differenti che sono “adeguate” in certo senso [...]: l’idea di classificare i modelli esistenti in termini di una qualche misura di verosimiglianza” converge con “il punto di vista di Feyerabend [...] sullo viluppo del pensiero scientifico, secondo cui non ci sono motivi che impongano una stretta corrispondenza fra teoria e realtà” (ibid., trad.nostra).

I parametri dei modelli distribuiti tradizionali sono spesso di non facile comprensione per quanto concerne il loro significato fisico. La modellazione *GIS-based* mira a implementare ragionamenti modellistici basati direttamente sulle proprietà misurabili degli oggetti, e quindi usando parametri di scelta meno arbitraria e di chiaro significato fisico, anche se molto spesso il procedere assegnando un valore di attributo a classi qualitative di evidenza presuppone un modello nel senso tradizionale del termine, con il quale operare l’attribuzione (ad esempio una proprietà idrologica al tipo di suolo) (*ibid.*). L’uso dei GIS, nei quali prima di tutto si verificano corrispondenze fra i diversi tipi di dati e si sfruttano le capacità dello strumento di supportare ragionamenti geografici (come la valutazione di distanze, tempi di accesso/percorrenza, gradienti, contiguità, forme, dimensioni...), favorisce lo sviluppo di concettualizzazioni e modelli della realtà che interpretino le funzioni dei diversi elementi geografici, attraverso indici di variazioni spaziali nel comportamento del sistema; questo sviluppo dovrebbe dipendere da un’inferenza basata sui dati più che sulla teoria, così come è accaduto molto tempo fa per lo sviluppo delle leggi della fisica valide alla piccola scala (*ibid.*).

La natura di questo processo di inferenza delle leggi dai dati, che le tecnologie GIS e i dati distribuiti telerilevati consentono di effettuare alla scala del territorio allo stesso modo in cui nella scienza classica si procedeva alla scala del laboratorio (benché Beven (*ibid.*) richiami l’attenzione sul fatto che l’idrologia – così come tutte le scienze ambientali- attende i suoi progressi prevalentemente da un miglioramento nelle tecniche di misurazione distribuita, oggi ancora carenti sotto molti punti di vista), prefigura un processo in cui il comportamento del territorio viene innanzitutto descritto, e la descrizione – contenendo l’ipotesi implicita della regolarità e stazionarietà dei fenomeni osservati (Smyth, 1998; Couclelis e Liu, 2000) – assume già in sé i caratteri del modello, e deve essere successivamente falsificata e confrontata in termini empirico-performativi con altre descrizioni equifinalizzate.

L’attività di classificazione è pressata dall’esigenza di *discutere i rimedi* alle situazioni che si osservano. La pianificazione che si appoggia su una tale classificazione, per sua natura discorsiva, richiede una legittimazione: afferma possibilità, dà giudizi, prende i risultati di analisi ed elaborazioni le più diverse per metterli in forma utile a suggerire le ipotesi di azione. Essendo il passaggio irrimediabilmente soggettivo, occorre che esso sia il più possibile razionale e condiviso.

L’aspetto della classificazione del territorio e quello della pianificazione sono indistricabili: si deve dedicare attenzione alle modalità con cui la classificazione possa essere scientificamente consistente, trasparente e costruita con la partecipazione dei gruppi sociali coinvolti nella pianificazione che su di essa si fonderà, limitando gli effetti distortivi che la *riduzione cartografica* produce.

L’uso di rappresentazioni geografiche e di modelli basati su operazioni GIS non è solo un’opzione tecnica, ma ha la capacità di consentire la comunicazione delle “verità” sul territorio che devono essere considerate nelle decisioni, in un modo prima del tutto inaccessibile alla modellistica tradizionale.

Mentre sono stati sviluppati programmi di ricerca sulla costruzione sociale dei sistemi informativi territoriali all’interno delle organizzazioni (Masser e Campbell, 1995; Ciancarella *et al.*, 1999), si deve ora portare l’attenzione su come in questi sistemi possano essere inglobati i ragionamenti scientifici per la previsione, in modo da rendere disponibile per la discussione politica non solo una base di dati, ma anche una base di produzione di scenari per la valutazione delle conseguenze e la *discussione dei rimedi*.

Si vogliono riportare le molteplici applicazioni di classificazione del territorio in un quadro complessivo che faciliti la riflessione sulle modalità con cui nella classificazione possa essere spesa la conoscenza disponibile, ai fini di produrre un piano strettamente legato alla comprensione dei sistemi ambientali, e caratterizzato quindi dalla sostanziale sostenibilità delle scelte.

3- L'uso dei GIS nella modellazione: da tecnologia a paradigma

Negli ultimi anni, si è passati dall'interesse per il GIS come tecnologia per rendere più efficienti e veloci le analisi tradizionali alla visione del GIS come ambiente di lavoro che modifica il modo stesso di ragionare sui fenomeni, di descriverli e di prevederli.

Con il contributo fondamentale di Goodchild (1992) si è incominciato a vedere, come detto, il mondo dell'informazione geografica come oggetto di una specifica scienza (la "GIScience") che si differenzia, a volte in modo ambiguo, dalla geografia, inglobando il pensiero sistemistico, la modellistica matematica ambientale e le teorie delle decisioni. Alla ricerca sullo sviluppo delle tecnologie dell'informazione geografica si affiancano riflessioni sulle conseguenze epistemologiche, metodologiche e politiche del loro uso pervasivo nella pianificazione fisica, sociale ed economica; di modo che oggi è impossibile parlare di modellistica geografica senza fare riferimento alla tecnologia GIS e alla corrispondente "GIScience".

Se molti autori mettono in luce le limitazioni dei GIS nella modellazione di fenomeni naturali dinamici (Wesseling *et al.*, 1996), multiscalarari (p.es. Goodchild, 2000 (a)) e in domini spazio-temporali diversi da quello euclideo-newtoniano della fisica classica (p.es. Couclelis e Liu, 2000), appare oggi chiaro che un problema fondamentale di ricerca non è tanto al livello degli strumenti di analisi, quanto delle applicazioni: diviene essenziale rispondere a nuove esigenze, conoscitive e normative, sfruttando nel mondo reale la molteplicità di opportunità di ricerca messe a disposizione dai GIS e da altri strumenti ad essi collegati, quali i modelli matematici previsionali.

Nel "*technological core*" della ricerca sui GIS, si intravede un crescente interesse per nuove applicazioni del "paradigma GIS", dal momento che un'applicazione di GIS portata a termine con successo introduce nel contesto un modo nuovo di operare e nuovi orizzonti di sviluppo della pianificazione (Martin e Atkinson, 2000).

Accanto a questa sempre maggiore importanza della applicazione innovativa come ricerca, si deve ricordare che le tecnologie dell'informazione hanno gradualmente cambiato *status*, da strumenti di calcolo a strumenti di comunicazione di massa, e corrispondentemente i GIS costituiscono oggi un potenziale ineguagliato per diffondere presso un pubblico ampio tecniche e procedure di analisi spaziale (Goodchild, 2000 (b)).

Nel proliferare delle tecnologie, appare sempre più attraente l'idea di un'architettura "universale" di software che consenta di inserire in ogni procedura formalizzata qualsiasi tipo di strumento di valutazione, così come oggi in molti *word processor* è possibile inserire in ogni documento una qualsiasi fonte informativa: immagine, testo, tabella, filmato...

Sono stati proposti numerosi schemi ideali di collegamento fra i modelli di simulazione e i GIS (p.es. Burrough, 1996; Taylor *et al.*, 1999; Westervelt e Shapiro, 2000). Sul versante tecnico, fra i due tipi di

strumenti si tende oggi ad una sempre più forte convergenza, rendendo facilmente contraddicibili definizioni troppo rigide²⁸.

In linea teorica questo sviluppo è oggetto di campi molto avanzati della scienza dei calcolatori e delle tecnologie dell'informazione. In pratica, comunque, si deve riconoscere che esistono già le possibilità di operare un numero molto grande di analisi ed elaborazioni modellistiche all'interno di pacchetti GIS unitari.

Nel seguito, si esamineranno in maggiore dettaglio le limitazioni esistenti nella implementazione di modelli all'interno dei GIS, che spesso coincidono con limitazioni per la piena integrazione di strumenti di simulazione nel processo di piano, ma anche le potenzialità dei GIS di tipo commerciale, disponibili in forme standard presso quasi tutte le pubbliche amministrazioni, e che oggi ci sembrano largamente inesplorate.

Se nei primi stadi della cartografia numerica si intendeva il GIS come il luogo in cui si sintetizzavano i vari contributi, e le funzioni analitiche dei GIS erano dirette soprattutto alla integrazione, alla *query* e sovrapposizione dei vari tematismi – il che supponeva l'uso di strumenti semplici quali l'*overlaying* delle mappe o il calcolo di distanze, oggi esiste una classe molto più ampia di operatori di algebra delle mappe, implementati in molti GIS, che consente lo sviluppo di modelli anche matematicamente complessi in forma analoga ai tradizionali calcoli cartografici. La grande flessibilità di questi strumenti rende in molti casi obsoleta l'attività di sviluppo del software che per tanti anni ha costituito la base della ricerca nelle scienze dell'ingegneria ambientale.

Oggi pare condiviso il fatto che le modellazioni previsionali fatte ricorrendo ai GIS siano generalmente limitate sotto l'aspetto della comprensione degli aspetti dinamici dei fenomeni, e che le formulazioni dinamiche siano per lo più inefficienti dal punto di vista computazionale (Maidment e Ye, 1996), per quanto esitano eccezioni di notevole rilevanza (p.es. Wesseling *et al.*, cit.; Burrough, 1996).

Le proprietà dei sistemi che possono essere studiate all'interno dei GIS, in genere, sono quelle che hanno a che fare con le relazioni spaziali fra oggetti: contiguità, connessione, distanza e accessibilità, relazione causale o statistica fra diversi fenomeni occorrenti contemporaneamente in un punto.

Berry (1993) sintetizza la visione, ancora oggi largamente accettabile, delle capacità analitiche dei GIS in termini di statistica spaziale e *map algebra*, che formano gli strumenti di una modellistica cartografica insieme all'*overlaying* e alle misure di connettività e distanza.

Secondo Albrecht (1996), tutte le operazioni svolte all'interno dei GIS commerciali esistenti possono essere classificate nei gruppi mostrati in Figura 3: identificazione, analisi di localizzazione, analisi topografica, analisi delle relazioni spaziali e della contiguità, analisi delle strutture spaziali, e misurazione. Come si può osservare, anche le operazioni che in sé richiamano fenomeni dinamici, come la "cost/diffusion/spread" (ovvero la descrizione in generale dei fenomeni diffusivi in termini di distanze pesate), sono ricondotte ad elaborazioni su un'immagine *statica* del territorio.

Tradizionalmente, l'analisi che viene fatta nei GIS riguarda il comportamento spaziale delle variabili (si veda a tale proposito la discussione fatta da Chung e Fabbri, 1999), mentre per l'aspetto dinamico si

²⁸ Si ricorda qui per inciso che la ricerca orientata all'introduzione di una analisi temporale fra le potenzialità di un GIS non si limita all'integrazione di modelli matematici distribuiti in un GIS (cosa ormai estremamente comune: p.es. GMS dell'US Dept. of Defence è un GIS dedicato alla modellistica idrogeologica; GRASS, dell'US Dept. of Agriculture, è il GIS standard per la modellistica con il codice AgNPS...). Una linea di ricerca che pare estremamente fruttuosa è quella più orientata alla individuazione degli aspetti essenziali dei fenomeni dinamici, per produrre uno strumento di analisi e simulazione spazio-temporale che rispetti i requisiti di un GIS *general purpose*. Un esempio di prodotto commerciale di questo tipo si può ravvisare nel package PC-Raster, della Università di Utrecht, nel quale sono espressamente previste funzioni di accumulo che consentono l'essenziale modellistica di fenomeni come il flusso ed il trasporto di materiali senza necessità di ricorrere a modelli numerici (differenze finite, elementi finiti ecc.) esterni e *rigidi* rispetto all'analisi spaziale (ovvero richiedenti una interfaccia ad hoc ed una ulteriore astrazione rispetto alla rappresentazione dello spazio gestita dal GIS).

è sempre preferito fare riferimento a modelli di processo (p.es. integrazione di equazioni della fisica matematica in forma numerica). Gli stessi Autori (*ibid.*) interpretano la costruzione di mappe come una operazione di modellistica predittiva, che muove dall'identificazione dei *supporting patterns* (la distribuzione dei vari "fattori causali") all'inferenza del *target pattern*, cioè la mappa della classificazione del territorio/predizione del fenomeno spaziale.

Search:	<i>Interpolation</i>	<i>Thematic</i>	<i>Spatial Search</i>	<i>(Re-)</i>
<i>classifi</i>		<i>Search</i>		<i>cation</i>
Location Analysis:	<i>Buffer</i>	<i>Corridor</i>	<i>Overlay</i>	
<i>Thiessen/Voro</i>				<i>noi</i>
Terrain Analysis:	<i>Slope/Aspect</i>	<i>Catchment/Bas</i>	<i>Drainage/Network</i>	<i>Viewshed</i>
		<i>ins</i>		<i>Analysis</i>
Distribution/ Neighborhood:	<i>Cost/Diffusion/ Spread</i>	<i>Proximity</i>	<i>Nearest Neighbor</i>	
Spatial Analysis:	<i>Multivariate</i>	<i>Pattern/Dispe</i>	<i>Centrality/Connect</i>	<i>Shape</i>
	<i>Analysis</i>	<i>rsion</i>	<i>edness</i>	
Measurements:	<i>Measurements</i>			

Figura 3 – Le 20 operazioni universali GIS (da Albrecht, 1996)

I GIS di tipo raster (e in parte anche quelli vettoriali - si pensi ai TIN: triangulated irregular networks) consentono di trattare dati organizzati nella forma di superfici continue (anche se approssimate a differenze finite). Questo ha prefigurato un approccio allo studio dei fenomeni fisici spazialmente distribuiti, basato fondamentalmente sull'interazione fra campi di variabili delle quali possono essere calcolati gradienti e altre proprietà differenziali (Mitas *et al.*, 1996). Rispetto agli approcci convenzionali che si concentrano su sistemi di equazioni, la cui soluzione fornisce una simulazione dei processi fisici, l'approccio dei campi interagenti vede i processi come risultato (eventualmente nel tempo) di una combinazione relativamente semplice di variabili continue e delle loro derivate. Mitas *et al.* illustrano questa concezione nell'applicazione alla modellazione dei processi erosivi, facendo vedere come le forme di questi ultimi possano essere descritte con un numero molto limitato di operazioni GIS, una volta caratterizzato ciascun campo continuo di variabile.

Alcuni strumenti molto potenti di analisi delle superfici matematiche continue, come derivate, filtri, calcoli di vicinaggio ecc. consentono di impostare soluzioni numeriche di molte equazioni di grande interesse pratico. È ad esempio possibile la modellazione di fenomeni spazio-temporali che richiedono l'integrazione di equazioni differenziali a derivate parziali (Bagli e Pistocchi, 2000).

In aggiunta, occorre ricordare che molte soluzioni delle equazioni, analitiche o corrette con relazioni empiriche, sono scrivibili come funzioni relativamente semplici delle distanze, per cui possono

associare in forma chiusa, ovvero mediante una formula analitica non iterativa, una determinata proprietà ad ogni punto dello spazio in relazione all'evoluzione temporale (ad es. Patrono, 1995).

Infine, i GIS possono gestire *simulazioni cinematiche* (studio di traiettorie): è possibile analizzare le mappe in modo da estrarre le proprietà che determinano lo spostamento di materia o di energia attraverso il territorio. Per esempio, la simulazione dei processi idrologici si può condurre secondo schemi distribuiti, valutando le direzioni di deflusso a partire da un modello digitale del terreno, ed effettuando quindi stime su aree virtualmente di ogni estensione. Lo stesso ragionamento si applica per la modellazione dell'erosione e del trasporto solido, o per il *particle tracking* degli inquinanti in falda. La simulazione cinematica consente di descrivere dove si muovono alcune entità rilevanti, e permette di affrontare una classe ampia di problemi connessi alla risposta di un sistema fisico distribuito, come un bacino idrografico o un acquifero, ad ingressi come le precipitazioni, lo sversamento di inquinanti, ecc. (p.es. Burrough e McDonnell, 1998).

Tutto ciò chiarisce le potenzialità della cornice computazionale dei GIS, oltre che per la cartografia o le operazioni di classificazione "standard", anche per la realizzazione di modelli matematici di complessità virtualmente illimitata. Con quasi tutti i GIS commerciali, si ha a disposizione un ambiente estremamente flessibile che permette di gestire in maniera unitaria il problema della produzione delle classificazioni attraverso vari tipi di modelli, della loro comunicazione e della discussione delle conseguenze e dei rimedi.

Il ragionamento sul territorio attraverso le operazioni GIS – con strumenti cartografici di lettura non tecnica, benché per nulla neutrale od oggettiva- permette ai vari gruppi sociali e agli specialisti di "giocare con i modelli", e si può ipotizzare che il processo decisionale risulti complessivamente di maggiore qualità.

Del resto, la pianificazione non si basa su descrizioni differenziali, puntuali o istantanee, dei fenomeni, ma solo su descrizioni integrali, che considerano le risultanti di processi locali in pattern riconoscibili alla scala regionale. Ci pare che spesso si invochi la scarsa attitudine delle cartografie alla descrizione dinamica senza avere ben chiaro qual è lo strumento che serve per la pianificazione.

La dinamica è essenziale per la valutazione, la progettazione o la verifica di manufatti: è una dottrina tipica dell'ingegneria di dettaglio. La pianificazione si appoggia invece su fatti quasi statici, per i quali, qualora occorra valutare le dinamiche, si considerano al più regimi di funzionamento sintetizzabili in pochi parametri la cui natura è quasi-invariante nel tempo. Se così non fosse, pochissimo si potrebbe dire in termini di rimedi.

L'analisi di supporto alla pianificazione territoriale è necessariamente sommaria rispetto a quella richiesta per le verifiche ingegneristiche: la comprensione dei fenomeni deve essere finalizzata all'assunzione di decisioni che normalmente hanno la scala del territorio e non del singolo sito insediativo. La potenziale importanza dei fenomeni è quasi sempre colta da una semplice disamina preliminare da parte dell'esperto di settore, e successivamente le fasi di indagine più significative sono quelle della raccolta e dell'interpretazione dei dati di campagna. Si producono rilievi, cartografie e database che forniscono un quadro della situazione che lascia scarso interesse, nella maggior parte dei casi, all'applicazione di modelli dinamici.

Per esempio, le esondazioni dei corsi d'acqua hanno caratteri fortemente dinamici, ed indubbiamente per la verifica degli organi di regolazione delle portate occorre studiare appositi modelli di simulazione dinamici. Tuttavia, al fine della pianificazione servono parametri molto più sintetici di quelli che

fornisce un'analisi dinamica: volumi esondati, aree potenzialmente allagabili, rischio che possono correre gli abitanti e i manufatti: mentre il modello dinamico basato sull'integrazione delle equazioni idrauliche consente di seguire l'evoluzione del fenomeno dell'alluvione, quello che interessa è solo la predizione delle aree inondate, che può essere fatta direttamente conoscendo in dettaglio il modello digitale del terreno (DTM) della zona. Conta solo l'effetto finale di un fenomeno, il suo integrale.

Quando poi è rilevante la comprensione delle dinamiche, modelli matematicamente più semplici rispetto alle equazioni della fisica matematica (p.es. automi cellulari: Von Neumann, 1966; Toffoli e Margolus, 1987) tengono conto maggiormente degli aspetti "intuitivi" dei fenomeni dinamici rispetto agli aspetti "specialistici", e facilitano la comunicazione dei ragionamenti e dei risultati anche grazie alla possibilità di ricondursi alla teoria dei giochi (p.es. Eigen e Winkler, 1986).

Se si considera ad esempio la soluzione fornita da Cecchini *et al.* (1997) all'equazione della diffusione, ricorrendo a tecniche di vita artificiale anziché alle classiche formulazioni numeriche, si osserva che il risultato perde un poco di realismo nella riproduzione delle transizioni, ma conserva la capacità di ben simulare le diverse "istantanee" che costituiscono gli stadi di evoluzione del fenomeno (nella fattispecie la diffusione di inquinanti nella laguna di Venezia), e si basa su un ragionamento molto più semplice da spiegare a gruppi non tecnici.

A parte alcuni problemi specifici, in generale interessa molto di più la distribuzione spaziale in corrispondenza di particolari istantanee anziché un filmato continuo dell'evoluzione del fenomeno. Si possono considerare istanti diversi per rendere conto dell'evoluzione degli scenari, ma l'attitudine del *planner* è verso un quadro generale e una "dinamica per stadi successivi", non verso una dinamica locale. Perciò la previsione dei modelli dinamici è quasi sempre costretta alla produzione di uno scenario finale più che ad un diario dell'evoluzione dei fenomeni, e quindi spesso questi modelli risultano sottoutilizzati rispetto alle loro potenzialità.

Infine, i modelli, semplificati e *data-driven*, che si implementano sui GIS presentano una struttura fortemente caratterizzata per la sua spazialità, e quindi predisposta per una successiva analisi di tipo multicriteriale secondo le tecniche proprie dei sistemi di supporto alle decisioni (DSS). Questo apre al generale concetto che il significato di un fenomeno può essere compreso solo a partire dal contesto in cui si verifica, e quindi dalla virtuale totalità degli altri fenomeni concomitanti. Poiché in pratica ogni modello deve essere riportato su una cartografia del sito indagato, è ovvia la praticità di uno strumento unitario che gestisca sia la simulazione, sia l'uso dei risultati della simulazione ed altre analisi geografiche per produrre la classificazione del territorio.

La maggior parte dei fenomeni fisici di interesse per la pianificazione, in ultima analisi, può essere descritta in termini semplici: ad es. nella trasformazione afflussi-deflussi, nonostante esistano modelli estremamente complicati, già con schemi molto semplici oggi è possibile descrivere gli aspetti fondamentali dei fenomeni (si veda p.es. Meijerink *et al.*, 1993).

Nella costruzione di zonizzazioni di rischio idraulico, l'enfasi tecnocratica sul modello, disgiunta da un ragionamento geografico, può produrre piani non gestibili. Ad esempio, se si simulano le correnti monodimensionali con modelli di moto vario per evidenziare molto accuratamente i tratti critici per esondazioni, ma si trascura poi di definire la risposta del territorio a seguito dell'esondazione, procedendo all'assegnazione semplicistica di classi di rischio, si commette un errore.

L'uso di matematiche meno complesse, ed il passaggio dai modelli algoritmicamente complessi ai modelli algoritmicamente semplici, che capitalizzano sulla raccolta ed elaborazione dei dati distribuiti, generalmente favorisce una maggiore attenzione al complesso del territorio rispetto al dettaglio del singolo processo.

E' a tal fine necessario inglobare quanta più informazione ambientale possibile nella costruzione del modello.

P.es. in idrologia sono utili modelli cinematici basati sull'analisi dei dati topografici distribuiti (*local drainage delineation*, LDD; es. Beven e Moore, 1993; Burrough e McDonnell, 1998), caratterizzati da una struttura concettuale e matematica molto semplice che capitalizza sull'abbondanza di dati distribuiti. Nello studio dell'inquinamento atmosferico, sono di grande interesse i modelli gaussiani con correttivi empirici per tenere conto degli effetti di ostacoli ed altre particolarità fisiografiche. Anche in questo caso, anziché tarare modelli più complessi, risulta vantaggioso procedere ad una descrizione dettagliata del territorio e dei suoi oggetti, usando poi schemi di calcolo semplici. I modelli della propagazione del rumore sono basati su soluzioni particolari dell'equazione delle onde, e sfruttano in maniera analoga ai modelli gaussiani un insieme di correttivi di tipo semiempirico che consentono di effettuare previsioni realistiche del livello di rumore da assegnate sorgenti, note le caratteristiche del territorio. In questi procedimenti si sfruttano le proprietà geografiche misurabili o osservabili (coesistenza, distanze, gradienti, forme...) in luogo di grandezze matematiche "astratte" come i parametri di taratura. In generale, si può affermare inoltre che molti dei processi fisici fondamentali per la pianificazione territoriale sono funzioni semplici della distanza, del gradiente ecc.

Riassumendo, si può affermare che oggi è irrilevante la scelta della tecnologia per la soluzione del singolo problema di previsione; *il passaggio fondamentale che distingue una modellazione qualunque che simula la realtà dalla modellazione che serve alla pianificazione territoriale è che in quest'ultima si produce una classificazione che contiene un giudizio sul territorio, che, a partire dall'identificazione di situazioni che si desidera modificare, abilita alla discussione dei rimedi.*

Il pianificatore si trova spaesato in un mercato di modelli nel quale ogni venditore proclama le virtù del proprio. Esistono oggi troppi modelli, ed ogni problema può essere risolto con un numero talmente elevato di sistemi diversi, che si ritiene utile una qualche schematizzazione che supporti nella scelta del processo di modellazione volta a volta più adatto alla classificazione.

Ad aggravare la già caotica condizione, c'è il fatto che oggi il termine "modellistica" è polisemico.

Da alcuni viene enfatizzato l'aspetto dell'analisi dei dati, da altri quella della riproduzione di valori osservati attraverso la soluzione di equazioni fisiche. Nel primo caso si dà maggiore spazio alla osservazione e al monitoraggio, nel secondo alla previsione e della modellistica fisico-matematica.

Le scuole sbilanciate verso il primo si concentrano sulla geostatistica e l'analisi dei dati, ricercando metodi che presuppongono il minimo ricorso alle equazioni a derivate parziali proprie dei modelli matematici distribuiti (p.es. Chantal de Fouquet, 1997; Bruno *et al.*, 2000).

Nel secondo caso, si preferisce invece prendere i dati solo come termine di confronto, e costruire invece schemi fondati su elaborazioni matematiche complesse, per i quali la validazione è solo una fase terminale del processo.

Ci sembra a questo proposito utile il concetto di *informazione a valore aggiunto*. Con ciò si intende tutta l'informazione che viene raccolta e strutturata, in varie forme, da fonti diverse e con varie tecniche, ai fini della costruzione di un database che consenta di effettuare classificazioni/previsioni, e quindi all'interno del la già richiamata visione del territorio come oggetto di modellistica.

Rispetto all'informazione *tout court*, questa definizione enfatizza il contributo interpretativo, sulla base di analisi più o meno formalizzate, da parte dell'analista.

La modellazione geografica sposta infatti il fuoco dalle forme e dai metodi con cui si ottiene un certo risultato, al suo uso ai fini di classificare il territorio.

Per essa, la mappa delle linee isopieze di un acquifero ottenute da un modello ad elementi finiti o da un'interpolazione geostatistica è assolutamente identica. Ovviamente, ci possono essere differenze pratiche in termini di utilizzo di quella mappa, ma concettualmente tutte e due entrano allo stesso modo all'interno del database e possono essere usate ai fini della classificazione (p.es. per distinguere zone che richiedono protezione o meno della risorsa idrica). Da questo processo di *assorbimento eclettico di informazione a valore aggiunto*, emerge un database che ha l'ambizione di rappresentare la percezione che il modellista o l'esperto ha del fenomeno, e che vuole vedere riprodotta dai dati raccolti.

Nella pianificazione territoriale, è centrale questa coincidenza di modello e database, che si traduce, per esigenze di rappresentazione e comunicazione, in cartografia nei GIS.

Se su un versante epistemologico la modellistica diviene principalmente classificazione, ovvero attribuzione di un giudizio per discutere i rimedi, su un versante tecnico il modello viene a coincidere con l'insieme dei criteri di classificazione, ovvero con la banca dati.

I GIS sono così strumenti non neutrali, alla stregua di tutti gli altri strumenti tecnologici come i software di *word processing* o di calcolo numerico: essi *impongono un paradigma modellistico, dal quale al contempo derivano, centrato sull'analisi sistematica del luogo e l'organizzazione delle informazioni a valore aggiunto*.

In questo senso può essere interpretata l'affermazione di Morain (cit. in Secondini, 1992) per cui il GIS è la *tabella periodica degli elementi* delle scienze del territorio.

4- Modelli disponibili per la pianificazione territoriale: un tentativo di sistematica

Produrre una sistematica dei modelli delle scienze ambientali si è rivelato estremamente utile in tutte le fasi in cui si avverte che il dibattito su un tema di ricerca è confuso. P.es. Freeze e Harlan (1969) hanno proposto in idrologia la distinzione fra modelli concettuali e modelli *physically based*, orientando i ricercatori a comprendere se nel loro modello fosse o meno inglobata una adeguata conoscenza dei fenomeni. Couclelis (2000) distingue nel campo delle scienze ambientali fra modelli delle scienze fisiche e modelli "integrati", fra *policy models* e *research models*, richiamando l'attenzione sul fatto che in generale la modellistica ambientale deve mantenere una rilevanza per le decisioni e un'applicabilità pratica. Costanza e Ruth (1998) hanno proposto un approccio a tre stadi di modellistica che parte dalle analisi scientifiche e giunge al pieno supporto alle decisioni nelle problematiche del mondo reale, articolandosi in *screening, research e management modeling*.

La scelta di un modello per una determinata applicazione dovrebbe seguire un criterio di minimo impegno di calcolo, ovvero di massima capacità predittiva, a seconda se l'applicazione tollera o meno una dose elevata di incertezza. La Tabella 1 riporta una possibile griglia di classificazione dei modelli per la pianificazione in relazione alla capacità predittiva e all'impegno di calcolo. La condizione ottimale è rappresentata, in linea teorica, dalla possibilità di applicare indici geografici di semplice elaborazione, basati su una conoscenza talmente dettagliata dei fenomeni da non richiedere alcun calcolo. P.es. molti degli esempi presentati da McHarg nel suo classico libro *Design with nature* (1969) consentono di effettuare predizioni avanzate (p.es. sulla localizzazione ottimale di determinate attività, insediamenti etc.) attraverso l'uso di una semplice sovrapposizione di mappe di indicatori booleani. Nel suo ragionamento, McHarg accetta gli indicatori senza discuterne in dettaglio, per cui siamo portati a ritenere che avesse motivi e conoscenze circa i fenomeni da essi rappresentati, tali da non dubitare di quegli indici. Ovviamente, in ogni situazione possono o meno verificarsi le condizioni che indici così certi siano disponibili (si veda in proposito Lober, 1995).

		IMPEGNO DI CALCOLO	
		ALTO	BASSO
CAPACITÀ PREDITTIVA	ALTA	modelli specialistici per verifiche approfondite	Modelli di classificazione ad indici, basati su una conoscenza approfondita <i>a priori</i> dei fenomeni
	BASSA	modelli di ricerca ancora in fase di sviluppo o di taratura	Modelli di prima approssimazione per scopi di <i>screening</i>

Tabella 1 – uno schema di classificazione funzionale dei modelli

Nei casi in cui queste condizioni non si verificano e sia comunque necessario disporre di una capacità predittiva elevata, ci si colloca nell’ottica di compiere verifiche specialistiche approfondite. Queste hanno generalmente costi tali da non poter essere applicate sistematicamente a tutto il territorio, ma solo alla scala locale. Generalmente, è meglio capitalizzare sui dati disponibili, perfezionandone la struttura, e definire indici di calcolo agevole all’interno di un GIS.

Openshaw (1998a), riprendendo una distinzione dovuta a Taylor (1990) fra sistemi geografici informativi e sistemi geografici di conoscenza, dove i primi enfatizzano la ricchezza in dati, i secondi la ricchezza in conoscenza “soft” come tipico della geografia umana, propone il “taylorgramma” (Openshaw, *id.*, *sic!*) di Tabella 1.

Conoscenza e contenuto concettuale	Ricchezza di dati			
	<i>Nessuna (immaginazione)</i>	<i>Poca</i>	<i>Moderata</i>	<i>Molta</i>
<i>Poco</i>	QG	SG	GIS SG	GIS SG
<i>Moderato</i>	MG QG	MG		
<i>Molto</i>	QG	MG QG		

Tabella 2- “taylorgramma”, da Openshaw, 1998 (MG=geografia matematica; SG= geografia statistica; QG= geografia qualitativa; GIS=geographic information systems)

L’Autore usa lo schema proposto per affermare che esistono situazioni in cui la geografia (umana) non usa tutta l’informazione disponibile, per mancanza di conoscenza su come trarne profitto, oppure non è in grado di estrarre conoscenza dai dati disponibili, con il che è giustificata la presenza di celle vuote nel “taylorgramma”. La *pars construens* di Openshaw vagheggia un uso generalizzato degli strumenti di intelligenza artificiale (come le reti neurali, gli algoritmi genetici e il *soft computing* di cui parla Zadeh, 1994) per estrarre il massimo di conoscenza dai dati, ad esempio attraverso procedure di modellazione “*model free*” guidata esclusivamente dai dati, tecniche per il riconoscimento automatico delle forme su una mappa, etc.

Il *soft computing*, secondo la definizione di Zadeh (cit.), consiste nel calcolo, ragionamento e *decision making* in cui si sfrutta la tolleranza per l’imprecisione e l’incertezza. Il *soft computing* usa la mente

umana come “modello di ruolo”, e mira alla “*formalizzazione dei processi cognitivi che gli uomini impiegano in modo così efficace nello svolgimento dei compiti quotidiani*” (ibid.).

Anche se ci pare che alcuni punti di vista mostrino un entusiasmo tecnocratico eccessivo per quelli che sono metodi di calcolo, mezzi per chiarire la rappresentazione e la comprensione dei dati del mondo reale, e quindi supportare le decisioni in maniera più efficace, ci sembra che sia da abbracciare l’istanza di sviluppare “*metodi di calcolo ibridi, che possano usare la conoscenza soft espressa in forma linguistica in computer che completino quello che pensiamo di conoscere con ciò che può svelarci solo una procedura di machine learning*” (Openshaw, cit.; trad. it. nostra). Se queste tecniche vengono viste come un modo di ordinare le idee, e non di cercare di far compiere ai calcolatori operazioni di cui solo la discussione politica può farsi carico, sicuramente l’ambiente GIS in cui si rappresentano i fenomeni del territorio e si discute la classificazione diventano più flessibili e capaci di sostenere una maggiore razionalità comunicativa.

La condizione essenziale per l’utilità della modellistica nella pianificazione è che i fenomeni siano espressi da equazioni di stato “quasi stazionario”, ovvero che abbia senso una loro integrazione (cioè una riduzione di un processo in cui le grandezze variano ad uno in cui si considerano i valori “medi” secondo qualche regola) nel tempo.

Questa operazione di integrazione nel tempo è molto importante, perché è alla base di ogni rappresentazione nel solo spazio geografico. Se si richiedesse di studiare la dinamica del fenomeno, occorrerebbe impostare un’analisi di tipo diverso, e si renderebbe necessario anche un diverso tipo di rappresentazione: per esempio un filmato, o una serie di punti, curve o superfici isocrone, queste ultime materialmente non compatibili con una rappresentazione di tipo cartografico.

Nell’ipotesi di stato quasi stazionario, invece, si può semplicemente riportare una limitata sequenza di istantanee del fenomeno nello spazio. All’interno di un GIS, inoltre, è possibile modellare un sistema dinamico stazionario ingresso-uscita a parametri concentrati. In altri termini, si possono modellare in un GIS tutti quei processi che sono il risultato di una coalescenza di effetti dei quali si tiene conto in maniera aggregata e non puntiforme; questi effetti si devono sovrapporre secondo modalità che *non dipendono da una variabile di stato del sistema*, ma solo da parametri fissi nel tempo, e solo dalla collocazione relativa di un punto rispetto ad un altro, dai ritardi temporali dovuti al trasferimento (che devono essere considerati delle costanti una volta assegnate le condizioni del sistema) in base ai quali si può costruire una risposta nel dominio del tempo ad un ingresso.

Questo tipo di approccio può essere esemplificato dalla modellazione della trasformazione da piogge nette²⁹ a portate che si verifica in un bacino idrografico: un GIS consente di rappresentare il DTM e calcolare una serie di mappe derivate, come quella di pendenza, di direzione di massima pendenza, di esposizione al sole, di distanza di ogni pixel dalla sezione di uscita del bacino ecc.

Inoltre, l’utilizzo di tematismi di diverso tipo consente di costruire una mappa della resistenza al moto, una mappa dell’erodibilità dei terreni ecc. In questo modo si può calcolare la distribuzione dei tempi di corrivazione del bacino e con un’analisi della distribuzione di frequenza di questi tempi si può stimare un idrogramma di piena con il metodo cinematico, o una curva di concentrazione dei sedimenti erosi o di inquinanti.

²⁹ Mentre un bacino idrografico non si comporta mai come un sistema ingresso-uscita per le piogge, a causa della notevole influenza delle variabili di stato (umidità del terreno, evapotraspirazione reale...), il comportamento rispetto alle piogge nette (depurate cioè di tutti gli effetti di perdita per infiltrazione, evaporazione e immagazzinamento) può essere rappresentato da, un sistema ingresso-uscita anziché da uno più complesso ingresso-stato-uscita, per scopi specifici.

Analogamente, si può stimare il decadimento di una sostanza reagente lungo una traiettoria a partire dalla conoscenza della lunghezza del suo percorso (si veda a proposito, p.es., Liu, 2000). In questi esempi, quello che si ottiene è solo l'andamento nel tempo della risultante di una serie di fenomeni (per esempio l'accumulo di acqua come portata in funzione del tempo (o idrogramma) alla sezione di chiusura del bacino, e non l'evoluzione dinamica in ciascun punto.

Finora si è discusso su quali siano le caratteristiche della modellazione che effettivamente serve per la pianificazione territoriale. Si è stabilito che un primo requisito fondamentale è la possibilità di fornire predizioni circa il comportamento del territorio che consentano di *discutere i rimedi*. Per fare questo, la modellistica deve procedere attraverso una classificazione che consenta di dare un giudizio a ciascun punto od oggetto del territorio rappresentato.

Per giungere al giudizio, ovvero alla classificazione, si possono utilizzare una serie di argomentazioni razionali che non necessariamente si restringono a calcoli basati sulla fisica matematica per la descrizione dei fenomeni. I modelli di simulazione sono una possibile tecnica per descrivere il comportamento delle risorse naturali. Tuttavia le tecnologie GIS mettono a disposizione numerosi strumenti di analisi spaziale che vanno molto al di là di queste tecniche.

Si è proposto al capitolo precedente che ogni classificazione del territorio possa essere ricondotta ad uno dei seguenti casi:

- metodologie basate sulla conoscenza di un modello esplicito di funzionamento del sistema (p.es. le simulazioni di processi fisici, basate su modelli matematici con i quali prevedere gli effetti delle attività antropiche, o dei fenomeni naturali su di esse, o l'identificazione e valutazione di strutture a comportamento noto);
- metodologie basate sulla conoscenza dei soli fattori significativi per il funzionamento del sistema, ma non delle regole della loro interazione (p.es. classificazioni probabilistiche ai fini dell'analisi del rischio di calamità naturali);
- metodologie basate su giudizi di valore espressi a livello tecnico e giustificabili in termini razionali (p.es. giudizio d'impatto ambientale, localizzazione ottimale di determinate attività antropiche in base ad analisi multicriterio).

Le metodologie ricadenti nel primo caso possono essere a loro volta distinte in (1) simulazione dei processi fisici, e (2) analisi e valutazione delle strutture.

Sul concetto di processo, e su quello ad esso collegato di "sistema", occorre spendere ancora qualche parola.

Per sistema si intende, con ovvia adesione alle attuali tendenze teoriche, un insieme di oggetti legati fra loro da relazioni di dipendenza causale. Questa definizione, molto ampia, ha spesso lasciato spazio ad un uso generico e improprio del termine, per cui ogni cosa è "sistema". Occorre affermare che è un sistema solo ciò che viene guardato, studiato e controllato-utilizzato come tale. La pianificazione dovrebbe allora avere a che fare quasi esclusivamente con sistemi. Si rinvia a Couclelis (2000) per una discussione sulla natura (come concetto della scienza contemporanea) dei concetti sistemici e sul loro ruolo nella produzione di modelli integrati.

Secondo il punto di vista della simulazione dei processi fisici, discussa ampiamente ad es. in lavori quali quello di Maidment (1993) o di Mitas *et al.* (1996), si devono caratterizzare le dinamiche dei fenomeni che interessano le georisorse. Queste dinamiche sono normalmente rappresentate sotto forma di equazioni alle derivate parziali, e descrivono fatti come la propagazione di un'onda, la diffusione, dispersione ed avvezione, oppure la continuità della massa, della quantità di moto o dell'energia.

L'ipotesi fondamentale di tipo geografico che sottende questo approccio è quella della continuità della variazione delle grandezze e delle loro derivate.

Il punto di vista della analisi e valutazione delle strutture si concentra sulla distribuzione spaziale delle grandezze, cercando di estrarne le proprietà topologiche rilevanti per la pianificazione. Entro questo contesto, convivono molte metodologie e tecniche analitiche: dalla geostatistica e dalle tecniche statistiche di analisi spaziale (come la statistica multivariata e la *pattern analysis*), all'analisi topologica delle reti (reti di trasporto; reti tecnologiche; reti ecologiche...), all'analisi delle immagini e dei segnali, che ha prodotto nel tempo strumenti analitici che sono stati generalizzati per studi anche molto diversi e spesso ricadenti nei primi due punti di vista di cui sopra. Fra questi ricordiamo in particolare le tecniche di filtraggio, che consentono di effettuare valutazioni sulle caratteristiche di variabilità locale delle mappe e trovano applicazioni molto vaste (per esempio nel calcolo dell'area di impatto visivo di un manufatto, nella delineazione delle reti di drenaggio superficiale, nella simulazione dei flussi di animali in una rete ecologica).

Accanto a queste tecniche, è da ricordare lo sviluppo del riconoscimento delle immagini, che si è sviluppato a partire dalla classificazione e oggi vede una frontiera estremamente interessante nella segmentazione *object-based* (p.es. Gorte, 1999).

L'analisi e la valutazione delle strutture sono spesso due volti dello stesso problema, dal momento che quasi sempre l'identificazione si appoggia ad un paradigma valutativo. Per esempio, nel caso dell'interpolazione geostatistica, all'analisi che produce l'estensione da dati puntiformi a dati areali si associa sempre una cartografia della varianza di stima, che costituisce il termine di giudizio dell'interpolazione stessa, ovvero una valutazione della disposizione spaziale dei punti di misura. L'analisi delle reti si basa in genere su indici prestazionali, che consentono di dire come si comporta il sistema sotto un particolare punto di vista. La classificazione, sopra proposta, dei punti di vista analitici riguarda approcci che, il più delle volte, si compenetrano e agiscono in modo sinergico e sussidiario, configurando circuiti di migrazione delle idee e *contaminationes* che aprono a sintesi spesso originali e fruttuose.

Con le metodologie ricadenti nel secondo caso, si devono studiare le ricorrenze dei fenomeni in relazione alla concomitanza dei loro fattori causali. Questa operazione modellistica si rifà essenzialmente alle procedure di *map overlaying*, e mira a dare un giudizio sul comportamento locale del territorio in concomitanza con la presenza di varie caratteristiche. Le sovrapposizioni di mappe possono essere effettuate con tecniche deterministiche ('*rule-based*': se... allora...). Tuttavia, spesso è necessario tenere conto dell'incertezza sia nelle definizioni degli oggetti, sia nella scelta di regole. L'incertezza può essere intesa anche come *fuzzyness*, indeterminazione. Molteplici approcci sono stati sperimentati negli ultimi decenni, dalla *fuzzy logic* alle reti neurali e all'intelligenza artificiale, alle tecniche bayesiane, o non parametriche, di tipo probabilistico. E' opportuno richiamare che le operazioni di classificazione possono essere interpretate come valutazioni multicriteriali, ed è in proposito necessario richiamarsi alla vasta letteratura degli ultimi anni.

Le metodologie ricadenti nel terzo caso (giudizi di valore espressi a livello tecnico e giustificabili in termini razionali) comprendono tutte le tecniche di formalizzazione dei ragionamenti che consistono semplicemente nel mettere in ordine, secondo una scala arbitraria ma condivisa, affermazioni soggettive circa fatti di per sé evidenti. In merito all'evidenza, si sottolinea che l'evidenza di un fatto non è una proprietà ontologica o gnoseologica "assoluta", ma ha natura discorsiva nello spirito del postmoderno: spesso, nell'affrontare i problemi, si riesce a trovare un accordo ragionevole fra i vari attori del processo di piano attorno ad alcuni aspetti fondamentali, che svolgono pertanto il ruolo di

evidenze o dati del problema. La classificazione in base a giudizi di valore è una forma del tutto tradizionale di classificazione del territorio. E' sostanzialmente diversa dalle altre due classi di metodologie perché non utilizza direttamente i dati per produrre la classificazione, per cui devono essere riviste le procedure con le quali un giudizio così espresso può essere ritenuto "validato". Un giudizio è una funzione che associa ad una combinazione unica di evidenze una classe di attributo. La funzione può essere costruita in vario modo. Un metodo molto comune è quello dell'analisi multicriterio. In questo tipo di procedura, ad un insieme di evidenze viene assegnato un punteggio su una scala convenzionale, che consenta di apprezzarne l'intensità ai fini del giudizio. I vari punteggi possono poi essere combinati in modo da ottenere per ogni combinazione unica un punteggio complessivo.

Il modo in cui si sceglie il punteggio è del tutto soggettivo. Nel caso di evidenze espresse in grandezze numeriche che variano con continuità (p.es. la concentrazione di un inquinante) si può ad esempio assumere come punteggio la variabile stessa, opportunamente normalizzata, che rappresenta una scala di intensità. Nel caso di variabili categoriali, può essere utilizzata ad esempio la *fuzzy logic*, in particolare nella formulazione nota come *semantic import* (p.es. Burrough e McDonnell, 1998). Come ben noto, con questa tecnica si riconduce un'affermazione del tipo sì/no, un oggetto appartiene/non appartiene ad un insieme, ad un'affermazione sul grado di appartenenza dell'oggetto all'insieme, attraverso la definizione della cosiddetta *membership function* (Zadeh, 1965; Bellmann e Zadeh, 1971). In questo modo possono essere costruiti giudizi sfumati, come è proprio della maggior parte dei giudizi umani, anziché giudizi di tipo *booleano*.

Ci sembra utile a questo punto proporre una sistematica dei modelli oggi disponibili. La convinzione deriva dal fatto che si è rapidamente diffusa in Italia, ma non solo, una domanda di modellistica nella pianificazione. A questa crescita della domanda, tuttavia, non corrisponde una adeguata crescita della cultura della modellazione, soprattutto in certi ambiti tecnici della pubblica amministrazione che si trovano poco attrezzati al suo uso critico.

Allo stesso tempo, le scuole di ricerca fanno uso molto vario del termine, per indicare ora procedure di simulazione con modelli fisico-matematici, ora procedure di stima o simulazione geostatistica o di serie sintetiche, ora operazioni di *overlaying* e supporto alle decisioni.

In via preliminare, proponiamo la seguente sistematica dei modelli previsionali utilizzabili per la classificazione del territorio:

1. modelli che consentono di riprodurre una variabile simulando i meccanismi con cui essa viene generata
 - a. basati sulla integrazione delle equazioni della fisica matematica
 - i. equazioni di tipo parabolico
 - ii. equazioni di tipo iperbolico
 - iii. equazioni di tipo ellittico
 - b. modelli basati su soluzioni analitiche o semiempiriche delle equazioni della fisica matematica
 - c. simulazione di processi stocastici
2. modelli che consentono di elaborare l'informazione disponibile per mettere in evidenza aspetti non immediatamente percepibili
 - a. interpolazione
 - b. correlazioni e regressioni
 - c. analisi con filtri numerici
 - d. analisi in componenti principali e analisi fattoriale
 - e. identificazione di sistemi a scatola nera.

3. modelli di classificazione basati su reti di inferenza
 - a. reti neurali
 - b. reti bayesiane
 - c. funzioni discriminanti, *pattern analysis* e *cluster analysis*, *supervised* e *unsupervised classification* nell'elaborazione delle immagini digitali
4. modelli di giudizio che riproducono il modo in cui i gruppi sociali formulano valutazioni qualitative e informali su diverse alternative
 - a. tecniche di analisi multicriterio
 - b. modelli di sovrapposizione di indici *rule-based* (*booleani o fuzzy*)

I modelli di cui al punto sono i tipici modelli della fisica per descrivere i fenomeni. Si tratta, storicamente, dei modelli prediletti dall'ingegneria per la soluzione di problemi legati alle verifiche di manufatti o sistemi circoscritti e a ridotta complessità (nel senso, p.es., di Morin, 1990; Kay, 2000), che poi sono stati estesi fino a coprire, nel contesto della teoria dei sistemi sviluppata nel XX secolo, anche oggetti di elevata complessità, spesso con risultati eccellenti soprattutto in ambito quali l'elettronica, la meccanica e la bioingegneria.

Ai fini della pianificazione territoriale, e sempre limitando il campo di indagine alla descrizione dei sistemi fisici, esistono molti esempi di applicazioni, anche di successo, di modelli di questo tipo a sistemi geografici. Per esempio, nel campo dell'idrologia o della meteorologia si usano correntemente modelli basati su equazioni differenziali a derivate parziali, risolte con tecniche numeriche in una, due o tre dimensioni. Alcuni casi significativi sono:

- la modellazione diffusivo-avvettiva (soprattutto in campo bidimensionale) per il trasporto degli inquinanti in falda (p.es. De Marsily, 1986)
- la modellazione cinematica dei processi idrologici (formazione del deflusso, erosione, inquinamento diffuso...) (p.es. Morgan, 1995; Beven e Moore, 1993)
- la modellazione del bilancio locale di massa (ad es. bilanci idrologici, di inquinamento...; p.es. Mackay *et al.*, 1985)
- la modellazione del flusso su strutture reticolari (es. reti idrauliche od elettriche, distribuzione della qualità delle acque fluviali, movimento di organismi lungo reti ecologiche, traffico veicolare...; p.es. Geneletti e Pistocchi, 2000)

Le soluzioni analitiche o semiempiriche sono impiegate in casi particolari, ma ricorrenti. Ad es.

- la modellazione di fenomeni ondulatori (es. rumore: p.es. ISO 9613-II)
- la modellazione diffusivo-avvettiva in campo monodimensionale (gaussiana) per l'inquinamento atmosferico (p.es. Zannetti, 1990) e idrico (p.es. Domenico e Schwartz, 1990), l'infiltrazione verticale nei terreni (p.es. De Marsily, 1986), la compattazione dei suoli (*ibid.*) etc.
- l'analisi all'equilibrio limite globale delle scarpate e dei versanti (p.es. Lancellotta, 1995).

Per l'implementazione dei modelli di questo gruppo, è possibile in linea di principio sfruttare le proprietà standard dei GIS di tipo raster, dal momento che si possono impostare quasi tutte le soluzioni delle equazioni in esame in termini di minima distanza, minimo costo, laplaciani e gradienti ecc. (si veda p.es. Bagli e Pistocchi, 2000). Un dubbio permane circa la praticità di questa procedura, viste le limitazioni correnti in termini di efficienza computazionale dei GIS (*ibid.*).

La simulazione di processi stocastici serve soprattutto per quantificare gli effetti di un ingresso incerto su un sistema del quale è noto il meccanismo di risposta. Per esempio, sappiamo come funziona un serbatoio, in termini di volumi invasati, livelli e portate scaricate, in relazione ai diversi ingressi

d'acqua, ma non sappiamo come effettivamente sarà l'andamento nel tempo delle portate entranti. In casi come questo, possiamo studiare l'andamento passato delle serie di portata, per costruire un modello che sia in grado di simulare un numero illimitato di serie di portata ipotetiche, ma caratterizzate dalle stesse proprietà statistiche e probabilistiche della serie che effettivamente si osserverà in futuro.

In questo modo possiamo verificare quale sarà il comportamento del sistema in relazione ai possibili eventi di ingresso, e valutare la sua idoneità allo scopo per cui è stato realizzato. Un esempio di modellazione di questo genere è riportato al capitolo 8.

I modelli classificati al punto sono molto diversi dai primi, e corrispondono a tutte le procedure formalizzate che trovano largo impiego nelle scienze geografiche e nella tradizione dell'ingegneria mineraria (Burrough e McDonnell, 1998; Journel e Huijbregts, 1978).

L'interpolazione è una operazione che può essere condotta con metodi molto diversi, di cui tuttavia il kriging nelle sue varie forme (Matheron, 1960) è oggi il più accreditato. Indipendentemente dal metodo utilizzato, comunque, l'interpolazione è una procedura che consente di visualizzare a colpo d'occhio l'andamento spaziale di una grandezza nota in un numero finito di punti.

Questa proprietà è di fondamentale importanza perché consente di far emergere una struttura spaziale che altrimenti non apparirebbe.

Le correlazioni e regressioni fra due o più variabili consentono di esprimere in forma analitica un legame fra le stesse, delle quali si riscontra un andamento mutuamente condizionato, ma non si conosce la legge fisica con la quale questo andamento è determinato. P.es. può essere ricostruito un campo continuo di grandezze note a partire dalla loro correlazione con altre grandezze. E' il caso p.es. delle precipitazioni medie annue in relazione alla quota topografica e alla distanza dal mare, ai fini della redazione di mappe del bilancio idrologico (Pistocchi e Neri, 2000).

I filtri numerici si applicano a sequenze di dati, in particolare a sequenze bidimensionali che costituiscono una mappa di superficie continua, per far risaltare meglio determinate caratteristiche. Per esempio, un filtro molto comune è quello della derivate, che permette di evidenziare concavità e convessità, pendenze, bordi e fronti ripidi in una superficie continua come quella topografica o i rilievi geofisici (p.es. Wright e Bonham Carter, 1996).

Si possono comprendere sotto questa categoria di strumenti modellistici tutte le procedure che consentono di identificare e valutare (in termini geometrici e topologici) le strutture del territorio (p.es. reti ecologiche, reti di drenaggio etc.). In questo, un ruolo importante è rivestito dalle procedure di *image processing* come i *neighbour operators* (ILWIS, 1997; Burrough e McDonnell, 1998).

Nel seguito del lavoro si mostreranno in proposito alcune applicazioni di questi strumenti per definire proprietà ecologiche ed idrologiche fondamentali del territorio, e conseguentemente assegnare un giudizio per la pianificazione.

L'analisi fattoriale e l'analisi in componenti principali sono un insieme di tecniche, finalizzate alla estrazione di alcuni indicatori sintetici da un insieme di popolazioni di variabili. Si ricorre a questi modelli per valutare la significatività di una variazione dei parametri esprimenti un certo fenomeno sia nello spazio, sia nel tempo.

Attraverso operazioni di statistica spaziale si può effettuare la valutazione di proprietà funzionali e geometriche rilevanti (p.es. dalla valutazione della *segment density* di lineazioni geologiche si può inferire il grado di fratturazione e quindi le proprietà tecniche degli ammassi rocciosi).

L'identificazione di sistemi a scatola nera (*black box*) consiste nella previsione dell'uscita di un sistema a partire dal solo ingresso e da eventuali variabili di stato, senza conoscere le leggi fisiche che determinano il passaggio. Si tratta di una tecnica molto potente, anche se soggetta a pesantissime

limitazioni (per la cui discussione si rinvia a Chierici, 1990), che trova applicazioni molto varie, anche se in genere si presta meglio per fenomeni a parametri concentrati e quindi non cartografabili (Pistocchi *et al.*, 2000).

I modelli di cui al punto 3 sono finalizzati alla classificazione diretta del territorio: essi presuppongono che sia specificata la classe cui si deve verificare l'appartenenza del punto od oggetto del territorio che si deve classificare. Il principio su cui si basa questa modellistica è quello di analizzare la combinazione delle variabili rilevanti ai fini del giudizio, che fa sì che il punto sia conseguentemente ascritto ad una certa classe. Il modello procede dall'esame di un certo numero di punti, per i quali viene assegnato un giudizio di classificazione, e con opportuni algoritmi estende il giudizio anche a tutti gli altri punti della regione di studio.

Le diverse tecniche possono ricorrere ad algoritmi come l'analisi delle frequenze e la conseguente inferenza delle probabilità condizionate, secondo il teorema di Bayes, oppure all'aggiustamento di funzioni di appartenenza in base ai dati osservati (come nel caso delle reti neurali), oppure alla massimizzazione di funzioni discriminanti come accade nella classificazione supervisionata o non supervisionata delle immagini da satellite. La classificazione basata su questo tipo di modelli è ben inquadrata dall'approccio delle *favourability functions* (Chung e Fabbri, 1993), che definiscono un paradigma generale per le applicazioni.

I modelli di cui ai punti 2 e 3 sono ampiamente utilizzati in tutti i package di tipo GIS e costituiscono ormai strumenti standard per l'analisi dei dati. Generalmente, sono la forma più frequente con cui si ottengono informazioni a valore aggiunto.

Ovviamente la predizione del comportamento dei sistemi studiati che si ottiene con queste tecniche è molto meno forte di quella che si ottiene da un modello di tipo 1. Questi modelli possono però essere estremamente utili in quanto si limitano a far emergere quanto già – implicitamente- contenuto nei dati di partenza, con un intervento sostanziale dell'esperto che deve fornire, a partire dai rilievi disponibili, i criteri di lettura e di selezione appropriata dei dati (Chung e Fabbri, 1999).

Si prefigura così un processo che consente di pervenire per approssimazioni successive, man mano che si rendono disponibili nuove informazioni, a una classificazione che si migliora "apprendendo" dalle esperienze nuove regole. In forza di questo processo di costruzione interattiva del database, queste metodiche si prestano in grado maggiore alla predisposizione di una base razionale delle discussioni. Si tornerà in seguito sui dettagli tecnici dei modelli impiegati allo scopo.

I modelli di cui al punto 4 sono decisamente diversi rispetto ai precedenti: innanzitutto essi tendono a spiegare e simulare processi decisionali, e non processi o strutture di tipo fisico o biologico. Inoltre, questi modelli non ammettono validazione. La classificazione del territorio condotta con questo tipo di modelli deve rendere esplicito un giudizio razionale e soggettivo: essi permettono di ottenere come risultato della simulazione una *decisione*, che potrà essere tradotta in una vera e propria decisione politico-amministrativa oppure no, ma che ha comunque un carattere molto più soggettivo e valutativo rispetto alla indicazione di un modello fra quelli dei punti precedenti.

Con l'approccio dell'analisi multicriterio, il giudizio è un punteggio o un codice di valutazione che dipende da un certo numero di fattori (criteri) da combinarsi con opportune regole. La forma più comune dell'analisi multicriterio è quella di assegnare una scala di punteggi normalizzata a ciascun fattore, e un peso. Dalla somma pesata dei punteggi si ottiene il giudizio complessivo. La procedura può essere riportata in termini geografici una volta che i criteri siano rappresentati da mappe, esprimenti ciascuna una distribuzione dei punteggi per il criterio cui si riferisce. L'analisi di questo tipo è implementata direttamente in alcuni package GIS (p.es. IDRISI: Clark Labs, 1998) ed è oggetto di

applicazioni correnti nel campo del *decision making* (p.es. Mendes e Motizuki, 2000; Berry *et al.*, 2000; Berry e Pistocchi, 2000).

Con l'approccio della modellazione *rule-based* (Burrough, 1996), si identificano alcuni indici significativi di attributi il cui concomitante verificarsi rende un punto adatto alla scelta oppure no. Esistono diversi esempi in letteratura al riguardo, soprattutto nel contesto di identificare i siti idonei per l'insediamento di determinate attività quali discariche, attività estrattive, ecc. (p.es. McHarg, 1969; Bonham Carter, 1994; Lober, 1995; Pistocchi e Neri, 2000c). La logica con cui valutare la compresenza degli attributi può essere sia di tipo booleano (p.es. Bonham Carter, 1994), come nelle applicazioni tradizionali *à la* McHarg, sia di tipo *fuzzy* (Zadeh, 1965; Burrough, 1986; Bonham Carter, 1994), cosa che consente di trattare gli aspetti più imprecisi e sfumati del giudizio.

Per quel che riguarda la calibrazione del modello, occorre considerare che il giudizio è, nella maggior parte dei casi, costruito in maniera discorsiva. Questo comporta che la calibrazione del modello coincida con la discussione stessa nella quale si scelgono i criteri rappresentativi del giudizio, sia i pesi da assegnare a ciascuno di essi. Esistono procedure che “nascondono” le modalità con le quali i pesi vengono assegnati: gli attori sociali coinvolti sono chiamati a esprimere alcune risposte su questionari variamente formulati, e successivamente viene applicata una procedura analitica che consente di calcolare i pesi. Se da un lato questo modo di procedere favorisce la “ripetibilità” del giudizio e cerca l’oggettività del modello, dall’altro non si deve dimenticare che lo scopo fondamentale dei modelli decisionali è quello di chiarire i termini del problema, e che quindi la costruzione discorsiva e sociale dei criteri e dei pesi è parte essenziale della modellazione.

Di conseguenza, non è affatto una “oggettività” del modello –del resto irraggiungibile in modo pieno – che viene ricercata, quanto una razionalità comunicativa.

5- La scelta dei modelli in relazione al problema di piano

Si è argomentato che la sola modellistica che realmente è importabile nel processo di pianificazione assume la forma della classificazione cartografica. In quest’ottica, l’uso dell’informazione ambientale disponibile può essere definito come un processo di “expert mapping”, ovvero un assemblaggio consapevole delle informazioni per la produzione di carte a valore conoscitivo aggiunto, mediante una elaborazione formale ed analitica commisurata al livello delle risposte cercate per esprimere un giudizio. La presentazione dei risultati sotto forma di una immagine sintetica, facilmente comunicabile e adottabile come base di ulteriori discussioni circa le scelte da assumere, è parte integrante del processo di modellazione: per quanto detto, la valutazione delle conoscenze scientifiche e informali ai fini del *decision making* è attività eminentemente discorsiva.

I modelli sono sempre frutto della valutazione dell’esperto; le tecniche formali, di cui si è cercato di costruire una sistematica, consentono una standardizzazione delle procedure che dovrebbe garantire non una obiettività, ma una trasparenza e una sostanziale razionalità delle scelte. Ovviamente, rimane al livello esclusivamente etico-politico ogni controllo di congruenza delle decisioni con le valutazioni.

La ricerca scientifica in campo ambientale mette oggi a disposizione strumenti per affrontare virtualmente ogni problema di previsione (almeno in termini locali e di breve-medio periodo).

Sono state sviluppate ricerche mirate allo studio di come le tecnologie dell’informazione geografica si diffondono nelle amministrazioni, e quale uso ne viene fatto (si veda, per tutti, Ciancarella *et al.*, cit.), ma poco è stato detto circa le modalità con cui effettivamente i modelli previsionali, in particolare per i sistemi fisici dell’ambiente, possono essere impiegati e migliorare la qualità della gestione del territorio. Mentre in quasi tutti i contesti della ricerca è chiaro il quadro teorico della modellistica,

l'aspetto politico e applicativo rimane quasi inesplorato. Restano ancora largamente irrisolte domande quali:

- che tipo di modelli (semplici/complessi, deterministici/stocastici, di uso "tecnocratico" o inglobati negli strumenti di cartografia usati dalle amministrazioni...) è meglio utilizzare per prevedere gli effetti del piano in relazione alle varie problematiche?
- quale uso (in termini politici, come base di discussione e di governo dei conflitti, come fonte di autorità nelle decisioni...) dovrebbe essere fatto del modello?
- fino a che punto è necessario approfondire la conoscenza dei sistemi ambientali (campagne di acquisizione dei dati, monitoraggi, approfondimento teorico dei modelli...) per pervenire a una base razionale adeguata per le decisioni?
- quale rappresentazione (cartografica "divulgativa", cartografica "tecnica", sintetica in forma di tabelle e grafici...) dovrebbe essere fatta dei risultati dei modelli previsionali?
- fino a che punto, e con quali modalità, è possibile fare uso delle indicazioni dell'analisi scientifica per produrre indirizzi, norme e vincoli di piano?
- come dovrebbero essere acquisiti, organizzati e rappresentati i dati per poter rendere operativo l'uso corrente di modelli di previsione nelle scelte di piano?

Alcuni autori si sono interrogati sulla diversa diffusione dell'uso dei modelli previsionali per difendere posizioni e scelte di pubblico dominio (p.es. King e Kraemer, 1993), ma i problemi richiamati rimangono ancora aperti.

La necessità nella pianificazione ambientale di un approccio profondamente interdisciplinare, che molti urbanisti "classici" non sono più in grado di gestire, ha prodotto una situazione di separazione fra le scienze ambientali e la progettazione.

Fino ad oggi le prime hanno sviluppato una *pars destruens*, senza reali capacità propositive, e la seconda si è appropriata di un lessico ambientalista spesso ingenuo e con pochissime ricadute concrete in termini di sviluppo sostenibile.

Innanzitutto, occorre rendersi conto che *la raccolta dei dati deve essere sviluppata in senso strettamente orientato alla messa a punto degli strumenti previsionali*. È chiaro che i livelli di analisi ambientale accessibili dipendono dalla disponibilità dei dati e dagli obiettivi di conoscenza.

Le scienze fisiche tendono a proporre un modello di approfondimento "lineare" della conoscenza, che non tiene conto delle reali esigenze in rapporto alle decisioni, ma aspira alla caratterizzazione, al dettaglio massimo compatibile con i dati: si parte da prime ipotesi, si mettono a punto modelli di *screening*, e gradualmente ci si avvicina ai modelli di maggiore impegno, visti comunque come un ideale cui tutte le ricerche dovrebbero tendere (Figura 4).

Un esempio tipico di questo approccio è da ravvisarsi nell'analisi di rischio, dove a seconda dei casi si impostano modelli in cascata che mirano a definire sempre in maggiore dettaglio il comportamento dei sistemi ambientali che producono fattori di esposizione dell'uomo a sostanze pericolose (p.es. RBCA).

La tabella 1 riporta alcuni esempi di organizzazione gerarchica delle analisi ambientali in vari contesti. Lo scopo della tabella è orientativo, per rendere conto delle implicazioni in termini di disponibilità di dati dell'approfondimento dell'analisi.

La messa a punto di un sistema di supporto alle decisioni passa sempre per il primo livello di caratterizzazione dei fenomeni indicato nella tabella precedente. L'analisi ambientale dovrebbe sempre svolgersi all'interno del quadrato grigio della Figura 4: occorre innanzitutto identificare i problemi rilevanti (*scoping*), operazione intrinsecamente qualitativa, e successivamente formulare le domande in termini modellistici (cioè individuando lo schema previsionale che può in qualche modo darci le risposte).

Questa fase preliminare può essere gestita interamente all'interno dei pacchetti GIS tradizionali, che invece sono oggi utilizzati quasi solo per le loro potenzialità grafiche o di gestione dei dati. La necessità di analisi di maggiore dettaglio spetta a livelli operativi successivi. In questi successivi livelli, si adottano modelli di crescente complessità matematica e congruamente esigenti in termini di dati in ingresso.

Il modello di conoscenza ad accrescimento in cascata ora descritto si caratterizza per:

- la “fede” nei modelli che prevede la possibilità di definire sempre un livello di modellazione più soddisfacente (e quindi una perfezionabilità teoricamente illimitata della capacità di controllo dei sistemi ambientali)
- l'obiettivo di previsione quantitativa “esatta” delle grandezze in gioco (un numero sintetico da poter usare nelle successive valutazioni ingegneristiche: *la* portata monosecolare, *la* potenza sonora superata per il 90 % del tempo, *la* concentrazione di una sostanza...)
- l'assenza di stadi esplicitamente riservati alla discussione “aperta”, fra gli attori sociali coinvolti, dei problemi: questi sono chiariti e formulati dall'analista e da un pool di specialisti di settore, che orchestrano il processo di acquisizione dei dati, loro interpretazione e produzione del quadro a valore informativo aggiunto costituito dai risultati dei modelli
- un'impostazione tecnocratica imperniata sulla convinzione che dalle risposte che si ottengono da una modellazione opportunamente calibrata e validata la società possa trarre le migliori risposte sul piano politico.

In questo schema prevale una utilizzazione dei sistemi GIS e della cartografia allo scopo di organizzare i dati e presentare i risultati, e se anche i modelli possono essere realizzati all'interno dei GIS si prediligono in genere altri strumenti predittivi (p.es. i sistemi di analisi del rischio, precedentemente ricordati, si fondano quasi sempre su modelli implementati in software *ad hoc*). Per riproporre una classificazione dei rapporti fra modelli e GIS riportata, fra gli altri, in Burrough, 1996, si può dire che in prevalenza il rapporto fra GIS e modellistica in questo tipo di schemi è di tipo “*loose coupling*”, e più raramente “*tight coupling*” ma quasi mai “*embedded*”. Questo viene giustificato dal fatto che si preferisce poter ricorrere a una grande varietà di formulazioni matematiche per poter garantire la flessibilità richiesta dal processo di progressivo miglioramento del modello, virtualmente fino all'inglobamento di tutta la conoscenza disponibile della realtà.

Ad esempio, si possono ricordare i numerosi casi di associazione fra GIS come il *freeshare* GRASS e modelli distribuiti di complessità anche notevole (WEPP; AgNPS; CODESA3D: Gambolati *et al.*, 1999) ai quali il GIS serve esclusivamente da *data provider* e visualizzatore dei risultati.

L'approccio descritto con questo schema è di fondamentale importanza ogni qual volta la decisione sia effettivamente legata alla predizione di un aspetto dinamico e di dettaglio circa il comportamento dei sistemi ambientali.

Contesto di analisi	Livello di conoscenza disponibile	Valutazione possibile
Reti ecologiche	uso del suolo 'ragionato' uso del suolo + rilievo qualità uso suolo campionatura faunistica	<i>animal flow simulation</i> esplorativa <i>animal flow simulation</i> di <i>screening</i> <i>animal flow simulation</i> previsionale
Rumore	dati bibliografici + sorgenti misure di 'controllo' (pochi punti mirati) misure 'di copertura' (misure a maglia 'fitta')	modellazione di <i>screening</i> secondo gli schemi semplificati di ISO 9613-2 validazione della prima modellazione interpolazione geostatistica
Aria	dati bibliografici + sorgenti + rosa dei venti dati sorgenti ('di controllo') + venti passo orario campo di moto noto	modelli gaussiani di screening validazione dei modelli modelli lagrangiani
Inquinamento delle acque e dei suoli: agro- zootecnico, urbano	uso del suolo, sorgenti point, dosi fertilizzanti, abitanti equivalenti, peso vivo allevato, ... bilancio idrologico a passo mensile conoscenza del singolo evento climatico dati dettagliati di inquinamento e portate liquide/ solide o piezometrie per la taratura dei modelli	assegnazione parametrica dei rilasci (kg/ ha di inquinante, a seconda del tipo di uso del suolo) assegnazione dei rilasci in base ai modelli tipo CREAMS applicati alla scala di un singolo campo applicazione di modelli tipo CREAMS alla scala di bacino (modellazione idrologica complessa) fiumi: modellazione di scarichi e prelievi: modelli diffusivo-avvevati (es. QUAL2E) o flusso a pistone (Streeter & Phelps) laghi: carico trofico, eq. di Vollenweider acquiferi: propagazione inquinanti con modelli di trasporto e di flusso
Subsidenza	dati su litologie interessate ed emungimenti conoscenza geotecnica terreni da fonti indirette, dati sugli emungimenti	assegnazione parametrica dei rischi modellazione geomeccanica della compattazione
Stabilità versanti	conoscenza qualitativa di litologia, pendenza, sismicità e altri fattori causali conoscenza dei terreni (dati bibliografici) prove in situ, spessori, parametri geomeccanici	1) zonazioni generali non parametriche (modelli rule-based, favourability functions etc...) 2) zonazioni generali parametriche 3) calcolo dei coefficienti di sicurezza
Pericolosità delle piene	1) zone a deflusso idrico rallentato, direzioni di deflusso, volumi disponibili nel territorio 2) conoscenza della topografia di dettaglio del territorio (quote, ostacoli...) 3) conoscenza degli affluenti, modellazione idrologica e geometria dell'alveo	1) analisi per 'celle idrauliche' 2) modello di screening della propagazione 2D per onde di piena uscente stimata in via preliminare 3) modello di propagazione dinamica dell'onda di piena, estrazione dei tratti critici e simulazione dell'onda di piena uscente
Irrigazione	temperature e precipitazioni umidità e vento	1) bilancio idrologico tipo Thornthwaite a stima preliminare dei fabbisogni 2) metodi tipo FAO (Penman, Blaney - Criddle) per la stima dei fabbisogni
Incendi	uso del suolo ragionato e altri fattori causali uso del suolo + rilievo biomassa + misure meteoclimatiche	modello probabilistico (bayesiano, con fuzzy logic, ..) previsione in tempo reale del rischio
Campi elettromagnetici	Dati bibliografici + sorgenti Misure	modelli di screening taratura e validazione dei modelli

Tabella 3- livelli di approfondimento successivi per alcuni tipi di analisi nella pianificazione ambientale

Esistono esempi, soprattutto in contesto nordamericano, di modelli usati con successo per la gestione di sistemi complessi, quali corpi idrici superficiali soggetti ad occasionali inquinamenti e richiedenti

interventi di emergenza (Cantin, 2000), o la previsione in tempo reale delle piene a scopi di protezione civile, o le previsioni meteorologiche di medio periodo per la gestione agricola di precisione (Marletto e Zinoni, 1996).

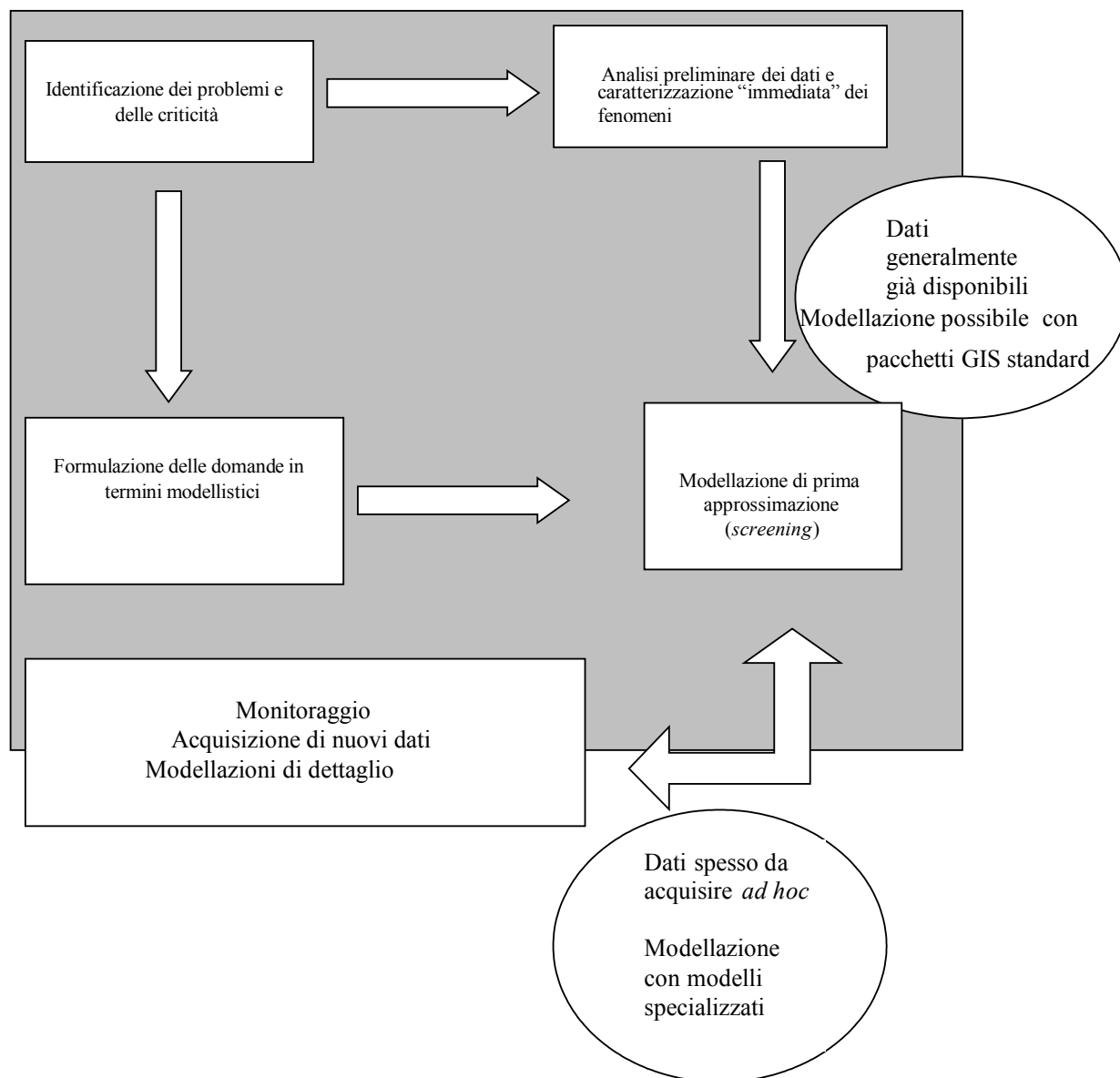


Figura 4- schema di utilizzo dei modelli in un DSS, con logica "tradizionale".

E' però importante sottolineare che né la pianificazione fisica, né la pianificazione strategica richiedono correntemente questo tipo di previsione. Si può anzi dire che le indicazioni che servono alla pianificazione (il cui scopo è assegnare un giudizio di vincolo o di opportunità/progetto a ciascun sito del territorio pianificato) riguardano *ciò che rimane quando i fenomeni dinamici si sono esauriti*.

Mentre ad es. per scopi di protezione civile può essere importante sapere quale sarà la velocità dell'acqua esondata a 155 metri dalla breccia arginale dopo 30' dalla rottura, e quindi è giustificato l'uso di modelli di dettaglio per la riproduzione e la previsione di fenomeni di breve durata e rapida evoluzione, alla pianificazione interessa sapere *dove* potranno mai esserci livelli d'acqua di un certo

tipo, o velocità di un certo altro tipo, ad esempio per porre i vincoli di assetto della rete idrografica in un piano di bacino.

La pianificazione può pertanto richiedere l'uso di modelli specializzati e di dettaglio, in alcuni casi isolati, per risolvere dubbi locali, ma in generale procede per ragionamenti a maglie molto più grossolane e con una logica spaziale del tutto singolare, che raramente viene compresa a fondo dai modellisti dei fenomeni fisici. Si corre il rischio, parlando di modellistica a supporto della pianificazione territoriale, di cadere in uno dei due opposti errori:

- da una parte, di interessarsi esclusivamente alla modellazione scientifica *tradizionale* dei fenomeni dinamici, per lo più basata su equazioni della fisica matematica, e di fornire quindi modelli troppo complessi e costosi, e difficilmente traducibili in indicazioni di piano chiare e spendibili per assegnare vincoli od opportunità³⁰;
- dall'altra, di ritenere che in fin dei conti questa modellistica di cui tutti parlano sia solo un gioco per piccoli scienziati che non apporta reale capacità di controllo del territorio da parte dei piani.

Riteniamo che sia importante chiarire le esigenze di una modellistica specificamente orientata alla pianificazione, per poter disporre di una griglia teorica ed operativa che consenta di migliorare la razionalità comunicativa del processo di piano.

Nella pianificazione territoriale, occorre innanzitutto un'analisi che consenta di definire:

- da un lato, la distribuzione spaziale dei fenomeni (*pattern*)
- dall'altro, l'ordine di grandezza della loro importanza "assoluta".

Si vuole sottolineare che nessuno dei due aspetti è genuinamente "dinamico". Il *pattern* è ciò che di un fenomeno costituisce la ricorrenza, la prevedibilità (Couclelis e Liu, 2000), e quindi –in qualche misura- le caratteristiche "integrali" e complessive; esso si distingue dal "rumore", ovvero da tutte le componenti locali, imprevedibili e contingenti (*ibid.*). Esso è descritto da trend, medie, funzioni relativamente semplici di regressione, interpolazioni di variabili fisse o comunque ragionevolmente stabili, disposizioni spaziali di oggetti fra loro variamente interrelati (p.es. in reti idrografiche, reti ecologiche, mosaici, *cluster*...).

L'ordine di grandezza, la rilevanza assoluta del fenomeno è invece un aspetto non-geografico: è semplicemente l'indicazione dell'importanza in senso assoluto, in un certo contesto, di un fenomeno.

P.es. se dobbiamo valutare l'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole in un bacino, possiamo prima di tutto stilare un semplice bilancio di massa che ci permette di dire quanti kg/ha anno di nitrati, ad esempio, possiamo aspettarci *mediamente* da certi usi del suolo (colture, spandimenti di liquame zootecnico). Tale bilancio è concettualmente molto semplice da stimare e ci segnala in sé se il fenomeno dell'inquinamento di origine agricola sia rilevante.

Risolto questo primo problema, possiamo decidere se valutare quali luoghi siano più importanti come sorgenti inquinanti rispetto agli altri. A tale scopo, occorre definire meglio i processi fisici che si verificano e influenzano la perdita di nitrati da un certo sito: la dose di liquame o altri fertilizzanti apportata dall'esterno, i processi del bilancio idrologico, l'erosione dei suoli, l'assorbimento da parte delle piante e i fattori che li determinano.

Molto spesso, la descrizione dei processi fisici di questo secondo tipo può essere fatta esclusivamente in termini di un *pattern*, ovvero deducendo con qualche tecnica la "forma" delle funzioni rappresentanti

³⁰ Si riporta a titolo di esempio il caso del Piano di Bacino del fiume Senio (Autorità Interregionale del Bacino del Reno, Regioni Emilia Romagna e Toscana), per il quale è stata condotta un'analisi modellistica di estremo dettaglio della propagazione delle onde di piena in moto vario lungo l'asta, ma non si è prestata la corrispondente attenzione a studiare i possibili percorsi delle eventuali esondazioni, giungendo a definire le fasce di pertinenza del corso d'acqua, e i relativi vincoli, con criteri assolutamente semplicistici che hanno creato non trascurabili difficoltà di recepimento del piano "fisico" nella pianificazione "strategica" (ad es. per il fatto che interi centri storici risultavano irrealisticamente compresi nella fascia di piena trentennale, che imponeva vincoli rigidissimi sulle trasformazioni edilizie).

l'output territoriale richiesto, riportandole però in termini adimensionalizzati, su una scala normalizzata p.es. fra 0 e 1.

Per chiarire le idee, si consideri il problema di costruire le linee isocorrive³¹ in un bacino per la modellazione del *runoff* con il metodo cinematico: a priori è molto difficile dire con quale velocità si verificherà lo scorrimento in ciascun punto del bacino, e quindi quale possa essere la distribuzione delle linee. Tuttavia, se si effettua un'analisi topografica in un GIS, è possibile ricostruire le linee di massima pendenza e i percorsi attesi delle singole gocce d'acqua, a ciascun tratto dei quali può essere assegnata una velocità di percorrenza proporzionale alla radice della pendenza e inversamente proporzionale alla scabrezza ("legge di Manning"). Si ottengono così le distanze pesate percorse dalle gocce di pioggia che passano in *runoff*, rappresentabili in una mappa i cui valori devono essere adimensionalizzati e moltiplicati per il tempo di corrivazione dell'intero bacino (calcolato a priori con altri metodi o rilevato sperimentalmente) per ottenere la mappa delle isocorrive effettive alla chiusura del bacino. L'esempio richiama il fatto che il *pattern* di un fenomeno può essere studiato analizzando le caratteristiche del territorio, mentre la sua entità assoluta viene valutata in forma globale e con altri metodi non geografici.

La modellistica che serve alla pianificazione può essere descritta come l'applicazione (calibrazione, validazione) di funzioni del tipo:

$$G = f(p_i(x, y, N(x, y))) * I_i, i=1, \dots, n$$

dove G è il giudizio sul punto di coordinate (x,y) in relazione alla concomitanza di n fenomeni, p_i è il pattern locale del fenomeno i-esimo, che dipende dalle coordinate del punto e dalle proprietà dell'intorno $N(\textit{neighbourhood})$, I_i l'intensità assoluta del fenomeno i-esimo su tutto il dominio di indagine.

Nell'equazione precedente, viene formulata una proprietà fondamentale della modellistica geografica: l'output del modello è un giudizio sul territorio, che dipende da un pattern spaziale dei fenomeni rilevanti e dalla valutazione della loro intensità assoluta. Sia i pattern, sia le intensità assolute dei fenomeni possono essere di forma qualunque, e caratterizzati da una precisione qualunque, essendo variabili non solo numeriche, ma anche categoriali, qualitative, *fuzzy*. In altri termini, il giudizio sul territorio dipende da un certo numero di indicatori spazialmente distribuiti, cui sono collegati solo logicamente, ma non in rapporto quantitativo necessariamente determinato, le grandezze fisiche dei fenomeni rilevanti. L'equazione esprime il fatto che il giudizio è una valutazione multicriteriale i cui fattori sono i pattern dei fenomeni e i cui pesi sono le intensità degli stessi.

In altri termini, l'intensità del fenomeno ha soprattutto senso se è espressa come entità relativa dello stesso rispetto agli altri fenomeni, e non come grandezza numerica affidabile in sé.

Ad esempio, ritornando al caso dell'inquinamento diffuso alle acque superficiali da nitrati di origine agricola, si può dire che i fattori significativi sono l'erosione del suolo, il runoff, la capacità di assorbimento degli inquinanti da parte della vegetazione presente, e la dose di fertilizzanti somministrata.

Se possiamo stabilire l'importanza relativa dell'assorbimento da parte delle piante, del runoff e dell'erosione mediante opportuni "coefficienti di estrazione" dei nitrati somministrati ad opera di ciascun processo, e possiamo esprimere la dose di azoto somministrata in termini non assoluti, ma

³¹ Come noto, il metodo cinematico suppone che le piene si formino per effetto della sola corrivazione delle piogge in eccesso nel bacino (ovvero che le laminazioni per effetto di invaso siano trascurabili); al fine di valutare l'idrogramma di piena è quindi necessario valutare le aree contribuenti al deflusso, raggruppate per tempo che l'acqua impiega a raggiungere da esse la chiusura del bacino. Questa valutazione viene fatta mediante una mappa delle linee di ugual tempo di corrivazione o isocorrive. Maione (1995) fornisce un'eccellente discussione circa le ipotesi della corrivazione e i limiti cui sono soggette. Burrough e McDonnell (1998) descrivono in maggiore dettaglio come possano essere effettuate le analisi geografiche richiamate nel testo.

relativi (p.es. dicendo che in un certo tipo di coltura si spande il 50 % dell'azoto rispetto ad un'altra), otteniamo un giudizio che contiene tutte le indicazioni utili per la pianificazione territoriale (dove effettuare interventi di riduzione dell'inquinamento, ed agendo su quali processi) pur senza aver stimato la quantità di azoto in kg/ha anno che viene rilasciata da ciascun sito. Dal confronto fra Figura 6 e , si evidenzia come la modellazione ad indici per la pianificazione non modificherebbe la logica della complessiva previsione, ma la filosofia che la sottende: non si cerca di prevedere tanto l'entità numerica dei fenomeni, quanto i criteri con cui giudicare i vari fenomeni, ed il peso da attribuire ad essi. Complessivamente, si tratta di una procedura di valutazione multicriteriale a tutti gli effetti.

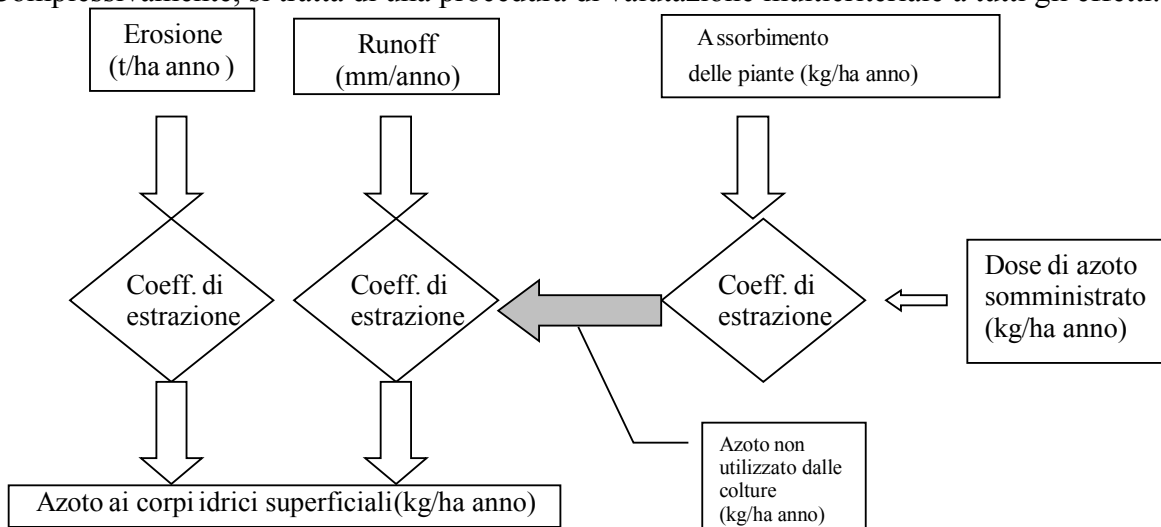


Figura 5 – una flow chart per la previsione numerica dell'inquinamento diffuso di origine agricola

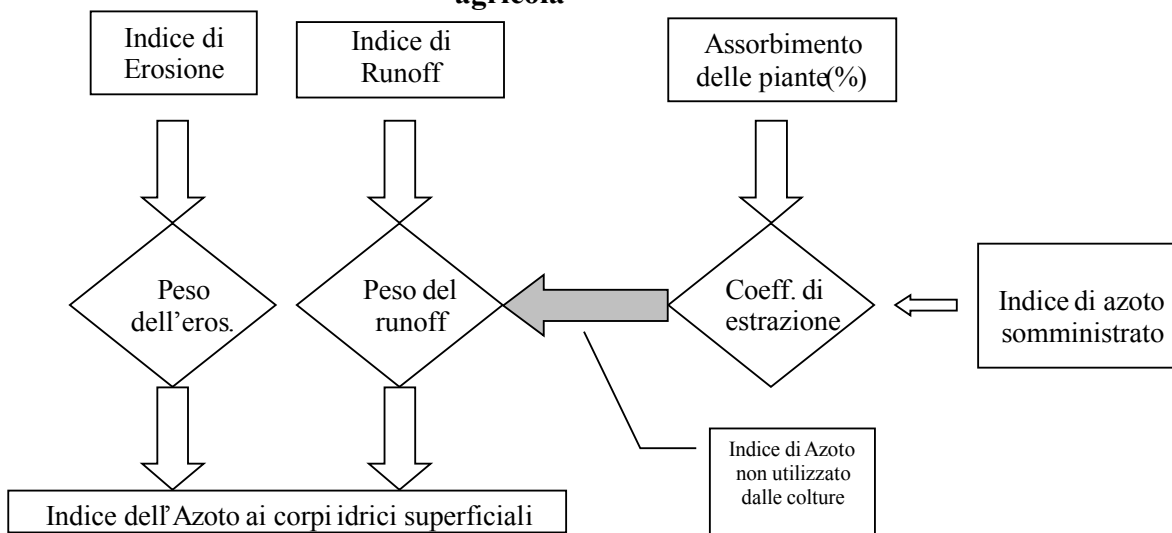


Figura 6- la stessa flow chart di , in termini di modellazione per indici

L'importanza di riconoscere il carattere della modellazione ad indici come valutazione multicriteriale risiede nella possibilità di modulare l'acquisizione dei dati e la complessità dell'approccio modellistico in relazione agli obiettivi di piano: se per l'assegnazione di vincoli è sufficiente identificare i criteri e assegnare pesi opportuni, è chiaro che le esigenze di predizione si semplificano notevolmente.

Naturalmente, nel caso in cui si debbano effettuare valutazioni più fini e controverse, possono essere messi a punto modelli di maggiore dettaglio.

L'affinamento può essere ottenuto con modelli matematicamente più complessi, ma in molti casi è sufficiente aggiungere più criteri e caratterizzare meglio, acquisendo più dati, i fenomeni che costituiscono i criteri stessi.

L'impostazione qui abbozzata è orientata a favorire l'inglobamento della modellazione delle risorse naturali nel processo di pianificazione territoriale. L'aspetto fondamentale per l'applicazione del metodo è una formulazione chiara e distinta dei problemi.

Il passo della formulazione delle domande è spesso carente nei piani urbanistici: si verifica così che le cartografie di analisi prodotte non hanno alcuna capacità predittiva. Si ricorre ad indici che non sono stati adeguatamente calibrati e validati, e questi indici non possono di conseguenza essere assunti come corretta base di progetto di scenari del territorio.

Inoltre, il carattere spesso "fantasioso" e poco chiaro di molti indici introdotti nella pianificazione mina la possibilità di un loro utilizzo come base razionale di decisioni condivise.

Chiarito il significato della modellistica per indici di cui è opportuno servirsi nella pianificazione territoriale, si devono definire le modalità e i contesti nei quali fare uso di questa modellistica. Rispetto allo schema di Figura 4, che presuppone -come osservato- un modello lineare di conoscibilità e prevedibilità dei sistemi ambientali, una prima esigenza da soddisfare è data dalla ricorsività del processo di conoscenza, per cui una affermazione diviene verità pratica solo in seguito ad iterate discussioni, a confronti di tipo politico e a monitoraggi/validazioni delle simulazioni. Per chiarire le idee, si può fare a proposito riferimento alla Figura 6 (Comune di Cesena, 2000). In essa, è rappresentata una metodologia per l'implementazione di un quadro di indici di qualità urbana. Il duplice problema che viene formulato è il seguente:

- a. "Come è possibile valutare la qualità della vita urbana (UQoL- urban quality of life) che deriva dall'attuazione di piani e progetti?"
- b. "Che rapporto deve esserci fra l'ideazione dei piani, la loro discussione e la loro valutazione?"

Si tratta di un problema generale che impone una riflessione sulla cornice socio-politica nella quale i modelli di simulazione e valutazione vengono usati. La proposta illustrata nella figura prevede che esistano due livelli socio-politici, definiti rispettivamente l'arena del *planning* e il quadro di controllo (*control panel*), che si integrano fra loro.

Questa struttura rispecchia in modo duale l'articolazione della pianificazione fisica e della pianificazione strategica. Il sistema integra un percorso tecnico, nel quale si calcolano gli indicatori sulla base di dati man mano acquisiti, e si utilizzano modelli per prevedere gli scenari futuri a seguito dei piani, dopo aver verificato che i modelli siano effettivamente in grado di riprodurre in termini degli indicatori medesimi la realtà presente (calibrazione del modello).

La modellazione previsionale costituisce già in sé uno *strategic environmental assessment*, in quanto gli indicatori sono già definiti secondo il giudizio sul territorio che devono essere in grado di fornire.

Attraverso una fitta rete di scambi fra il livello tecnico e il livello politico e sociale, rappresentati da un "city management board" che riunisce i rappresentanti di vari gruppi sociali, si definisce interattivamente la conoscenza dei processi ambientali; questa serve come base euristica per la produzione di scenari, che dovrebbero originare dal coinvolgimento dei vari gruppi, e che vengono ulteriormente sottoposti alla valutazione.

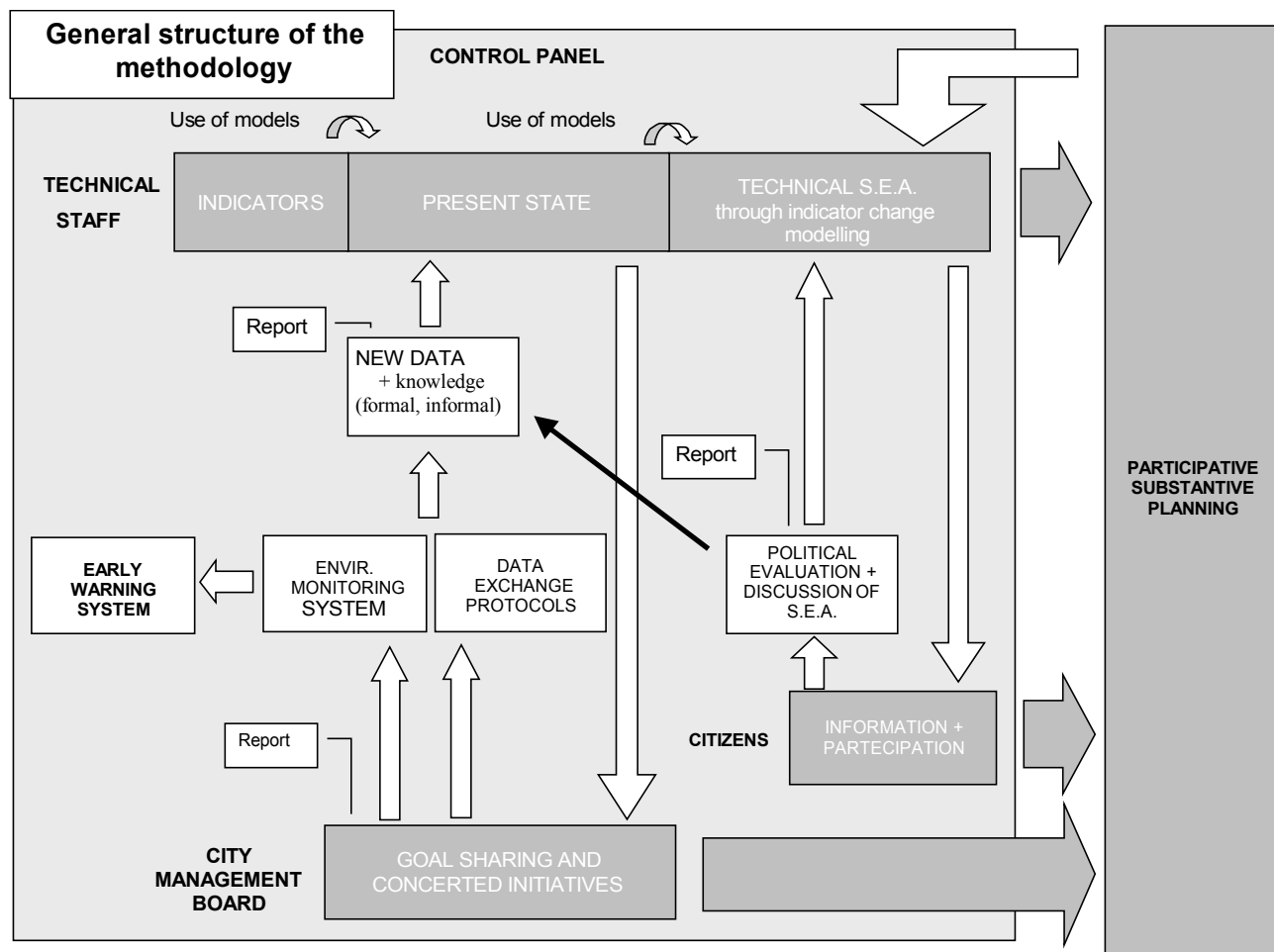


Figura 7 – Uno schema di pianificazione partecipata basata sull'uso di modelli (da Comune di Cesena, 2000)

Nel più recente quadro della pianificazione fisica in Italia (quello definito dalla legge 183/1989 sulla difesa del suolo, dalla “legge Galli”, n. 36/1994, dal “decreto Ronchi”, D.Lgs.22/97 e dal D.Lgs. 152/99 sulla tutela delle acque dall'inquinamento), assume sempre maggiore rilevanza la conoscenza quantitativa e la capacità previsionale sui fenomeni ambientali. Per la prima volta nella legislazione italiana sulle risorse naturali i modelli previsionali sono citati espressamente fra le fonti di conoscenza per il supporto alle decisioni.

Si sta assistendo, per esempio, a una domanda crescente di analisi quantitative nella valutazione di impatto ambientale e nell'analisi di rischio, che tendono a far assomigliare questi settori ad ambiti ingegneristici più tradizionali dove si compiono verifiche quantitative di routine dei sistemi oggetto di studio. Le istanze di elevata protezione dell'ambiente recepite dalla normativa recente invocano una capacità di controllo dell'ecosistema, che parte necessariamente dalla sua conoscenza e dalla prevedibilità degli effetti delle azioni umane sulle georisorse.

Già da tempo alcune tradizioni culturali dell'Occidente (e in particolare quella della gestione ambientale statunitense e canadese) hanno prodotto paradigmi, strumenti e condizioni operative per queste analisi, e oggi si ha una enorme disponibilità di software che consentirebbe la simulazione di situazioni e processi virtualmente di ogni complessità. Si trovano software commerciali, dotati di avvincenti interfacce grafiche, che producono simulazioni matematiche con estrema facilità. Spesso però non si considera che anche i più semplici, fra i modelli matematici maggiormente noti, sono troppo complessi e richiedono troppi dati per l'uso in situazioni ordinarie; sono inoltre “rigidi” e

difficilmente adattabili alle esigenze particolari che emergono in ogni caso di studio, e poco trasparenti all'utente circa le diverse fasi del calcolo.

D'altra parte, si può dire che molte delle procedure di modellazione di pratica utilità possono essere facilmente implementate con strumenti di calcolo più flessibili, che consentono all'utente di mantenere un controllo pressoché totale su di esse.

L'importanza di un pieno controllo delle operazioni compiute da parte dell'analista non impone più una programmazione specialistica, dal momento che esistono molti ambienti di calcolo di alto livello sempre più diffusi e *user friendly* (es MatLab: Mathworks, 1998; Excel: Microsoft, 1997) nei quali sono disponibili funzioni *general purpose* e si possono implementare con facilità i calcoli correntemente utilizzati negli studi ambientali.

Inoltre, si vuole richiamare l'importanza di visualizzatori di superfici continue, sia calcolate sia interpolate, come strumenti di modellistica *di screening* (ad es. Surfer: Golden Software, 1997; GNUplot: Williams e Colin, 1986). Molte soluzioni analitiche a problemi bidimensionali (fra cui la soluzione gaussiana dell'equazione diffusivo-avvertiva, usata sia per l'inquinamento delle falde, sia per quello atmosferico da sorgenti puntuali) possono infatti essere identificate attraverso questi strumenti.

La possibilità di creare semplici modelli "personalizzati" potrebbe portare ad un uso veramente generalizzato delle previsioni degli impatti ambientali, e in generale ad un controllo degli effetti di tutte le decisioni. Ovviamente, a questo aumento di *facilities* tecnologiche potrà seguire un vero vantaggio solo se si svilupperà di pari passo una presa di coscienza del significato e dei limiti dei modelli.

Occorre, a questo proposito, ricordare che quasi sempre i dati ambientali disponibili non consentono di andare oltre il livello di una prima caratterizzazione dei fenomeni. A tale livello si associa una comprensione sommaria, per ordini di grandezza, dei processi fisici descritti con modelli matematici.

Quindi non ci si può affidare alle risposte dei modelli, intendendole valide quantitativamente, in assenza di una validazione (solidamente dimostrata) della loro taratura. Inoltre, occorre che le amministrazioni che richiedono studi e previsioni (ad esempio per studi di impatto) siano perfettamente informate circa i contenuti ed i limiti delle affermazioni prodotte.

In genere, per problemi ambientali che generano una modesta conflittualità socio-economica, si può decidere in base ad una valutazione approssimativa e a favore di sicurezza. Solo di rado è richiesto un approfondimento con modelli più complessi e più esigenti in termini di dati in ingresso.

Le risposte dei modelli devono essere comunque riportate, ogni volta che ciò sia possibile, a livello cartografico sulle basi mappali correnti, e i risultati devono essere chiariti in termini comunicabili e associati ad una stima della loro affidabilità e dei margini di incertezza dell'*output*.

A questo proposito, risulta estremamente utile che l'analisi dei dati e la modellazione vengano fatte nello stesso ambiente operativo della cartografia (un GIS).

I GIS sono oggi sempre più economici e di semplice utilizzo, e si può supporre che un numero crescente di persone possa essere attirato dal linguaggio che essi permettono di parlare: non solo freddi resoconti pieni di tabelle e grafici troppo tecnici, ma un insieme di mappe tematiche che consentono di visualizzare a colpo d'occhio, se ben costruite, la maggior parte degli aspetti salienti dei fenomeni studiali e delle previsioni effettuate. I GIS sono sempre più ricchi di funzioni di modellistica vera e propria, per cui è già possibile (ed è prevedibile che lo sarà sempre più) implementare veri e propri modelli di processi fisici all'interno di ambienti di cartografia numerica (Ye *et al.*, 1996), benché al costo di una bassa efficienza computazionale (*ibid.*; Bagli e Pistocchi, 2000).

Nonostante la complessità dei fenomeni, i modelli riescono a fare alcune previsioni. In assenza di altro, quelle previsioni sono il terreno più razionale per il dibattito. I decisori devono giustificare le loro scelte sulla base delle previsioni che hanno fatto, e gli oppositori devono contrastare queste giustificazioni sullo stesso terreno di razionalità "scientifica". Ciò non significa che le scienze fisiche

siano l'unico linguaggio utilizzabile. Tuttavia, ogni affermazione, nel dibattito sugli usi del territorio, deve essere supportata da una precisa analisi razionale e da una rappresentazione condivisibile, o per lo meno negoziabile: la rappresentazione "scientifica" è da intendersi come una rappresentazione replicabile ed esplicita di una teoria, di una sensazione, di una credenza o di una descrizione (Openshaw, 1998).

Scorrendo la Tabella 4, si nota come non siano molti, a dispetto della complessità dei sistemi oggetto di studio, i tipi di modelli di impiego "standard". Alcuni problemi ambientali vengono studiati *ad hoc*, con modelli molto specialistici e campagne di raccolta dati costose e difficilmente generalizzabili ad ampie porzioni di territorio. In ognuno degli ambiti riportati in Tabella 4, è ovviamente possibile usare modelli molto complessi, del livello I in Tabella 5, ma è ormai chiaro che ciò si limita in pratica solo ai casi-pilota. Sono di questo tipo i modelli cosiddetti completi per la simulazione delle trasformazioni afflussi-deflussi in idrologia, e i modelli lagrangiani di dispersione in atmosfera. I modelli del livello II possono essere usati nei casi in cui occorrono verifiche approfondite di determinati fenomeni, ma si ammettono comunque drastiche semplificazioni perché interessa solo un sottoinsieme dei processi fisici coinvolti.

Ambito di analisi ambientale	Valutazioni prevedibili	Modelli utilizzabili
Aria	effetti di emissioni point e non point;	modelli gaussiani(*°); modelli box per inquinanti 'pesanti'(*°)
Acque Superficiali	effetti di scarichi e prelievi sui corpi idrici; processi idrologici e loro modificazione; erosione; piene fluviali	modelli incrementali per la valutazione delle portate minime vitali (*); varie forme dell'equazione di Streeter e Phelps(*); modelli elementari di trasformazione afflussi-deflussi (cinematico, in vaso, GIUH, Nash...)(*); bilanci idrologici(*°); equazione USLE e sue modifiche(*°); modello di Morgan, Morgan e Finney e sue modifiche(*°); modelli idraulici di moto vario a pelo libero(+)
Acque sotterranee	Inquinamento delle acque e dei suoli; subsidenza	Modelli di flusso e trasporto degli inquinanti in falda (analitici (*°) e numerici(^)); modelli di infiltrazione (analitici(*°) e numerici(+ ^)); leggi di compattazione dei terreni per la subsidenza(*°)
Controllo delle pratiche agronomiche	Rilasci di inquinamento diffuso da colture e allevamenti	Modelli empirici (GLEAMS); modelli di dettaglio (WEPP, SWAT, AgNPS...); modellistica GISbased
Rumore-vibrazioni	Effetti di attività estrattive, industrie, infrastrutture...	Leggi empiriche a base fisica per la propagazione e le attenuazioni delle onde di pressione(*°)
Campi elettromagnetici	Intensità dei campi in prossimità di linee elettriche e circuiti	Modelli analitici basati sulle equazioni di Maxwell, con correttivi empirici(*°)
Ecologia	Analisi degli effetti di interventi antropici sui sistemi di ecosistemi; previsioni in dinamica delle popolazione	Modelli di scelta dei percorsi in una rete ecologica(+); analisi rule-based(*°+ ^); modelli di dinamica di popolazione (capacità portante degli ecosistemi, competizioni, sinergie, nicchie ecologiche...)(*+)
Discariche RSU	Previsione della produzione di percolato	Bilanci idrologici sul corpo della discarica(*+); analisi identificativa tipo black-box(+*)
Analisi di rischio	Quantificazione delle esposizioni di sostanze nocive per varie vie di trasmissione	Modelli empirici prod otti nel corso di studi epidemiologici(*°).

Tabella 4 - Ambiti di analisi ambientale e modellistica utilizzabile (*=implementabili su foglio elettronico; °=implementabili su visualizzatori di superfici continue (es. Surfer); +=implementabili in ambienti di calcolo ingegneristico (es. MatLab); ^= richiedenti specifici codici di calcolo)

Esempi possono essere riscontrati nell'uso di modelli bidimensionali dell'idrologia sotterranea, e i modelli di moto permanente per le correnti monodimensionali a pelo libero. I modelli del livello III sono quelli di più generale diffusione nel campo delle valutazioni ambientali. Esempi sono quelli gaussiani di dispersione in atmosfera (USEPA, 1995; Benson, 1979), quelli di cinetiche degli inquinanti nelle acque superficiali con ipotesi di flusso non diffusivo (Streeter e Phelps, 1925), quelli delle strutture dell'ecologia del paesaggio (Forman e Godron, 1986).

Esistono campi di pianificazione (soprattutto industriale) nei quali l'utilizzo di modelli matematici di sistemi naturali è operazione del tutto ordinaria: ad esempio, nell'industria petrolifera si effettuano correntemente simulazioni previsionali relativamente al flusso e trasporto di fluidi nei giacimenti. Al livello della gestione ambientale, tuttavia, oggi i modelli più complessi praticamente usabili riguardano la gestione delle risorse idriche: la presenza di una tradizione molto antica, e la relativa facilità di osservazione dei fenomeni (la cui dinamica non ha l'effimero dell'atmosfera e lo statico della litosfera), consentono di disporre di un corpo di dottrina piuttosto vario, e di modelli relativamente complessi che pure conservano una discreta applicabilità.

Ad esempio, è possibile utilizzare le equazioni iperboliche di St Venant per descrivere la propagazione di una piena fluviale, e usare i risultati per la discussione politica su come individuare aree esondabili e casse di espansione; oppure mettere a punto un modello matematico tridimensionale di acquiferi, risolvendo con tecniche numeriche le equazioni del flusso e del trasporto, per ottenere indicazioni non ovvie ai fini della progettazione di interventi idraulici "speciali". Ovviamente queste applicazioni richiedono una raccolta di dati ed un impegno di calcolo che viene giustificato solo dall'esigenza di studi approfonditi. A quanto pare, si tratta delle applicazioni modellistiche più avanzate che si siano finora diffuse presso le pubbliche amministrazioni per la soluzione di problemi ambientali.

Nella pratica corrente trovano largo impiego, invece, modelli di calcolo idraulico fluviale più semplici (p.es. quello di moto permanente HEC-RAS, USACE, 1998) usati per la progettazione degli interventi di messa in sicurezza idraulica del territorio, la verifica di officiosità delle sezioni dei corsi d'acqua e altri scopi analoghi.

Questi modelli rientrano ormai fra gli strumenti di calcolo ingegneristico ordinario. Analogamente diffusi sono modelli di moto negli acquiferi secondo schemi bidimensionali, utilizzati sia per prevedere la dinamica delle falde, sia per modellare la dispersione degli inquinanti e le loro cinetiche di degradazione, naturale o controllata artificialmente.

I modelli dei sistemi ambientali si possono classificare come mostrato in Tabella 5.

Livello	Caratteristiche	Dati richiesti
I	Previsione dettagliata dei fenomeni fisici	Campagne di raccolta di dati che presuppongono attrezzature sperimentali
II	Previsione dei soli effetti significativi, ai fini della pianificazione, dei fenomeni fisici	Raccolta di dati ad hoc con attrezzature standard
III	Screening, o valutazione per ordini di grandezza	Raccolta di dati specifici del luogo, ma non eccessivamente dettagliati, quali quelli che spesso sono disponibili nei database standard

Tabella 5 - Livelli di modellazione dei fenomeni ambientali

Al proposito, esistono modelli che possono essere reperiti gratuitamente sul World Wide Web (WWW), come ad es. Bioplume III (Rafai et al., 1998). Occorre notare però che questi prodotti spesso contengono alcuni errori di programmazione che li rendono quasi inutilizzabili (ad es. Lorenzini, 1999).

Altri modelli simili possono essere acquistati a costi molto contenuti (Chiang et al. 1998).

Fra i modelli di screening, meritano di essere ricordati quelli relativi all'inquinamento dei suoli. Un utile esempio è l'Hydrocarbon Spilling Screening Model (HSSM), riferito alla percolazione e al

trasporto in falda degli idrocarburi (Charbeneau et al., 1997). Tutti questi modelli possono però essere implementati anche in ambienti molto familiari, come i fogli elettronici, e devono essere applicati, quando non si hanno dati molto dettagliati, per ottenere prime indicazioni sugli ordini di grandezza dei fenomeni. Ogni modello più complesso, che venga utilizzato in assenza di dati non idonei, fornisce infatti risultati quasi sempre inattendibili, mentre i modelli di screening, che danno risposte molto generali, consentono di filtrare l'incertezza in una risposta 'mediata' per ordine di grandezza. Schnoor (1997) fornisce un'eccellente panoramica, cui si rinvia il lettore per ulteriori approfondimenti, dei modelli che effettivamente servono nella pianificazione e nelle valutazioni ambientali, e che nella generalità dei casi possono essere implementati senza dover ricorrere a software *ad hoc*. In tutti quei casi, lo sviluppo del modello può essere fatto direttamente nel GIS.

Capitolo 4 – La ricerca geografica come applicazione creativa di modelli

1. Premesse

In questo capitolo si espone in maniera unitaria il contenuto dei capitoli successivi, che assume invece la forma di una serie di casi di studio fra loro apparentemente slegati e ciascuno dotato di una sua autonomia. Si descrivono alcune applicazioni di carattere “creativo”, nel senso che in ciascun caso si è cercato di fare un uso non convenzionale di strumenti già noti in letteratura ed oggetto di applicazioni in casi “standard”. Le metodologie sono state di volta in volta esportate, con modifiche, in altri contesti di analisi e legate il più possibile al *decision making*.

Si riportano in particolare:

- alcuni casi di studio in cui si è fatta una classificazione del territorio usando modelli “espliciti” di fenomeni fisici
 1. un’analisi delle strutture ecologiche del paesaggio nel bacino del fiume Savio (FC) basata su modelli di comportamento
 2. un caso di modellazione della dispersione in falda di un inquinante ricorrendo ad algebre cartografiche
 3. un modello cartografico generale dei processi idrologici in un comune collinare dell’Emilia Romagna
 4. una valutazione dell’inquinamento diffuso da nitrati nel bacino del fiume Savio (FC)
- alcuni casi di studio in cui si è fatta una classificazione del territorio usando l’approccio della *favourability functions*
 5. analisi della propensione ai dissesti franosi nel bacino del fiume Savio
 6. analisi della pericolosità per incendi boschivi in un comune collinare dell’Emilia Romagna
 7. analisi del potenziale minerario per coltivazione di rame in una regione dello Zimbabwe
- alcuni casi di studio in cui si sono integrati modelli e strumenti di previsione per assegnare giudizi soggettivi e razionali di rilevanza per la pianificazione
 8. analisi di impatto ambientale di una cava di calcare in Toscana
 9. localizzazione ottimale delle attività estrattive nella valle del fiume Savio (FC)
 10. analisi delle reti di distribuzione del gas e pianificazione degli interventi di riassetto nella città di Forlì
 11. quadro ambientale a supporto delle decisioni per il piano regolatore di un comune collinare dell’Emilia Romagna.

Il capitolo vuole illustrare le caratteristiche di ciascun gruppo di applicazioni in termini comparativi, al fine di fornire una chiave di selezione delle metodologie a fronte di un’ampia gamma di problematiche ricorrenti nella pianificazione.

Prima di sviluppare la panoramica dei casi di studio, si vuole richiamare un aspetto relativo alla *rappresentazione* del giudizio. La procedura logica e grafica più tipica delle discipline urbanistiche è quella della sovrapposizione di elementi, per cui i giudizi si ricavano dall’ispezione visiva di una serie di *layers* cartografici sovrapposti, movendosi nel solco tracciato dalla metodologia delle carte trasparenti sovrapposte a mano da McHarg (1969), come è evidente se si esaminano gli elaborati di analisi di quasi tutti i Piani Regolatori Generali, e di molti altri piani territoriali appartenenti per lo più alla pianificazione “strategica”, e come risulta dalla dominanza di sistemi GIS vettoriali per queste

analisi. Questo modo di procedere è di assoluto interesse quando si devono mettere a punto immagini progettuali del territorio, che devono avere il carattere evocativo dell'utopia. Ad esempio, vari autori osservano l'importanza della scomposizione del disegno in strutture elementari e della loro sovrapposizione in sintesi finale al fine di progettare un edificio o una città (p.es. Lynch, 1964; Viganò, 1996; Kolhaas e Mau 1997).

Quando però il problema è di discutere una classificazione del territorio, ci pare preferibile adottare nella rappresentazione dei giudizi una *semantica disgiuntiva* della cartografia: ogni carta dovrebbe riportare un solo tipo di informazione alla volta, ed il problema generale di piano dovrebbe essere scomposto in una serie di domande e ragionamenti, collegati fra loro ma ciascuno reso elementare, formulati in termini chiari e distinti. Questo non significa che ci si debba adattare a visioni riduzionistiche e a modelli troppo settoriali, ma ci pare necessario che, alla fine di un processo di modellazione sistemica, integrata e complessa, si pervenga a un indicatore sintetico, che viene rappresentato nella sua distribuzione spaziale e serve a classificare coerentemente il territorio. L'indicatore sintetico è di volta in volta una grandezza diversa. Può essere ad esempio:

- il valore di una grandezza fisica simulata dal modello, quando questa sia abbastanza chiara (p.es. il $L_{eq}(dBA)$ nel caso di un'analisi del rumore, la concentrazione di un inquinante-spia, il carico piezometrico in un acquifero, il vettore velocità nelle simulazioni fluidodinamiche...)
- il valore di un indice di propensione o di un giudizio multicriteriale, quando si esegua un *overlaying* di più criteri con varie logiche (in tal caso la variabile è priva di significato fisico di per sé, ma esprime la posizione del punto nella scala continua di giudizio: ad esempio l'impatto ambientale relativo, la propensione relativa al dissesto...)
- una classe categoriale di una partizione completa del dominio (ovvero una classificazione che assegna un attributo ad ogni punto, selezionandolo da un insieme di attributi logicamente omogenei (ad esempio suddivisioni del tipo: zone urbanizzate, zone di potenziale nuova urbanizzazione e zone non urbanizzate; aree da risanare, aree da monitorare ed aree non contaminate rispetto ad una forma specifica di inquinamento; classi di uso del suolo; classi di diversa funzionalità ecopaesistica: macchie, corridoi, matrice...).

Non sono invece favorevoli alla corretta discussione delle scelte di piano rappresentazioni che riportino, semplicemente sovrapposti, più elementi diversi: ad esempio, carte di analisi che riportano infrastrutture acquedottistiche (linee, reti), isolinee della subsidenza (*contour*, approssimazione di una superficie continua) da emungimento di acque sotterranee e pozzi per acqua (punti) possono essere estremamente utili a cogliere a livello intuitivo alcuni legami fra le tre entità, ma poi il ragionamento deve essere fatto esplicito per poter essere usato nella discussione razionale.

Nel caso specifico, si può passare da queste tre entità ad una carta di indicatore sintetico categoriale che distingue le diverse zone del territorio in base al giudizio, come ad es. in Tabella 6.

	Comportamento del suolo	
	Subsidente	Non subsidente
Approvvigionamento da risorse idriche superficiali	Possibile	ZONE DA ADEGUARE
	Non poss.	ZONE DA TRASFORMARE
		ZONE ADEGUATE
		ZONE NON PROBLEMATICHE

Tabella 6- un esempio di classificazione per il problema della subsidenza, secondo una *semantica disgiuntiva*.

In questo modo di procedere, è necessario prevenire *due possibili deformazioni*:

- la trasformazione del lavoro di sintesi in un'operazione tecnocratica, che il pubblico si ritrova già pronta senza avervi potuto apportare un contributo;
- la confusione fra i livelli del giudizio, che esprime la sintesi, e il progetto/piano di soluzioni, che pur appoggiandosi ad *expertise* di tipo specialistico rimane una scelta politica.

In definitiva, si può dire che la cartografia che segue una *semantica disgiuntiva* rappresenta un'occasione di costruzione partecipata delle analisi ai fini della discussione razionale delle scelte; fornisce spunti perché le varie parti sociali possano trovarsi attorno al tavolo della discussione per trovare un accordo su come identificare e classificare il territorio, ma deve essere impiegata con la consapevolezza dei suoi limiti e delle sue deformazioni.

2- Caratteristiche funzionali dei diversi tipi di ragionamenti in relazione alla pianificazione

I metodi utilizzati per la soluzione dei casi di studio sono stati scelti in modo da essere sufficientemente rappresentativi dello spettro di metodologie direttamente utilizzabili nella pianificazione. Nel seguito, si presenta una breve caratterizzazione generale di ciascuno in relazione all'applicabilità, ai vantaggi e agli svantaggi nella pianificazione.

Modelli espliciti di sistemi fisici

Si ritiene che questo tipo di modelli sia poco applicabile nella pianificazione. Il problema fondamentale, già discusso nel capitolo 3, per cui è difficile far funzionare schemi di questo genere, è che essi si basano sull'estrapolazione di proprietà, accertate alla scala del laboratorio, su supporti a scale completamente diverse. L'aggiustamento dei parametri che ne consegue si basa essenzialmente sulla misura e sulla calibrazione *ad hoc* dei parametri, che teoricamente dovrebbero essere proprietà misurabili.

Si sottraggono a questa critica di fondo le soluzioni empiriche e semiempiriche di alcune equazioni della fisica matematica (come ad es. i modelli gaussiani con correttivi pratici per la dispersione atmosferica: ISC3, USEPA, 1995; CA.LINE 4, Benson, 1979). In questi modelli, è presente un insieme di parametri calibrati appositamente per il loro uso alla scala del territorio, anche se i risultati attesi

sono affetti da incertezze notevoli (si pensi che un modello di dispersione atmosferica è ritenuto accettabile se l'errore è contenuto entro il 40%: CON.CA.WE...).

Un uso corretto di modelli espliciti è da ravvisare comunque nell'esplorazione di possibilità, più che nella pretesa di simulare in maniera precisa e dettagliata i fenomeni. Risolvendo le equazioni del problema con diversi parametri, con diverse condizioni al contorno e con diverse ipotesi di configurazione del sistema, possono effettivamente essere apprezzati molti aspetti diversi, che a colpo d'occhio o riflettendo in termini esclusivamente qualitativi non emergerebbero.

Questo giustifica in parte lo sforzo compiuto per mettere a punto tecniche statistiche di valutazione dell'incertezza, come il metodo Montecarlo (p.es. Burrough e McDonnell, 1998). In generale, assume rilevanza per la pianificazione la valutazione della sensibilità del modello ai parametri, che fornisce un'indicazione sui margini di ignoranza del funzionamento del sistema, e quindi di "fallibilità" delle decisioni basate sul modello.

In generale, visto anche il bisogno di effettuare molte prove per ogni sistema fisico studiato, si ritiene che sia importante sviluppare ovunque possibile questi modelli *all'interno* delle piattaforme GIS, usando gli strumenti di analisi spaziale da esse resi disponibili. Nel capitolo 6 si forniscono esempi di modelli a equazioni differenziali anche di una certa complessità che possono essere risolte usando le funzioni di derivata e di iterazione del calcolo presenti in vari GIS commerciali (nella fattispecie, Arc-View della ESRI, 1998). Inoltre, molti modelli espliciti possono essere costruiti senza l'uso diretto di equazioni a derivate parziali: è il caso dei modelli che si basano sull'uso disaccoppiato dell'equazione di continuità e di quella del moto. Ad esempio, possono essere costruiti modelli di bilancio di massa (esemplificati da un caso di applicazione del bilancio idrologico) e modelli cinematici per il *routing* lungo un reticolo assegnato di flussi materiali quali runoff e trasporto solido. In questi secondi casi, le potenzialità offerte dai GIS per l'analisi dei modelli digitali del terreno sono estremamente utili, oltre che sul piano meramente strumentale, anche nello spostare l'attenzione del modellista dalla concettualizzazione analitica del modello alla descrizione dettagliata del fenomeno secondo logiche più intuitive. Ad es., si adopera il solo, semplice principio che l'acqua segua la linea di massima pendenza, e si cerca di incorporare nel modello quanta più conoscenza del territorio possibile: l'effetto delle strade, l'effetto degli ostacoli naturali, la deformazione delle linee di massima pendenza indotta dalla presenza di corsi d'acqua rispetto alle sole curve di livello topografiche...

Sulla stessa logica si muovono i modelli basati su soluzioni semiempiriche. In particolare, i modelli del rumore non si basano quasi mai sulla soluzione di complesse equazioni differenziali, ma assumono le grandezze come funzione di distanze, pesate opportunamente, dalle sorgenti di rumore. Lo stesso può essere fatto con la diffusione di inquinanti in acque superficiali (modelli di flusso a pistone o a miscelazione completa, che risultano in concentrazioni che sono funzioni relativamente semplici di aree e lunghezze di tronchi di reticolo idrografico ecc.).

Infine, quando si usano soluzioni analitiche semplificate delle equazioni della fisica matematica (è il caso, ad es., della dispersione di inquinanti in falda secondo schemi gaussiani: p.es. Domenico e Schwartz, 1990; della consolidazione dei terreni e degli effetti di subsidenza: p.es. de Marsily, 1986; della previsione della piezometrica attorno ad un pozzo, *ibid.*), il GIS consente di calcolare immediatamente, in modo semplice, la mappa risultante. Quindi questi modelli, ritenuti a ragione poco realistici, assumono un nuovo interesse nell'analisi esplorativa dei problemi e nel ragionamento sui possibili scenari, almeno ai livelli generali della pianificazione.

Si può affermare che l'analisi spaziale disponibile nei GIS è oggi poco sfruttata per la soluzione delle equazioni della fisica matematica, mentre in un futuro questo uso può essere di rilievo nell'integrare all'interno di un unico ambiente tutti gli strumenti di analisi necessari, come suggerito anche dallo sviluppo di funzionalità tese a rendere più efficiente il calcolo all'interno del GIS medesimo.

A margine delle considerazioni fin qui svolte, è necessario ricordare che negli ultimi vent'anni ha assunto un rilievo prima impensato l'uso di tecniche ad automi cellulari, per la simulazione dinamica di sistemi di natura qualunque. A differenza delle equazioni della fisica matematica, gli automi cellulari consentono di formalizzare le leggi dinamiche di un sistema in modo formalmente più semplice ed intuitivo, e sostanzialmente più flessibile, per cui sono oggetto oggi di applicazioni in campi molto diversi, da quello sociologico ed epidemiologico a quello urbanistico, geoeconomico, alla modellazione dell'uso del suolo, alle scienze ambientali e alla fisica. Su ragionamenti ad automi cellulari si basano i GIS che incorporano linguaggi di simulazione dinamica (p.es. PCraster, ...)

In definitiva, oggi sono possibili numerose applicazioni che coinvolgono la simulazione di un sistema fisico (e non solo) ipotizzando la conoscenza delle leggi che lo governano. Questo è di grande utilità nella pianificazione perché consente di passare per una verifica quantitativa le ipotesi di piano e dare risposte a domande del tipo “cosa succede se...”, in modo consistente, trasparente e replicabile.

Modelli non espliciti (conoscenza dei soli fattori rilevanti)

Si tratta in generale di tecniche molto più ampiamente applicabili. Con metodi di questo genere si sviluppano in generale ragionamenti formalizzati di tipo causa-effetto basati sull'assunzione che alla presenza di determinati fattori corrisponda un comportamento tipologico del territorio.

Ragionamenti di questo genere sono diffusamente utilizzati nella mappatura del rischio di calamità naturali, quando i processi sono troppo complessi e i parametri troppo difficilmente acquisibili per l'uso di modelli espliciti. Un caso tipico è quello delle frane: anche se in linea di principio è possibile descrivere i movimenti gravitativi con modelli espliciti, in pratica questo è possibile solo per singole frane note in dettaglio, mentre la zonizzazione del territorio in base, ad esempio, a coefficienti di sicurezza per la stabilità del pendio calcolati da parametri distribuiti è quasi sempre limitata dall'assenza di coperture omogenee. Per ovviare al problema, si considerano i fattori segnalatori delle frane (“*supporting pattern*”): pendenza, natura litologica dei terreni, presenza di falde acquifere, sismicità, copertura del suolo...

Un errore molto comune nella mappatura del rischio in base ai fattori è che la classificazione sia fatta in modo “personale”, soggettivo e non trasparente dall'esperto. L'assegnazione di un “peso” a ciascun fattore è infatti operazione delicata, che quasi mai viene svolta sulla base di considerazioni modellistiche: p.es. il servizio cartografico della Regione Emilia Romagna ha distinto il rischio di frana in base a criteri fissati in modo non giustificato se non da considerazioni intuitive da parte di alcuni esperti (Regione Emilia Romagna, 1999). I pesi sono dati per scontati e non adeguatamente motivati. L'uso del GIS in questi casi è puramente strumentale ad eseguire elaborazioni arbitrarie, e non consente di inglobare nella cartografia un vero e proprio modello.

In alternativa, sarebbe più corretto riferirsi all'approccio-quadro della modellazione di favourability functions (Chung e Fabbri, 1993, 1999): la procedura di classificazione in base ai *supporting pattern* richiede una calibrazione e una validazione del modello. In pratica, quando non sono disponibili modelli espliciti dei fenomeni, occorre costruire una “rete di inferenza” che consenta di prevedere il manifestarsi di eventi in relazione ai fattori che si ritengono causalmente efficaci. La rete di inferenza può essere definita in modo *knowledge driven* (quando l'esperienza e la conoscenza a priori assumono rilevanza dominante), oppure *data driven*, quando è dominante la “deduzione” della predizione dai dati, con minimo apporto dell'opinione dell'esperto (p.es. nei metodi di regressione). In ogni modo, occorre usare una parte della conoscenza per costruire il modello di inferenza, ed una parte per validarlo.

Esistono numerose tecniche per la costruzione di reti di inferenza, che ricadono sotto le definizioni di *neural networks* e di *probabilistic reasoning* all'interno del *soft computing* delineato da Zadeh, 1994. In generale, tuttavia, è importante non solo la costruzione tecnica di una rete di inferenza, ma anche la

piena attuazione del paradigma da essa richiamato: occorre analizzare le mappe come fonte di conoscenza e di informazione, con la consapevolezza che ad ogni operazione fatta con le mappe corrisponde un modello previsionale, e quindi occorre verificare costantemente la capacità previsionale del modello in relazione alle conoscenze disponibili.

La Figura 8 evidenzia i due schemi di ragionamento che sottendono i modelli finora considerati.

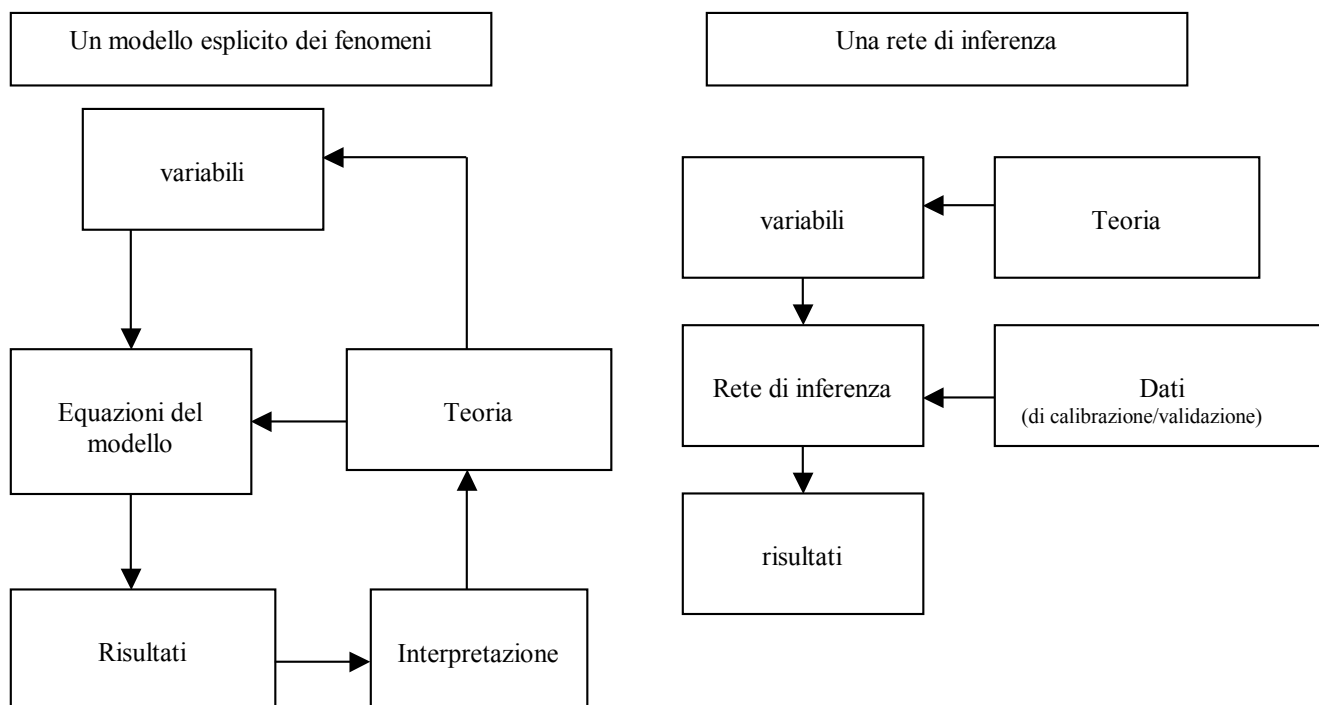


Figura 8 – confronto fra i modelli di tipo esplicito e le reti di inferenza (da Openshaw, 1998b; modificato)

I modelli a rete di inferenza sono estremamente utili nella pianificazione territoriale, in quanto soddisfano domande del tipo “dove” e “che cosa” in modo trasparente, consistente e replicabile, esattamente come i modelli di simulazione di cui sopra. Il vantaggio operativo non trascurabile delle reti di inferenza è che esse sono strutturalmente già compatibili con le piattaforme GIS, ed anzi in molti casi sono possibili solo grazie ad esse, nelle quali si possono compiere la sovrapposizione delle mappe dei *supporting factors* e le altre operazioni di *map algebra*.

Le reti di inferenza rappresentano un veicolo per l’ingobamento dei pareri e delle opinioni soggettive, ma basate su conoscenza sostanziale dei fenomeni (benché *soft*), degli esperti. Il rapporto fra i modelli di simulazione e le reti di inferenza può così essere descritto in termini sinergici, dal momento che alcuni *supporting factors* possono derivare dalla simulazione dei sistemi fisici, mentre nel ragionamento possono trovare spazio tutti i fattori che non possono essere formalizzati all’interno del modello di simulazione. In senso del tutto generale, mentre non si può dire che i modelli di simulazione siano autosufficienti per la classificazione del territorio, risulta che le reti di inferenza siano uno dei due tipi di classificazione possibili. Il secondo tipo di classificazione, il giudizio razionale, è descritto nel seguito.

Il giudizio razionale

È un fatto che l'ingegnere cerchi *la* soluzione³², mentre è altrettanto un fatto che nella pianificazione esistano spesso *le* (molte, ognuna problematica, ognuna conflittuale con le altre, ognuna non del tutto equa...) soluzioni. Nei precedenti capitoli si è cercato di sottolineare il rilievo dell'azione comunicativa, paradigma proposto da Habermas nel 1981 e sviluppato nel contesto della teoria della pianificazione da diversi autori, nel rivalutare le procedure informali di valutazione. In molti casi di pianificazione, è irrinunciabile la valutazione a buonsenso, cercando di capire i fatti sociali e culturali che determinano varie posizioni contrastanti, e costruendo un consenso attorno ai problemi, agli obiettivi e alle strategie.

I GIS sono fra le altre cose uno strumento di rappresentazione “chiara e distinta” di tutti e tre: i problemi possono essere visualizzati con indici sintetici (che tuttavia non devono essere ermetici) che consentano di localizzare “a colpo d'occhio” i punti caldi, la distribuzione delle intensità dei fenomeni, e le richieste di intervento. Gli obiettivi si concretizzano in scenari, che i GIS possono aiutare a rappresentare meglio, chiarendo in che modo ogni scenario interferisca con gli interessi di ciascun gruppo e con lo sviluppo di ciascun luogo. Le strategie possono essere definite ricorrendo a istantanee di stadi successivi di sviluppo, oppure possono essere visualizzate con altre grandezze nello spazio geografico (p.es. la distribuzione spaziale delle tasse straordinarie richieste per un certo intervento; la distribuzione dei tempi aggiuntivi di percorrenza legati alla presenza di cantieri; i benefici “di posizione” conseguenti a diverse fasi di attuazione di un progetto, come la deformazione del commercio indotta dalla riqualificazione differenziale di un centro storico, lo spostamento dell'“epicentro di rischio” durante l'intervento di bonifica di un sito contaminato, etc.).

In tutti questi casi gli strumenti di modellazione servono solo *a latere* di un processo politico. I modelli possono aiutare a chiarire le idee, mettere in ordine concetti, visualizzare certe situazioni, ma il giudizio è altrove e secondo altre logiche. Ci sembra tuttavia che si possa ancora parlare di modelli di classificazione, perché il giudizio razionale risponde in questi casi del dove e come attuare interventi. Il territorio è ancora classificato, secondo un modello che – a differenza dei casi precedenti- non ha una teoria alle spalle, ma segue le stesse logiche operative. Se si volesse rappresentare il giudizio razionale con uno schema analogo a quello di Figura 8, saremmo costretti a pensare a qualcosa come lo schema di Figura 9.

³² Ciò è testimoniato da una ricca aneddotica, fra la quale si estrae ad esempio il detto che per l'ingegnere il geologo migliore è quello con una mano sola, in riferimento alla tendenza di categorie meno coinvolte nella soluzione pratica di problemi ad indicare sempre più possibili risposte ad una domanda. Del resto, si dice che il presidente Roosevelt chiedesse a Babbo Natale “un economista con una sola mano” (Wyatt, 1999).

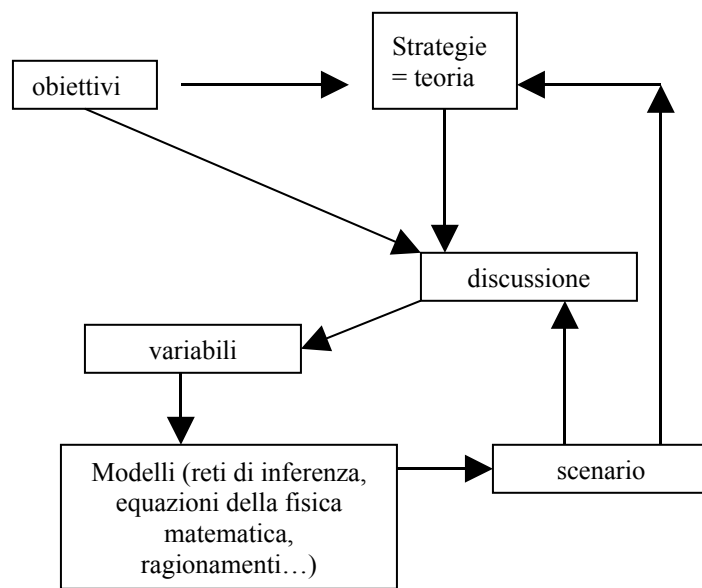


Figura 9 – Un modello di giudizio razionale

A prima vista, può apparire sorprendente che si accomuni ad un procedimento conoscitivo (come quello dei due tipi di modelli sopra descritti) ad un procedimento operativo. In realtà, ciò che accomuna i due tipi di ragionamenti è la casella dei “risultati”: in entrambi i casi si ha infatti una produzione di mappe che esprimono una classificazione del territorio. Mentre nel caso in cui si usino modelli di simulazione la classificazione è prodotta dalla “interpretazione” dei risultati, negli altri due casi si ha direttamente un risultato che esprime il giudizio ed evidenzia la necessità dei rimedi. Quando i fenomeni sono evidenti di per sé – p.es. rischi di calamità naturali, potenziale per l’estrazione mineraria – e non richiedono discussione, è sufficiente costruire una rete di inferenza, mentre quando si trattano fatti più complessi (opportunità di sviluppo, aree da salvaguardare, fenomeni di degrado sociale...) è indispensabile passare al giudizio razionale.

Le forme di modellazione del giudizio razionale, sui cui caratteri si è riflettuto nel capitolo 3, hanno lo scopo di mettere in ordine una discussione; ha un senso la ricerca di formalizzazioni solo se queste non sono considerate alternative alla discussione democratica, ma tecniche per tenere sotto controllo la consistenza e “difendibilità” del giudizio espresso da ogni gruppo sociale.

Con questo consideriamo esaurita la breve introduzione ai vari casi di studio di seguito presentati. In ciascuno di essi si potranno trovare alcuni degli spunti sviluppati finora, e la lettura potrà essere nell’ottica di reperire esempi applicativi alla teoria della modellazione geografica che si è abbozzata. Prima, però, vogliamo dare sfogo al malcelato delirio di onnipotenza che ogni ricercatore coltiva nel suo cuore, per il quale la realtà esiste in fondo solo perché qualcuno l’ha precedentemente modellizzata. Nel paragrafo seguente, si delinea un’utopia dell’uso sinergico dei vari tipi di modelli che, non senza un fondo autoironico, abbiamo chiamato LEVIATANO.

3- LEVIATANO: Land Evaluation and Impact Assessment Theory AND Operation (a benign utopia?)

Immaginiamo un mondo in cui i dati distribuiti sono disponibili:

- tutta l’Italia è effettivamente coperta da un DTM a passo “50 m or better” (Beven, 1996)

- i suoli sono effettivamente noti, almeno per ogni classe tessiturale del “triangolo USDA”, in modo che ha senso estendere alle unità della mappa le proprietà fisiche dei suoli misurate in laboratorio o in situ;
- le misure meteorologiche sono effettivamente affidabili, così come quelle di portata solida e liquida nei corsi d’acqua e livello piezometrico negli acquiferi; esistono reti di monitoraggio tali per cui è possibile valutare in ogni punto il valore della grandezza regionalizzata, con la sua varianza di stima;
- la cartografia geologica consente di identificare litologia di superficie e strutture geologiche ad un dettaglio ragionevole; inoltre, si conoscono le informazioni fondamentali sul sottosuolo (sequenze stratigrafiche e proprietà petrofisiche dei materiali)
- la cartografia di uso del suolo è affidabile almeno a scale 1:25000 o meglio;
- sono disponibili correntemente immagini da satellite con cui mappare la copertura del suolo e altre caratteristiche;
- il reticolo idrografico e stradale viene rappresentato a sufficiente dettaglio

In un mondo di questo tipo, è possibile costruire un “modello ambientale” che descriva con modelli espliciti di simulazione:

- flusso delle acque sotterranee
- trasformazione afflussi-deflussi durante le piene
- bilancio idrologico giornaliero, stagionale ed annuale
- livelli idrici nei corsi d’acqua, velocità e capacità di trasporto solido
- erosione e sedimentazione
- comprimibilità dei terreni
- proprietà geomeccaniche dei materiali litoidi
- struttura media dei venti in ogni punto (rosa dei venti)
- propensione all’innescò e alla propagazione degli incendi
- connettività delle reti ecologiche, proprietà morfometriche degli ecosistemi e delle strutture ecologiche del paesaggio
- (all’elenco possono essere aggiunte altre voci a piacere).

Inoltre, con reti di inferenza:

- il rischio di frane
- il rischio sismico
- il rischio di alluvioni
- il rischio di incendi boschivi
- il rischio di esplosioni e incidenti industriali
- la possibile esistenza di giacimenti minerari
- la possibilità di presenza di specie animali o vegetali
- la propensione alla diffusione di epidemie in relazione ai fattori fisici dell’ambiente
- (all’elenco possono essere aggiunte altre voci a piacere).

Supponiamo poi di disporre di un database di tutti i fattori di pressione dell’uomo sull’ambiente:

- tutti i prelievi di acque destinate a varie forme di consumo
- tutti gli scarichi di acque reflue civili e industriali
- tutti i carichi inquinanti associati alle attività zootecniche
- tutte le attività estrattive esistenti
- tutte le emissioni di inquinanti in atmosfera da sorgenti puntuali
- l’intensità del traffico veicolare sul reticolo stradale
- le emissioni sonore puntuali

- i consumi energetici distinti per tipologie
- la presenza di correnti elettriche e altre sorgenti di radiazioni
- la distribuzione delle colture agrarie
- la produzione di rifiuti solidi distinti per tipologie
- i siti contaminati
- (all'elenco possono essere aggiunte altre voci a piacere).

In un quadro così ottimistico, possiamo fare uso dei modelli previsionali per descrivere il “fato ambientale” delle varie emissioni (chimiche e fisiche); possiamo valutare –per i casi in cui non ci siano misure dirette delle emissioni – la loro presunta entità (p.es. inquinamento diffuso da fonti agricole e urbane; emissioni sonore ed atmosferiche da traffico veicolare); possiamo valutare con opportuni ragionamenti gli effetti che le emissioni potranno avere sui vari comparti dell'ambiente.

Molti aspetti potranno essere descritti da modelli di tipo esplicito, capaci di rispondere a domande del tipo “che cosa...se...”. Altri aspetti dovranno essere indagati con reti di inferenza. Infine, su tutti i passaggi potrà sorgere una discussione, alcuni gruppi politici o culturali potranno chiedere spiegazioni scientifiche, dettagli di procedure, o potranno chiedere a loro esperti di fiducia di verificare che la lettura e le previsioni sulla realtà siano effettivamente corrette.

I vincoli fisici sarebbero fissati, nei limiti della conoscenza disponibile, in modo deduttivo, dopo aver condiviso a livello sociale alcuni obiettivi fondamentali: la protezione dell'ambiente, la tutela della salute umana, e altre cose di più difficile definizione, tipo l'equità, la libertà ecc.

In questo modo, potrà essere messa a punto una mappa che classifichi il territorio in relazione a ogni possibile sua utilizzazione: ad esempio, si potrà rappresentare in una mappa a toni di grigio o a falso colore l'attitudine dei suoli ad essere coltivati a cereali, tenuto conto dei fattori fisiografici e meteorologici, della sensibilità delle acque rispetto ai fertilizzanti o ai pesticidi impiegati, ecc.: le zone scure sono poco adatte, quelle via via più chiare lo sono sempre di più. Oppure si possono identificare le zone più adatte per costruire strade: potranno esserci aree completamente escluse, altre poco favorevoli, altre via via più favorevoli, ed al limite potrà essere identificato un percorso di “minimo costo” generalizzato. Oppure potrà essere scelta la localizzazione ottimale delle attività estrattive: si farà una graduatoria delle aree via via più sfavorevoli, da mettere in produzione con il crescere della domanda. E non è detto che tutto debba essere espresso in forma di vincoli: potranno esserci suggerimenti su dove spendere prioritariamente un fondo comunitario per i rimboschimenti, la difesa del suolo o la depurazione.

Ogni scelta della pianificazione sarà basata su un'attenta e trasparente procedura di valutazione di impatto e sulla preventiva *land evaluation*, per identificare opportunità e vincoli all'uso della terra. Ci sarà una “banca modelli” che raccoglierà, per ogni argomento, i modelli disponibili; semplici interfacce grafiche e ambienti di calcolo *user friendly* consentiranno di provare tutti i modelli, calibrarli, validarli e stimare l'incertezza delle previsioni. Ogni modello produrrà risultati che saranno rappresentati su mappe e discussi in assemblee che coinvolgeranno tutte le persone interessate al problema. L'uso di Internet (reso finalmente gratuito e velocissimo) consentirà a tutti di accedere alle informazioni ed ai modelli e di fare le proprie simulazioni, le proprie mappe e le proprie argomentazioni razionali a favore della propria tesi.

Poi si discuterà, e prima o poi si troverà un accordo perché tutti si sarà adottato un “atteggiamento etico” e un comportamento comunicativo. Nessuno sarà più ignorante e di conseguenza nessuno sarà più malvagio.

Quando qualcuno avrà un'idea “politica”, tipo l'espansione di una città o la realizzazione di un insediamento industriale, o l'istituzione di un parco nazionale, o la realizzazione di una ferrovia, si

discuterà serenamente sui *pro* e sui *contra*, si andrà a vedere come i modelli classificano il territorio, e se possono esserci spazi per quell'idea nel luogo pensato e proposto. Altrimenti si discuterà, sempre altrettanto serenamente, il da farsi.

Le utopie sull'uso della tecnologia hanno sempre avuto un ruolo importante nella nostra civiltà. Senza bisogno di riferirsi alla Nuova Atlantide di Bacone, ai giorni nostri sono già state proposte diverse utopie, che si sono andate realizzando. Fra le più recenti, la "*Digital Earth*" – discussa da Goodchild, 2000 – rappresenta una visione del mondo in cui tutto è rappresentato sul GIS, dall'intero pianeta all'oggetto nella stanza, e tutti i vari livelli di organizzazione sono fra loro collegati, interagiscono e consentono di trattare le proprietà emergenti di scala. Già oggi è impressionante come le tecnologie consentano di trattare una quantità di dati enorme, comunicare un sacco di informazioni, e produrre nuove forme di civiltà. La rivoluzione biotecnologia degli ultimi anni e l'ingegneria dell'informazione hanno risvolti inquietanti nel ridurre tutto ad elemento manipolabile, a rappresentazione per *riduzione cartografica*, per cui veramente pare che il reale tenda a coincidere con ciò che è rappresentato e pensato. Siamo forse d'accordo con Openshaw, che non capisce perché mai un paradigma computazionale nelle scienze dovrebbe essere disumanizzante (Openshaw, 1998a). Il LEVIATANO sopra descritto è un bellissimo modello regolativo, e se ben utilizzato può portare a un sensibile miglioramento della qualità dei processi decisionali. Ma occorre procedere con la chiara consapevolezza che al progresso tecnologico si deve affiancare un abbassamento della "soglia di vibratilità" etica, alla conoscibilità degli oggetti rappresentati dai modelli una crescente attenzione per ciò che i modelli non dicono, e non potranno mai dire, perché in essi non potrà mai essere rappresentato.

Non vorremmo che i modelli divenissero un sistema di potere, con il quale governare un "*brave new world*" in cui tutti sono felici perché sistematicamente predeterminati, alimentati e soddisfatti nei loro bisogni materiali in modo ottimale, come nel famoso ed attualissimo romanzo di Huxley del 1927. Per usare veramente i modelli, occorre non crederci affatto. L'uso politico del modello è possibile solo con il "supponiamo che" e con il "secondo questo schema risulterebbe che". I modelli sono un caleidoscopio di possibili, e non crediamo che un LEVIATANO possa mai essere in grado di mettere sul tavolo della discussione tutti gli elementi necessari a formulare una decisione "ottima", a trovare una soluzione in senso assoluto. Siamo assolutamente convinti che l'uso di modelli e il ragionamento sui dati, che abbiamo chiamato altrove produzione di "informazione a valore aggiunto", sia un sostegno indispensabile alle decisioni, ma siamo altrettanto convinti che la conoscenza sia troppo complessa – e troppo diversa dalla sola *informazione*- per essere racchiusa in una procedura formalizzata. I dati sono importanti: ma non si sa mai con precisione *da chi* e *con che criterio* sono dati. E siccome la nostra riduzione cartografica non ha contenuti ontologici, ci aspettiamo che solo l'uso pratico delle nostre valutazioni potrà dirci che cosa esse significhino, quale utilità potranno avere e come potranno essere migliorate.

Capitolo 5 –L’ecologia del paesaggio come metodo nella pianificazione territoriale: riflessioni su un caso di studio

1- L’uso dei concetti dell’ecologia del paesaggio nella progettazione

Le origini dell’ecologia del paesaggio

Il paesaggio è un’entità estremamente complessa da definire, anche se la sua cognizione pare piuttosto intuitiva (Pignatti, 1994). In Italia, una forte tradizione “crociana” ha imposto un forse eccessivo attaccamento agli aspetti estetico-percettivi del paesaggio, che hanno impedito per lungo tempo lo sviluppo di studi transdisciplinari efficaci per la comprensione dei fenomeni naturali e per la gestione equilibrata del territorio. P.es. Pignatti (cit.) imposta il suo manuale di ecologia del paesaggio da una prospettiva essenzialmente botanica, e a margine della trattazione inserisce considerazioni – invero piuttosto naïf – sulla percezione del paesaggio nella letteratura e nell’arte. Sempre rimanendo al ‘criterio del libro’ (Kuhn, 1970) per chiarire il paradigma, Ingegnoli (1993) richiama la tradizione di Leonardo da Vinci e dei suoi studi naturalistici a partire dalle osservazioni del paesaggio. In altro contesto, l’inquadramento del paesaggio agrario dovuto al Sereni (1961) mostra il fascino e la ricchezza culturale, ma in certa misura anche l’isolamento e lo scarso aggiornamento, del punto di vista tipicamente italiano sull’argomento³³.

Il termine ‘ecologia del paesaggio’ viene utilizzato per la prima volta da Troll nel 1939, ad indicare quell’area disciplinare, a cavallo fra la geobotanica e la geografia regionale, che ha per obiettivo lo studio del legame fra le forme percepibili del paesaggio e il funzionamento dei sistemi fisico-biologici che lo costituiscono. Una prima fonte del pensiero ecologico sul paesaggio è da ravvisare nello studio della vegetazione e delle successioni dinamiche di associazioni vegetali (Clements, 1916). La tradizione geografica del XIX secolo è comunque estremamente ricca di ricerche e riflessioni sulla distribuzione spaziale delle piante e degli animali (p.es. Humboldt, 1807). Secondo Naveh (1982), tuttavia, un passo decisivo per la definizione metodologica dell’ecologia del paesaggio è il superamento della polarità fra ambiente naturale/equilibrio di climax da un lato, e ambiente antropizzato/artificializzato dall’altro. Questa polarità, fortemente radicata nella tradizione ecologica occidentale, è stata messa in discussione solo negli anni ‘50 del Novecento. Un’idea fondamentale che ha contribuito a questo superamento è secondo Naveh (*ibid.*) il concetto di *noosfera*, introdotto da Vernadsky (1945) per rappresentare il sistema in cui l’azione dell’uomo determina nuovi corsi ai processi naturali. L’azione dell’uomo configura nuovi ecosistemi, sconosciuti in fasi precedenti della civiltà umana, nelle quali la sua influenza era molto più modesta, e il suo ruolo passivo.

Il paesaggio deve oggi essere studiato a partire dalla considerazione che non esistono ambienti e forme esclusivamente naturali, ma che ogni paesaggio è *Kulturlandschaft* molto prima che *Naturlandschaft*, e che in ogni caso non è possibile risalire ad un paesaggio naturale originario, dal momento che l’azione modificatrice dell’uomo è pervasiva e antichissima (Schmithüsen, 1961; cit. in Naveh, 1982). Lo studio del paesaggio, prima condotto come analisi delle associazioni vegetali o delle forme geologiche,

³³ Al proposito si deve richiamare che la legislazione italiana sulla tutela del paesaggio si riferisce sempre ai concetti di “bellezze naturali” e mai a quelli più “integrati” propri dell’ecologia del paesaggio.

è stato portato gradualmente al livello di una ‘fisiologia del territorio’, con crescente attenzione per gli aspetti dinamici e di processo che in esso si consumano. In questo percorso, il superamento di un modello ‘di stato stazionario’ degli ecosistemi – legato al particolare all’egemonia culturale di MacArthur e al suo concetto dell’equilibrio competitivo (p.es. MacArthur e Wilson, 1967) - per farsi carico pienamente degli aspetti dinamici e della complessità del paesaggio, ha avuto un ruolo fondamentale (Lavers e Haines-Young, 1993). Secondo questi ultimi Autori, il carattere degli studi ecologici che definisce una vera e propria ecologia del paesaggio è rappresentato dall’interpretazione del paesaggio come sistema di flussi (di materia e di energia), e dall’attenzione posta alla scala di analisi. In quest’ottica, il ruolo delle tecnologie dell’informazione si è rivelato essenziale, consentendo, grazie al miglioramento delle tecniche di gestione dell’informazione spaziale, lo sviluppo di nuovi modelli concettuali per descrivere il funzionamento dei sistemi ecologici alla scala del paesaggio (*ibid.*).

Lo sviluppo della cibernetica, della teoria generale dei sistemi e le loro implicazioni (fra cui la definizione di ecosfera, tecnosfera e noosfera, e l’interpretazione cibernetica delle civiltà umane - Laszo, 1972), nonché delle teorie dell’auto-organizzazione (l’ordine attraverso le fluttuazioni’-Prigogine e Nicolis, 1971) hanno costituito una cornice culturale nella quale collocare la visione degli ecosistemi come risultato degli equilibri dinamici fra i diversi processi naturali e quelli controllati in tutto o in parte dall’uomo (Naveh, 1982).

Il concetto di paesaggio oggi più adottato è strettamente legato ad un approccio olistico, nel quale la totalità degli ambienti fisici, e ciascun suo sottoinsieme significativo, sono visti come prodotti di una azione simultanea dell’uomo e dei processi naturali, sia biologici sia chimico-fisici (*ibid.*).

‘Concetti spaziali’ e pianificazione territoriale

Mentre è manifesta un’integrazione spaziale e visiva fra la tecnosfera e la bio-geosfera nel paesaggio percepito, il riconoscimento di un ‘ecosistema umano totale’ (*ibid.*) che possieda caratteri di ‘homeorhesis’ (Waddington, 1975; Jantsch, 1975) o equilibrio, seppure dinamico, fra i suoi molteplici processi, appare più difficile. L’ecologia del paesaggio, seguendo Naveh, dovrebbe fornire un controllo in retroazione nel processo decisionale, favorendo l’integrazione funzionale e strutturale delle entità concrete di questo ‘ecosistema totale’ al livello della loro maggiore interazione con l’uomo, ovvero quello dell’uso del suolo.

Ahern (1999) definisce la pianificazione del paesaggio come la pratica dell’organizzazione dell’uso sostenibile delle risorse fisiche, biologiche e culturali, sviluppatasi dal dialogo con l’ecologia del paesaggio: “*Ci sono molte dimensioni della sostenibilità, e la pianificazione del paesaggio si riferisce essenzialmente alla dimensione spaziale. I piani paesistici sono essenzialmente ipotesi su come vengono influenzati, dai piani stessi, i processi del paesaggio. Il piano paesistico offre specifiche raccomandazioni sull’allocazione dell’uso del suolo, sul progetto di diversi livelli di protezione e gestione, e sulle modalità con cui invertire trasformazioni negative del passato*” (*ibid.*, trad. nostra con lievi modifiche).

La pianificazione del paesaggio si basa su questa dialettica struttura-processo, che, seguendo Turner (1989), rivela strettissimi rapporti di causa ed effetto e deve quindi essere presa come criterio per la gestione delle risorse, soprattutto al livello di vasta scala. Il problema, oggi, è approfondire la conoscenza delle relazioni fra cambiamenti delle strutture e sviluppo dei processi, anche sfruttando tecnologie di indagine oggi sempre più accessibili (*ibid.*).

L’ecologia del paesaggio è da vedersi come una fonte di ispirazione per la produzione di ‘concetti spaziali’ per la pianificazione: “*Un concetto spaziale esprime attraverso parole ed immagini la visione di un oggetto di piano in relazione all’indirizzo di sviluppo spaziale della società e alla natura degli*

interventi ritenuti necessari” (Zonneveld, 1991, trad. it. nostra). I concetti spaziali sono ‘concetti attivi’ (Langevelde, 1999) nel senso che vogliono colmare il dislivello fra la situazione esistente ed una situazione immaginata, fornendo suggerimenti operativi. Zonneveld (cit. in Langevelde, 1999) distingue cinque funzioni che i concetti spaziali devono possedere: (1) la funzione cognitiva, per cui essi devono rappresentare un pensiero ordinato sulla forma del paesaggio da progettare; (2) la funzione intenzionale, per cui essi devono costituire una visualizzazione delle idee di sviluppo proposte dai progettisti; (3) la funzione istituzionale, per cui essi possono creare consenso politico-amministrativo attorno a scelte di organizzazione del territorio; (4) la funzione comunicativa, per cui attraverso la rappresentazione per immagini si possono svolgere discussioni e si possono definire accordi su obiettivi e strategie nel progetto del paesaggio; (5) la funzione attuativa, per cui i concetti spaziali costituiscono una guida all’azione di piano e di progetto.

Langevelde (op.cit.) traccia una breve storia dell’uso di concetti spaziali nella pianificazione del paesaggio in Olanda, durante il XX secolo. Secondo l’Autore, si può parlare di:

- un periodo iniziale, fino al 1954, caratterizzato da un interesse per l’ambiente rurale periurbano come risorsa ricreativa, che ha introdotto l’uso del concetto spaziale (di origine americana) del *parkway*, per promuovere il collegamento fra la campagna e la città mediante la creazione di cunei di verde che dividono l’urbanizzato in aree di piccola dimensione, e al contempo la realizzazione di percorsi forestati in mezzo alla campagna, utilizzabili per scopi ricreativi.
- un secondo periodo, successivo al Land Consolidation Act (1954) e fino agli anni ’70, è caratterizzato dall’uso di concetti spaziali di segregazione degli usi del suolo e allargamento di scala, con creazione di aree naturalistiche o ricreative di vaste dimensioni, e specializzazione-intensificazione degli usi agricoli; un esempio è il concetto di ‘cuore verde’ dell’Olanda, come area-cuscinetto interna al Randstad, da mantenere in condizioni di naturale equilibrio.
- il periodo dagli anni ’70 alla fine degli anni ’80, in cui viene usato il concetto spaziale di “infrastruttura ecologica”. Se nel periodo precedente si era posta attenzione ad elementi del paesaggio di vaste proporzioni e quindi di valenza sulla grande scala, in questi anni si approfondisce l’interesse per i piccoli elementi del paesaggio, sull’onda del successo incontrato dalla teoria biogeografica di MacArthur e Wilson (cit.). In base a questa teoria, si è cercato di superare la frammentazione del paesaggio realizzando corridoi, ecotopi e loro connessioni. Tuttavia, l’uso di una teoria ancora non molto testata, e per di più formulata in considerazione delle caratteristiche specifiche di ciascun tipo di animale, ha portato a confusioni e ad una applicazione spesso non efficace del concetto di infrastruttura ecologica nella formulazione di piani territoriali.
- dalla fine degli anni ’80, si è sviluppato un concetto spaziale di ‘cornice paesistica’, basata sulla segregazione spaziale di usi intensivi del suolo (richiedenti flessibilità) e usi estensivi, che necessitano invece di stabilità. Un concetto molto importante ai fini dell’ideazione di forme dle paesaggio è quello di ‘rete ecologica’, basato sulla proprietà di connettività. In questo concetto, si integrano i diversi concetti precedentemente esplorati (i ‘cunei verdi’, i corridoi, etc.), superando l’incompletezza dell’approccio per ‘infrastrutture ecologiche’, e riproponendo una visione complessa del paesaggio in cui i vari elementi (corridoi e macchie dalle diverse caratteristiche) sono fra loro collegati per potenziarne le funzioni ecologiche e garantirne un uso multifunzionale in cui la conservazione della natura è integrata con lo sfruttamento sostenibile delle risorse.

Ahern (op.cit.) riporta più generali esempi di concetti spaziali, come quelli di ‘contenimento’ (p.es. fasce verdi attorno alle città), griglia (come nell’organizzazione spaziale di molte bonifiche, delle centuriazioni, di coltivazioni negli Stati Uniti, etc.), interdigitazione (come i cunei verdi), segregazione (p.es. le riserve naturali), rete (i ‘corridoi’ e le ‘macchie’). Sull’uso dei concetti spaziali, l’Autore sottolinea come essi possano produrre ‘scenari-stato’, oppure ‘scenari-processo’. Nel primo caso si definisce semplicemente una situazione futura, senza chiarire i passi operativi e temporali necessari a

pervenirvi. Nel secondo caso, che viene indicato come più appropriato per la pianificazione del paesaggio, si considerano invece i passaggi che portano dallo stato attuale ad uno scenario di progetto, che può essere *beginning state driven* (quando si considera la situazione esistente e si riflette su quali azioni migliorative sono effettivamente possibili) o *end state driven* (quando si identifica a priori una situazione finale soddisfacente e si definiscono i passaggi per arrivarci). Compito esplicito dell'ecologia del paesaggio sarebbe l'assistenza nello sviluppo di nuovi concetti spaziali, e nella loro valutazione.

McHarg (1997) definisce la pianificazione ecologica come *“il processo nel quale una regione è descritta come un fenomeno bio-fisico e sociale comprensibile attraverso l'azione di leggi fisiche e del tempo. Questo fenomeno può essere reinterpretato in termini delle opportunità e dei vincoli che mostra per ogni specifico uso umano”* (tr.it. nostra).

Il 'progettare con la natura' di McHarg esprime un legame strettissimo fra le discipline ecologiche e la creatività progettuale: *“C'è chiaramente un disperato bisogno di professionisti che siano conservazionisti per natura, ma che si preoccupino non solo di conservare, ma anche di creare e di gestire. Queste persone non possono essere impeccabili scienziati, perché tale purezza li paralizzerebbe. Devono essere degli operatori che si interessano istintivamente di scienze fisiche e biologiche, e che cercano da esse informazioni per poter applicare le loro capacità creative al territorio.[...]Questo è il metodo: un semplice esame sequenziale del territorio al fine di comprenderlo e di considerarlo un sistema interattivo, un 'magazzino attivo' e un sistema di valori. In base a queste informazioni è consentito prescrivere gli usi del suolo possibili, non come attività singole, ma come associazioni di attività. Non è una piccola pretesa, non è un piccolo contributo: dovrebbe essere evidente che il metodo dell'ecologia può essere usato per comprendere e per elaborare un piano con la natura, forse per progettare con la natura.”* (McHarg, 1969; tr.it. Muzzio).

L'approccio 'topologico' proprio dell'ecologia tradizionale, orientata alla comprensione 'in verticale' dei processi, dovrebbe però essere integrato con un approccio 'corologico', volto allo studio delle relazioni spaziali, orizzontali fra gli elementi ambientali (Zonneveld, cit.; Ahern, cit.). In questo, l'ecologia del paesaggio – come branca emergente dell'ecologia 'classica' e dell'ecologia umana, dovrebbe fornire un paradigma sostantivo (Faludi, 1973; Ndubisi, 1997) per la pianificazione territoriale, nel senso che dovrebbe indicare nuovi contenuti e nuove forme di ispirazione della creatività progettuale.

Recenti esperienze nel campo della pianificazione territoriale (Arts *et al.*, 1995) mostrano come siano in forte crescita le iniziative di conservazione della natura condotte a maturo livello geografico. Si evidenziano diverse prospettive, che spaziano dall'analisi delle strutture fisiche del paesaggio, all'esame delle caratteristiche biotiche, con particolare attenzione per gli aspetti di isolamento e frammentazione delle macchie paesistiche. Sono stati presentati numerosi modelli di gestione del paesaggio, da quelli che integrano strettamente conservazione e fruizione, a quelli specializzati su uno solo dei due aspetti. Tuttavia carattere comune ai vari approcci è l'esigenza di integrare conoscenze scientifiche nel processo di piano (*ibid.*). In tal senso, il piano attuato diventa un esperimento di campagna da cui l'ecologia del paesaggio può ricavare nuove conoscenze (Golley e Bellot, 1991, cit. in Ahern, 1999), caratterizzandosi al contempo come un processo di *adaptive management* (*ibid.*). Vari modelli interdisciplinari sono stati proposti per un simile processo di piano. P.es. Berger (1987) propone una 'land use ecology' che integri i risultati e l'approccio dell'ecologia del paesaggio con l'ecologia umana (Ahern, cit.), mentre Naveh (cit.) richiama la natura dell'ecologia del paesaggio come disciplina essenzialmente relativa agli ecosistemi umani, per i quali dovrebbe indicare le condizioni dell'integrazione dei diversi oggetti del paesaggio nella gestione degli usi del suolo. In particolare, l'Autore richiama l'attenzione sul concetto di *total human ecosystem* (Egler, 1970) come passaggio essenziale per il superamento della crisi dei sistemi antropici nel rapporto colle loro basi ecologiche.

Oggi sembrerebbe non darsi alcuna progettazione dell'ambiente e del territorio in assenza di una solida base di ecologia del paesaggio. Esistono molti esempi di progettazione eco-paesistica in Europa e, anche se le origini concettuali delle scelte sono molto diverse, pare possibile parlare di un loro esito sostanzialmente congruente (Jongman, 1995). Tuttavia, finora è parso che i concetti ispiratori delle politiche sul paesaggio abbiano privilegiato gli aspetti geografici, rispetto agli aspetti più genuinamente ecologici, della disciplina. Del resto, hanno contribuito ad un allontanamento dalla base 'scientifica', offerta dall'ecologia del paesaggio alla pianificazione, da un lato il crescente livello simbolico al quale gli studi e le analisi si esprimono, e dall'altro la bassa definizione dei loro oggetti. Il paradigma americano della progettazione per percorsi, o *greenways* (Little, 1990; Fabos, 1991, in Jongman, cit.), ha avuto molto più successo pratico rispetto alle concettualizzazioni legate a sistemi gerarchici e metapopolazioni (Langevelde, cit.). Oggi rimane problematico stabilire fino a che punto la pianificazione territoriale abbia bisogno delle analisi eco-paesistiche, o come sia possibile muoversi sulla scorta di alcune semplici e relativamente intuitive regole di 'buona organizzazione' dello spazio. L'analisi ecopaesistica mostra aporie a molti livelli, riconducibili alle seguenti:

- difficoltà di definizione del supporto, ovvero dell'unità spaziale elementare a cui riferire le elaborazioni (p.es. nel calcolo di indici spaziali quali frammentazione o diversità, e' necessario definire sottoaree omogenee dell'area di studio, ma mancano basi teoriche per la scelta di queste sottoaree);
- difficoltà di interpretazione degli indici. Nonostante le analisi siano basate su concetti teorici condivisi, risulta poi difficile estrarre indicazioni univoche dai risultati (p.es. gli indici di frammentazione, valutati con varie tecniche, sono quasi sempre interpretati sulla base di considerazioni *ad hoc*);
- difficoltà di individuazione delle priorità di analisi e delle loro concatenazioni. Il problema e' legato ai precedenti, e si manifesta al momento di decidere quali analisi siano effettivamente utili, e come possano essere sinergiche.

In effetti, pare che l'ecologia del paesaggio giunga ad un circolo vizioso: da un lato, essa ha posto attenzione alla diffusione di rilevanti concetti spaziali, che oggi sono sempre più usati nella pianificazione; dall'altro, si è evoluta in una direzione spesso formalmente quantitativa, senza però avere alle spalle una solida base concettuale per l'impostazione delle sue valutazioni, giungendo ad uno *status* per cui le sue analisi paiono spesso astruse e di scarsa utilità pratica. E tanto più questa incomunicabilità fra pianificazione ed ecologia del paesaggio cresce, quanto più le analisi si fondano su concetti simbolicamente evoluti, quali le dimensioni frattali o indici prestazionali non solidamente basati su fenomeni verificabili.

Per le loro caratteristiche e funzioni, i concetti spaziali devono essere fatti di immagini e parole facilmente visualizzabili: devono essere intuitivi e pronti per la comunicazione. Se l'analisi perde la capacità di tradursi in questo tipo di indicazioni, risulta inefficace. Se poi non si esplicitano le capacità descrittive e predittive di ciascuno strumento di analisi, esso è destinato a non poter essere utilizzato neppure per scopi relativamente specializzati, come la conservazione della fauna o la delimitazione di riserve naturali.

Chi scrive ritiene che per valutare il paesaggio e fornire concetti spaziali ed indicazioni operative alla pianificazione, occorra ricorrere a metodi trasparenti. Fra essi possiamo includere i modelli ecologici distribuiti, quali i modelli di flusso di animali, e la ricognizione della struttura spaziale dell'uso del suolo.

Le valutazioni dell'ecologia del paesaggio

L'ecologia del paesaggio è oggi una disciplina multiforme, che attinge a molteplici tradizioni culturali, e questa caratteristica di eclettismo la rende particolarmente interessante, fra le discipline del territorio, come luogo di discussione dei piani territoriali alla luce della razionalità da essa rappresentata. In quanto produttrice di concetti spaziali, l'ecologia del paesaggio invoca un legame, oltre che con la teoria sostantiva della pianificazione, con la scienza dell'informazione geografica (Goodchild, 1992).

Nonostante già da alcuni anni sia diffusa la consapevolezza che i sistemi informativi geografici (GIS) possono potenziare enormemente la capacità di analisi ecologica del territorio (Bridgewater, 1993; Haynes-Young *et al.*, 1993), e se, come detto, l'ecologia del paesaggio fornisce idee su come orientare la pianificazione e le scelte sul territorio, ci sono ancora molte cose da esplorare circa:

- la natura delle rappresentazioni del territorio prodotte da questa disciplina;
- l'uso dell'informazione spaziale che in essa viene richiesto;
- la natura delle affermazioni e delle predizioni che vengono prodotte.

Le analisi dell'ecologia del paesaggio dovrebbero essere dirette allo studio del rapporto forma-funzione. In questo, dovrebbero sostanzialmente diversificarsi tanto dalle analisi di tipo tradizionalmente naturalistico (che tipo di oggetti possono essere osservati in un certo luogo), quanto da quelle ecologiche (che processi si svolgono, e quali ne sono cause ed effetti, ad un livello locale).

Turner (1989) propone una lettura delle teorie dell'ecologia del paesaggio nei termini dello studio dell'effetto delle strutture sui processi. In questo quadro, dopo aver passato in rassegna alcuni indici per la quantificazione delle strutture (in genere riconducibili a indici prestazionali applicabili a qualunque grafo, come ad es. le reti tecnologiche o di trasporto), l'Autrice esamina alcuni approcci ricorrenti nel descrivere la relazione fra processi e strutture. Questi approcci sono:

- 1- modelli neutri di struttura o di processo, che mirano a riprodurre una particolare ed osservata struttura senza dover esplicitare i termini del processo che l'ha generata (appartengono a questa categoria la teoria della percolazione di Gardner *et al.*, 1987, e le più recenti tecniche di *pattern recognition*, come ad es. in Chiarello *et al.*, 1995);
- 2- modelli di propagazione di *disturbance*, che tengono conto di molteplici fattori causali e delle eterogeneità. Si pensi a modelli di propagazione degli incendi, o a modelli di predisposizione di una certa classe di uso del suolo ad essere modificata da un prefissato fenomeno: si tratta nei due casi di modelli di propagazione di *disturbance* condizionata in modo vario dall'eterogeneità del paesaggio;
- 3- modelli di movimento e di persistenza di organismi: si tratta di modelli volti a identificare e valutare gli effetti delle strutture del paesaggio sull'abbondanza locale e i flussi delle popolazioni. Possono essere di vario tipo e basati su algoritmi molto diversi, da semplici ottimizzazioni di funzioni di costo a modelli fluidodinamici di elevata complessità;
- 4- modelli relativi alla redistribuzione di materiali e nutrienti, volti a caratterizzare le interazioni fra flussi orizzontali o verticali, p.es. di azoto o di sedimenti in un bacino, e strutture del paesaggio;
- 5- modelli di processo ecosistemico alla scala del paesaggio, finalizzati alla stima di funzioni ecologiche (produzione primaria, evapotraspirazione, decomposizione, etc.). Esistono alcuni rilevanti esempi di applicazioni di questo genere in letteratura, spesso basate sull'elaborazione di immagini telerilevate.

Questa classificazione può essere considerata tuttora valida. In merito alla quantificazione delle strutture, si può affermare che molti indici fra quelli noti in letteratura siano fra loro equivalenti. A tal proposito, Giles e Trani (1999) illustrano come le misure della struttura del paesaggio, riportate in letteratura, possano essere espresse in termini di un numero ristretto di variabili, da cui tutte le altre possono essere dedotte. Gli Autori propongono le seguenti variabili fondamentali:

- 1- area totale;
- 2- numero di classi di uso/copertura del suolo significative;
- 3- percentuale dell'area ricadente nella classe dominante;
- 4- numero di poligoni omogenei costituenti l'area di studio;
- 5- lunghezza totale stimata del confine dei poligoni;
- 6- quota topografica.

Queste variabili fondamentali rappresentano una caratterizzazione del paesaggio provatamente collegata alle sue proprietà funzionali: *“Cosa ogni pianificatore possa fare per cambiare valore alle variabili, e con ciò influenzare il valore di una risorsa, y, pare difficile da interpretare”*, e tuttavia *“se la struttura del paesaggio influenza y, [...]ciò sarà ben espresso dalle variabili[fondamentali]”* (Giles e Trani, cit., tr.it. nostra).

Esistono molti altri tentativi di studio quantitativo delle strutture del paesaggio. Patrono e Feoli (1997) utilizzano la dimensione frattale e l'indice di diversità per caratterizzare ogni classe di copertura del suolo, evidenziando come ciascuna mostri una sua specifica traiettoria nello spazio vettoriale definito dai due indici in relazione ai gradienti di fattori geografici significativi (influenza dell'uomo, quota topografica, orientamento del versante). Altobelli *et al.* (1999) utilizzano la dimensione frattale (FD) delle macchie paesistiche, come proposto in precedenza da Burrough e de Jong (1995), insieme all'indice normalizzato di vegetazione (NDVI) calcolato da immagini telerilevate SPOT-XS, per evidenziare le strutture del paesaggio in un caso di studio. Incrociando i due indicatori, si distinguono secondo gli Autori le aree rurali con elevata diversità di colture (elevati valori di NDVI e di FD), da altri tipi di uso del suolo (come l'urbano e industriale, con NDVI basso e FD elevata, oppure aree rurali e periurbane degradate, con entrambi gli indicatori a valori bassi).

Meltzer e Hastings (1992) utilizzano la dimensione frattale per evidenziare gli impatti dovuti all'aumento della pressione di pascolo di bestiame sul territorio. Lo studio mette in evidenza il legame fra la dimensione frattale e il grado di stabilità dei processi di trasformazione del territorio.

Kenkel e Walker (1996) sottolineano tuttavia come, benché la natura frattale degli oggetti ecologici sia *self-evident*, la diffusione di analisi basate sulla geometria frattale ancora non abbia prodotto modelli complessivi dei processi e delle strutture che si osservano in natura.

Un approccio molto promettente nello studio del paesaggio viene dall'applicazione di modelli di simulazione del movimento di animali. A differenza di altri modelli tradizionali di spostamento (p.es. nelle reti di trasporto: Ferrari, 1996), in questi casi gli algoritmi non cercano tanto leggi esplicite che descrivano i fattori determinanti i flussi di individui, ma ottimizzano una funzione di resistenza. Questa viene definita in base a parametri legati all'uso del suolo e ai suoi attributi di idoneità per il passaggio o la permanenza di animali, o ad altri fattori determinanti le funzioni del paesaggio. Ad esempio, Langevelde (1999) descrive i modelli MENTOR ed ENLARGE, che si fondano sulla massimizzazione vincolata di una funzione delle variabili binarie di presenza-assenza di una specie, tenendo conto dell'idoneità dei diversi usi del suolo e del valore locale derivante dalla presenza della specie.

Westervelt e Hopkins (1999) descrivono un sistema di simulazione spaziale della dinamica delle popolazioni. Il sistema è configurato in un'architettura di calcolo 'aperta' e considera la possibilità di molteplici modelli dinamici. Questo tipo di strumenti è indicato nella gestione delle risorse biologiche.

Patrono e Saldana (1997) mettono a punto una procedura di calcolo, basata sull'uso estensivo di operatori di vicinaggio (si veda, p.es., Burrough e McDonnell, 1999) applicati a cartografia raster, per la delineazione di corridoi, a connessione di macchie di habitat, lungo i quali risulta minima la resistenza al movimento degli animali. Il modello prende in considerazione vincoli sulla distanza massima percorribile, la presenza di barriere per il movimento (quali insediamenti, strade, etc.) e consente di evidenziare i corridoi che riescono a connettere più macchie, rispetto a quelli a fondo cieco. Il modello si ispira al lavoro di Knaapen *et al.*, 1992, che introduce il concetto di minima

resistenza cumulativa (MCR). Questi Autori sottolineano come il loro approccio non serva a riprodurre i flussi di animali o le effettive traiettorie degli stessi, quanto a valutare l'isolamento delle macchie nella matrice del paesaggio.

Oltre agli approcci sopra citati, poche altri studi hanno applicato tecniche specifiche dell'ecologia del paesaggio. Più frequente è l'uso di modelli propri di altre discipline (idrologici, geomorfologici, ecologici, etc.), riportati alla scala del paesaggio. La gran parte delle analisi specifiche dell'ecologia del paesaggio viene di fatto effettuata mediante l'uso di indici geometrici o prestazionali delle strutture osservabili del territorio. Molti di questi indici (connettività, circuitazione, etc.) hanno origini piuttosto remote e nascono dallo studio di strutture topologiche generiche, mentre in campo eco-paesistico sono stati introdotti da lavori come quello di Forman e Godron (1986). Altri indici derivano dalla teoria dell'informazione (indice di Shannon, Shannon and Weaver, 1962) o dalla geometria frattale (Mandelbrot, 1975).

E' da segnalare che in Italia non sempre si è mantenuta una chiara distinzione fra indici che esprimono un giudizio di qualità sulle proprietà locali del territorio, e indici che derivano dall'analisi della struttura, delle proprietà topologiche e geometriche del paesaggio. Ad es. Ingegnoli (op.cit.) comprende fra gli indici dell'ecologia del paesaggio anche indici tradizionalmente ecologici *stricto sensu*, come il notissimo EBI (indice biologico esteso); Bernini e Padoa-Schioppa (1997) trattano come indice ecopaesistico un giudizio a punteggi quale è la bio-potenzialità territoriale o BTC (Ingegnoli, cit.), e Siligardi (1997) inserisce fra gli indici il giudizio fornito da un altro sistema a punteggi, l'RCE (Petersen, 1991).

2- Un caso di studio: il comprensorio cesenate

Introduzione: area di studio ed obiettivi

L'area assunta per lo studio è il comprensorio cesenate, al margine sud-orientale della Pianura Padana. Il confine ideale fra le zone a maggiore pressione antropica e quelle di più elevata naturalità è dato dalla via Emilia, che rappresenta anche il margine pedecollinare.

Il territorio si caratterizza per un gradiente paesistico che comprende le seguenti fasce (si veda la carta dell'uso del suolo dell'area, in Figura 10):

- costa sabbiosa adriatica (Cesenatico);
- pianura con usi del suolo agricoli fortemente artificializzati e frammisti a insediamenti produttivi, commerciali e residenziali diffusi con relativamente elevata densità infrastrutturale;
- zone di collina con grado di naturalità crescente allontanandosi dalla via Emilia;
- rilievi prossimi al crinale appenninico.

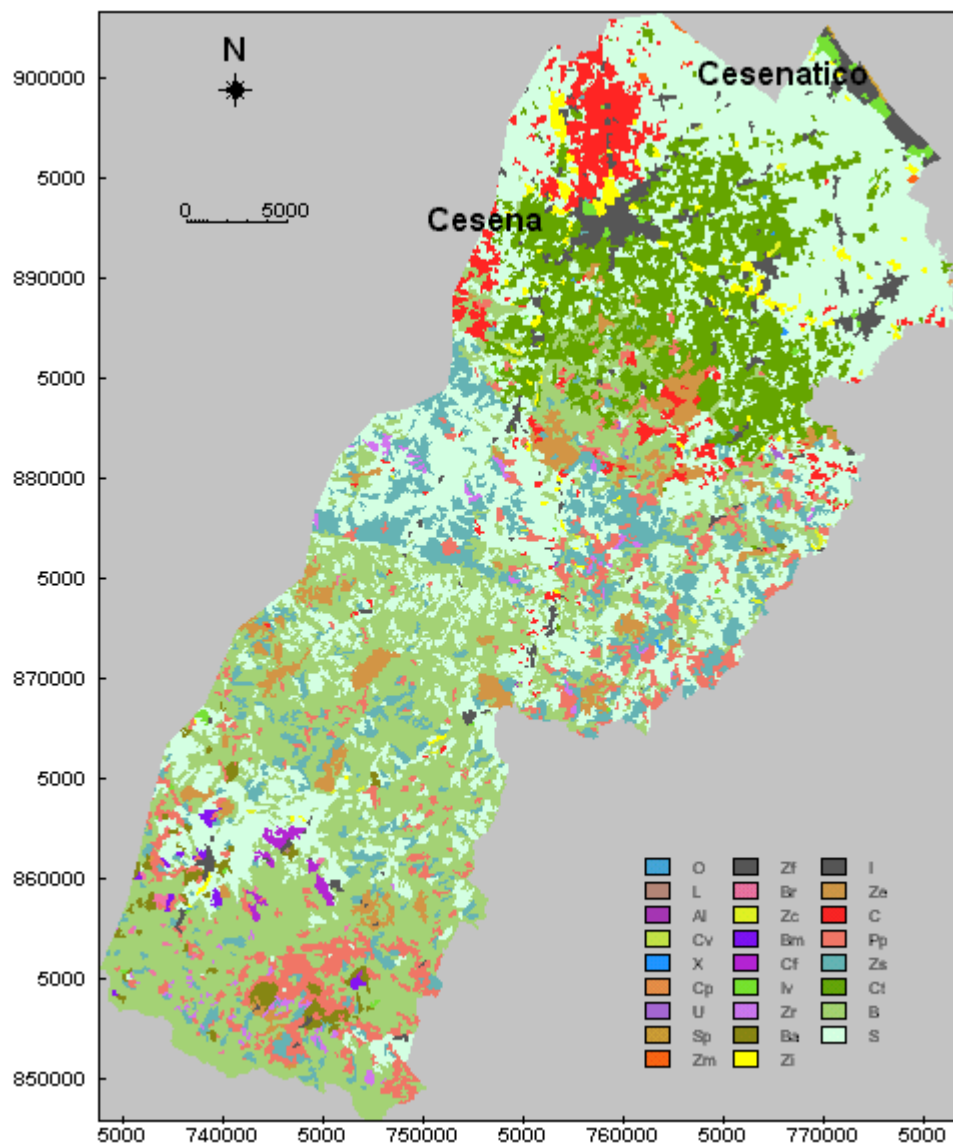


Figura 10 - Carta dell'uso del suolo dell'area di studio (cfr. Tabella 7 per il significato dei codici)

Nella pianura sono presenti siti ad alto valore naturalistico e paesistico, che risultano isolati in una matrice fortemente disturbata. Questo carattere del paesaggio sfuma a monte con il diminuire dei disturbi.

Lo studio ha avuto lo scopo di sperimentare alcune analisi spaziali dell'ecologia del paesaggio, valutandone il possibile contributo alla pianificazione territoriale. Particolare attenzione e' stata data all'identificazione di corridoi ecologici potenziali e alla valutazione del grado di isolamento delle macchie paesistiche costituite da habitat naturale residuo, identificato con le aree boschive, secondo la legenda della carta dell'uso del suolo della regione Emilia Romagna (URL1). Sia dal punto di vista della pianificazione di riserve naturali, sia, più in generale, per lo sviluppo territoriale sostenibile, è fondamentale considerare le strutture paesistiche esistenti e potenziali, cercando di interferire quanto meno possibile con le loro forme e funzioni.

Il metodo utilizzato

Il problema della pianificazione di un assetto sostenibile del paesaggio può essere impostato, pur con i limiti dell'approccio, nei termini della teoria biogeografica di MacArthur e Wilson (cit.), che guarda alla connettività delle reti ecologiche e al non-isolamento delle macchie paesistiche come valori del paesaggio. Per pianificare gli interventi di salvaguardia, occorrerebbe prima di tutto identificare le macchie paesistiche di maggiore pregio per la conservazione della natura o per la fruizione ed individuare corridoi effettivi o potenziali per la loro connessione.

Cod..	Classe di uso del suolo	Valore di resistenza
I	Zone urbanizzate	-1.0
Zi	Zone industriali	-1.0
Zf	Reti ferroviarie e stradali	-1.0
Zc	Zone estrattive e discariche	9.0
Iv	Zone verdi urbane e impianti sportivi	7.0
S	Seminativi	8.0
Cv	Vigneti	4
Ct	Frutteti	6
U	Uliveti	4
C	Colture specializzate miste (frutteti e vigneti)	8
O	Orti, vivai, colture sotto tunnel	6
Cp	Colture da legno specializzate (pioppeti, etc.)	4
Cf	Castagneti da frutto	1
Pp	Prati stabili	2
Ze	Aree agricole eterogenee	4
B	Formazioni boschive a prevalenza di latifoglie	0
Ba	Formazioni di conifere adulte	0
Bm	Boschi misti di conifere e latifoglie	0
Br	Rimboschimenti recenti	1
Zs	Cespuglieti	1.5
Sp	Spiagge costiere	3
Zr	Zone a prevalente affioramento litoide	2
Al	Corsi d'acqua	3
L	Corpi d'acqua (laghi, bacini)	3

Tabella 7 - Valori di resistenza al flusso delle varie classi di uso del suolo. Il punteggio cresce con la resistenza; il valore -1 indica le classi inaccessibili (barriere), mentre il valore zero si riferisce alle aree-sorgente.

Successivamente, si possono progettare interventi di riqualificazione o salvaguardia dei corridoi, in modo da rendere efficaci i collegamenti. Malcevski *et al.* (1996) trattano in dettaglio questo approccio, sottolineando come la presenza di corridoi ecologici sia determinante per la dispersione di numerosi organismi e contribuisca anche ad aumentare il valore estetico del paesaggio.

Il presente studio mira ad un'interpretazione del territorio basata sulle seguenti analisi:

- analisi della distribuzione e connessione dell'habitat naturale;
- analisi dei possibili corridoi di flusso per organismi;
- analisi dell'esposizione a disturbi esterni delle macchie di habitat naturale.

Lo studio è stato condotto utilizzando come documento di base la carta di uso del suolo dell'area di studio, realizzata dalla Regione Emilia-Romagna in scala 1:25.000 (URL1, cit.). Le unità paesistiche di partenza sono state identificate con porzioni di territorio caratterizzate da un medesimo uso del suolo, secondo la classificazione riportata in . Nonostante questo approccio sia stato criticato (per es. in Ingegnoli, 1993, pag. 71), le carte di uso e copertura del suolo rappresentano uno degli strumenti più comunemente usati negli studi di ecologia del paesaggio, visto il vantaggio che offrono in termini di reperibilità ed oggettività.

Altre forme di rilevamento paesistico, in cui, cioè, le unità vengono classificate in base alla loro funzione ecologica anziché urbanistica, richiedono, infatti, studi specifici e non si avvalgono ancora di una metodologia rigorosa e ripetibile. Utilizzare come strumento di partenza il rilievo dell'uso del suolo, inoltre, ha avuto il significato di investigare fino a che punto gli indici e le analisi spaziali teorizzate dall'ecologia del paesaggio potessero fornire un valore aggiunto agli strumenti pianificatori tradizionali. In altre parole, si è voluta sperimentare l'effettiva possibilità di trattare una comune carta di uso del suolo per estrarre informazioni ecologiche a supporto alla pianificazione.

Il rilievo dell'uso del suolo è stato acquisito in formato digitale e l'intera analisi è stata condotta nel software GIS di tipo raster ILWIS 2.23 (ILWIS 1997).

Distribuzione e connessione dell'habitat naturale

L'habitat naturale nell'area di studio è stato identificato con le formazioni boschive di origine spontanea, più o meno trasformate da parte dell'uomo. Questa scelta ha un carattere puramente convenzionale: non si vuole asserire che si tratti effettivamente dell'habitat potenziale della zona di studio, in assenza di disturbi antropici. Tuttavia, rispetto ad altre classi di uso del suolo, le aree boschive rappresentano sicuramente, nel caso in esame, un buon indicatore di condizioni di basso disturbo, e come tali esse saranno considerate nel seguito.

Le formazioni boschive sono distribuite prevalentemente nell'alta collina e in prossimità del crinale, e sono costituite da boschi di latifoglie con composizione floristica tipica della zona. Le specie dominanti sono querce e carpini alle quote più basse, progressivamente sostituite dal castagno e, a quote più alte, dal faggio; sono presenti coperture di conifere, spesso a seguito di rimboschimenti più o meno recenti. Nelle zone di pianura si incontrano relitti di boschi ripariali, costituiti da salici, pioppi e in minor misura da ontani, presso i corsi d'acqua naturali maggiori, e in particolare il fiume Savio. Nelle zone di pianura a monte della via Emilia, i corsi d'acqua hanno importanti funzioni connettive, soprattutto quando il territorio circostante è soggetto ad elevata pressione antropica. In questi casi, il reticolo idrografico rappresenta pressoché l'unica porzione di territorio relativamente indisturbata. Questa caratteristica, nel caso del fiume Savio, è conservata fino alla foce, se si escludono alcuni tratti arginati a marcato carattere artificializzato. In generale, il fiume Savio costituisce un macro-corridoio con caratteri di naturalità e di pregio ambientale lungo tutto il suo corso nella pianura antropizzata. Verso la costa si trovano alcune aree naturali, frammentate e di piccole dimensioni, immerse in una matrice agricola.

Una volta selezionate le aree costituite da habitat naturale, con i criteri di cui sopra, si è effettuata un'operazione di *area numbering*. Questa consiste nell'identificare tutti i gruppi di pixel appartenenti alla medesima classe e che presentano una connessione verticale, orizzontale o diagonale fra loro. L'analisi, con funzione essenzialmente esplorativa, consente di delineare le connessioni esistenti fra le varie macchie di habitat naturale.

Il risultato (Figura 11) rivela un'estensione di bosco pressoché continua nell'alta collina e nei versanti montani, mentre le macchie di bosco di pianura e della media e bassa collina sono molto più frammentate, con l'eccezione di una macchia di una certa dimensione posta all'incirca al centro

dell'area in esame. Queste considerazioni valgono alla scala del presente studio, mentre a scale diverse possono assumere significato non trascurabile interruzioni o riconessioni dovute ad elementi più fini.

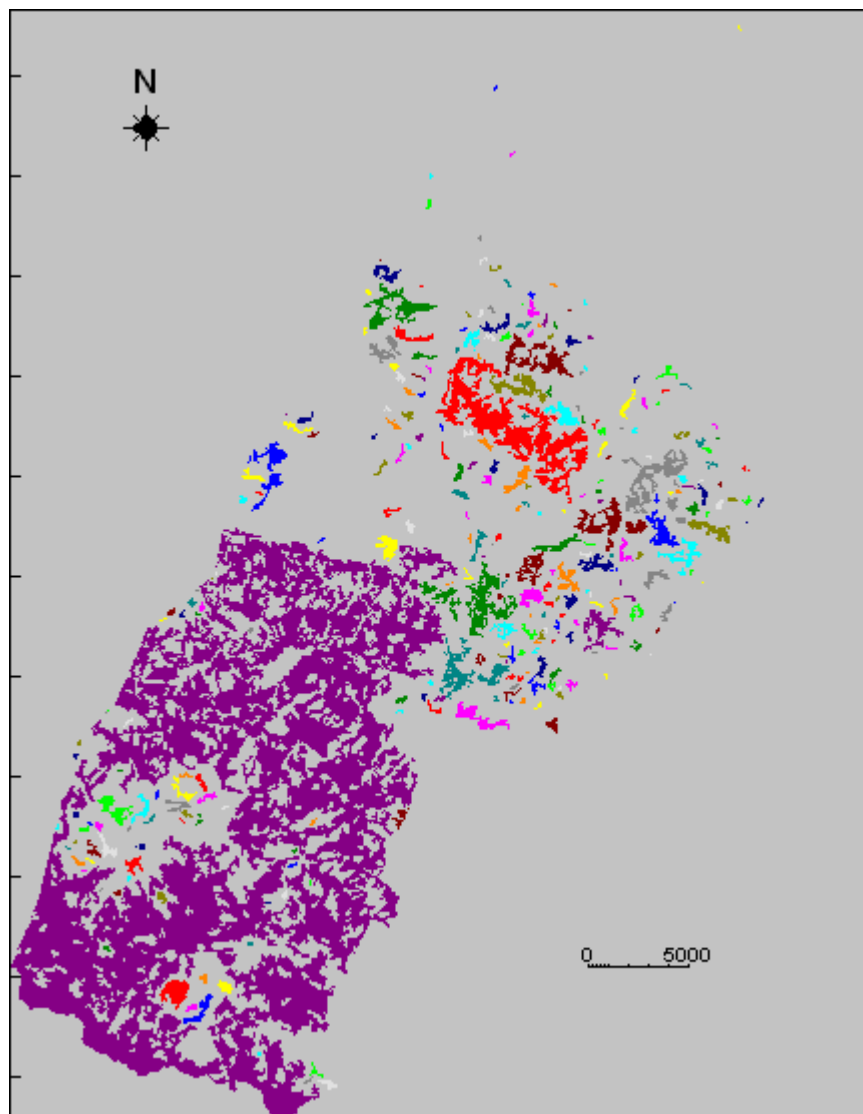


Figura 11 - Analisi della connettività dell'habitat naturale (ogni macchia è rappresentata da un colore diverso).

Analisi dei possibili corridoi di flusso per organismi

La capacità di organismi di spostarsi attraverso la matrice in cui si collocano le unità frammentate di habitat è influenzata dalle distanze reciproche tra le unità stesse e dalla permeabilità della matrice, che può costituire un ostacolo maggiore o minore allo spostamento. Si è ritenuto che l'approccio di Patrono e Saldana (cit.) fosse soddisfacente per lo scopo della pianificazione, sulla base della sua capacità di identificare le strutture connettive del territorio e le loro caratteristiche. Il modello prevede l'applicazione di un algoritmo con cui vengono calcolati e delineati i possibili percorsi di connessione fra macchie di habitat (aree-sorgente) all'interno della zona di studio. L'algoritmo è basato sulla ottimizzazione locale di una funzione di distanza $\text{dist}(X,Y)$ così descritta:

$$\forall (X_0, Y_0) \in D, \min [\text{dist}(X, Y)]$$

sotto i vincoli:

$$\text{dist} < d_{\max}$$

$$X, Y \in I_{3*3}(X_0, Y_0)$$

dove

X_0, Y_0 = punto di partenza della ricerca operativa

D = mappa della distanza pesata dalle sorgenti

d_{\max} = massima distanza ammissibile per il percorso della specie bersaglio

I_{3*3} = intorno 8-connesso con il punto (pixel) considerato

Con una semplice verifica dell'accessibilità di ogni pixel, basata sul fatto che la distanza dalle sorgenti (pesata con le resistenze, ossia con un fattore di permeabilità assegnato alle varie classi di uso del suolo) sia minore o maggiore della distanza massima ammessa, si giunge alla identificazione dei percorsi chiusi e aperti, che consente la riclassificazione del territorio in:

- aree sorgente (nel nostro caso le macchie boschive descritte nel paragrafo "Distribuzione e connessione dell'habitat naturale");
- matrice paesistica;
- percorsi che non uniscono tra loro aree sorgente;
- percorsi di connessione tra aree sorgente, ossia possibili corridoi ecologici.

I parametri di controllo nel modello sono costituiti dai fattori di permeabilità assegnati alle varie classi di matrice paesistica e dalla distanza limite, d_{\max} . Il loro significato deriva da considerazioni diverse a seconda dell'applicazione. Se si desidera studiare una specie definita, tali parametri possono essere valutati in base all'effettivo comportamento dell'animale, mentre se, come in questo caso, l'interesse è per l'accessibilità 'aspecifica' delle macchie, si potrà fare riferimento a criteri di permeabilità generali e a distanze rappresentative dell'assetto del territorio considerato. I valori di resistenza delle diverse classi di uso del suolo utilizzati nel presente studio sono riportati nella . Essi sono stati assegnati in base a considerazioni euristiche; in un contesto differente, la scelta avrebbe potuto essere fatta con altre tecniche di analisi multicriterio. Come distanza massima di spostamento è stato considerato il valore di 5 km. Alcuni esperimenti numerici hanno mostrato comunque che il modello è poco sensibile a questo parametro. Utilizzando dati non specifici per un singolo animale, le indicazioni fornite dal modello sono necessariamente di carattere generale. Tuttavia esse riescono a suggerire un possibile 'buon assetto' del paesaggio, valido tanto per la fruizione del verde quanto per la conservazione e il miglioramento del territorio. Il modello può infatti essere utilizzato in fase di pianificazione ai fini dell'individuazione di aree dove localizzare interventi di protezione della fauna, di miglioramento della naturalità, di rimozione di disturbi causati da manufatti, insediamenti e infrastrutture.

Nel condurre l'analisi, si è integrata l'informazione disponibile sull'uso del suolo con quella relativa al reticolo stradale, cui si è assegnato un punteggio di resistenza elevata (nel caso delle strade comunali) o una funzione di barriera invalicabile (nel caso delle strade provinciali o statali, della ferrovia e dell'autostrada). Inoltre, si è considerata la presenza di corsi d'acqua, ai quali è stata assegnata una funzione connettiva mediante l'assegnazione di basse resistenze al moto (nel caso dei corsi a monte della via Emilia, e del fiume Savio per tutto il suo corso), o una funzione di barriera invalicabile (nel caso dei corsi d'acqua in pianura, caratterizzati da arginature, assenza di vegetazione e elevato grado di artificialità).

Il risultato dell'analisi è mostrato in . Come si può notare, rispetto all'analisi illustrata nel paragrafo precedente, questo tipo di modellazione consente di valutare il ruolo connettivo di tutte le classi di uso del suolo.

Questo ha permesso di delineare nell'area di studio i principali corridoi di connessione fra le macchie del paesaggio, mettendo in evidenza le interruzioni provocate da usi del suolo caratterizzati da elevata

resistenza al movimento di organismi. L'indicazione che ne deriva puo' essere utilizzata per la pianificazione degli interventi di salvaguardia o di rinaturalizzazione.

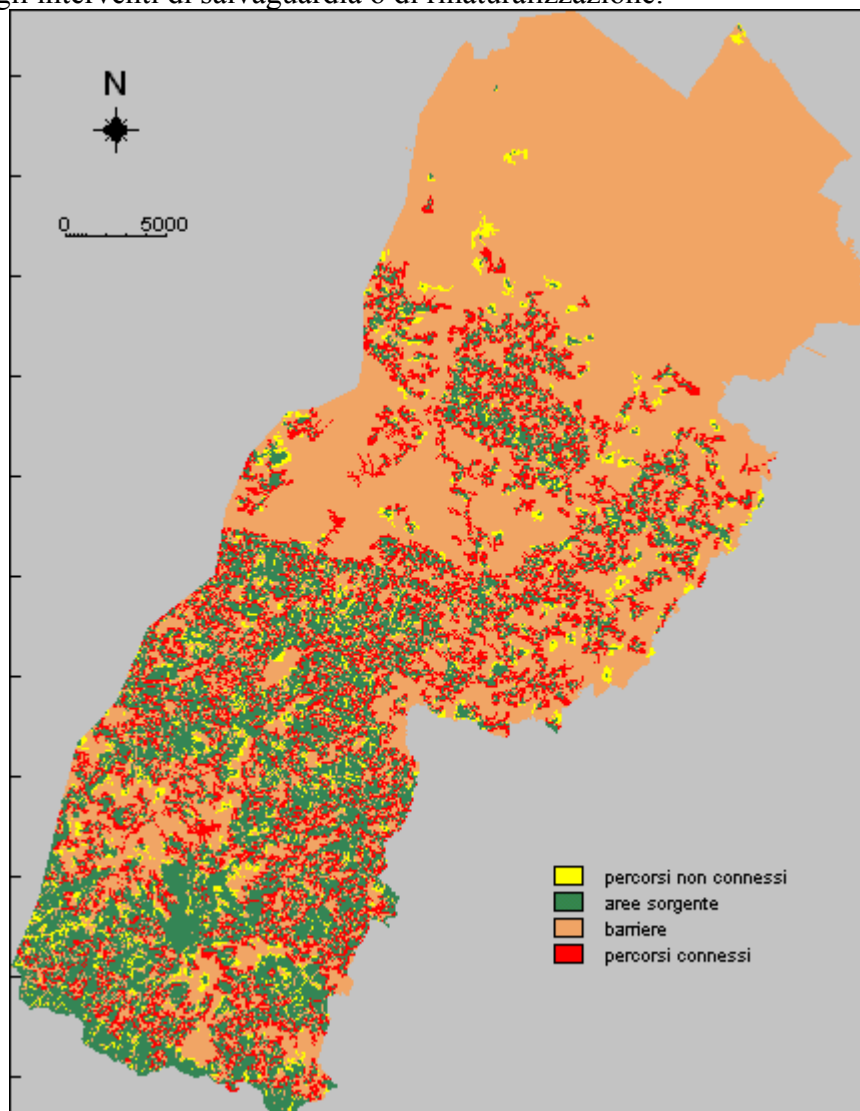


Figura 12 - Analisi dei possibili corridoi di flusso per organismi

Analisi del grado di esposizione a disturbi esterni dell'habitat naturale

Nel paragrafo precedente si e' discussa la caratterizzazione delle connessioni fra macchie di habitat. Un altro parametro che puo' rivestire notevole importanza e' l'esposizione delle macchie di habitat ad effetti di margine, e in particolare alla diffusione dei disturbi indotti da aree esterne. Forma e dimensione di ciascuna macchia sono le principali determinanti, a parita' di altre condizioni, di questi effetti. Un indice molto comune per caratterizzare la forma di una macchia e' il rapporto fra area e perimetro: quanto maggiore e' questo rapporto, tanto maggiore e' la possibilita' che la macchia presenti una parte interna relativamente protetta dagli effetti esterni. Nel presente studio, anziche' caratterizzare ciascuna macchia di habitat, si e' scelto di valutare il grado di esposizione a disturbi esterni di ciascun singolo pixel. Diversi indici sono stati proposti per questo scopo, per lo piu' basati sull'applicazione di filtri numerici, comunemente usati nell'elaborazione di immagini telerilevate.

numero di celle di non-habitat in un intorno di 7x7 celle	giudizio sulla cella
0:3	non esposta
3:22	mediamente esposta
22:48	molto esposta

Tabella 1: Classificazione del risultato dell'indice CVN.

Per il presente studio e' stato scelto un indice relativamente semplice proposto da Murphy (1985) e applicato per analisi eco-paesistiche in Geneletti (2000): il CVN (Center versus Neighbours). Questo indice calcola il numero di celle diverse da quella centrale in ogni intorno di 7x 7 celle, ed e' stato utilizzato per ogni cella coperta da boschi naturali, valutando il numero di celle circostanti appartenenti a classi di uso del suolo diverse. Ogni cella è stata così classificata come cella di bosco non esposta, mediamente esposta o molto esposta in base al valore dell'indice, secondo le soglie riportate in Tabella 1.

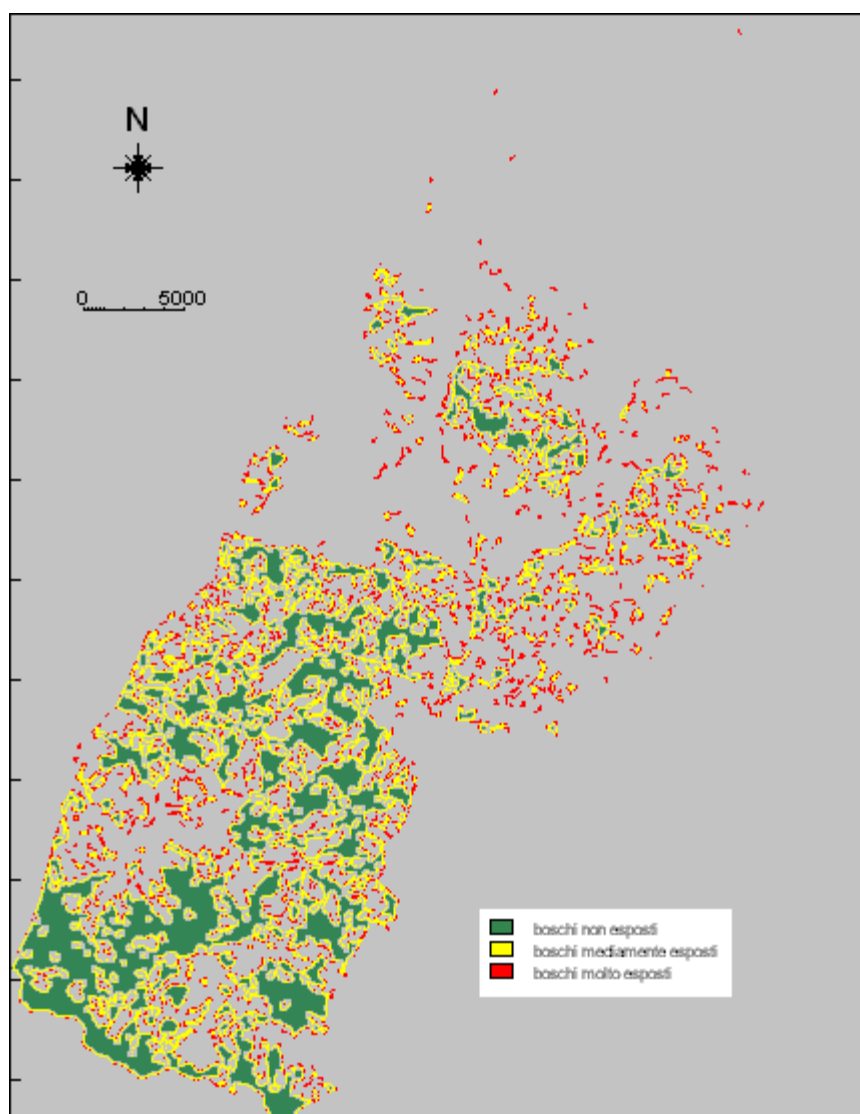


Figura 13 - analisi del grado di esposizione a disturbi esterni delle macchie boscate.

Come si osserva in Figura 13, il filtro si comporta essenzialmente come *edge detector*. Tuttavia, in alcuni casi esso è servito a mettere in luce la frammentazione causata dalla crescente pressione antropica e dalle conseguenti variazioni di uso del suolo.

3- Conclusioni

La presente memoria analizza lo stato delle applicazioni di ecologia del paesaggio per la pianificazione territoriale. Si è evidenziata una notevole incertezza, a tutt'oggi, circa l'effettiva applicabilità degli strumenti di analisi finora proposti. In molti casi, infatti, le analisi di ecologia del paesaggio si dirigono verso concettualizzazioni di elevato livello simbolico che rendono difficoltosa la comprensione ecologica del paesaggio da parte di chi si occupa di pianificazione e gestione territoriale.

Dopo aver passato in rassegna i principali approcci metodologici proposti in letteratura, rivolgendo particolare attenzione allo studio delle strutture territoriali, si è valutata l'utilizzabilità di tre tipi di analisi:

- l'identificazione delle macchie di habitat connesse;
- la simulazione dei flussi di organismi per la delimitazione di possibili corridoi ecologici;
- la valutazione del grado di esposizione a disturbi esterni delle macchie di habitat.

Queste analisi, applicate ad un tipico paesaggio italiano, hanno consentito di mettere in relazione la caratterizzazione del paesaggio con la definizione di criteri praticamente utilizzabili. In particolare, le tre analisi condotte hanno mostrato rispettivamente come:

- nelle zone maggiormente antropizzate le macchie di habitat siano fortemente frammentate, ma esistano strutture paesistiche da tutelare e potenziare nel loro insieme, come il bosco collinare di latifoglie situato nella porzione centrale dell'area di studio);
- i diversi usi del suolo determinino corridoi che possono o meno connettere macchie di habitat. La distribuzione di questi corridoi fornisce indicazioni sulle strategie di miglioramento e protezione delle reti ecologiche e il ripristino ambientale;
- nonostante la distribuzione dei boschi più o meno esposti al disturbo esterno segua quella delle dimensioni delle macchie, si trovano macchie esposte ad effetti di margine significativi in molte parti dell'area di studio. Questo fornisce un criterio per individuare aree maggiormente vocate alla conservazione della natura.

Per quanto le analisi abbiano prodotto risultati in qualche modo prevedibili, si ritiene, concludendo, che lo studio della struttura del paesaggio, con tecniche come quelle mostrate, rivesta una notevole importanza nel rappresentare in termini chiari le sue proprietà e orientare di conseguenza le azioni antropiche.

Capitolo 6 – Modellazione di fenomeni le cui leggi fisiche sono note: *case studies*

1- Modellazione cartografica dei fenomeni diffusivo-avvevativi: integrazione di GIS e modellistica ambientale in ambienti di supporto alle decisioni sul territorio

Si riporta nel seguito un contributo presentato nell'ambito del dibattito in corso circa l'integrazione della modellistica previsionale con i GIS (Bagli e Pistocchi, 2000).

Introduction and outline of the problem

Dispersion-advection modeling (Rinaldi *et al.*, 1979) is a very important issue in environmental engineering. The most common context in which it is required is groundwater pollution, albeit there are other cases of concern like air pollution (lagrangian models) or river quality simulation (e.g. QUAL2E: Brown and Barnwell, 1987).

Applications of such modeling can be found in industrial, human health and environmental risk assessment (NAS 1983, USEPA, 1989, 1992, 1998), environmental impact assessment, and the design of soil remediation (van Eyk, 1997).

In groundwater simulation, the velocity field is often to be seen as steady-state, due to longer response time to variations with respect to pollution dynamics.

It is very common that piezometric surface be described by interpolation from point observation data: models for the integration of flow equations need boundary and initial conditions that are not easy to be identified, and calibration of a model is far more expensive than spatial interpolation of existing data. Under the theoretical respect, one might argue that – since model calibration strictly depends on available measures – velocity fields obtained from spatial interpolation, and the integration of flow equations give more or less the same reconstruction of the phenomenon: the simulation of flow is then just necessary when “what-if” type questions arise, like e.g. in soil remediation through water extraction or injection. In most other applications, the flow field can be assumed as known given the piezometric and lithological data.

Thus it happens that people are interested in modelling solute or pollutant transport, given a velocity field.

There are many models linked to a graphical user interface for the task, like e.g. MT3D (Zheng, 1990), Bioplume III (Rafai *et al.*, 1998), ASM (Chiang *et al.*, 1998). Heavy numerical techniques like finite elements or implicit finite differences are involved.

The problem with such models is they are usually complex, and they require further data exchange with GIS platforms in order to manipulate the modeling results in the decision making environment (see e.g. McKinney and Tsai, 1996).

Numerical methods have been implemented for the solution of the dispersion-advection equation, and recent research has been focussed on the use of explicit (Hossain, 1999) or accurate implicit (i.e. accounting for corrections on the artificial dispersion: Hossain and Yonge, 1999) finite difference schemes, keeping under control the effects of both Péclet and Courant numbers.

For practical uses, analytical solutions are under elaboration, although often calling for specialised analytical tools like numerical series computation (Batu, 1996) that make these impractical for field

case studies using current cartographic software. In addition, Domenico and Schwartz (1990) stress that the main use of analytical solutions is to evaluate the transport parameters of an aquifer, and that they don't support realistic modeling of field observations. Analytical (or semi-analytical) solutions of the dispersion-advection equation require to satisfy very strict conditions about flow field and the features of the medium.

In addition close-form, general purpose nature models include plenty of tools for the detailed description of physical phenomena that very often are not usable in practical cases, due to available data limitations. This produces a modeling effort for the estimation of parameters, that appear very often to be redundant with respect to actual modeling needs and data availability. For instance, the code FEMWATER (Yeh *et al.*, 1997) allows to simulate coupled flow and transport, linear features like streams and drains, groundwater recharge using infiltration equations etc., that is virtually all phenomena practically occurring in real world groundwater dynamics, but it is quite uncommon to have all data required for proper calibration/validation of such a complex model.

Some examples of 'open' architecture models have been published, like the DESERT model (Ivanov *et al.*, 1995) for stream hydraulics and quality: this model allows to use different approaches and to specify to a certain extent user-defined modeling approaches, models usually do things fine, but do them their way: people who want a model to use a special approach in some cases often need to program their own code. This is true in particular when special pollution chemiokinetics need to be taken in account.

Models have been classified according to the relation existing between the computational module and the geographical framework and database (Burrough, 1996). In particular, models can be embedded in the GIS (e.g. the Groundwater Modeling System: US Dept. of Defense, 1998) , or bound to different degrees of interdependence with it, or -finally- they can be build straight on their tools and analytical capabilities.

The aim of this paper is to illustrate an example of how map analysis tools can be directly used for mathematical modeling of diffusive-advective phenomena, thus eliminating the need to use software external to the GIS in which ordinary decision support is performed. As it will be detailedly outlined, raster maps define a computing environment that allows the integration of explicit finite difference approximations of differential equations, provided that the GIS supports iterative recalculation of maps. GIS software has been increasingly supporting flexible numerical programming (Ye *et al.*, 1996) over the last years, although strong limitations seem to persist about the efficiency of computation.

The use of map-based models, which have been already developed for kinematic hydrology (e.g. Beven and Moore, 1993) or for dynamic modeling of surface and subsurface hydrology (Ye *et al.*, 1996; Maidment, 1993, 1996), is appealing because of its capability to be integrated in existing spatial decision support systems, an issue that parallels the increased awareness of planners and land managers about the use and advantages of quantitative predictive models in contexts previously dominated by quasi-qualitative approaches.

It is expected that use of flexible predictive modeling in existing GIS platforms, capitalising on their capabilities for data analysis and scientific computing, will favour the adoption of more rational bases in land use and management-related decision making.

Model formulation and implementation

The idea underlying the approach is remarkably simple: since GISs allow for the numerical computation of partial derivatives of continuous fields, why not to use this capability for the integration of partial differential equations?

Following this simple idea, the model hereby presented is nothing but an explicit finite difference solution of the advection-dispersion equation obtained through subsequent map calculations. The model has been implemented using ESRI's Arc-View's object-oriented programming language, Avenue (ESRI, 1999), but the approach is very general and can be duplicated under any GIS platform provided that iterative computation functionalities are available.

The advection-dispersion equation is a parabolic partial differential equation (Marsily, 1986) and can be written as follows (e.g. Marsily, 1986):

$$\frac{Dc}{Dt} = \nabla \bullet \underline{\underline{D}} \bullet \nabla c - \lambda c \quad (1)$$

where c represents the pollutant's concentration, λ is a decay rate term for c , $\underline{\underline{D}}$ is the dispersion tensor, ∇ is the gradient operator, \bullet is the scalar product, and the left hand side represents the lagrangian derivative of c :

$$\frac{Dc}{Dt} = \underline{v} \bullet \nabla c + \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2)$$

where \underline{v} represents the velocity vector.

It is quite clear that many terms of eq. 1 represent spatial variables that can be plotted in a map. Thus a map can be drawn representing velocity or dispersion components, local decay rates, etc. In most cases, a velocity map can be obtained as the product of a hydraulic gradient map by a hydraulic conductivity map, and this is made easy when a geological database containing lithotechnical properties of aquifers is available, together with piezometric data at discrete observation points that can be interpolated to a continuous field for which gradients can be computed. In the same way, dispersion coefficients can be assigned to different lithological units as a function of the specific dispersivity (longitudinal or transversal) and local (previously computed) velocity. Decay rates depend both on aquifer properties and the pollutant's chemical nature. A numerical solution to the equation can be obtained once appropriate initial and boundary conditions are applied. Initial conditions concern the initial distribution of concentrations, and can be assigned through interpolation of the values at given measurement points. Another case of interest is when the total amount of pollutant injected in the aquifer is either known or estimated. In such cases an initial concentration map can be computed using an analytical solution for a pulse point mass release (see below) for a relatively short time, so that aquifer inhomogeneities and anisotropy haven't been active yet. Other potential conditions of concern might be zero concentration on the borders of the domain, when the source is internal. In case of continuous release, such as a leaking tank, the constant concentration condition can be assigned to the source location.

Writing eq. 1 as an explicit finite difference approximation yields the following expression for the concentration variation at each step:

$$\Delta c = \Delta t * [\nabla (D_{xx} * \nabla_x c + D_{yy} * \nabla_y c) - v_x * \nabla_x c - v_y * \nabla_y c - \lambda c] \quad (3)$$

where Δt is the time step, the gradient operator ∇ and the directional derivatives along x and y axes, ∇_x and ∇_y , have been applied to the involved maps, and products denoted with $*$ are map-products, i.e. are performed cell-by-cell on the operand maps. Eq. 3 yields the correction modifying concentrations computed at the previous time step. So concentration at time 1 is given by concentration at time 0 plus the correction. The new concentration is used to compute another correction, that gives concentration at

time step 2, etc. In eq. 3, it has been assumed that x and y are principal directions of anisotropy for dispersion coefficients, so that terms D_{xy} can be neglected. It is always possible to reproduce this situation through a rotation of the axes, when appreciable anisotropy appears. The new point with eq. 3 is it uses standard raster (or grid)-based GIS operators for the computation of corrections, and can be introduced in any such software.

It must be noticed that – generally speaking – finite difference methods suffer from artificial dispersion due to neglecting second order derivatives in the approximation of functions, and explicit methods need to meet specific conditions on the Péclet number, and Courant number, given by the following equations,

$$Pe = \frac{v \bullet \Delta x}{\min(D_{xx}, D_{yy})} \quad (4)$$

$$Cr = \frac{v \bullet \Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

(where Δx and Δt are the spatial (pixel) and temporal discretisation steps, while the other symbols keep the meaning previously reported) in order to ensure stability and convergence of the solution.

This results as well known in limitations on the size of time steps and ratio between time and spatial discretization steps, and makes such methods computationally inefficient, but it is an opinion of the authors that computation time is not any longer a major constraint, and the availability of a flexible modeling framework such as a grid-based GIS platform compensates for the use of the method in widespread decision support.

The results for each time step can be stored and represented as maps readily available in the decision support and cartography framework, thus facilitating the use of rational evaluations in planning.

As far as the term representing the decay, λ , is concerned, any function of concentration (for which the value computed at the previous time step is used) can be used: for instance, a Langmuir or Freundlich adsorption isotherm might be of concern. It is also very simple to incorporate other component dynamics (e.g. biodegradation following a Michaelis-Menten type kinetics) in the model. A remark is due because of the potential instability of the solutions computed for some value intervals of λ , but this goes beyond the scope of the present work.

The approach seeks a more general solution of eq. 1 with respect to other techniques already available in some GIS packages, like the programs POROUSPUFF and PARTICLETRACK in ArcInfo (ESRI, 1995).

The map-computational approach hereby proposed can be easily generalised to all other parabolic-form partial differential equations; in particular, it can be implemented for the solution of the flow equation in confined and unconfined aquifers, heat flow simulation in continuous fields, or the modeling of river quality as a consequence of pollutant spills along the stream.

A much more complicated case is when elliptic (Laplace or Poisson: e.g. steady-state flow) or hyperbolic (e.g. seismic/acoustic wave propagation) equations are concerned. In other terms, the presented map-based modeling approach works for the solution of equations representing transient dispersion phenomena, provided the appropriate initial state. Despite the limitations of the approach, one cannot ignore that most practical problems relate with this class of models.

Testing the model: comparison with analytical solutions

The case of a lens of pollutant migrating in a homogeneous, isotropic medium following a constant flow field has been used to test the model. In such conditions, the following analytical solution holds for a pulse injection of mass M at time $t=0$ (Baestlé, quoted in Domenico and Schwartz, 1990):

$$C(x, y, t) = \frac{M}{(8\pi t)^{3/2} (D_x D_y)} \exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t}\right) - \lambda t \quad (6)$$

Where C is the concentration, t is the elapsed time from spill, D_x and D_y are the dispersion coefficients, and v is the velocity, while λ is the decay rate constant.

The equation yields the concentration map $C(x,y)$ at a given time. The solution has been computed for a relatively short time ($t=10$ years) and this has been used as initial condition for the proposed model. Further results for different time steps have been compared between the analytical and the hereby-proposed numerical solution. For the example, the following values of the parameters and discretization steps have been used: $\Delta x=10$ m, $\Delta t=0.2$ year, $v=5$ m/year, $D_x=200$ m²/year, $D_y=20$ m²/year, $M=1000$ kg.

Figure 1 gives an outlook of the comparison. As it can be noticed, there is no significant discrepancy between the two solutions. Thus the model works well in a simple case having an analytical solution. The mass balance has been found to be strictly respected (the total sum of concentrations, computed over all map pixels, keeps constant).

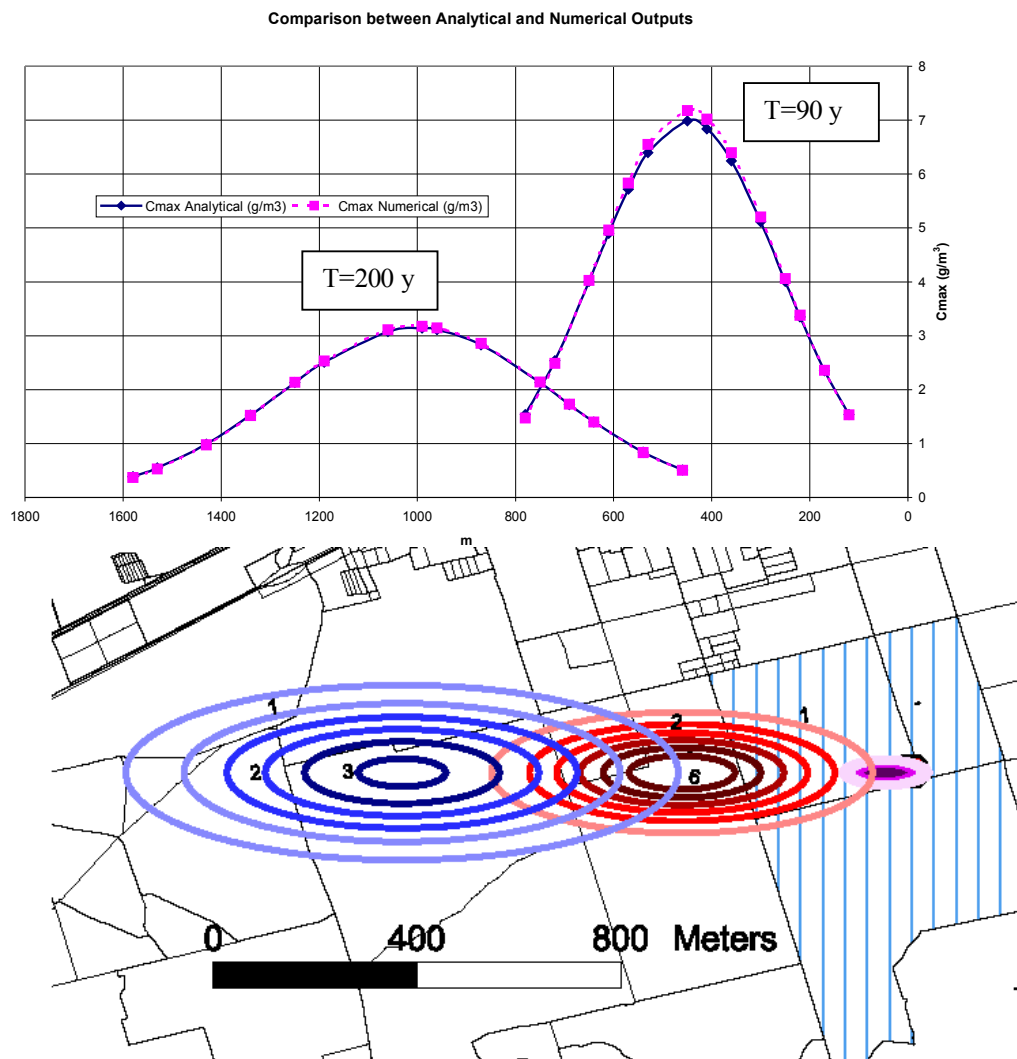


Figure 1– Comparison between analytical and numerical solution: case of homogeneous parallel flow (contour labels refer to concentration values in g/m^3)

Sample application in a real-world-like case study

As it is intended for practical use within existing spatial decision support systems, the model should be set up following the worksheet shown in Figure 2. The scheme stresses the need to reason in terms of existing maps and data structures in order to achieve full integration between the modeling and decision making stages of planning.

The model has provided satisfactory results in a sample field case study as described in the following. The data considered were a water table computed by interpolation of point measures, a hydraulic conductivity map obtained through reclassification of existing geological information, and estimates of the dispersion coefficients, considered as constant for the sake of simplicity and not invalidating the generality of the approach. Figure 3 shows the hydraulic conductivity and water table assumed for the study.

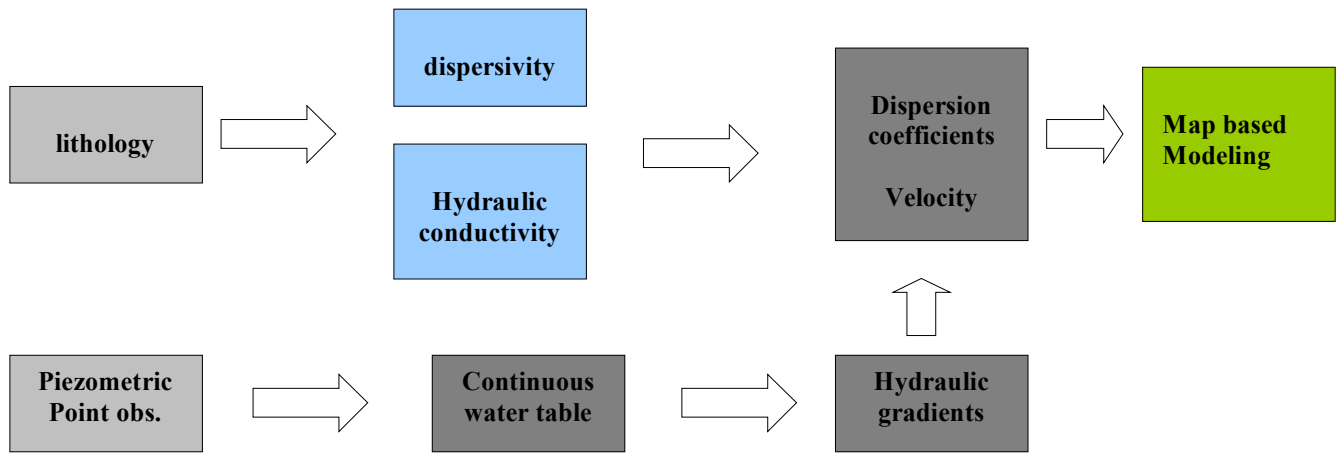


Figure 2- flow sheet of the proposed modeling approach

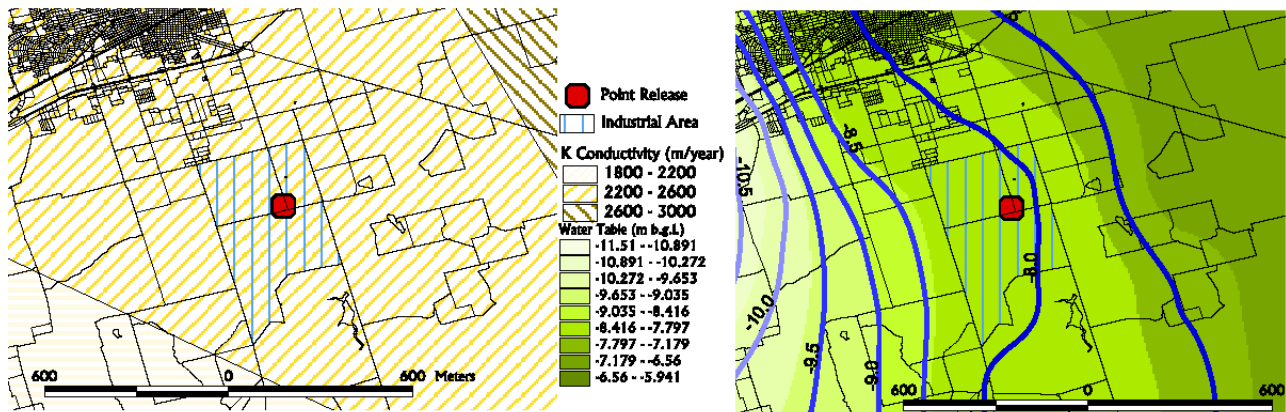


Figure 3- Hydraulic conductivity (left) and water table (right) maps used for the sample calculation

The following parameters have been used: $\Delta x= 10$ m, $\Delta t=0.2$ year, $D_x= 100$ m²/year, $D_y=10$ m²/year; the initial condition has been chosen to coincide with the concentration map computed as the analytical solution of dispersion-advection equation, (4), for time $t=10$ y and $M=1000$ kg.

As Figure 4 shows, the model allows simulating the plume dispersion in a non-uniform flow field, which is a more realistic representation of the phenomenon with respect to analytical solutions.

Conclusions and future lines of research

The approach hereby proposed allows to perform predictive modeling and decision support evaluations using standard GIS analysis functionalities. The method outlined, which is an explicit finite difference solution of partial differential equations using map computations, applies in general to all diffusive-advective phenomena and can be generally implemented for problems relating to pollution of continuous media like surface and groundwater, and atmosphere. Due to its simplicity and flexibility in accounting for different phenomena, it is believed that the approach, despite its computational inefficiency, can undergo a wide use in real world problem solving, especially in land planning issues calling for quantitative predictions and rational founding of critical decisions.

When the computational efficiency is concerned, multigrid techniques, so far used for traditional methods involving matrix computation iterations (McKinney and Tsai, 1996), are promising to speed up solution.

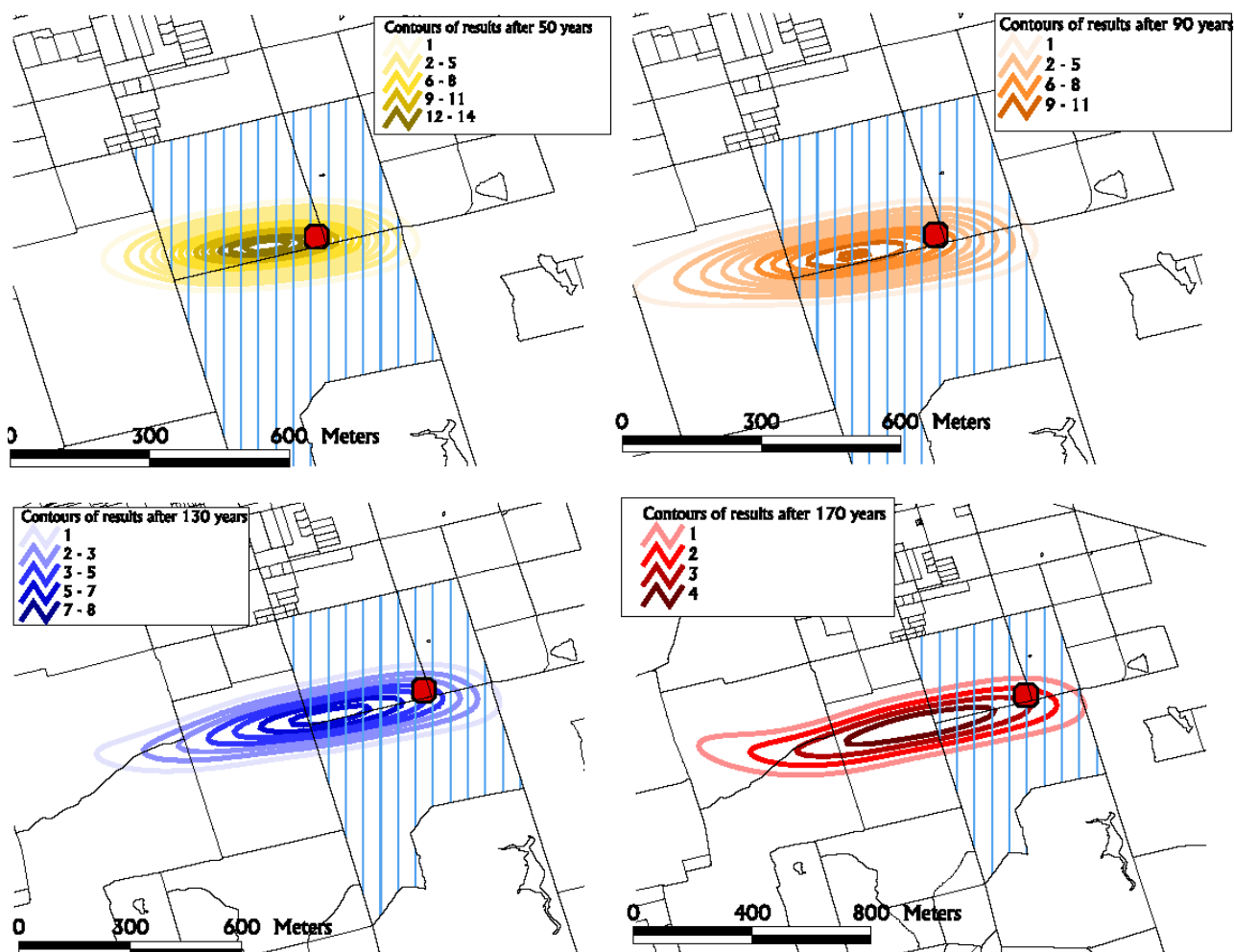


Figure 4 - Solution of the sample field calculation (contour labels refer to concentration values in g/m^3)

Acknowledgements

The research has been developed during the PhD course followed by the authors at the Department of Chemical Engineering, Mining and Environmental Technology (DICMA), University of Bologna, Italy. The authors wish to acknowledge Professor G. Spadoni at DICMA, for the financial support in making GIS tools available for the study.

2- Analisi *GIS-based* dei fenomeni idrologici per la pianificazione territoriale

Premesse

Il bilancio idrologico serve come quadro di controllo della disponibilità di risorsa idrica e di valutazione delle forme in cui essa è presente; esso serve anche a descrivere i processi da esso controllati, e a mettere in evidenza quali sono i meccanismi di inquinamento cui la risorsa è più facilmente vulnerabile. L'evoluzione del quadro di pianificazione in Italia delinea soggetti specifici deputati al controllo del ciclo idrologico e alla gestione delle risorse idriche (rispettivamente le Autorità di Bacino, L.183/89, e le Autorità d'ambito ottimale, L. 36/94). Tuttavia, la crescente attenzione per gli aspetti di sostenibilità dello sviluppo e le residue competenze in materia di gestione delle acque che spettano agli Enti territoriali (anche a seguito del recente riordino normativo introdotto dal D.Lgs. 152/99) fanno delle risorse idriche un tema sempre più spesso presente a tutti i livelli di analisi per la pianificazione.

Nella presente memoria si descrive un'esperienza di modellazione dei processi idrologici rilevanti alla scala della pianificazione comunale, condotta in occasione delle analisi preliminari alla redazione del Piano Regolatore Generale del Comune di Sogliano al Rubicone (prov. di Forlì-Cesena). Il caso di studio si riferisce ad un'area pedemontana, prevalentemente utilizzata per attività zootecniche ed agricole, poco densamente popolata e con caratteristiche climatiche di aridità. Il substrato litologico è poco permeabile, e abbondano le aree calanchive e quelle genericamente a deflusso superficiale accelerato. Le risorse idriche del territorio sono una variabile strategica per vari motivi, fra cui sono preminenti:

- l'approvvigionamento idrico per usi produttivi;
- l'approvvigionamento idrico per uso potabile;
- il controllo della qualità dei corpi idrici superficiali (e, secondariamente, sotterranei), minacciati soprattutto dall'inquinamento di origine non puntiforme dovuto alle attività agricole e zootecniche;
- il controllo degli effetti dei dissesti idrologici, ed in particolare l'erosione dei suoli agrari.

Il territorio di Sogliano manifesta piene di breve durata, corrispondenti alle precipitazioni intense, e quindi scarsa capacità di immagazzinare acqua da utilizzare nei periodi asciutti. I bilanci idrologici devono essere confrontati dunque con alcuni parametri di diretto interesse per la pianificazione: il fabbisogno idrico delle colture, e il fabbisogno idropotabile.

Lo studio condotto ha mirato a caratterizzare la distribuzione geografica del bilancio idrologico e dei fenomeni connessi, al fine di estrarre un supporto razionale alla pianificazione del territorio.

Procedure di calcolo per la regionalizzazione del bilancio idrologico

Il cuore dell'analisi è il bilancio idrologico, effettuato secondo il metodo di Mather e Thornthwaite (1957). I limiti di questo approccio, legati a semplificazioni dei termini del bilancio di massa e all'uso di una funzione di evapotraspirazione che dipende solo da temperatura e irradiazione solare, non sono eccessivamente rilevanti quando si desiderano indicazioni su base aggregata, come quella mensile qui utilizzata.

Si utilizza una regressione lineare multipla per la regionalizzazione dei dati di pioggia e di temperatura. Il motivo per cui si è dovuto ricorrere a questa stima è l'assenza di una buona copertura del territorio con misure meteorologiche. In queste condizioni, si è ritenuto che non si sarebbe

osservato alcun sensibile miglioramento ricorrendo a tecniche di stima più sofisticate, come il krigaggio universale o il co-krigaggio.

Un'altra limitazione dello studio è da riconoscere nella scarsa qualità dei dati pedologici, che nella generalità dei casi sono insufficienti ad una corretta individuazione della granulometria dei suoli e della loro permeabilità. Lo studio del bilancio idrologico ha lo scopo di ricavare dati quantitativi sulle disponibilità idriche del bacino oggetto dello studio.

L'equazione seguente esprime il bilancio idrico su base mensile:

$$A = D + Er + Ie + \Delta S$$

dove:

A = afflussi medi annui nel bacino considerato [mm]

D = deflussi medi annui alla stazione idrometrografica che sottende il bacino considerato [mm]

Er = evapotraspirazione reale media annua [mm]

Ie = infiltrazione efficace media annua [mm]

Afflussi e temperature:

I valori di A e T sono stati dedotti dalla pubblicazione dei dati del SIMI prodotta dalla Regione Emilia Romagna (1996), che prende in considerazione un periodo che va dal 1951 al 1994.

Dato il numero limitato delle stazioni di misure termopluviometriche, si è eseguita una regressione lineare multipla a minimi quadrati, in modo da avere una stima degli afflussi e delle temperature su tutto il territorio, dipendente solo da parametri misurabili in ogni punto.

Le equazioni di regressione sono state calcolate partendo dalla conoscenza dei dati di pioggia di 26 stazioni e dai dati di temperatura di 7 stazioni.

Come variabili indipendenti sono state scelte la distanza dalla linea di costa (D) e la quota topografica (Q) (parametri noti per ogni punto del territorio). E' disponibile un'equazione di regressione per ogni mese dell'anno, e una equazione per la media annua, sia per la pioggia (mm), sia per la temperatura (°C).

Le equazioni, la cui forma generale è del tipo $A=aD+bQ+c$, $T=a'D+b'Q+c'$ (dove a,b,c,a',b',c' sono opportuni parametri di regressione) hanno mostrato i coefficienti di regressione lineare (R2) di Tabella 8.

Mese di studio	Temperatura: R2	Afflussi meteorici: R2
Gennaio	0.65	0.75
Febbraio	0.92	0.74
Marzo	0.96	0.78
Aprile	0.97	0.87
Maggio	0.93	0.78
Giugno	0.9	0.8
Luglio	0.87	0.47
Agosto	0.9	0.46
Settembre	0.94	0.59
Ottobre	0.96	0.72
Novembre	0.93	0.76

Dicembre	0.67	0.78
----------	------	------

Tabella 8 – coefficienti di regressione multipla

Come si può notare, i coefficienti sono generalmente soddisfacenti, ad eccezione di quelli riguardanti gli afflussi meteorici dei mesi di luglio, agosto e settembre. Si è osservato comunque un netto miglioramento della stima, con questa tecnica, rispetto a quella prodotta in altre ricerche sulla base della sola quota topografica (Pistocchi et al., 2000a).

Indice di aridità:

Confrontando precipitazione e temperature si possono trarre utili informazioni sullo stato di umidità del terreno in rapporto alla situazione climatica ed alle esigenze della vegetazione della zona. L'indice di aridità utilizzato è quello proposto da De Martonne (Barazzuoli et al., 1986):

$$I_a = 12A/(T+10)$$

dove:

I_a = indice di aridità mensile

A = afflusso medio mensile

T = temperatura media mensile

Si è anche valutato l'indice di aridità medio annuo I_{am} attraverso la relazione:

$$I_{am} = [A/(T+10)+12a/t]/2$$

dove:

A = afflusso medio annuo

T = temperatura media annua

a e t = afflusso e temperatura del mese più arido.

Evapotraspirazione:

Questo parametro è stato valutato attraverso la formula di Thornthwaite, che calcola l'evapotraspirazione potenziale corretta E_{pc} (quantità d'acqua che evaporerebbe nel caso in cui vi fosse sempre una sufficiente disponibilità idrica).

$$E_{pc} = K * 16 * (10 * T / I)^\alpha$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} i_n$$

$$i = (T/5)^{1.514}$$

$$\alpha = 0.49239 + 1792 * 10^{-5} * I - 771 * 10^{-7} * I^2 + 675 * 10^{-9} * I^3$$

dove:

K = coefficiente (funzione della latitudine), che tiene conto delle ore di insolazione media mensile

T = temperatura media mensile

I = indice termico annuale

α = funzione cubica di I

Da questa, si ricava l'evapotraspirazione reale secondo la relazione:

$$E_r = E_{pc}, \quad \text{se } A - E_{pc} > 0$$

$$E_r = A + I\Delta R, \quad \text{se } A - E_{pc} < 0$$

dove:

E_r = evapotraspirazione reale [mm]

R = riserva idrica del suolo [mm]

ΔR = variazione della riserva idrica del suolo [mm]

Riserva idrica del suolo:

Si immagina il suolo come un serbatoio che contiene acqua utilizzabile solo dalle piante.

La piovosità fornisce apporti positivi che tendono a riempire il serbatoio, mentre l'evapotraspirazione rappresenta una perdita d'acqua che porta allo svuotamento dello stesso.

Si ipotizza un valore di riserva idrica $R = 200$ mm. Il valore è stato scelto in linea con le ipotesi fatte in precedenti ricerche nella zona (ERSO, 1990), ma rappresenta un elemento di incertezza notevole del calcolo. In applicazioni richiedenti valutazioni precise, occorre stimare il parametro con prove in situ.

Il valore di R per i 12 mesi si calcola nel seguente modo:

$$R = 200 \quad \text{se } A - E_{pc} \geq 0 \text{ e } R_{\text{anno_prima}} = 200$$

$$R = R + (A - E_{pc}) \quad \text{negli altri casi}$$

Il valore di R è sempre compreso tra i valori 0 e 200 mm.

Deflusso:

Per separare i deflussi superficiali si è scelto il metodo di Kennessey, per la sua applicabilità indipendentemente dalla conoscenza delle condizioni idrologiche dei suoli e della precipitazione nel singolo evento (come invece richiesto dal più noto metodo del Curve Number dell'USDA – SCS; p.es. si veda Maione, 1995). Il metodo del Curve Number è stato applicato con alcuni accorgimenti in altre ricerche (Pistocchi et al., cit.), mostrando di non essere del tutto adeguato per studi di carattere pianificatorio e per il livello del bilancio idrologico su base mensile. La scelta del metodo di Kennessey è stata sostenuta dal riscontro in letteratura di alcune verifiche sperimentali di questa tecnica nei nostri climi (Barazzuoli et al., cit.)

Secondo questo metodo, il calcolo del deflusso superficiale si basa sulla stima del valore del coefficiente di deflusso C_d , calcolato come:

$$D = C_d \cdot (A - E_r) \quad \text{se } A - E_r > 0$$

$$D = 0 \quad \text{se } A - E_r < 0$$

A = afflusso

C_d = coefficiente di deflusso

D = deflusso

Il coefficiente di deflusso dipende essenzialmente dai seguenti parametri:

acclività della superficie topografica

copertura vegetale

permeabilità delle rocce affioranti

condizioni climatiche dell'area di studio – Ia

Il metodo consiste nel calcolare il coefficiente di deflusso medio annuo (Cd) come semplice somma di tre componenti (Ca, Cv, Cp) dipendenti rispettivamente dall'acclività, dalla copertura vegetale e dalla permeabilità. A loro volta i tre coefficienti dipendono dall'indice di aridità mensile (Ia) calcolato secondo De Martonne.

	Coefficienti		
	Ia < 25	25 > Ia > 40	Ia > 40
Acclività – Ca			
1 – maggiore del 35%	0.22	0.26	0.30
2 – tra il 10% e il 35%	0.12	0.16	0.20
3 – tra il 3.5% e il 10%	0.01	0.03	0.05
4 – minore del 3.5%	--	0.01	0.03
Copertura vegetale – Cv			
1 – roccia nuda	0.26	0.28	0.30
2 – pascoli	0.17	0.21	0.25
3 – terra coltivata, boscata	0.07	0.11	0.15
4 – bosco d'alto fusto	0.03	0.04	0.05
Permeabilità – Cp			
1 – molto scarsa	0.21	0.26	0.30
2 – mediocri	0.12	0.16	0.20
3 – buona	0.06	0.08	0.10
4 – elevata	0.03	0.04	0.05

Tabella 9 – coefficienti Ca, Cv, Cp

Infiltrazione efficace:

L'infiltrazione efficace si calcola nel seguente modo:

$$I_e = A - E_r - D - \Delta R, \quad \text{se } \Delta R < 0$$

$$I_e = A - E_r - D, \quad \text{se } \Delta R > 0$$

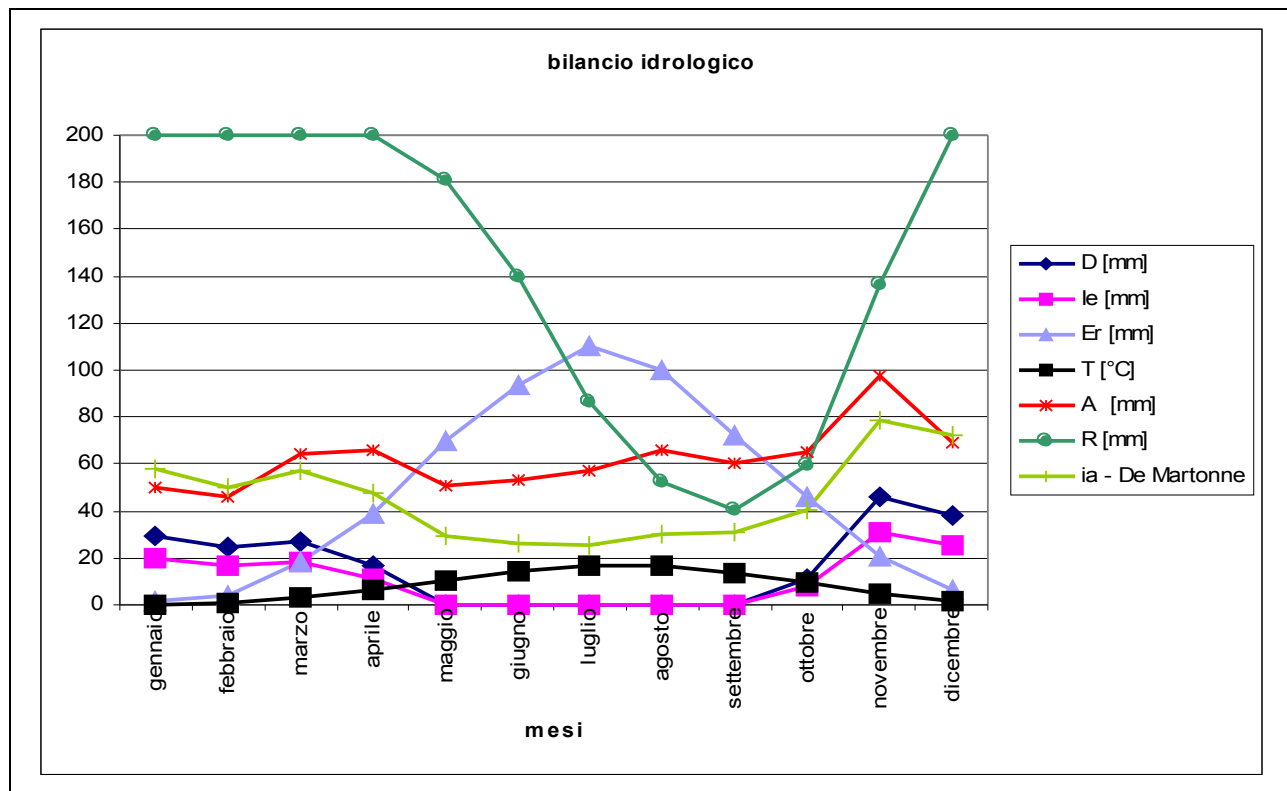


Figura 14 – grafico del bilancio idrologico per la stazione di Sogliano

In figura 1 si rappresenta il calcolo del bilancio idrologico effettuato per la località di Sogliano-Capoluogo. In maniera analoga, la valutazione può essere fatta in ogni altro punto del territorio. Se si impostano le procedure sopra descritte in termini di algebra delle mappe in un GIS (preferibilmente di tipo raster), si ottengono mappe delle varie grandezze, che possono essere utilizzate per la valutazione della distribuzione geografica di vari fenomeni. Nel caso specifico, si è utilizzato il GIS ILWIS 2.23 della PCI (1997)

La figura 2 e la figura 3 illustrano lo schema di calcolo seguito per ottenere le varie mappe.

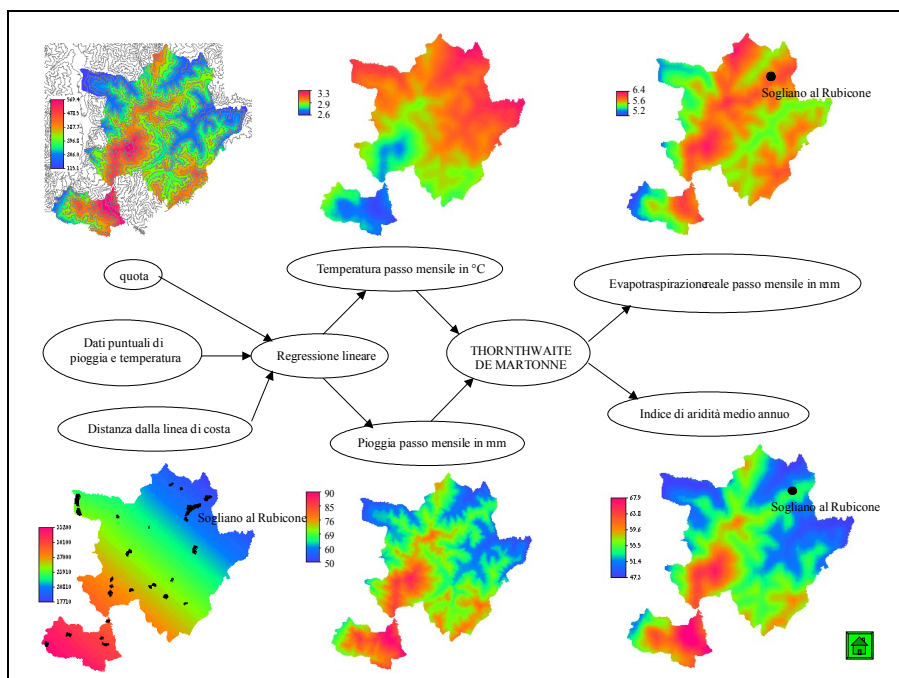


Figura 15 – bilancio idrologico: calcolo dell’evapotraspirazione e dell’indice di aridità

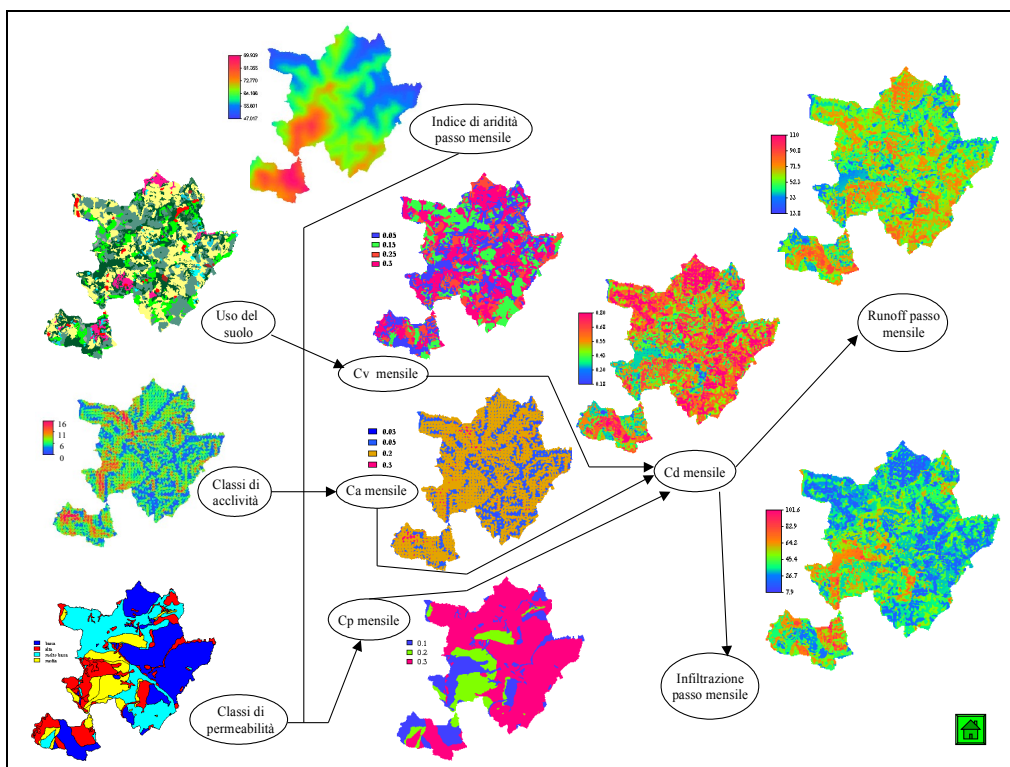


Figura 16 – bilancio idrologico: calcolo del coefficiente di deflusso, del runoff e dell’infiltrazione

L’erosione dei suoli

Il dissesto dei suoli è una causa di degrado del territorio per molti motivi (Morgan, 1995): l’apporto di sedimenti ai corpi idrici recettori è da considerare come un inquinamento in quanto viene ridotta la

trasparenza e la qualità biologica delle acque; inoltre la distruzione degli strati superficiali del suolo provoca fenomeni che si amplificano e producono altri dissesti di maggiore rilievo. Infine, il suolo fortemente interessato dall'erosione subisce un drastico calo di produttività agricola. Il controllo dell'erosione rientra quindi fra gli obiettivi di ogni strumento di piano, e in particolare nella pianificazione di un comune che considera il territorio come una risorsa ed è minacciato da situazioni di oggettiva sensibilità per i dissesti. In linea del tutto generale, si può affermare che l'erosione dei suoli dipende dai seguenti parametri:

- pendenza topografica
- lunghezza del pendio
- copertura del suolo rispetto alla pioggia battente
- intensità della pioggia, ovvero energia (cinetica) della pioggia stessa
- erodibilità del suolo, dipendente dalla sua granulometria e dalla percentuale di sostanza organica presente
- deflusso superficiale (quantità e velocità).

La procedura utilizzata nel presente studio è quella dell'indice USLE (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier e Smith, 1978), che rappresenta la perdita totale di suolo su base annua (espressa in t/ha anno). Il metodo, implementato in vari codici di calcolo esistenti (p.es. AgNPS, 1994) sia per singolo evento, sia per stime su base aggregata, ha subito numerose modifiche in base a riscontri sperimentali. Recentemente è stata proposta una versione della procedura, definita RUSLE, che apporta alcune rilevanti modifiche circa i metodi di stima dei fattori legati all'utilizzo e alla copertura del suolo (Renard et al., 1997). Nel caso in esame, anche considerato che le modifiche sono state tarate su condizioni meteorologiche ed agronomiche piuttosto diverse da quelle dell'area di studio, si è preferito fare riferimento alla metodologia tradizionale.

Si deve ricordare che la valutazione non ha la precisione di una stima quantitativa puntuale: il valore di perdita di suolo annua è da assumere come un indice, che segnala situazioni di dissesto ma non predice con esattezza la quantità di suolo perduta. Ai fini delle previsioni quantitative puntuali è preferibile l'uso di modelli a più solida base fisica, come per es. il modello di Morgan et al. (1982), quale utilizzato p.es. da Pistocchi *et al.*, cit.

Come considerazione generale è degno di nota che, comunque, la taratura di un modello di erosione richiede un insieme di dati raramente disponibili. In particolare, è estremamente difficile disporre di misure adeguate di trasporto solido, per cui la calibrazione e validazione di modelli alla scala del bacino è del pari difficile. Le equazioni come USLE possono essere impiegate alla scala del singolo campo, mentre varie modifiche sono state proposte al modello di Morgan et al. per poterlo impiegare alla scala del bacino (de Jong, 1994). Sono in corso ricerche per ulteriori affinamenti del metodo, secondo le proposte di Pistocchi *et al.*, cit. L'uso di indici rappresentativi delle pratiche di uso del suolo, della copertura vegetale e dei fattori topografici, pedologici e idrologici consente tuttavia di fornire alla pianificazione indicazioni razionali in termini comparativi, per la selezione delle aree di intervento prioritario.

L'indice USLE consente infatti di valutare gli effetti di diverse pratiche di gestione agronomica sull'erosione.

I fattori presi in considerazione per stimare la perdita di suolo, sono:

- l'aggressività della pioggia (erosività, fattore R);
- la suscettività del suolo all'erosione (erodibilità, fattore K);
- la lunghezza e la pendenza del versante (fattore topografico, LS);
- la copertura vegetale e le tecniche culturali (fattore C);
- le eventuali opere sistematorie conservative (fattore P).

Questi fattori sono moltiplicati a fornire la stima delle perdite di suolo seguente:

$$A = R * K * LS * C * P$$

dove A = perdita di suolo in t/ha anno

L'erosività R dipende dall'indice di erosione (EI), determinato dal prodotto di due caratteristiche dell'evento piovoso:

E = energia cinetica della pioggia, responsabile del distacco delle particelle di suolo;

I = intensità massima dell'evento, di durata pari a 30 minuti, responsabile del loro trasporto a valle attraverso la formazione del ruscellamento.

Per il calcolo di E, si divide l'evento piovoso in intervalli di uguale intensità e per ognuno di essi si calcola l'energia cinetica unitaria attraverso il seguente algoritmo:

$$e = (0.119 + 0.0873 \log i)p \quad \text{se } i < 76 \text{ mm/h}$$

$$e = 0.283 \quad \text{se } i > 76 \text{ mm/h}$$

e = energia cinetica unitaria [MJ/ha mm]

i = intensità media dell'intervallo [mm/h]

p = quantità di pioggia caduta nell'intervallo

E = Σe , dove la sommatoria è estesa a tutti i valori del periodo considerato (p.es. l'anno)

Il fattore R corrisponde alla media annuale dell'indice di erosione (EI) calcolata per un numero sufficiente di anni (10 – 15) visto che l'andamento delle precipitazioni in un dato luogo è soggetto a variazioni cicliche di tipo poliennale.

Vista la mancanza dei dati necessari per il calcolo preciso del fattore R, è stato utilizzato il valore indicato dall'ERSO: $R = 1446.2$ [MJ.mm/ha.h.a]

Per erodibilità del suolo si intende la perdita di suolo per erosione dovuta alle caratteristiche dello stesso, indipendentemente dagli altri fattori esterni.

Per calcolare il fattore K, sono disponibili diagrammi (es. Renard et al., cit.; ERSO, cit.), che richiedono la conoscenza dei valori percentuali di sabbia (0.1 – 2 mm), di limo + sabbia molto fine (%), (0.1 – 0.05 mm), di sostanza organica (%), oltre che della permeabilità e struttura pedologica del terreno.

Il fattore topografico LS prende in considerazione la pendenza e la lunghezza del pendio. La lunghezza (L) è definita come la distanza tra il punto di origine del ruscellamento e il punto in cui la pendenza diminuisce e si verifica la sedimentazione, oppure il punto in cui le acque di ruscellamento penetrano in un canale ben definito, il quale può essere sia un elemento del reticolo idrografico, sia un opera di diversione.

La pendenza (S) è quella media del versante, idrologicamente definito come sopra. L'equazione seguente fornisce il fattore LS:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m * (0.065 + 0.045 * s + 0.0065 * s^2)$$

dove:

λ = lunghezza del versante [m]

s = pendenza %

m = 0.2 per versanti con pendenza minore del 1%; 0.3 per pendenze comprese tra 1 – 3%; 0.4 per pendenze comprese tra 3 – 5%; 0.5 per pendenze superiori al 5%. In Renard et al., cit., vengono

proposte formule alternative per il fattore LS, che però non sono state qui considerate. Si rinvia ad un approfondimento dell'indagine un affinamento della modellazione dei fattori topografici, anche in considerazione del fatto che il fattore LS si applica alla scala del singolo campo, e non dell'intero bacino, ed esclude i fenomeni di deposizione, descrivendo le sole aree di erosione netta.

Gli effetti della copertura vegetale e delle tecniche colturali interagiscono tra di loro e quindi sono stati inglobati in un unico fattore di influenza (C).

Il valore di questo fattore può variare nel corso dell'anno perché l'effetto protettivo della copertura vegetale non dipende solo dal tipo di vegetazione e dal suo stadio di accrescimento, ma cambia in relazione alla distribuzione della erosività delle precipitazioni.

Il fattore C viene calcolato per ogni particolare coltura e per ciascuna fase del ciclo colturale, oppure in combinazione con le eventuali successioni colturali (rotazioni), tenendo conto della distribuzione dell'indice di erosione EI durante le fasi suddette.

Il fattore C medio annuo per le varie colture presenti nel territorio è stato calcolato seguendo gli schemi riportati in ERSO, cit. (Tab. 3). Anche in questo caso si deve sottolineare che un'analisi di maggiore dettaglio dovrebbe tenere conto della variabilità durante l'anno della copertura del suolo (Renard et al., cit.).

uso del suolo	Fattore C
Colture specializzate	0.259
calcolato come media dei fattori C delle colture seguenti:	
Vigneto con due lavorazioni/anno	0.451
Vigneto inerbito	0.163
Frutteto con 3 lavorazioni/anno	0.296
Frutteto inerbito	0.126
Prati stabili	0.135
Cespuglietti	0.112
Colture agrarie permanenti	0.097

Tabella 10 – fattore C

Il fattore P caratterizza l'effetto antierosivo delle opere di sistemazione del suolo. Il valore di P per vari tipi di pratiche è riportato in letteratura. Nel nostro caso si può ipotizzare che non ci siano significative lavorazioni atte a ridurre le perdite di suolo, e conseguentemente si assume $P = 1$ per tutto il territorio comunale.

Per la stima dell'indice A si è fatto riferimento a studi esistenti in un'area vicina (ERSO, cit.), dalla quale il territorio esaminato non si differenzia sostanzialmente sotto il profilo pedologico. Tutti i parametri sono stati ricalcolati, comunque, per le situazioni specifiche. Si è anche valutato diversamente, sulla base del modello digitale del terreno reso disponibile dai dati della Regione Emilia Romagna (che pure è piuttosto grossolano, rappresentando curve di livello ogni 50 m), il fattore di lunghezza e pendenza del versante. La pendenza è quella locale calcolata con uno schema a differenze finite centrali, mentre la lunghezza del pendio è stata valutata considerando la distanza dagli oggetti che interrompono il pendio stesso: elementi del reticolo idrografico, macchie di bosco e cespugli. Per quanto difficile da stimare, è evidente che può esistere una sovrastima della lunghezza del pendio dovuta alla non considerazione di altri possibili ostacoli al deflusso. Ai fini della pianificazione, e non del progetto dei singoli interventi, si può ritenere che l'approssimazione della mappa sia comunque soddisfacente.

In Figura 17 è descritto sotto forma di diagramma di flusso il procedimento di calcolo della USLE. Partendo dai dati di uso del suolo, pendenza, pioggia, pedologia e permeabilità, si ricavano i 5 fattori

precedentemente descritti e si procede al calcolo della stima di perdita di suolo per il territorio di Sogliano.

L'inquinamento diffuso

L'inquinamento delle acque e dei suoli presente in territorio di Sogliano al Rubicone è prevalentemente legato alle attività agricolo-zootecniche, e in particolare agli spandimenti di reflui di allevamento, mentre in forma meno pesante alla generica concimazione delle colture.

Queste fonti si riferiscono essenzialmente all'azoto e - in misura più contenuta - al fosforo.

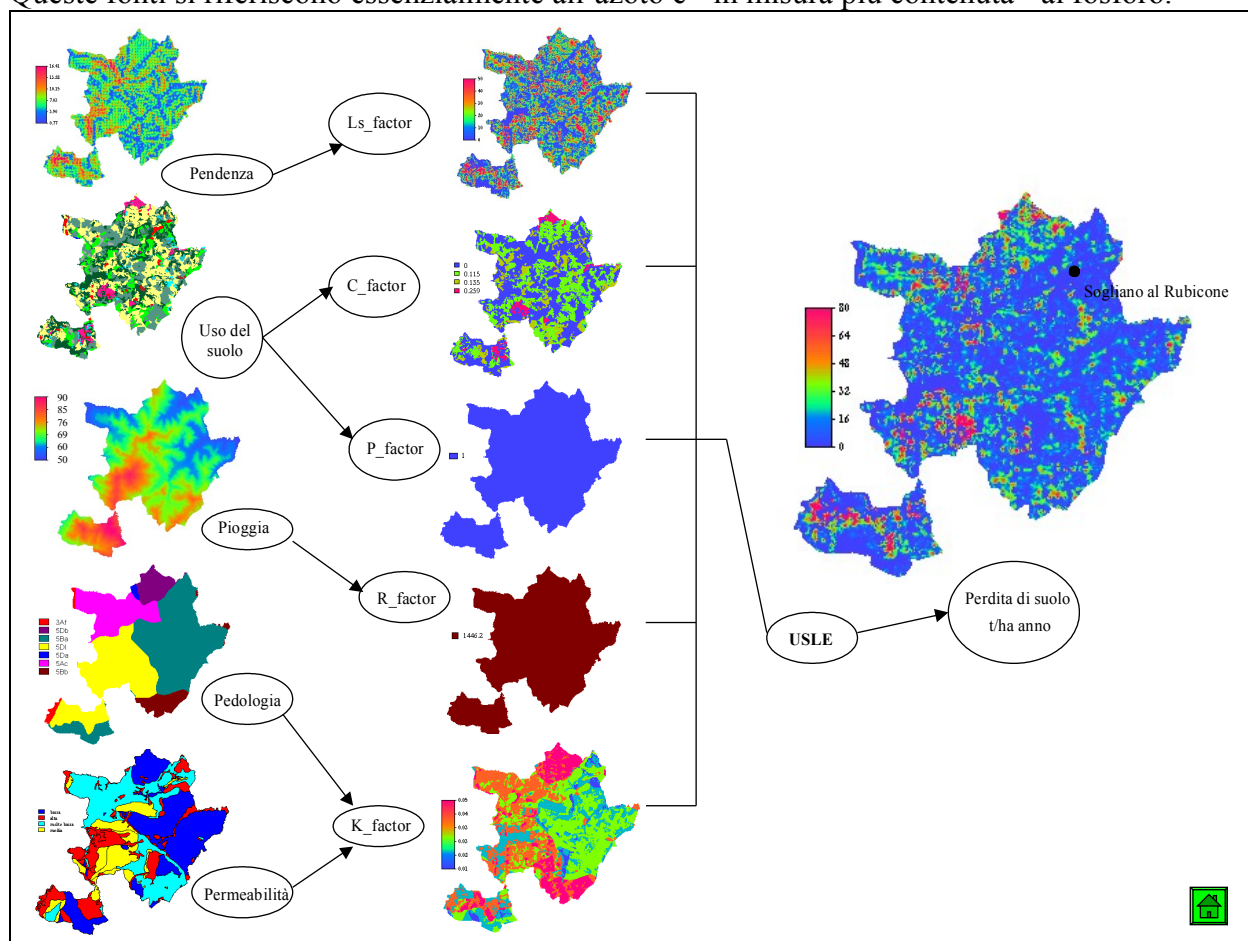


Figura 17 – calcolo della USLE

Il calcolo delle portate massiche di inquinanti in ingresso è stato condotto a partire dalla conoscenza delle dosi di spandimento dei reflui zootecnici (ipotizzate pari ai limiti di normativa, in assenza di dati più affidabili) e del numero di abitanti equivalenti corrispondenti ad ogni scarico civile o produttivo censito. Non si sono presi in considerazione sversamenti non autorizzati di liquami, che peraltro non sembrano frequenti in territorio di Sogliano. I valori della concentrazione di azoto totale negli scarichi è stata dedotta da indicazioni di letteratura, e comunque non pare necessario un dato di maggiore dettaglio.

Una volta noti gli scarichi, sia diffusi sia concentrati, si è provveduto a ripartirli fra le varie fasi del ciclo idrologico, secondo le leggi empiriche, basate su numerose osservazioni fisiche, messe a punto

nel modello CREAMS (USDA, 1982) e nella sua variante, GLEAMS. Si deve notare che questo modello è fra gli approcci suggeriti dalla recente normativa (D.Lgs. 152/99) per la stima della vulnerabilità del territorio rispetto ai nitrati, e rappresenta un metodo relativamente avanzato di valutazione in contesto nazionale. Il modello calcola la concentrazione dell'azoto nel deflusso superficiale, nell'infiltrazione verso la falda, e nel sedimento eroso. Ovviamente, quindi, è stato necessario effettuare il calcolo dell'erosione e del deflusso superficiale prima di applicare il modello. Visto anche che l'erosione e il deflusso superficiali sono stati calcolati con dati piuttosto incerti, il risultato di questa analisi è valido solo per ordini di grandezza. Per il territorio di Sogliano si sono considerati valori delle somministrazioni di azoto desunti dalla letteratura, dalle normative e dagli archivi di Provincia di FC e ARPA di Forli-Cesena, come riportato in tabella 4.

Terreni di spandimento	Carico azoto
zone non vulnerabili zooselezioni	340 kg/ha anno Valori ad hoc a seconda della concentrazione di sodio presente nel terreno
Suoli coltivati	
seminativi	180 kg/ha anno
colture specializzate miste	90 kg/ha anno
colture agrarie permanenti	90 kg/ha anno

Tabella 11- fonti di origine diffusa : terreni di spandimento e suoli coltivati

La concentrazione iniziale di azoto presente nel suolo, assunto lo spessore del suolo in cui si considera distribuito l'azoto pari ad 1 cm, e la densità media del suolo di 1500 kg/mc (da cui risulta che il volume di suolo disponibile in 1 ha di superficie è $1 \text{ cm} * 1 \text{ ha} = 0.01 * 10000 \text{ mc} = 100 \text{ mc}$), è pari alla dose di concimazione o di spandimento divisa per 150000 kg. Ad es., per spandimenti di reflui zootecnici in zone non vulnerabili si ottiene una concentrazione iniziale di azoto per ha anno = $340/150000 = 0.002266 \text{ kg azoto/kg suolo}$.

Insieme ai carichi di origine diffusa, si sono considerate le immissioni concentrate, che nel caso specifico corrispondono ai soli scarichi di reflui civili.

In ambito urbano, il carico pro capite d'azoto di origine domestica è valutabile pari a circa di 12 g/ab/giorno (corrispondente a 4.38 kg/ab/anno), secondo le indicazioni di letteratura (p.es. Andreottola e Canziani, 1990). La tabella 5 riporta le stime per il caso di studio, basate sul criterio ora detto.

Scarichi Civili	Abitanti	Carico	Azoto
Depuratore Sogliano	Equivalenti	[Kg/Anno]	
Scolmatore Sogliano	1500	6570	
Imhoff Sogliano	400	1752	
Imhoff Sogliano	45	197.1	
Imhoff Montetiffi	150	657	
Depuratore Bivio Montegelli	50	219	
Imhoff Montegelli	300	1314	
Imhoff Ponte Uso	130	569.4	
Scarico Diretto Villaggio Baviera	130	569.4	
Imhoff Montepetra	150	657	
Depuratore Rontagnano	90	394.2	
Imhoff Bagnolo	130	569.4	
Imhoff Rontagnano	30	131.4	
	30	131.4	

Tabella 12 - fonti localizzate: popolazione (metabolismo e detersivi liberati nell'ambiente con gli effluenti domestici)

Per valutare i carichi che effettivamente raggiungono il corpo idrico si devono prendere in considerazione le perdite che essi subiscono nel passaggio dalla fonte al recettore. Nel caso specifico, si è stimato che solo il 5% del carico di azoto di origine puntiforme raggiungesse il recettore (Provincia di Forlì-Cesena, 1996).

La dinamica degli elementi nutritivi nel suolo è influenzata da diversi fattori, come:

- caratteristiche chimico-fisiche del suolo
- concimazioni (minerali e organiche)
- asportazioni da parte di colture
- lisciviazione ed erosione da ruscellamento

In particolare l'azoto, soprattutto in forma di nitrati, è piuttosto sensibile alla lisciviazione. L'azoto organico è invece rimosso prevalentemente attraverso l'erosione.

Il modello scelto tiene conto in qualche modo degli aspetti descritti, pur trascurando in modo drastico i fenomeni di uptake da parte delle piante, e utilizza come parametri d'ingresso:

deflusso superficiale (calcolato nel bilancio idrologico)

infiltrazione efficace (")

perdita di suolo (stimata con la USLE)

Mediante la conoscenza di questi dati è possibile valutare:

- concentrazione media dei nutrienti in soluzione nell'acqua di ruscellamento
- contenuto dei nutrienti nei sedimenti erosi
- contenuto dei nutrienti nell'acqua d'infiltrazione.

Elementi trasportati con il sedimento:

Questo parametro è stimato con le seguenti relazioni, che tengono conto dei fenomeni di arricchimento del sedimento eroso in concentrazione di nutrienti, a causa della selezione granulometrica che si verifica:

$$ERN = A * SED^B$$

$$SEDN = SOILN * SED * ERN$$

dove:

A = 2 (valori medi di letteratura)

B = -0.25 (“)

ERN= rapporto di arricchimento dell'azoto

SEDN = quantità di azoto trasportato nel sedimento [kg/ha anno]

SED = quantità di sedimento asportato prevista dal modello di erosione [kg/ha anno]

SOILN = concentrazione di azoto presente nel terreno [kg/kg di suolo]

Il valore SOILN deriva dalla conoscenza dei carichi d'azoto delle diverse sorgenti produttrici: per il territorio di Sogliano si sono considerati i valori desunti dalla letteratura e dagli archivi di enti come Provincia ed ARPA.

Elementi trasportati per lisciviazione dovuta al runoff ed elementi trasportati per infiltrazione:

L'ammontare di nutrienti presenti nelle acque di ruscellamento [kg/mc] è valutato attraverso le seguenti espressioni:

$$RON = C_{2m} * EXKN_2 * Q * 0.01$$

dove:

C2m = concentrazione media di azoto durante il runoff

EXKN2 = coefficiente di estrazione per runoff = 0.2

Q = RO deflusso superficiale utile complessivo annuo [mm]

$$C_{2m} = ((C_1 - C_r)/(K_2 * Q)) * (1 - \exp(-K_2 * Q)) + C_r$$

$$C_1 = (C_0 - C_r) * \exp(-K_1 * F) + C_r$$

$$C_{1m} = ((C_0 - C_r)/(K_1 * F)) * (1 - \exp(-K_1 * F)) + C_r$$

$$EXKN_1 = d * POR * K_1$$

$$EXKN_2 = d * POR * K_2$$

RO = deflusso complessivo annuo [mm]

Cr = concentrazione di nutriente nella pioggia (assunta = 0)

C1 = concentrazione alla fine dell'infiltrazione e all'inizio del runoff

C1m = c oncentrazione media di azoto durante l'infiltrazione

C0 = concentrazione iniziale di nutriente nell'acqua dello strato superficiale del suolo [kg/mc]

K1 = tasso di percolazione

K2 = tasso di ruscellamento

POR = porosità del suolo [%], assunta pari al 40%

d = profondità dello strato superficiale di suolo, assunta pari a 10 mm

EXKN1 = coefficiente di estrazione per infiltrazione = 0.25

F = infiltrazione

L'ammontare di nutrienti presenti nelle acque di infiltrazione [kg/mc] è valutato attraverso le seguenti espressioni:

$$DWN = C_{1m} * EXKN_1 * I_e * 0.01$$

dove:

Ie = F-dpor - infiltrazione efficace [mm]

dpor = volume pori (supposto = 0)

Si ricava quindi:

$RON_{tot} = RON * Q * 10000 / 1000$ - azoto in runoff in kg/ha anno

$DWN_{tot} = DWN * I_e * 10000 / 1000$ - azoto in infiltrazione in kg/ha anno

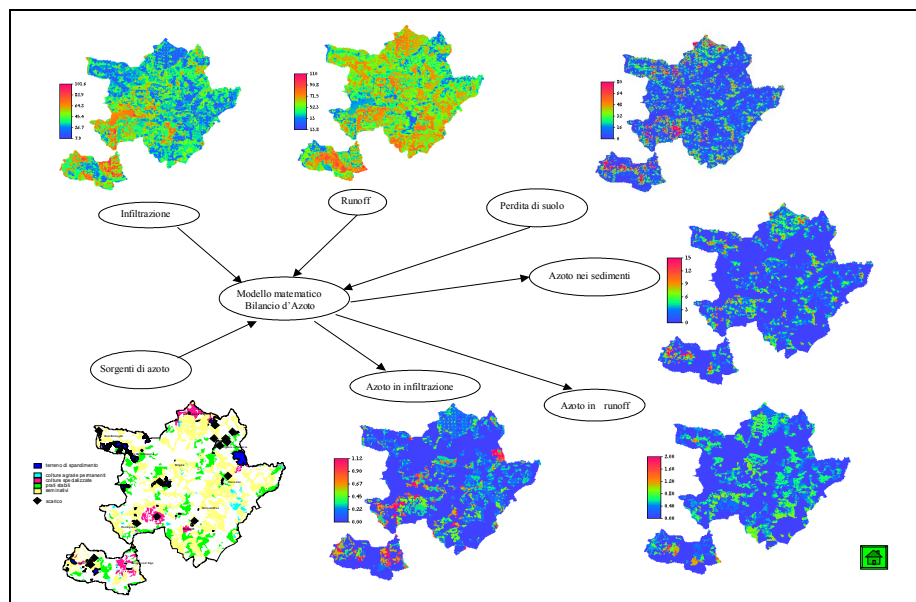


Figura 18 – calcolo dei contributi d’azoto nei sedimenti, in runoff e in infiltrazione

Ovviamente, date le semplificazioni modellistiche e l’approssimazione dei dati, le valutazioni condotte con questa tecnica devono essere interpretate sempre in senso comparativo, e consentono di evidenziare i luoghi dove è più urgente il fenomeno. Sia la consistenza quantitativa effettiva del fenomeno, sia il dimensionamento di interventi devono essere valutati con un contenuto maggiore di conoscenza, per esempio ricorrendo al modello CREAMS completo e ai modelli da esso derivati.

L’uso delle valutazioni nella pianificazione

Le valutazioni quantitative, condotte sulla base della stima – almeno in termini comparativi- dei fenomeni, fornisce in linea di principio una base di razionalità per la discussione dei possibili scenari di piano e della scala di priorità degli interventi. E’ immediato interpretare le mappe che risultano dallo studio in termini di priorità di intervento per la lotta all’inquinamento diffuso e all’erosione. Una discussione sull’uso delle valutazioni e delle analisi ambientali ai fini del supporto alle decisioni è fornita in Pistocchi *et al.*, 2000b). La messa a punto di un sistema di valutazione idrologica del territorio non esime ovviamente dal produrre informazioni più aggiornate e affidabili, che comunque possono essere inserite nella cornice qui delineata senza alterarne la struttura.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato svolto nell’ambito degli studi preliminari alla redazione del Piano Regolatore Generale di Sogliano al Rubicone, coordinati dall’arch. E.Preger di Cesena per gli aspetti generali, e dall’ing. A.Pistocchi per le analisi dell’ambiente e del territorio. I dati utilizzati provengono dall’archivio cartografico della Regione Emilia Romagna, dal SIT della Provincia di Forli-Cesena e da ARPAER (Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell’Emilia Romagna, Sezione Provinciale di Forli-Cesena).

3- Modellazione previsionale *GIS-based* dell'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole. Un caso di studio.

Introduzione

Con lo sviluppo del calcolo automatico, la modellistica matematica si è orientata alla produzione di strumenti per la simulazione dei fenomeni ambientali che sono ora caratterizzati da una notevole complessità e da un elevato grado di concettualizzazione. Questi strumenti ricorrono spesso a parametri di difficile stima e richiedono una quantità di dati che spesso sono di costosa acquisizione. Al contempo, la richiesta di informazioni da parte della pianificazione territoriale è limitata a indicazioni molto aggregate nel tempo e caratterizzate da una spazialità definita dall'area di interesse del piano. Per questo, appare estremamente utile la modellazione dei fenomeni quale può essere effettuata in un GIS di tipo raster, in particolare sfruttando la capacità di descrivere fenomeni fortemente distribuiti nello spazio mediante relazioni matematiche semplici. Un vantaggio di questo approccio è la limitata richiesta di dati –rispetto ai modelli tradizionali– per il fatto che molti dei parametri utilizzati si riferiscono a grandezze fisiche ricavabili direttamente, e non devono essere quindi tarati. Per quanto riguarda i parametri da tarare, invece, occorre prevedere una procedura di calibrazione, ma la modellazione mira a ridurre al minimo il loro impiego e la sensibilità del modello rispetto ad essi. Nel seguito si descriverà l'applicazione di una modellazione GIS-based al problema dell'inquinamento di origine diffusa.

Localizzazione e inquadramento dell'area

L'area oggetto di studio interessa il bacino del fiume Savio, dall'alto Appennino cesenate sino a una sezione di chiusura situata presso Ca' Bianchi (Molino Cento di Cesena). La superficie occupa un'area di circa 480 km² e si estende da aree di montagna (al confine con la regione Toscana) sino alla pianura, attraverso la fascia collinare. Il fiume Savio è a regime torrentizio: la portata risente notevolmente delle variazioni stagionali di pioggia; pertanto si riscontrano periodi di piena primaverili e autunnali intervallati da periodi siccitosi in estate e inverno. Da un punto di vista geologico, possiamo individuare le seguenti formazioni principali: (1) Formazione marnoso-arenacea romagnola (*Serravalliano-Tortoniano*), costituita da sequenze torbiditiche di arenarie e peliti grigie. Questa formazione occupa una porzione rilevante del territorio esaminato e si estende in entrambi i lati del fiume Savio. (2) Formazione gessoso-solfifera (*Messiniano medio*), costituita da gesso microcristallino intercalato a strati marnoso-argillosi o sabbiosi e da calcare solfifero basale. (3) Formazione a colombacci (*Messiniano medio-sup.*), costituita essenzialmente da tre facies, pelitica, arenacea e conglomeratica, contenenti degli orizzonti calcarei che danno il nome alla formazione. Sono inoltre presenti le Marne di Verghereto, costituite da marne grigie siltose in alcuni casi ricche di sabbia e con sottili intercalazioni arenacee; le arenarie del M. Comero (*Eocene sup.*), con interstrati pelitici e brecciole calcarenitiche; le arenarie e le argille plioceniche (argille grigio-azzurre e alcuni lembi di argilliti varicolorate caotiche). Le formazioni geologiche influenzano direttamente anche la morfologia del rilievo, che si presenta dolcemente ondulato su litologia prevalentemente argillosa e più aspro nelle aree interessate dalla Formazione marnoso-arenacea. Si osserva inoltre un'ampia diffusione di fenomeni calanchivi, che insistono su zone acclivi litologicamente predisposte a una forte erosione superficiale. Per quanto riguarda l'uso del suolo, il territorio di pianura e di prima collina è adibito prevalentemente a uso agricolo, con frutteti e vigneti come colture legnose agrarie più rappresentative. Le colture erbacee sono più diffuse nella fascia di media ed alta collina e sono costituite soprattutto dal frumento e dal sorgo, che vengono coltivati in rotazione con l'erba medica (per la quale spesso si sceglie un ciclo triennale). Alle quote più elevate divengono significative le colture boschive (circa il 30% sull'intera superficie del bacino), alle quali si alternano i prati-pascolo e, in misura minore, i seminativi e i terreni

incolti. In particolare, al di sopra degli 800 m si ha da un lato la predominanza delle colture boschive, dall'altro l'incremento dei prati-pascolo (60-80% della superficie non boscata) a scapito dei seminativi.

Finalità e metodologie

Scopo dello studio è di analizzare l'applicabilità di un modello semplice e data driven per la previsione dell'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole alla scala del bacino. Il fenomeno è ben noto, e si può schematizzare come segue:

- composti nutrienti (di azoto e fosforo in particolare) vengono somministrati alle colture sotto varie forme, e in dosi eccedenti rispetto a quanto effettivamente assorbito dalle piante
- il ruscellamento delle acque ne porta una certa percentuale in soluzione
- una parte dei nutrienti viene invece assorbita dal suolo
- il suolo è soggetto ad erosione superficiale
- ai recettori possono giungere nutrienti sotto forma di sedimenti arricchiti in azoto e fosforo, oppure sotto forma di sostanze in soluzione nelle acque.

Esistono diversi modelli di tipo distribuito che simulano il comportamento dei nutrienti e di altre sostanze alla scala di bacino (e.g. CREAMS/GLEAMS, AGNPS, SWAT...). Tutti questi modelli presentano generalmente un'attitudine a simulare i singoli eventi piovosi e i loro effetti. Solo di recente è stata sviluppata, ed è ancora in fase di beta-testing, una versione di AGNPS che consente di effettuare una simulazione in continuo (AnnAGNPS, 1998). La descrizione dei fenomeni è estremamente dettagliata e rende generalmente molto dispendioso – e a volte praticamente impossibile – utilizzare questi modelli in casi reali. I modelli suscettibili di proficuo impiego nell'ambito della pianificazione territoriale devono invece soddisfare alcuni criteri fondamentali: (1)devono essere capaci di prevedere l'evoluzione dei fenomeni di interesse, entro un certo limite di accuratezza e precisione (a seconda delle specifiche problematiche indagate); (2)devono mettere il pianificatore in grado di valutare le conseguenze delle scelte che possono essere prese sui fenomeni di interesse modellistico (in questo costituendo sistemi di supporto alle decisioni); (3)devono essere di semplice utilizzo e ragionevole possibilità di diffusione, richiedendo un numero di informazioni in ingresso commisurato alla capacità di produrle da parte dell'amministrazione pubblica e degli enti di ricerca; (4)devono produrre risultati facilmente comprensibili e divulgabili, in modo che possano venire a formare base di discussione per le decisioni di interesse collettivo; (5) devono essere accompagnati da linee guida piuttosto stringenti per la scelta dei parametri, in modo da poter essere impiegati anche al di fuori delle aree per cui sono stati calibrati senza richiedere costi di taratura eccessivi.

In questi ultimi anni si è molto diffusa, presso tutte le pubbliche amministrazioni, la tecnologia dei sistemi informativi territoriali (GIS o SIT). Si tratta di strumenti di calcolo e di gestione dei dati, di cui fino ad ora si è sfruttata la capacità di organizzare l'informazione sull'ambiente e il territorio. Nel presente studio si illustra una metodologia che consente di sfruttare i GIS al pieno delle loro capacità, ovvero per scopi non di solo immagazzinamento, ma anche di analisi dei dati, mediante algoritmi di calcolo che derivano da concettualizzazioni modellistiche della realtà fisica. I dati necessari alla conduzione dell'analisi sono stati in parte forniti dalla Regione Emilia-Romagna (Servizio Cartografico e Geologico) e dall'ARPA-Regione Emilia Romagna (Servizio Meteorologico Regionale), mentre l'ARPA-Sezione Provinciale di Forlì-Cesena ha supportato lo studio fornendo informazioni riguardo alle specificità del territorio e indicazioni di tecnica agronomica, e rendendo possibile una prima verifica sul campo, con apposito sopralluogo, delle assunzioni teoriche fatte circa le caratteristiche di uso del suolo. La cartografia da cui sono state estratte le informazioni è costituita da: (a)pedologia (scala 1:250000); (b) copertura e uso del suolo (scala 1: 100.000); (c) altimetria (scala 1: 50.000) ; (d) idrografia e viabilità (scala 1:10.000)

Dalle scale (valori indicativi riferiti al dettaglio dell'informazione contenuta) della cartografia si può desumere l'eterogeneità dei dati disponibili, e si deve notare che il dettaglio delle previsioni modellistiche è quello della scala più piccola, ovvero 1: 250.000 (si noti, fra l'altro, che il modello è estremamente sensibile ai parametri pedologici, per cui a maggior ragione la scala più piccola è in questo caso limitante). Questo aspetto pone una prima, forte limitazione alla validità dei risultati ottenuti. L'elaborazione dei dati è stata effettuata con il software GIS ILWIS 2.21. Come imposto dal tipo di dati in ingresso, la simulazione effettuata ha avuto solo lo scopo di chiarire l'applicabilità del metodo proposto. Per ottenere risultati affidabili occorre essere in possesso di dati più dettagliati, ed effettuare una descrizione di maggiore dettaglio dei processi idrologici. Indicazioni sulle linee di approfondimento da perseguire verranno fornite nelle Conclusioni.

Descrizione del modello di erosione

Il modello adottato per prevedere le perdite annuali di suolo dai versanti è quello, già da tempo noto nella letteratura del settore, di Morgan, Morgan & Finney. Si è preferito questo modello ad altri, come quello più diffuso e noto come USLE (Universal Soil Loss Equation), per la maggiore base fisica in esso inglobata. In questo modello il processo erosivo è suddiviso in una fase di distacco dovuta all'impatto della pioggia sul suolo e in una fase di trasporto delle particelle asportate. Si distinguono allo scopo due gruppi di variabili: quelle legate alla precipitazione e alla formazione del deflusso superficiale (*water phase*) e quelle legate alla dinamica di distacco, trasporto e rideposizione dei sedimenti (*sediment phase*); la considerazione delle due fasi del processo erosivo consente una rappresentazione di fenomeni che risultano estremamente significativi nel passaggio alla scala di bacino. Il modello ignora invece i processi di trasporto dovuto all'impatto dell'acqua sul suolo e di distacco per deflusso superficiale, ritenendoli trascurabili rispetto agli altri aspetti del fenomeno. Si mettono a confronto la quantità di sedimento potenzialmente distaccata dalla pioggia e la capacità di trasporto del deflusso, e si assume il valore più basso fra i due come stima delle perdite annuali di suolo. Attraverso le equazioni della *water phase* si ricavano l'aggressività della pioggia, misurata tramite la sua energia cinetica, e il volume del deflusso superficiale. Questi valori sono poi utilizzati come parametri di ingresso per la *sediment phase*, le cui equazioni consentono di ricavare sia il tasso di distacco che la capacità di trasporto.

Water phase (v. Figura 19)

Si devono assegnare come input:

R: piovosità annua (mm).

R_n: numero di giorni piovosi in un anno.

I: intensità della pioggia (mm h⁻¹).

Il valore di questo parametro varia a seconda del clima. Per climi con una spiccata stagionalità, come quello mediterraneo, si assume un valore pari a 30.

E: energia cinetica delle precipitazioni (J m⁻²).

Q: volume di deflusso superficiale (mm).

E_t/E₀: rapporto fra evapotraspirazione reale ed evapotraspirazione potenziale.

MS: contenuto di umidità del suolo alla capacità di campo (% w/w).

BD: densità dello strato superficiale di suolo (g cm⁻³).

RD: profondità delle radici nello strato più superficiale di suolo (m).

(Questo parametro è definito come la profondità del suolo dalla superficie fino a un orizzonte impermeabile o pietroso; alla base dell'orizzonte A; sino a 1 m, qualunque sia il meno profondo).

Si possono così calcolare:

- l'erosività della pioggia $E = R (11.9 + 8.7 \log_{10} I)$

- Il volume di deflusso superficiale $Q = R e^{-Rc/R0}$

essendo :

$$R_c = 1000 MS \cdot BD \cdot RD \cdot (E_t/E_0)^{0.5}$$

$$R_0 = R/R_n$$

Sediment phase (v. Figura 20, Figura 21)

Si deve conoscere:

K: indice di distaccabilità del suolo ($g J^{-1}$).

È definito come il rapporto fra il peso del suolo distaccato e l'energia delle precipitazioni.

A: percentuale delle precipitazioni intercettate.

C: fattore di copertura vegetale (considera anche le tecniche colturali adottate e le eventuali opere di conservazione del suolo).

S: angolo di inclinazione del versante (radianti).

F: tasso di distaccamento del suolo dovuto all'impatto delle precipitazioni ($kg m^{-2}$).

G: capacità di trasporto del deflusso superficiale ($kg m^{-2}$).

WATER PHASE

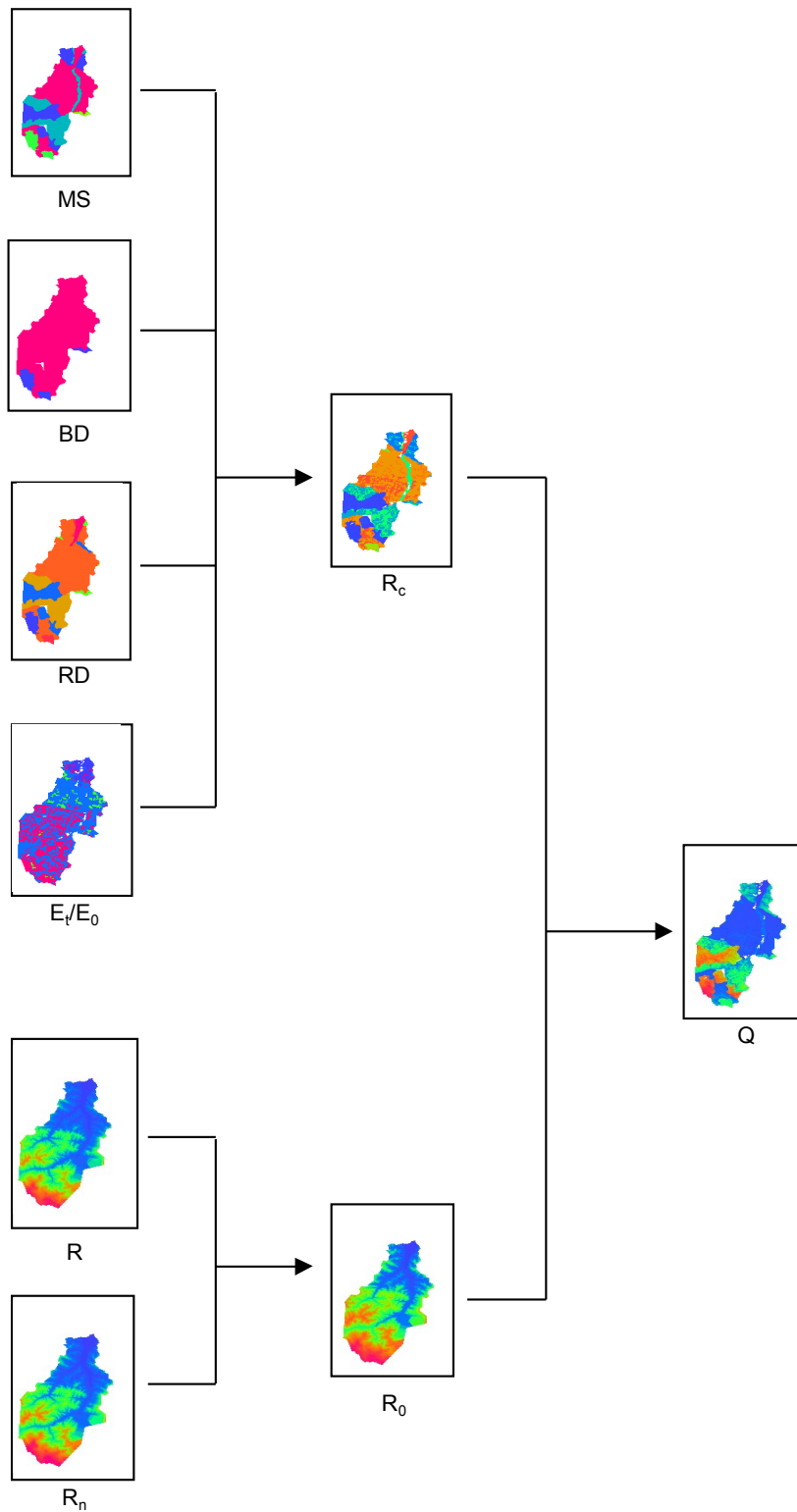


Figura 19- Flowsheet per il calcolo di Q (volume del deflusso superficiale).

SEDIMENT PHASE

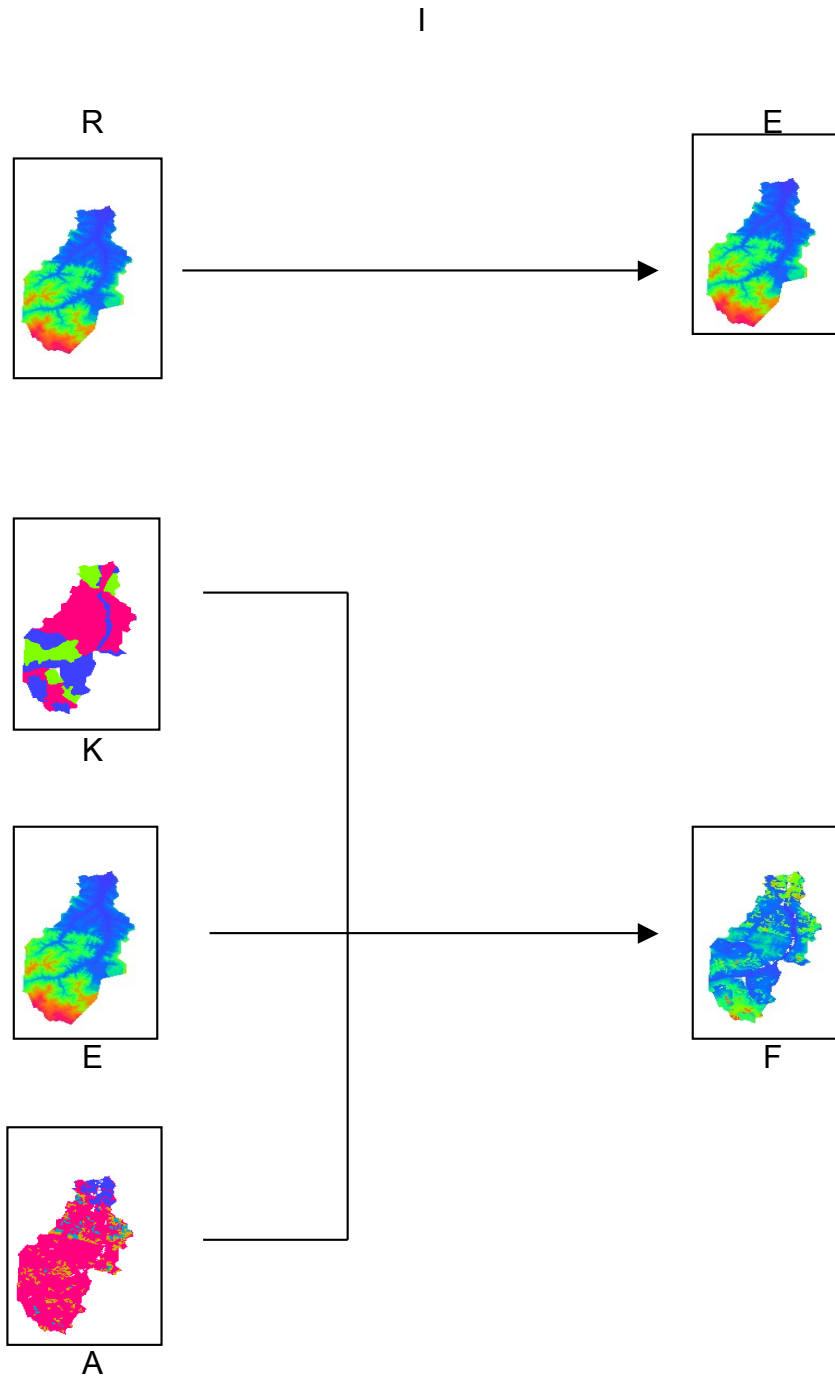


Figura 20- Flow sheet di calcolo di F (tasso di distacco del suolo).

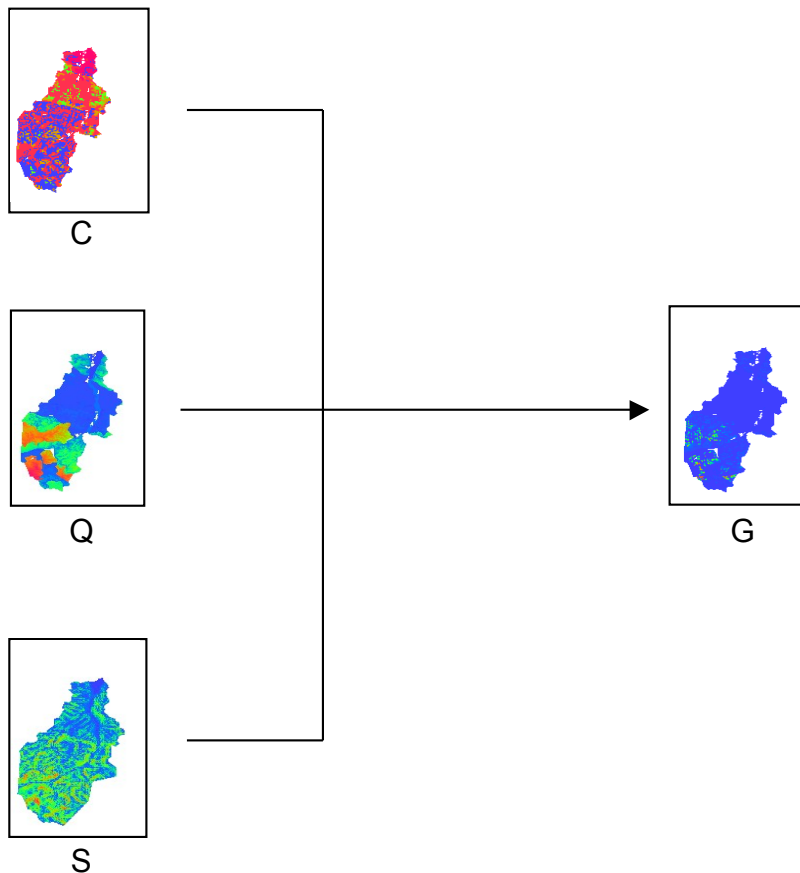


Figura 21 Flow sheet per il calcolo di G (capacità di trasporto del deflusso superficiale)

Si ottengono così:

la capacità di distacco dei sedimenti da parte della pioggia $F = K (E e^{-aA})^b \cdot 10^{-3}$

la capacità di trasporto da parte del deflusso superficiale $G = C Q^d \text{sen}S \cdot 10^{-3}$

Il valore degli esponenti e' da assumere come segue :

$a = 0.05;$

$b = 1.0;$

$d = 2.0.$

Si noti che il modello, come qui presentato, vale per la scala del singolo campo, e calcola l'erosione da ogni pixel come se esso fosse isolato. Il deflusso Q e' l'eccesso di pioggia rispetto alle 'perdite

idrologiche' (infiltrazione, evapotraspirazione...) e viene stimato con la relazione sopra riportata che non tiene conto del fatto che ogni pixel riceve anche le acque dell'area da esso drenata. Alcuni esempi di calcolo di Q in modo da tenere conto della dinamica del bacino sono stati compiuti (e.g. deJong, 1994).

Seppure in questo caso, per mancanza di un modello digitale del terreno sufficientemente accurato, il modello è stato applicato come se tutti i pixels fossero dei campi isolati, senza effettuare alcuna forma di *routing* dei sedimenti, in un successivo approfondimento si potrà raffinare il calcolo introducendo la descrizione degli aspetti legati alla cinematica del bacino (come descritto in Pistocchi,1998). In tal modo, potrà essere calcolata la capacità di trasporto di ogni pixel sulla base del deflusso totale. Inoltre, potrà essere effettuato un confronto fra la capacità di trasporto e tutti i sedimenti provenienti dall'area a monte di ogni pixel, e non solo quelli prodotti per distacco nel pixel. Allo scopo, esistono procedure di analisi cinematica del bacino che possono essere implementate in ogni GIS di tipo raster dotato di un operatore di *neighbourhood*. Si rinvia alla letteratura esistente per ulteriori dettagli (Pistocchi, cit.). L'analisi sull'intero bacino è stata condotta suddividendo il territorio in celle (pixel) di 50 x 50 m. Tutti i dati pervenuti sono stati uniformati a un unico sistema di coordinate (UTM), in modo da poter effettuare anche sovrapposizioni di mappe. Per quanto concerne i dati relativi alla pioggia, si sono utilizzate le stazioni riportate in Tabella 13.

Stazione	Quota (m s.l.m.)	Piovosità annua (mm)	Num. Giorni piovosi in un anno
Verghereto	812	1304.2	111.0
Bagno di Romagna	495	1283.9	109.1
Terzo di Carnaio	704	1197.1	101.5
Diga di Quarto	325	860.6	94.9
Monte Jottone	442	848.6	84.7
Luzzena	312	854.2	77.0
Cesena	44	829.4	84.7

Tabella 13-Stazioni pluviometriche e dati di piovosità annua.

Mettendo in relazione le quote altimetriche con le piovosità annue, emerge una dipendenza diretta (indice della regressione lineare: $R^2=0.66$) tra questi due parametri. L'equazione ottenuta per interpolazione è la seguente: $y = 0,7086x + 708,19$ dove y rappresenta la piovosità media annua e x la quota s.l.m. Da questa equazione si può ricavare la distribuzione delle piogge sull'intero bacino. Analogamente è stata ottenuta una mappa dei giorni piovosi annui: in questo caso la y rappresenta il numero di giorni piovosi in un anno (media sul lungo periodo) e il coefficiente di regressione lineare risulta pari a 0.53. L'equazione della retta è: $y = 0,0374x + 77,977$. Per i parametri MS, BD, K si sono assegnati i valori a seconda della tessitura, sulla base di tabelle specifiche (Tabella 14) disponibili in letteratura. Per quanto riguarda il parametro RD, la profondità dello strato superficiale è stata ricavata utilizzando le note illustrative della Carta dei suoli 1:250000 edita dalla Regione Emilia-Romagna. Chiaramente, la scala di conoscenza della pedologia (1:250.000) ha consentito, come detto, solo valutazioni di prima approssimazione.

Tipo di suolo	MS	BD	K
Argilloso	0.45	1.1	0.02
Franco argilloso	0.40	1.3	0.40
Limoso-argilloso	0.30	1.2	0.30
Franco sabbioso	0.28	1.2	0.30

Franco limoso	0.25	1.3	0.30
Franco	0.20	1.3	0.35
Sabbie franche	0.15	1.4	0.20
Sabbioso	0.08	1.5	0.70

Tabella 14-Parametri pedologici utilizzati per il modello di Morgan & Finney (da Morgan, 1995).

I parametri di uso del suolo sono stati assegnati sulla base di indicazioni di letteratura (Tabella 15).

Uso del suolo	A	E _v /E ₀	C
Seminativi	30	0.65	0.3
Frutteti	17	0.60	0.35
Boschi	30	0.95	0.002-0.004
Pascolo	20	0.75	0.15
Incolto	25	0.65	0.2
Rocce nude	0	0.05	1

Tabella 15 - Parametri relativi all'uso del suolo per il modello di Morgan & Finney (da Morgan, 1995).

La mappa di partenza per il calcolo delle pendenze è un DTM (Digital Terrain Model) ottenuto tramite interpolazione di punti disposti secondo una maglia di 250 m circa, fornito dal Servizio Meteorologico Regionale dell'ARPA Emilia Romagna. Attraverso un calcolo delle derivate direzionali nord/sud ed est/ovest, effettuato con un operatore di filtro sulla mappa raster del DTM, si ottengono le pendenze dei versanti.

Risultati della stima del sedimento eroso

Dalle due mappe esprimenti la capacità di trasporto e quella di distacco, applicando la funzione di minimo, si è ottenuta la mappa dell'erosione, che rappresenta la perdita annuale di suolo. La Tabella 16 riassume I risultati ottenuti per vari tipi di uso del suolo.

Uso del suolo	Perdita di suolo (t/ha/anno)
Seminativi	4-22
Frutteti e vigneti	2-35
Prato-pascolo	<1-25
Boschi	2-5
Incolto	25-35
Rocce nude	118-134

Tabella 16- Perdita di suolo annuale stimata con il modello di Morgan & Finney.

Descrizione del modello di *loading* dei nutrienti

Lo studio dei nutrienti è stato effettuato seguendo gli algoritmi del modello CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, USDA, 1980). Il modello originale è composto da tre parti (idrologia, erosione e dinamica dell'inquinamento) delle quali si è utilizzata essenzialmente quella relativa alla chimica dei nutrienti.

La dinamica degli elementi nutritivi nel suolo è influenzata da diversi fattori, come:

- caratteristiche chimico-fisiche del suolo
- concimazioni (minerali e organiche)
- asportazioni da parte delle colture
- lisciviazione ed erosione da ruscellamento

In particolare il fosforo, essendo caratterizzato da bassa mobilità, è trasportato essenzialmente per erosione dei sedimenti, mentre l'azoto, soprattutto in forma di nitrati, è più sensibile alla lisciviazione. Il modello dei nutrienti utilizzato tiene conto di tutti questi aspetti. Il modello dei nutrienti utilizza come parametri di ingresso le stime del deflusso superficiale e dell'infiltrazione (modello idrologico), nonché le stime della perdita di suolo (modello di erosione). Mediante questi parametri è possibile valutare la concentrazione media di N e P in soluzione nell'acqua di ruscellamento per ogni evento piovoso, unitamente al contenuto di elementi nei sedimenti erosi e nell'acqua di percolazione. Nelle seguenti definizioni si adotta il simbolo (-) ogni qualvolta ci si riferisce a uno degli elementi nutritivi N o P (Es.: SED- = SEDN o SEDP).

A) Elementi trasportati con il sedimento

Essi son stimati con le seguenti relazioni, che tengono conto dei fenomeni di arricchimento del sedimento eroso in concentrazione di nutrienti, a causa della selezione granulometrica che si verifica:

$$ER- = A- \cdot SED^{B-}$$

$$SED- = SOIL- \cdot SED \cdot ER-$$

Essendo :

ER-: rapporto di arricchimento del nutriente.

SED-: quantità di elemento trasportato dal sedimento ($kg\ ha^{-1}$).

SED: quantità di sedimento asportato prevista dal modello di erosione ($kg\ ha^{-1}$).

SOIL-: concentrazione di elemento presente nel terreno (kg/kg di suolo).

(Per l'azoto si è utilizzato un valore medio pesato di $0.002\ kg/kg$ di suolo; per il fosforo di $0.00055\ kg/kg$ di suolo).

A-;B-: parametri per l'equazione di arricchimento, per i quali sono stati assunti rispettivamente i valori 7.4 e -0.2 per entrambi i nutrienti, secondo le indicazioni del modello CREAMS.

B) Elementi trasportati per lisciviazione dovuta al runoff

L'ammontare di nutrienti presenti nelle acque di ruscellamento (espresso in $kg\ m^{-3}$), e' valutato secondo le espressioni:

$$RON = C_2 \cdot EXKN_2 \cdot Q \cdot 0.01$$

$$ROP = C \cdot EXKP_2 \cdot Q \cdot 0.01$$

essendo:

EXK-1: Coefficiente di estrazione relativo alla percolazione.

EXK-2: Coefficiente di estrazione relativo al deflusso superficiale.

F: infiltrazione totale per evento piovoso (mm).

$$EXKN_1 = d \cdot POR \cdot K_1$$

$$EXKN_2 = d \cdot POR \cdot K_2$$

$$EXKP_2 = d \cdot POR \cdot K_2$$

$$C_2 = (C_1 - C_r) / K_2 \cdot Q \cdot (1 - \exp(-K_2 \cdot Q)) + C_r$$

$$C = (C_1 - C_r) / K_2 \cdot Q \cdot (1 - \exp(-K_2 \cdot Q)) + C_r$$

$$C_1 = (C_0 - C_r) \cdot \exp(-K_1 \cdot F) + C_r$$

C_r: concentrazione di nutriente nella pioggia.

C₀: concentrazione iniziale di nutriente nell'acqua dello strato superficiale di suolo ($kg\ m^{-3}$).

K₁: tasso di percolazione.

K₂: tasso di ruscellamento.

Q: deflusso superficiale complessivo per evento piovoso (mm)

POR: porosità del suolo (%), assunta pari al 40%.

d: profondità dello strato superficiale di suolo, assunta pari a 10 mm.

Le espressioni sopra riportate si deducono da un bilancio del nutriente durante il deflusso, supponendo che l'azoto possa anche essere trasportato verso la falda, e che il fosforo rimanga nel suolo entro i primi

centimetri. Per poter calcolare il valore dell'infiltrazione **F** si è dapprima valutata l'evapotraspirazione ETR con la formula di Turc, sottraendo poi il valore ottenuto alle piogge:

$$ETR = P/\sqrt{0.9 + P^2/L^2}$$

essendo $L = 300 + 25*T + 0.05*T^3$ (mm)

P = pioggia media annua (mm)

T = temperatura media annua (°C)

Successivamente si è proceduto al calcolo di un coefficiente di afflusso (c_SCS) con il metodo del numero di curva dell'SCS (USDA), utilizzando le informazioni relative all'uso del suolo e alla tessitura dei terreni.

Infine, si è valutato il deflusso come $Q=(P-ETR)*c_SCS$. L'infiltrato, F, è desunto come differenza dalla:

$$F = P - ETR - Q$$

trascurando tutti gli effetti di immagazzinamento nel suolo (si veda la fig. 4).

Si noti che il deflusso Q così calcolato differisce da quello utilizzata nel modello di Morgan, Morgan e Finney per l'erosione. La discrepanza è dovuta al fatto che in questo modulo è necessario calcolare l'infiltrazione, che non può essere stimata direttamente dalla stima del deflusso superficiale di Morgan in quanto in questa sono aggregate le perdite evapotraspirative e quelle di infiltrazione. Si è ritenuto che, visto il carattere esplorativo dell'applicazione, fosse opportuno valutare l'erosione senza apportare modifiche al metodo descritto in precedenza, per cui si è dovuto fare ricorso alle integrazioni ora descritte per la rappresentazione dell'idrologia.

In Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25 si riportano gli schemi logici dei calcoli effettuati.

I risultati della simulazione sono dati dalla somma dei nutrienti presenti nel deflusso e nei sedimenti erosi. Da un esame dei risultati di tentativo ottenuti, si è osservato che l'azoto asportato varia fra i 10 e i 60 kg/ha anno circa, mentre il fosforo varia fra i 2 e i 15 kg/ha circa. Questi valori possono essere in certo grado di eccesso rispetto a quelli riportati in letteratura, e la tendenziale sovrastima può essere attribuita al fatto che nel calcolo si è ritenuta attiva l'intera quantità di precipitazione annua, mentre solo una parte di essa contribuisce nei fatti alla lisciviazione.

Inoltre, come nello spirito del presente studio preliminare, i parametri del modello CREAMS sono stati assegnati seguendo le indicazioni di letteratura, senza un maggiore approfondimento sulla base di dati sperimentali, introducendo ulteriori motivi di incertezza. In definitiva, le mappe ottenute sono da guardare come semplici zonizzazioni della potenziale produzione di inquinamento e di erosione. Hanno già in sé un'utilità per la pianificazione di interventi e la valutazione delle priorità, ma non sono affidabili per valutazioni quantitative. Per queste ultime sono di seguito indicati gli sviluppi richiesti.

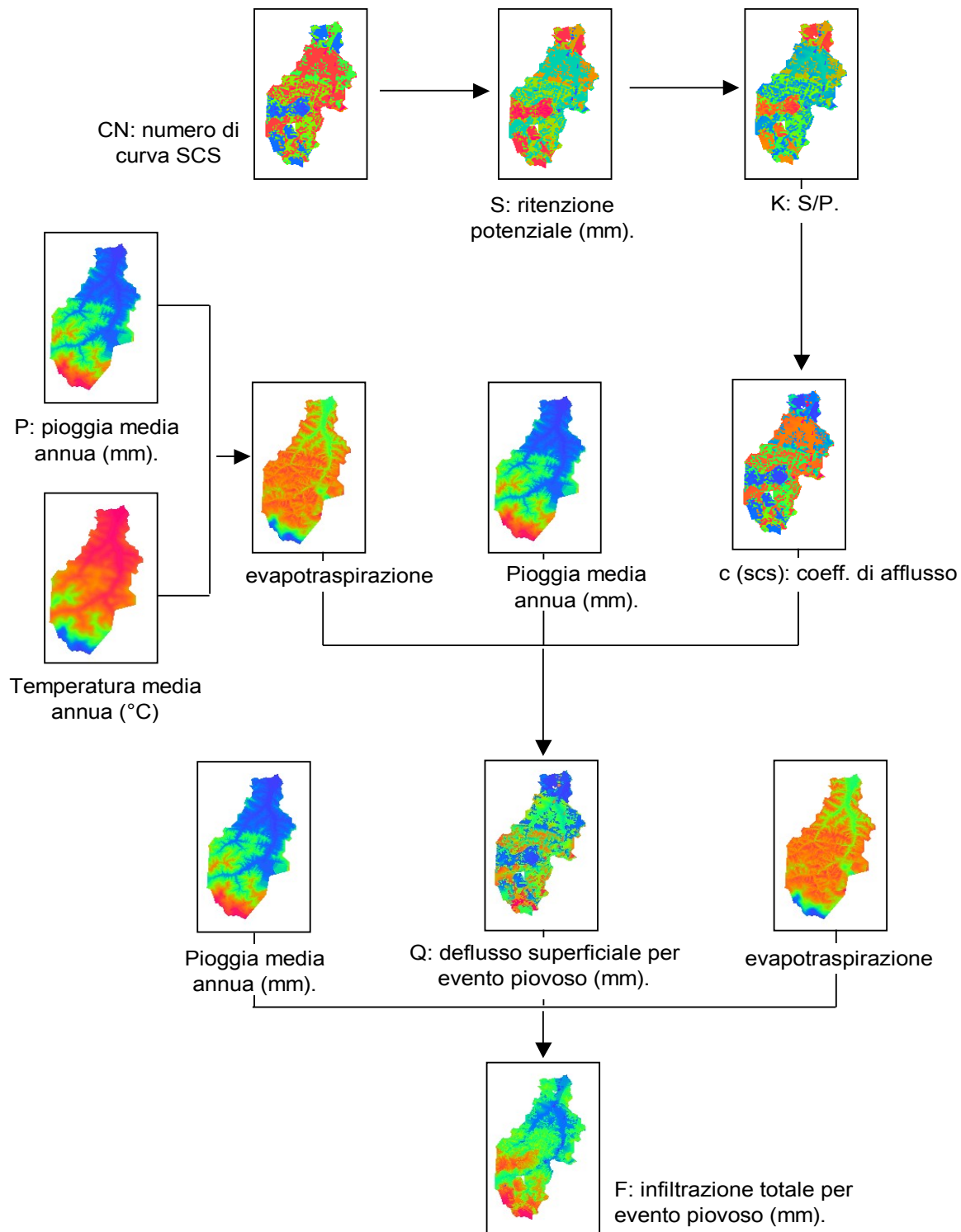


Figura 22 - Percorso seguito per valutare il deflusso superficiale (Q) e l'infiltrazione (F) per evento piovoso.

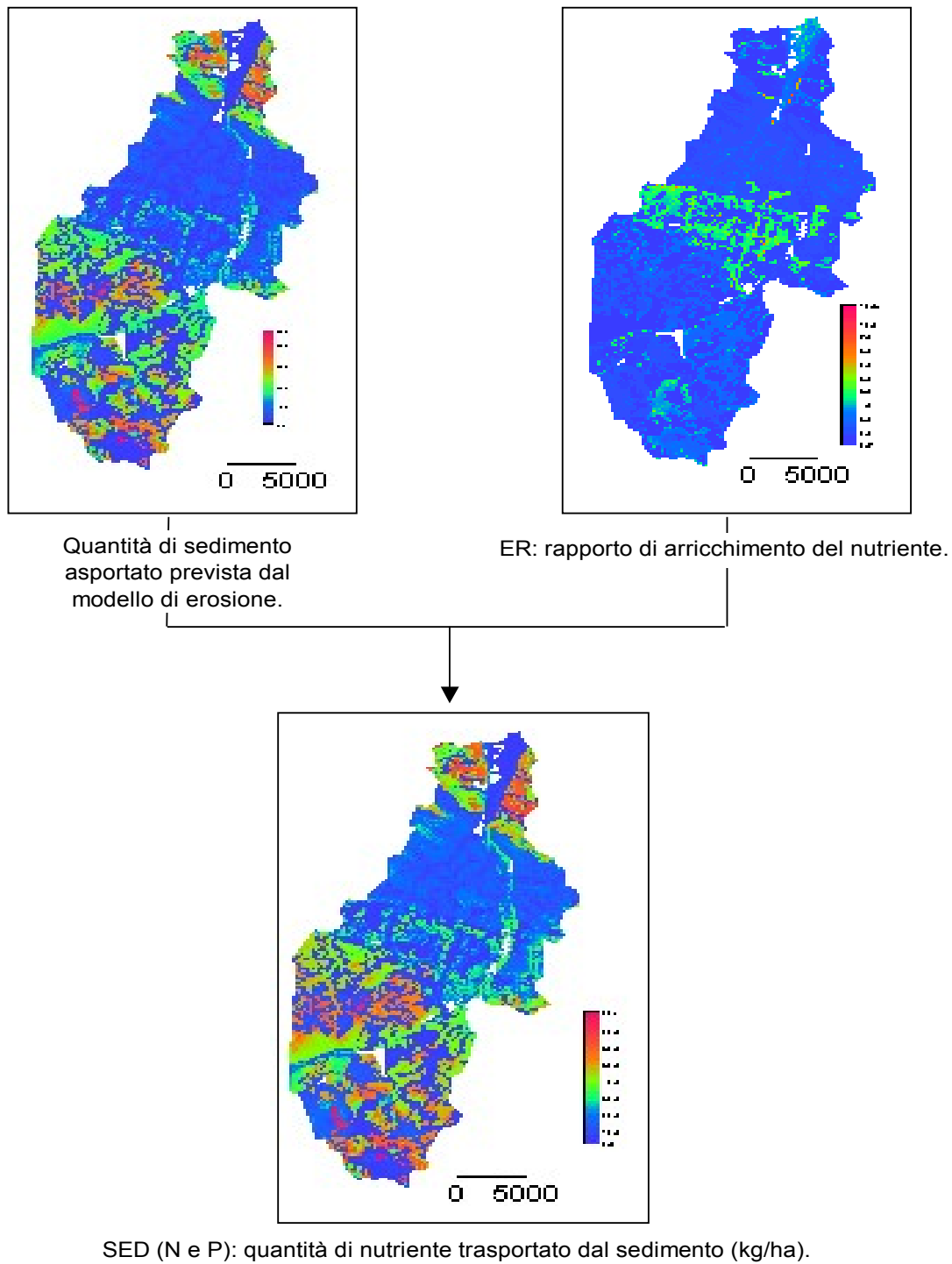


Figura 23 Percorso seguito per valutare la quantità di nutrienti trasportati dal sedimento.

Conclusioni e sviluppi futuri

In linea di principio e' possibile modellare i fenomeni legati all'idrologia di superficie, all'erosione e all'inquinamento di origine agricola diffusa, mediante modelli di notevole semplicità all'interno di un GIS di tipo raster come quello qui utilizzato. La cosa puo' essere fatta sia al livello delle grandezze (medie o totali) su base annuale, sia a quello del singolo evento. L'uso di tali modelli risulta di un certo interesse allorchè sia richiesta la pianificazione di sistemi territoriali complessi e la redazione, in particolare, di piani di risanamento delle acque, di piani di bacino e di piani di spandimento dei reflui o di sistemazione idraulico-agraria. I principali limiti dello studio condotto sono da ricercare in quanto segue:

- attendibilità dati disponibili
- il modello non considera (almeno direttamente) la struttura del suolo, ma solo la tessitura (a differenza, in questo, della più nota USLE)
- la conoscenza delle grandezze idrologiche e' solo approssimativa, e i coefficienti delle regressioni lineari utilizzate per costruire le mappe delle precipitazioni e dei giorni piovosi totali annui sono piuttosto bassi (uno è pari a 0.66, l'altro a 0.53): occorrerebbe una maggiore definizione della distribuzione del fenomeno, come potrebbe essere dedotto da una accurata analisi di tipo geostatistico, e da un numero comunque maggiore di informazioni di pioggia.

Si intende che il presente studio costituisca un prima verifica dell'applicazione del metodo, che dovrà essere integrato con approfondimenti in merito a:

(1) una migliore conoscenza degli eventi piovosi, del loro andamento nel tempo e dell'energia cinetica della pioggia da considerare nel modello; (2) una corretta stima del deflusso mediante un modello idrologico distribuito di trasformazione afflussi-deflussi, basato su un maggiore dettaglio di considerazione dei processi (infiltrazione ed evapotraspirazione) e sul concetto del metodo cinematico per il *routing* del deflusso: un tale modello puo' essere integralmente realizzato all'interno del GIS mediante procedure di delineazione delle direzioni di deflusso e calcolo distribuito dei parametri dell'infiltrazione e dell'evapotraspirazione; (3) una corretta stima del carico di sedimenti in arrivo da monte ad ogni cella e conseguentemente una piu' accurata stima del trasporto solido del deflusso.

Inoltre, è di grande interesse ricomprendere una stima dell'apporto di nutrienti alla falda, il che suggerisce di modellare in modo piu' dettagliato (p.es. con le equazioni di Horton, Philip o Green-Ampt) i fenomeni di infiltrazione. Occorre ricordare che la cornice GIS e l'approccio modellistico individuati possono essere utilizzati anche per la simulazione di singoli eventi. In particolare, se si possiede una descrizione della superficie topografica sufficientemente dettagliata, si puo' costruire una mappa della direzione di drenaggio (Burrough, 1998), con la quale si rappresenta la cinematica del deflusso e dei sedimenti all'interno del bacino. Piu' in generale, la tecnologia GIS consente di descrivere in estremo dettaglio i processi occorrenti durante l'evento piovoso; possono così essere inglobati nel modello tanti aspetti (ad esempio il *crusting* dei suoli) che difficilmente sono presenti nella modellistica corrente.

Sara' pertanto interesse di un approfondimento futuro il ricorso a una modellazione dei processi idrologici più accurata secondo quanto detto, utilizzando pero' le sole informazioni già esistenti o quelle facilmente ricavabili, nello spirito di una modellistica dai costi sostenibili per il supporto alle decisioni di pianificazione. Lo scopo ultimo di questo tipo di valutazioni, infatti, rimane quello di fornire indicazioni circa linee di azione concreta e direttamente spendibile, nei limiti degli strumenti di

piano esistenti, per la gestione dei sistemi agricoli che attualmente rappresentano una significativa fonte di inquinamento.

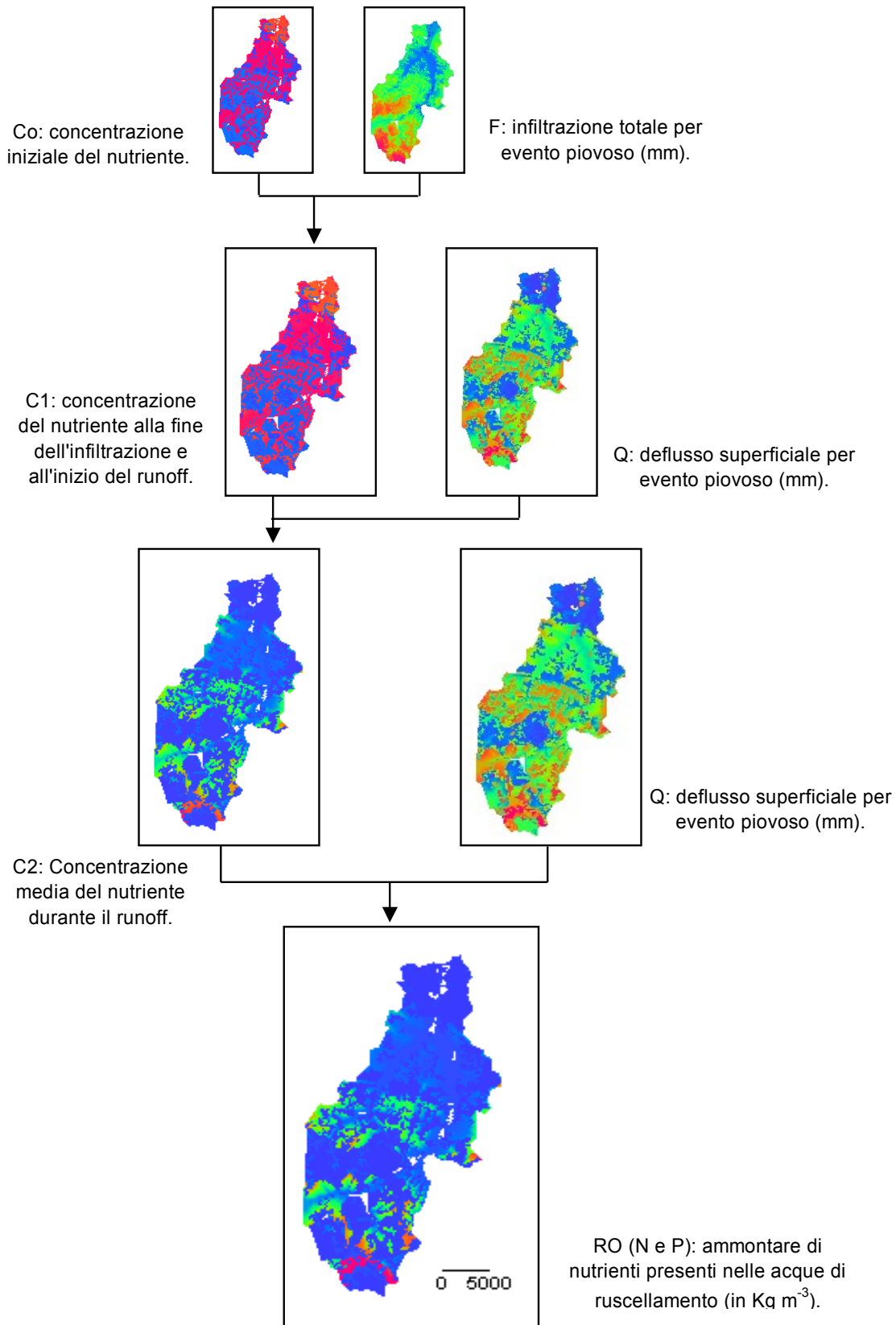
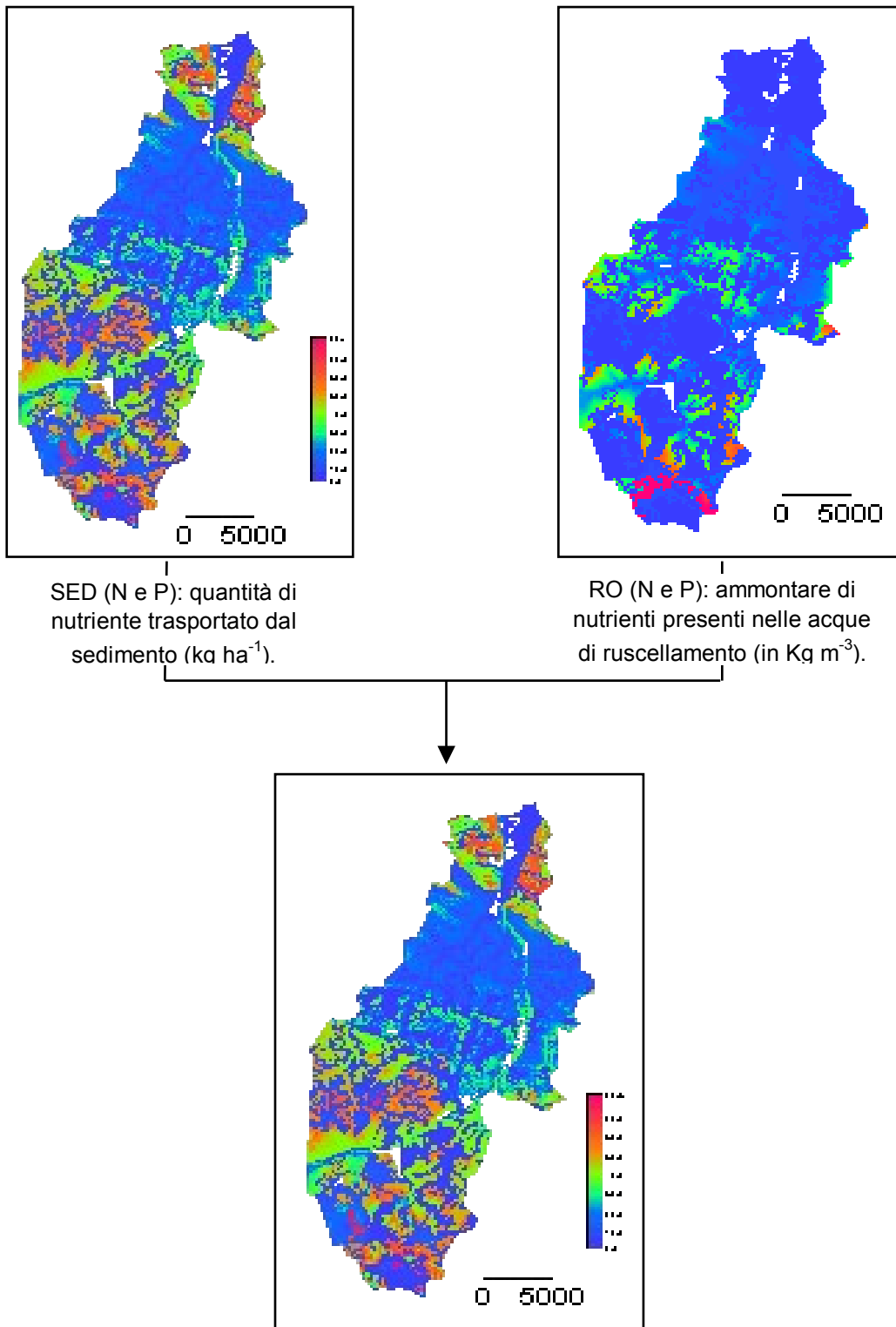


Figura 24- calcolo delle concentrazioni di N e P nel runoff



erficiale per
oso (mm).

Figura 25- calcolo dell'azoto e del fosforo totali prodotti dal bacino

4- Modellazione GIS-based dello spandimento di reflui zootecnici e dell'incidenza dell'inquinamento conseguente

Introduzione

La presente memoria illustra un'applicazione di tecniche di modellazione GIS per la caratterizzazione degli spandimenti di reflui zootecnici. Come ben noto, questi ultimi sono una delle fonti di inquinamento delle acque superficiali e sotterranee dominanti in bacini idrografici a forte vocazione agricola, e si caratterizzano per essere fonti diffuse di nutrienti ed altre sostanze, che possono essere trasportati dal ruscellamento superficiale, dall'infiltrazione nel suolo e dal moto dei sedimenti erosi verso i vari recettori (p.es. Vismara, 1992).

La normativa nazionale e comunitaria vigente (p.es. Dir. 91/676/CEE) prescrive limiti alle dosi di azoto somministrabili nelle diverse situazioni in relazione alla sensibilità dei corpi recettori, ed indicazioni a proposito sono discusse anche nel Codice di Buona Pratica Agricola (si veda ad es. Sequi, 1999) ed in numerose altre fonti informative e normative.

Le indicazioni fornite al momento, comunque, sono da ritenersi requisiti di minima, mentre alle Regioni ed agli altri Enti responsabili per la gestione del territorio viene demandato il compito di fornire criteri di maggiore dettaglio e specifici per le diverse situazioni, al fine di meglio definire le quantità massime di reflui che possono essere somministrate senza pregiudizio per la qualità delle acque e dei suoli.

L'approccio tradizionale per definire questi criteri consiste nell'effettuare un bilancio dei nutrienti, che tenga conto:

- della dose di spandimento
- della capacità di assorbimento da parte delle piante
- delle trasformazioni ad opera di batteri e altri microrganismi nel suolo
- della lisciviazione operata dal deflusso superficiale e dall'infiltrazione
- dell'adsorbimento ai sedimenti, e dei processi che si generano in relazione all'erosione (arricchimento dei sedimenti in nutriente, trasporto e reazioni chimico-fisiche che avvengono durante quest'ultimo).

Come si può intuire, la descrizione dettagliata dei vari termini del bilancio è estremamente complessa, richiede la conoscenza di un numero elevato di parametri fisici, biologici ed agronomici, e presuppone la messa a punto di:

- un modello di bilancio idrologico
- un modello di erosione e trasporto dei sedimenti
- un modello di crescita delle piante
- un modello di *uptake* del nutriente da parte delle piante
- un modello dei fenomeni chimico-fisici di degradazione nel suolo

che devono essere fra loro interconnessi in modo opportuno. Una volta messi a punto, questi modelli possono essere utilizzati per prevedere, in relazione all'andamento delle variabili in ingresso (piovosità, operazioni colturali e somministrazione di nutrienti), gli effetti finali in termini di accrescimento delle colture e perdita di nutrienti negli ecosistemi.

Esistono numerosi modelli che svolgono questo compito. Fra i primi ad essere impiegati diffusamente, merita un particolare rilievo il modello CREAMS (USDA, 1980), successivamente adattato in varie forme e con vari nomi (AgNPS, GLEAMS, SWAT). Questo modello possiede tutti i moduli sopra elencati, e risulta quindi di notevole complessità quanto a reperimento dei parametri e taratura. Altri modelli analoghi, ma destinati prevalentemente a situazioni in cui alcune componenti possono essere trascurate (p.es. l'erosione: bacini prevalentemente pianeggianti), sono stati messi a punto in Europa. Fra essi si può ricordare, ad esempio, il modello SOILN e la sua modifica dovuta al Servizio Meteorologico Regionale dell'Emilia Romagna, CRITERIA (si veda p.es. Marletto e Zinoni, 1996).

In ogni caso, permane l'aspetto fondamentale della difficoltà a conoscere l'effettivo comportamento di dettaglio delle colture nell'assorbire i nutrienti. I parametri richiesti da questi modelli sono difficilmente ricavabili in termini specifici per ogni sito, la loro acquisizione può essere costosa, e l'uso di valori di letteratura introduce un'incertezza che rende i modelli applicabili solo per valutazioni orientative, per ordini di grandezza, il che spesso non giustifica il costo di messa a punto del modello.

Per ovviare a questo tipo di problemi, anche sulla scorta di una secolare esperienza delle scienze agrarie, sono stati messi a punto criteri speditivi di valutazione dell'efficienza di rimozione dei nutrienti da parte delle colture in diverse condizioni agronomiche, pedologiche e idrologiche. Ad esempio, Tabaglio e Spallacci (1993) riportano una semplice procedura, facilmente implementabile in termini di calcoli geografici su mappe tematiche apposite, per la stima dell'efficienza di rimozione dell'azoto.

Anche in questo approccio, tuttavia, sono richieste informazioni specifiche del sito che, se certamente disponibili in aziende agricole già in attività, spesso non sono sufficientemente diffuse e non possono essere dedotte, per aree vaste di rilievo per la pianificazione territoriale, dalla cartografia tematica oggi disponibile in Italia. In particolare, risulta critica la conoscenza

dei suoli, che nel Paese pare appannaggio di pochi Uffici pedologici e si limita a rappresentazioni di piccola scala (ad es. la Regione Emilia Romagna (1994) ha pubblicato solo una mappa dei suoli in scala 1:250.000 per tutta la regione, e scale di maggiore dettaglio solo localmente e per le aree di pianura).

In definitiva, si può affermare che, mentre nella conduzione della singola azienda possono essere disponibili informazioni per ottimizzare lo spandimento e per minimizzare gli effetti ambientali – ma spesso manca la conoscenza sui possibili effetti dell'inquinamento, e quindi l'ottimizzazione avviene solo in termini produttivi -, alla scala della pianificazione territoriale poco o nulla può essere detto in termini di caratterizzazione del fenomeno dell'inquinamento da fonti zootecniche e per programmare gli interventi di risanamento.

D'altra parte, la rilevanza del fenomeno per la pianificazione è evidente: i piani di settore devono poter localizzare i "focolai" di inquinamento di questo tipo all'interno di ciascun bacino idrografico, prevedere gli interventi di depurazione diffusa (p.es. con *constructed wetlands* o *stream buffers*), ed eventualmente provvedere a negare autorizzazioni – o richiedere condizioni più restrittive- in aree ritenute sensibili. Un *esquematage* spesso utilizzato nelle analisi di pianificazione è quello di assegnare un coefficiente rappresentativo del carico inquinante teorico proveniente da un certo tipo di coltura, o più spesso da una classe di uso del suolo (p.es. Provincia di Forlì-Cesena, 1994, 1996). È evidente che questa approssimazione può essere soddisfacente solo per un giudizio di prima approssimazione, non contenendo alcuna valutazione specifica del sito, e non rappresenta che una riclassificazione, spesso arbitraria, dell'uso del suolo.

Nel seguito si propone un metodo speditivo per una prima valutazione del rischio di inquinamento dovuto a spandimento dei reflui. Vengono prese in considerazione solo alcune grandezze di tipo topografico, di copertura del suolo, di piovosità, ampiamente disponibili per tutto il territorio nazionale, e la presenza di terreni di spandimento e di allevamenti. Queste ultime due variabili sono generalmente disponibili, mentre è più difficile reperire informazioni affidabili circa l'effettiva quantità di reflui prodotti in ogni allevamento, e ancor più circa quelli somministrati in ciascun terreno. Sono infatti disponibili solo i dati di autorizzazione, che riportano quantità autorizzate strettamente compatibili con i limiti di legge, mentre nella realtà possono verificarsi comportamenti tali da variare le dosi nominali anche in modo considerevole.

La tecnica impiegata consiste nel ragionamento modellistico per indicatori anziché per variabili fisiche, a partire dalla struttura generale di un modello condiviso (nella fattispecie il modello CREAMS), che viene separato nelle sue parti "assoluta" (variabili di intensità dei fenomeni) e "comparativa" (variabili di *pattern*).

Inoltre, si affronta il problema di rappresentare correttamente l'intensità dello spandimento agronomico, studiando in termini economici la possibilità che alcuni terreni, i più vicini all'allevamento e quindi con minori costi di trasporto del refluo, siano sottoposti a dosi maggiori di quelli più lontani.

Modellazione per indicatori

Nel seguito, si riportano gli elementi essenziali del modello CREAMS interpretato in termini di indicatori. La parte del modello rilevante per il problema degli spandimenti di reflui zootecnici è quella che corrisponde al "*nutrient submodel*" (Frere *et al.*, 1980). In particolare, il sottomodello descrive:

- l'assorbimento dei nutrienti da parte delle piante
- la denitrificazione che avviene nel suolo ad opera di microrganismi
- il dilavamento dei nutrienti dovuto al runoff
- la rimozione dei nutrienti con i sedimenti erosi
- l'infiltrazione di azoto disciolto nel suolo.

Nel seguito, si farà riferimento per semplicità alle trasformazioni dell'azoto. Per il fosforo, valgono considerazioni del tutto analoghe.

A parità di condizioni di trasformazione del nutriente somministrato da parte delle piante, e nell'ipotesi di apporto da parte della pioggia nullo, la somma dell'azoto che si infila e dell'azoto che viene dilavato in superficie è data da:

$$\Delta N = DWN + RON = d \text{ POR } C_0 (1 - e^{-k_1 Q - k_2 F}) \quad (1)$$

essendo DWN l'azoto nelle acque di infiltrazione, RON l'azoto lisciviato dalle acque superficiali, d lo spessore di suolo interessato dal processo (convenzionalmente, il modello CREAMS assume di norma $d=1$ cm), POR la porosità superficiale del suolo, C_0 la concentrazione iniziale dell'azoto al suolo all'inizio della pioggia, k_1 un coefficiente di estrazione dell'azoto da parte dell'infiltrato F (mm), k_2 un coefficiente di estrazione dell'azoto da parte del runoff Q (mm). I dettagli delle equazioni di partenza, per le quali si sono mantenuti invariati i simboli, possono essere trovate in Frere *et al.*, cit., mentre l'equazione (1) può essere ricavata con semplici passaggi algebrici.

Occorre subito osservare che la (1) contiene due parametri di calibrazione del modello (k_1 e k_2) che rappresentano coefficienti di estrazione del nutriente da parte dell'infiltrato e del runoff rispettivamente, che possono essere tarati sperimentalmente solo in presenza di dati accoppiati di concentrazione nell'infiltrato e nel runoff, cosa possibile solo in condizioni sperimentali molto particolari. Inoltre, occorre assegnare la concentrazione C_0 , che è una funzione complessa

della concentrazione al termine dello spandimento e dei vari processi di trasformazione che, in tempo secco, avvengono ad opera di microrganismi e piante delle colture. Se accettiamo che il runoff e l'infiltrato siano legati alla pioggia netta P dalla relazione:

$$\begin{aligned} Q &= f P \\ F &= (1-f)P \end{aligned} \tag{2}$$

essendo f il coefficiente di deflusso, è immediato scrivere la (1) nella forma:

$$\Delta N = C_0 d \text{ POR } (1 - e^{-k_2 f P - k_1 (1-f)P}) \tag{3}$$

Da cui si ottiene la relazione di proporzionalità:

$$\Delta N = C_0 u (1 - \exp[-w P]) \tag{4}$$

in cui il coefficiente di proporzionalità w è funzione del coefficiente di deflusso e dei coefficienti di estrazione secondo la legge $w=f(k_2-k_1)+k_1$, mentre il coefficiente u può essere assunto come una costante. È possibile assumere w come costante, considerato che se $k_1=k_2$ è $w=k_1$, e che in generale i valori di k_1 e k_2 riportati in letteratura (refs.) sono fra loro abbastanza simili. Dalla (4) si desume che la pioggia, come del resto è ovvio, è un buon indicatore del nutriente potenzialmente perso per dissoluzione nelle acque. Tuttavia, cosa più interessante, la relazione tra l'indicatore e la grandezza L è su una scala non lineare, ma logaritmica. La dispersione di azoto attraverso le acque interessa soprattutto la frazione minerale del nutriente, mentre la frazione organica è generalmente soggetta al trasporto preferenziale con il sedimento eroso. Riferendoci a quest'ultimo caso, sempre in base al modello CREAMS, vale l'equazione:

$$\Delta N' = C'_0 A E^{B+1} \tag{5}$$

per la perdita di azoto organico (essendo C'_0 la concentrazione iniziale di azoto organico nel suolo, E la quantità di suolo erosa, A e B parametri di taratura per i quali valgono considerazioni analoghe a quelle per i parametri relativi alla fase acqua), che può essere scritta nella forma:

$$\Delta N' = C'_0 u' E^{w'} \tag{6}$$

essendo questa volta w' e u' delle costanti. Anche in questo caso, si vede che l'erosione E è un buon indicatore dell'azoto organico perso, secondo una relazione debolmente non lineare con esponente w'. Mettendo insieme la (4) e la (6), si ottiene:

$$\Delta N \text{ tot} = \Delta N + \Delta N' = C_0 u (1 - \exp[-w P]) + C'_0 u' E^{w'} \tag{7}$$

che consente di esprimere la perdita totale di azoto da un sito come somma pesata di due termini che rappresentano rispettivamente il vettore fluido e il vettore solido del nutriente. La (7) può essere scritta in termini di variabili dimensionali rappresentative del solo "pattern" dei due processi. Infatti, la somma può essere riscritta come:

$$\begin{aligned} \Delta N + \Delta N' &= \frac{\Delta N}{\Delta N_{\max}} \Delta N_{\max} + \frac{\Delta N'}{\Delta N'_{\max}} \Delta N'_{\max} = \Pi \Delta N_{\max} + \Pi' \Delta N'_{\max} \\ \text{ove} \\ \Pi &= \frac{C_0 u (1 - \exp(-wP))}{[C_0 u (1 - \exp(-wP))]_{\max}} = \text{norm}[C_0 (1 - \exp(-wP))] \\ \Pi' &= \frac{C'_0 u' E^{w'}}{[C'_0 u' E^{w'}]_{\max}} = \text{norm}[C'_0 E^{w'}] \end{aligned} \tag{8}$$

essendo norm l'operatore di normalizzazione a 1. Il vantaggio della (8) è nel permettere di calcolare una mappa dell'indicatore ΔN tot come somma di due mappe di pattern, dipendenti dagli indicatori di

processo fisico P ed E e dai parametri di taratura w e w' , pesati per le intensità assolute delle perdite di azoto massime attese nella zona. Quella che si evidenzia non è una semplice manipolazione algebrica, ma una modifica sostanziale del ragionamento attorno al calcolo previsionale che si intende fare: non si mira più a prevedere quantitativamente una grandezza fisica, ma a costruire un'immagine geografica della sua distribuzione, a partire da un indicatore relativamente semplice da calcolare. I pesi ΔN_{\max} e $\Delta N'_{\max}$ che compaiono nella (8) rappresentano la rilevanza assoluta del fenomeno, e possono essere assegnati anche sotto forma dimensionale, p.es. come loro rapporto, riconoscendo con valutazioni specifiche della situazione e dettate dall'esperienza che la perdita di azoto sotto forma minerale è n volte più importante di quella sotto forma organica.

In definitiva, la mappa dell'indicatore che si costruisce con la (8) fornisce una distribuzione geografica di valori che sono linearmente dipendenti dalla perdita di azoto attesa; l'indicatore dipende da due parametri di taratura, w e w' , che possono essere valutati con appositi rilievi sulle due componenti (minerale ed organica) oppure per tentativi a partire dai dati di azoto trasportato alla chiusura del bacino ed in falda. In molti casi, quando non sono disponibili dati per la taratura, si potrà procedere per tentativi a partire dai valori desumibili dalla letteratura (Menzel, 1980; Smith et al., 1980; Timmons e Holt, 1980).

Poiché comunque i parametri influenzano solo il pattern, è possibile scegliere i parametri w e w' anche per tentativi a partire dalla conoscenza delle effettive aree di maggiore rilievo per la perdita di azoto. In questo caso, si può procedere al test statistico delle ipotesi per ogni valore di w e w' assunto in base al giudizio del modellista, ad es. mediante la prova del *prediction rate* (Chung e Fabbri, 1999; Pistocchi e Neri, 2000).

Oltre ai parametri w e w' , l'indicatore richiede la valutazione dei pesi relativi della componente organica e minerale. Poiché però si tratta di grandezze ricorrenti e sulle quali esiste una certa esperienza, si può procedere a buonsenso stabilendo per ogni situazione ed ogni tipo di refluo un valore significativo dei pesi.

Per quanto riguarda l'input delle variabili fisiche, P ed E, e la concentrazione C_0 e C_0' , occorre spendere qualche ulteriore considerazione, di seguito riportata.

Valutazione delle variabili E e P

La variabile piovosità dovrebbe essere un dato del problema. Tuttavia, spesso accade che non siano disponibili coperture soddisfacenti del territorio con stazioni pluviometriche. In questo caso, è opportuno regionalizzare la variabile con tecniche statistiche, come ad esempio la regressione rispetto ad altre variabili (comunemente identificate nella quota topografia e nella distanza dal mare). In prima approssimazione, si può ritenere che la variabile P coincida con la pioggia media annua, mentre analisi più dettagliate possono portare a scegliere altre variabili rappresentative della pioggia netta. In particolare, poiché la pioggia più rilevante è quella che si verifica in eventi significativi di precipitazione (ad es. il modello AgNPS trascura la pioggia di altezza giornaliera inferiore ai 12 mm), si può ritenere che l'indicatore di pioggia sia da scegliere a livello mensile o sub-mensile, nei periodi di maggiore piovosità associati alla presenza di reflui somministrati, etc.

Per quanto riguarda la variabile E, si propone di valutarla a partire dal modello di trasporto del sedimento di Morgan, Morgan e Finney (1982). Questo modello suppone che l'erosione netta in un sito sia data dal minimo delle due grandezze D e T, essendo D la capacità di distacco del suolo ad opera della pioggia, e T la capacità di trasporto. Per quest'ultima, Julien e Simons (1985) hanno dimostrato che si può assumere una funzione generale che fa dipendere la portata solida da portata idrica di scorrimento superficiale, pendenza topografica, intensità di pioggia, e rapporto fra gli sforzi tangenziali efficace e critico per assegnato materiale, dovuti al flusso idrico sulla superficie erosa. Nel nostro caso, per semplicità, si assume la relazione adottata nel modello originale di Morgan, Morgan e Finney (1982), anche sulla scorta delle modifiche e delle indicazioni di DeJong e Riezeboos (1992):

$$T = Q^2 S C \quad (9)$$

Essendo Q il volume di runoff, S la pendenza topografica e C un fattore che tiene conto della copertura del suolo e delle pratiche agrarie di conservazione. Nella situazione più ricorrente, si può supporre in prima approssimazione che C coincida con il tasso di copertura del suolo, e quindi con la densità di vegetazione per i suoli non pavimentati. Il volume di runoff può essere assunto proporzionale all'area che da monte viene drenata in ogni punto. Se si considera poi che nei nostri climi la capacità di distacco è sempre superiore alla capacità di trasporto, si può supporre in pratica $T=E$.

Anche a proposito dell'erosione, si deve ricordare che esistono diverse formulazioni di indicatori ritenuti rappresentativi del pattern dei fenomeni alla scala del paesaggio. Fra essi ricordiamo quello proposto da Mitasova *et al.* (1996) e quello costruito da Desmet e Govers (1996) a partire dal fattore LS della tradizionale USLE (Wischmeier e Smith, 1978).

È da notare che nella formulazione per indicatori sopra riportata non si è presa in considerazione la natura del suolo. Questa semplificazione può essere ritenuta accettabile in aree omogenee, mentre non è più valida dove si riscontrano marcate differenze nelle proprietà fisiche dei suoli. In particolare, in questi ultimi casi diventa rilevante il pattern spaziale dell'erodibilità e quello delle proprietà di estrazione del nutriente durante l'infiltrazione e il runoff, che nel modello (4) sono descritte in modo semplificato con il solo coefficiente di afflusso f . In questi casi, una strategia è quella di operare la modellazione sopra delineata per sottosezione omogenee, oppure sono richiesti dati di maggiore dettaglio e lo schema semplificato qui proposto non è applicabile.

Valutazione delle concentrazioni

Le concentrazioni iniziali di azoto organico e minerale possono essere, in prima approssimazione, rappresentate per mezzo delle dosi di spandimento. Poiché queste sono legate alle concentrazioni disponibili al suolo dal coefficiente di efficienza di trasformazione dell'azoto da parte delle colture, che è un parametro strettamente legato al tipo di pianta, di suolo e ad un insieme complesso di altre variabili, è da verificare l'ipotesi di lavoro che il *pattern* spaziale delle concentrazioni sia approssimato dal pattern degli spandimenti.

Nel definire il pattern degli spandimenti, può essere sufficiente considerare la distribuzione dei terreni di spandimento, pesati per le dosi di somministrazione assentite ai sensi delle normative vigenti.

In alcuni casi, tuttavia, può essere ragionevole supporre che i terreni di spandimento più prossimi agli allevamenti abbiano dosi di spandimento effettive maggiori, e quelli più lontani dosi minori. Un semplice indicatore geografico di questo fenomeno è la distanza del terreno dall'allevamento. Possiamo ad esempio supporre che, anziché la dose nominale costante somministrata su tutti i terreni, si abbia una distribuzione lineare che rispecchia i costi di trasporto ().

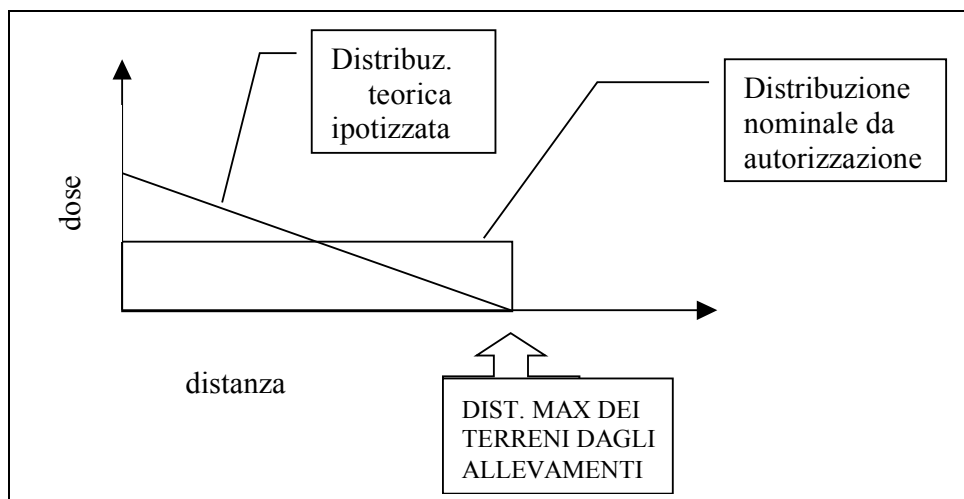


Figura 26 – una possibile ipotesi di lavoro sulla distribuzione delle dosi di spandimento.

In un'ipotesi di lavoro ancora più semplice, si può supporre che la quantità totale nominale dei reflui di ciascun allevamento destinati a spandimento sia somministrata in modo uniforme su tutta l'area disponibile per l'allevamento, entro una distanza effettiva (tenendo conto cioè dei percorsi reali, lungo il reticolo stradale o attraverso i terreni, con i relativi pesi per tenere conto delle diverse resistenze) ritenuta la massima ammissibile in termini tecnico-economici.

Un caso di studio

Si propone qui una indagine esplorativa sul caso di studio della valle del Savio, in Provincia di Forlì-Cesena. Si tratta di un bacino idrografico collinare e montano nell'Appennino Romagnolo, caratterizzato da una litologia e pedologia relativamente omogenea (dominata da formazioni marnoso-arenacee e argillose, e da suoli a granulometria fine), per il quale si può partire dall'ipotesi di omogeneità delle proprietà dei terreni in termini di erodibilità. Questa ipotesi ha chiaramente una serie di limiti che però, in questa fase esplorativa, può ritenersi accettabile. Descrizioni di maggiore dettaglio possono essere reperite in Pistocchi *et al.*, 2000.

La valle del Savio mostra un carico inquinante non trascurabile proveniente dagli insediamenti civili situati per lo più nei comuni di Bagno di Romagna, Mercato Saraceno e Cesena, ma la presenza di allevamenti zootecnici, specialmente suinicoli ed avicoli, costituisce una fonte di inquinamento assolutamente significativa. È difficile allo stato attuale stimare in termini quantitativi l'apporto di nutrienti (la forma di inquinamento più pesante provocata dagli allevamenti) per tutto il bacino, anche se sono in corso studi per la definizione di un bilancio di massa complessivo dei nutrienti dalle varie fonti. Le difficoltà di una modellazione quantitativa puntuale, in questo come nella generalità dei casi, risiede nella difficoltà di definire i parametri cinetici e chimico-fisici effettivi, *in situ*, che presiedono alla trasformazione e ripartizione dell'azoto e del fosforo fra le varie fasi del ciclo idrologico e dei sedimenti.

La sezione provinciale di Forlì-Cesena dell'Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia Romagna (ARPA) ha condotto un censimento degli allevamenti e dei relativi terreni di spandimento, autorizzati ai sensi delle leggi regionali vigenti dietro presentazione di un piano di spandimento che soddisfi i requisiti di dose di azoto inferiore ai limiti per aree sensibili (170 kg/ha anno) e meno sensibili (340 kg/ha anno). La Figura 27 mostra la distribuzione degli allevamenti suinicoli e avicoli, mentre la Figura 28 riporta la distribuzione dei terreni di spandimento autorizzati per gli stessi allevamenti. Già ad un primo esame visivo si osservano alcuni *outliers*, terreni dichiarati ai fini dello spandimento ma che si trovano a distanze considerevoli dagli allevamenti.

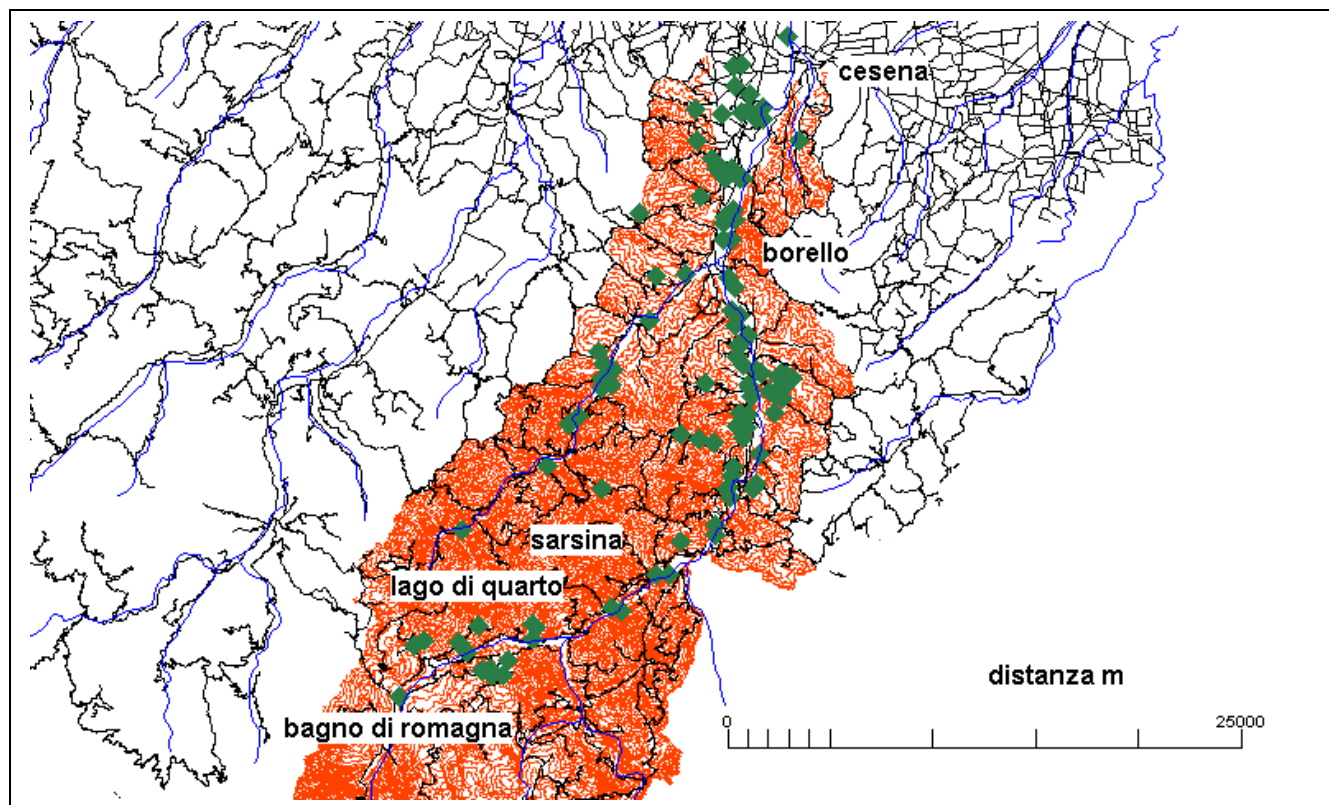


Figura 27 – localizzazione degli allevamenti suinicoli e avicoli nell'area di studio (ns. elab. dati ARPAER-FC)

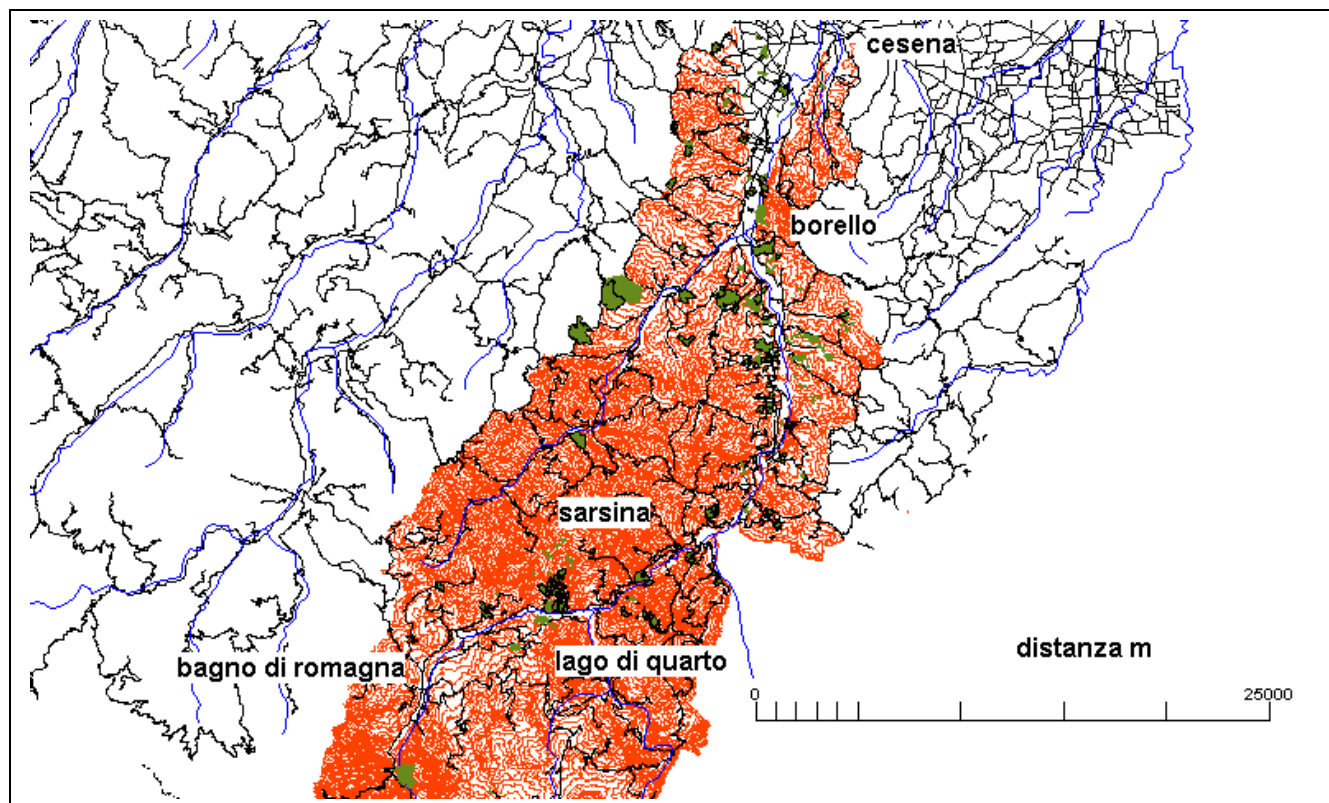


Figura 28 - localizzazione dei terreni di spandimento degli allevamenti di Figura 27 (ns. elab. dati ARPAER-FC)

Il problema degli *outliers* nell'assegnazione delle dosi di liquame e letame è assai delicato: essendo verosimile che i terreni localizzati a distanze maggiori di quanto sia economicamente vantaggioso percorrere ai fini dello spandimento siano utilizzati in misura minore rispetto alla dose dichiarata, ne risulta che il pattern di inquinamento derivante dall'applicazione delle dosi nominali non rispecchi fedelmente la realtà. Si è proceduto pertanto ad un'analisi esplorativa degli scenari di inquinamento derivanti dall'adottare una distanza massima di spandimento di 2500 e 5000 m rispettivamente, procedendo secondo il metodo di seguito esposto, implementato con procedure di calcolo geografico nell'ambiente GIS ILWIS 2.23 (ILWIS, 1997).

A partire dal reticolo stradale digitalizzato disponibile dalla Regione Emilia Romagna, si è calcolata una mappa delle resistenze al trasporto dei reflui, che assegna ai percorsi fuori dal reticolo stradale un peso di dieci volte superiore a quello dei percorsi lungo le strade. La scelta dei pesi è stata fatta a buon senso e per tentativi, non tenendo conto né delle differenze di resistenza al movimento nei diversi tipi di uso del suolo, né delle barriere invalicabili presenti al di fuori del reticolo stradale (corsi d'acqua, scarpate, boschi densi etc.). Un affinamento della mappa delle resistenze non rappresenta alcuna modifica rilevante alla procedura, e potrà essere oggetto di approfondimenti futuri.

Con questa mappa delle resistenze, è stato possibile calcolare la distanza pesata da ciascuno dei terreni di spandimento a disposizione di un allevamento suinicolo o avicolo. Allo stesso tempo, sono stati valutati i poligoni di Thiessen dei terreni di spandimento. Questi rappresentano l'area di influenza di ogni terreno, nel senso che per ogni punto all'interno di un poligono ha come terreno più vicino quello cui corrisponde il poligono stesso. Il calcolo è stato fatto considerando la distanza pesata e la distanza geometrica (in linea d'aria). I poligoni di Thiessen nei due casi risultano conseguentemente differenti

(Figura 29). Ai fini della individuazione degli allevamenti i cui scarichi finiscono nei vari terreni, possiamo costruire una mappa dei poligoni di Thiessen ritagliati in modo da escludere le distanze superiori al limite assunto per la convenienza tecnico-economica. La Figura 29 riporta due esempi di questa operazione, assumendo soglie di 5 e 2,5 km rispettivamente, anche sulla scorta delle osservazioni di Cortellini, 1993.

Si può verificare che spesso gli allevamenti si trovano al di fuori dei poligoni di Thiessen dei propri terreni (Figura 30).

Il database predisposto da ARPA contiene i dati relativi alle quantità di liquame e di letame nominali prodotti. L'assegnazione delle quantità totali è stata effettuata convenzionalmente secondo la procedura che segue:

- 1) si è sovrapposta la mappa dei poligoni di Thiessen "ritagliati" alla mappa degli allevamenti. Il poligono di Thiessen è caratterizzato dall'identificativo dell'allevamento per cui il terreno è disponibile.
- 2) Se l'identificativo del terreno coincide con l'identificativo di almeno uno degli allevamenti ricadenti nel suo poligono di Thiessen, al terreno viene assegnata la quantità di liquame e di letame corrispondente all'allevamento.
- 3) Gli allevamenti che non ricadono nel poligono di Thiessen di un terreno a loro disposizione sono considerati come fonti concentrate di inquinamento per il carico inquinante corrispondente.

La procedura, sviluppata in automatico con tecniche GIS standard, è semplificativa e porta ad un errore sistematico connesso col fatto che se un allevamento ha un terreno disponibile al di sotto della soglia di distanza scelta, ma cade nel poligono di Thiessen di un terreno di altro allevamento, esso viene considerato come fonte concentrata. Da un'analisi esplorativa dei dati e dei risultati, tuttavia, si è verificato che l'entità dell'errore descritto è modesta e si può in prima approssimazione trascurare. Questo esime dall'effettuare un'analisi di ciascun allevamento separatamente, che facilita l'applicazione della metodologia a grandi basi di dati (p.es. di livello regionale). Dall'analisi descritta, è possibile ricavare le dosi nominali di liquame e letame da assegnare a ciascuna potenziale sorgente inquinante (Figura 31). In tal modo, si possono applicare le considerazioni sopraesposte, considerando la dose di liquame come indicatore di nutrienti che si disperdono prevalentemente in fase acqua, e la dose di letame come indicatore di nutrienti rimossi per lo più con il sedimento eroso.

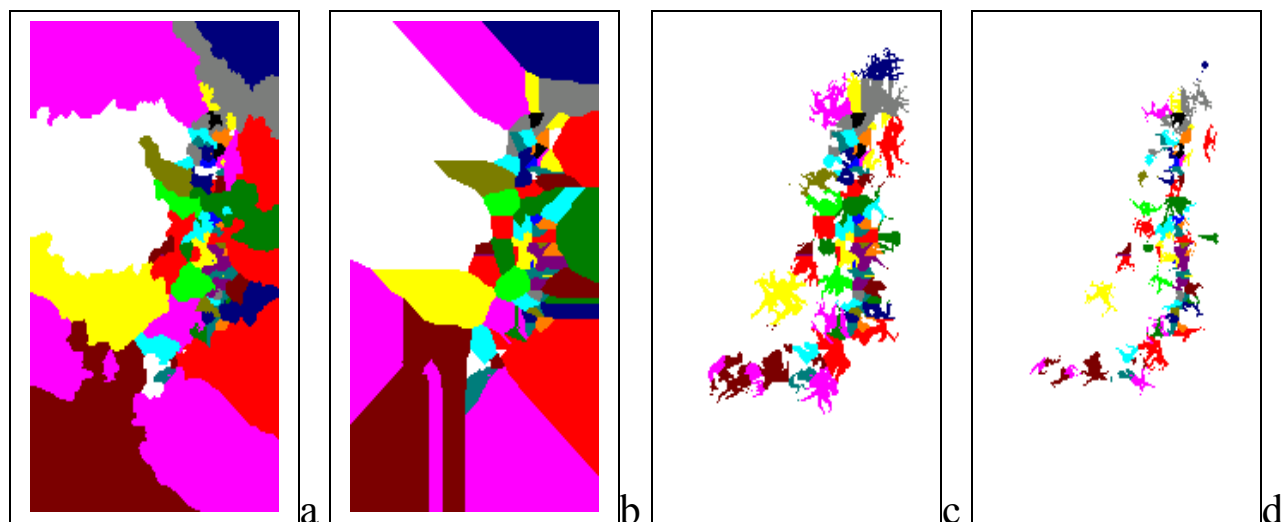


Figura 29 – poligoni di Thiessen degli allevamenti nei due casi di distanza pesata (a) e di distanza geometrica (b). I poligoni di Thiessen possono essere ritagliati escludendo distanze pesate superiori ai 5 km (c) o 2,5 km (d) dagli allevamenti.

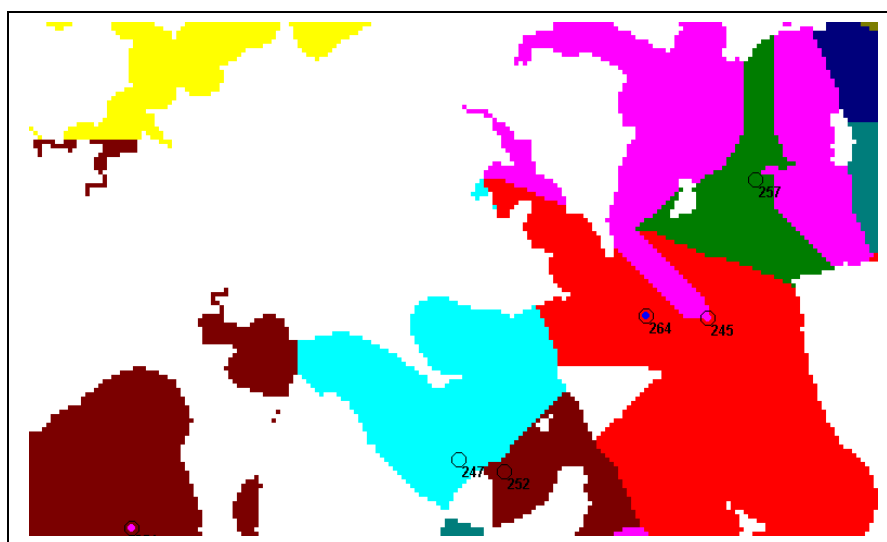


Figura 30 – poligoni di Thiessen (interrotti a 5 km) dei terreni di spandimento con sovrapposti gli allevamenti. Si nota come alcuni allevamenti hanno come terreno più vicino un terreno a loro disposizione, mentre altri hanno un terreno non a loro disposizione (ogni colore corrisponde ad un identificativo di terreno o allevamento).

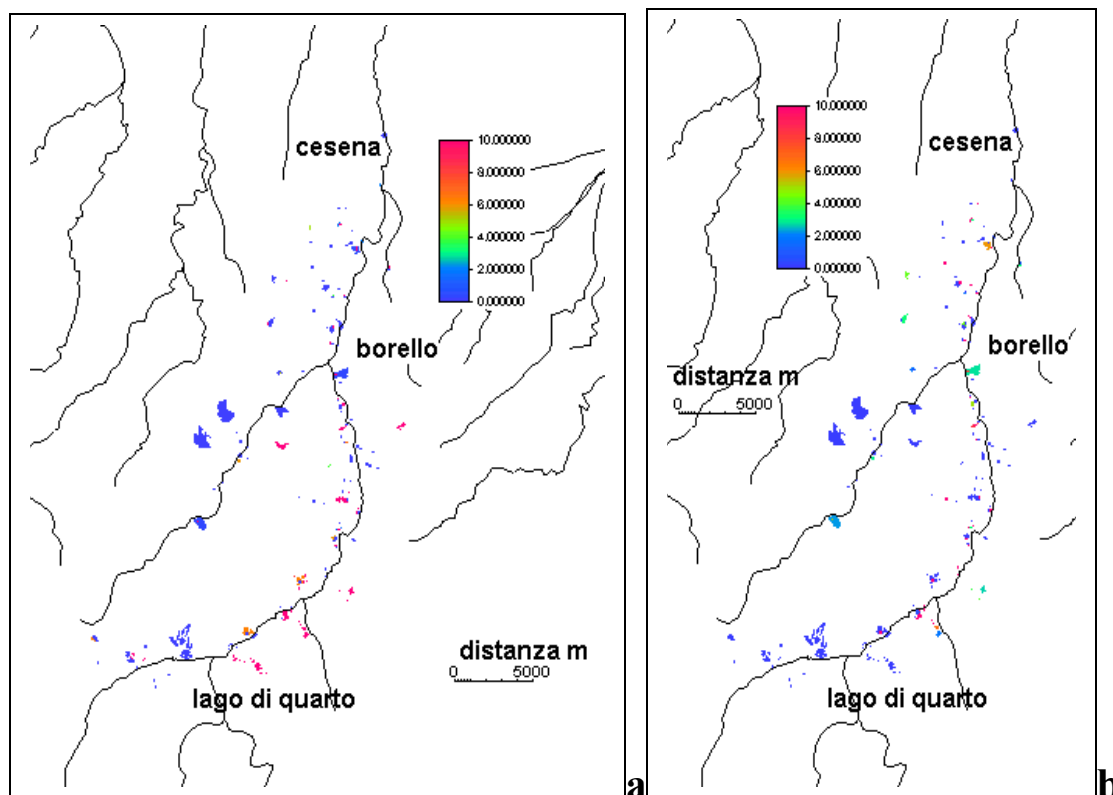


Figura 31 – mappa degli spandimenti nominali di letame (a) e liquame (b) (valori in decine di mc/ha). In figura è riportato il caso di soglia di distanza pari a 5 km.

Usando questi due indicatori come input alle equazioni (7) e (8), si può ricavare una mappatura delle aree prioritarie come fonti di inquinamento rispettivamente per erosione dei sedimenti arricchiti di azoto organico (dalla mappa delle dosi di letame) e de per lisciviazione dell'azoto minerale in fase acqua (dalla mappa delle dosi di letame). Oltre alle dosi di azoto stimato nelle due forme, che consentono di mappare un indicatore di concentrazione iniziale C_0 , si è proceduto a costruire indicatori appropriati per l'erosione e la pioggia. Nel primo caso, in base alla relazione (6), è possibile costruire la mappa dell'indicatore T di capacità di trasporto, nell'ipotesi che la variabile Q sia proporzionale all'area drenata da monte, in ciascun punto. Questo equivale a supporre che il coefficiente di deflusso sia lo stesso in ogni sottoarea del bacino, ed ovviamente è una prima e grossolana ipotesi di lavoro. In fasi successive, si possono introdurre coefficienti di deflusso diversificati sull'area. Dettagli sulla costruzione dell'indicatore Q e sulla sua approssimazione con l'area drenata si possono reperire in Burrough e McDonnel, 1998. A partire dal modello digitale del terreno (da cui si calcolano i parametri A , area drenata, e S , pendenza, con procedure standard; si veda p.es. Gorte, 1995) e dai dati sulla copertura del suolo (da cui il parametro C), si ricava così la variabile T . Il parametro C , che rappresenta in prima approssimazione il complemento a 1 del grado di copertura del suolo, è stato valutato a partire dall'indice di vegetazione NDVI (p.es. ILWIS, 1997) calcolato su immagini TM Landsat disponibili della zona, risalenti al 1992 e fornite dalla Regione Emilia Romagna. Come ben noto, l'NDVI è un indice di riflettività che rappresenta la densità della vegetazione, e l'indice NDVI normalizzato fra 0 e 1 può essere assunto come indicatore della percentuale di copertura del suolo dovuta alla vegetazione. Si è posto così $C=1-NDVI$, il che implica che per $C=1$ l'effetto di erosione è completamente annullato dalla copertura vegetale. In successivi approfondimenti, potranno essere introdotti nel calcolo tutti i criteri che determinano il fattore C proposto da Morgan, Morgan e Finney (e coincidente con il C-factor della USLE: Wischmeier e Smith, 1978). Inoltre, potranno essere

sviluppate le considerazioni di maggiore dettaglio suggerite da USDA (1997) in particolare per quanto attiene alla variabilità stagionale del fattore in relazione alla variazione delle colture. Noto l'indicatore T , si può porre $E=T/T_{max}$, essendo T_{max} il valore massimo di T sull'area, e questa posizione non produce deformazioni nella mappa finale del fattore di pattern Π' che rappresenta il termine erosivo normalizzato secondo le eq.ni (8).

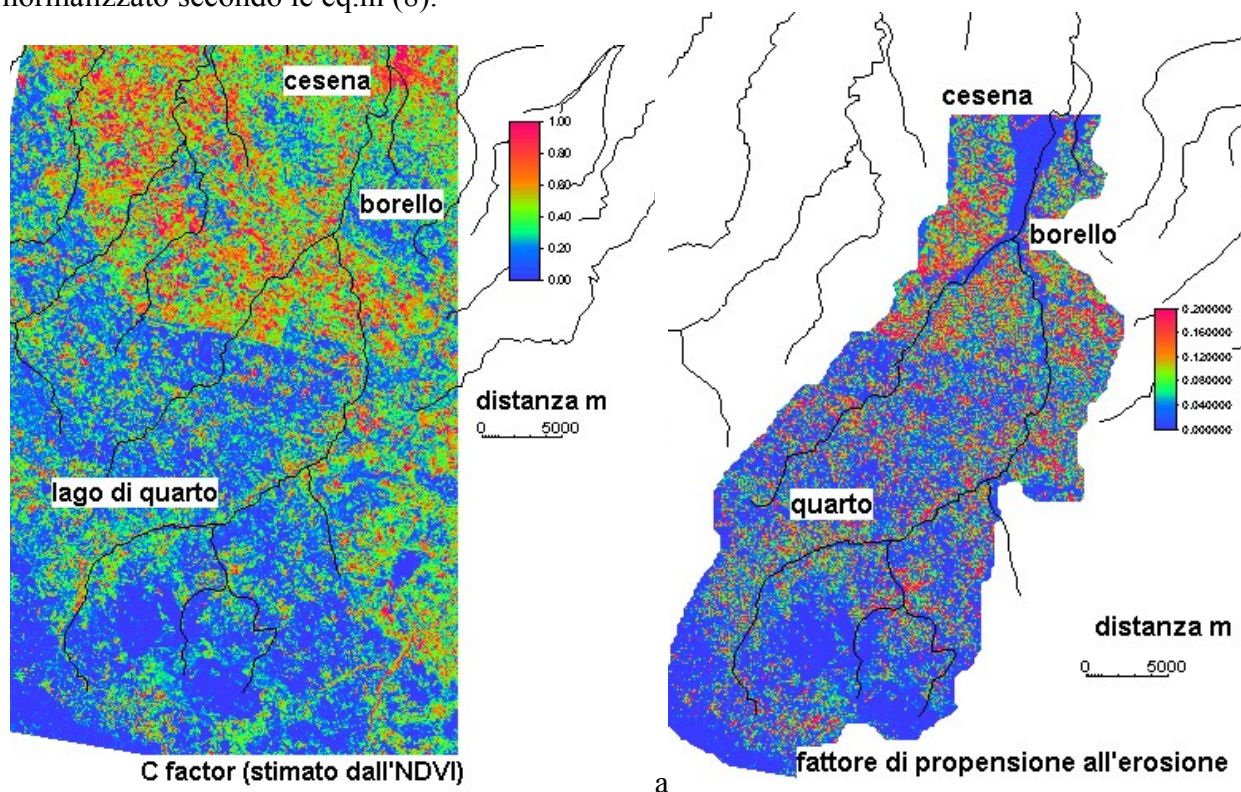


Figura 32 – fattori relativi all'erosione (normalizzati): a- fattore di copertura ottenuto dall'indice NDVI; b- mappa del fattore T secondo l'eq. (9)

La pioggia annua, nella formulazione qui adottata, richiede invece di essere stimata esplicitamente in modo quantitativo, a causa della non linearità delle relazioni in cui è introdotta e quindi per la necessità di normalizzare valori assoluti nelle eq.ni (8). Ai fini di ottenere una mappa della pioggia si sono sfruttate le relazioni empiriche di regressione della pioggia totale annua sui fattori distanza dalla costa e quota topografica, ricavati per l'area in esame in precedenti studi (Pistocchi e Neri, 2000) ai quali si rimanda per ogni ulteriore dettaglio. Sono così state calcolate le mappe mostrate in Figura 32(b) e Figura 33.

Nella presente applicazione metodologica, in assenza di rilievi sperimentali, si sono usati i valori di letteratura per i parametri del modello CREAMS, e in particolare $B=-0.2$, $k_1=k_2=0.03$, e inoltre si è fissato il coefficiente di infiltrazione al valore di tentativo di 0.5 (che bene approssima i coefficienti di deflusso medi annui registrati dal Servizio Idrografico e Mareografico Italiano negli Annali Idrologici per il bacino del Savio). Introducendo questi valori e le mappe dei parametri E e P nelle eq.ni (8) è stato possibile calcolare la mappa delle perdite di azoto nelle due forme (per erosione/trasporto con il sedimento e per lisciviazione). In pratica, ogni terreno di spandimento ottiene un punteggio convenzionale che è proporzionale, secondo il modello, alla perdita attesa di nutriente. Il valore del punteggio, però, è di per sé insignificante. Se si effettua invece un ranking delle aree secondo il punteggio decrescente, e le si divide in classi di ugual area (nel caso di studio si sono usate 20 classi ognuna coprente un 5% dell'area in ordine di pericolosità decrescente), si ottiene una mappa delle aree

richiedenti attenzione prioritaria in quanto fonti di inquinamento. Questo risultato, per le due modalità di trasporto del nutriente, è mostrato in Figura 34.

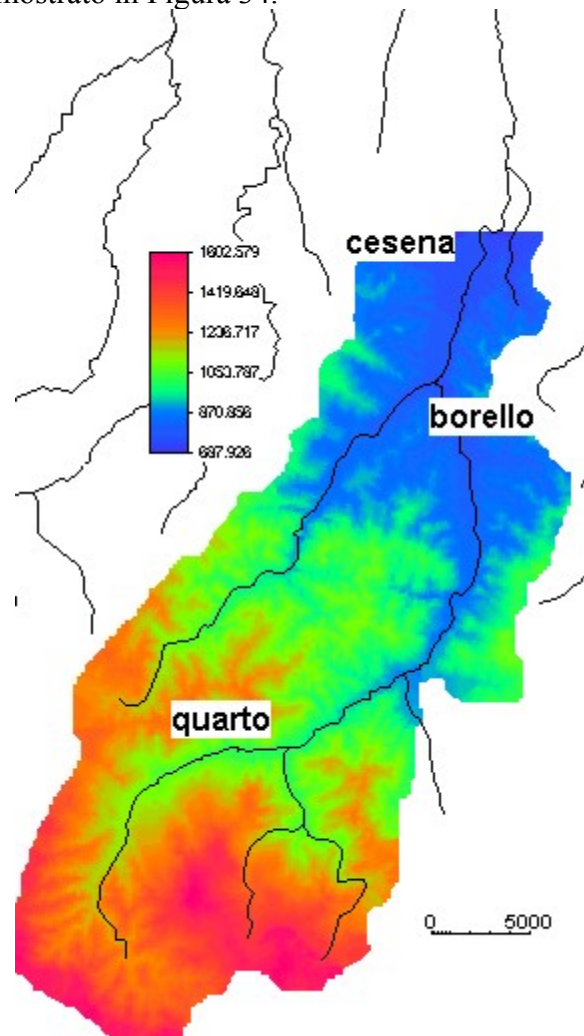


Figura 33 – mappa della piovosità, ottenuta per regressione multipla dei dati rispetto a distanza dalla costa e quota topografica.

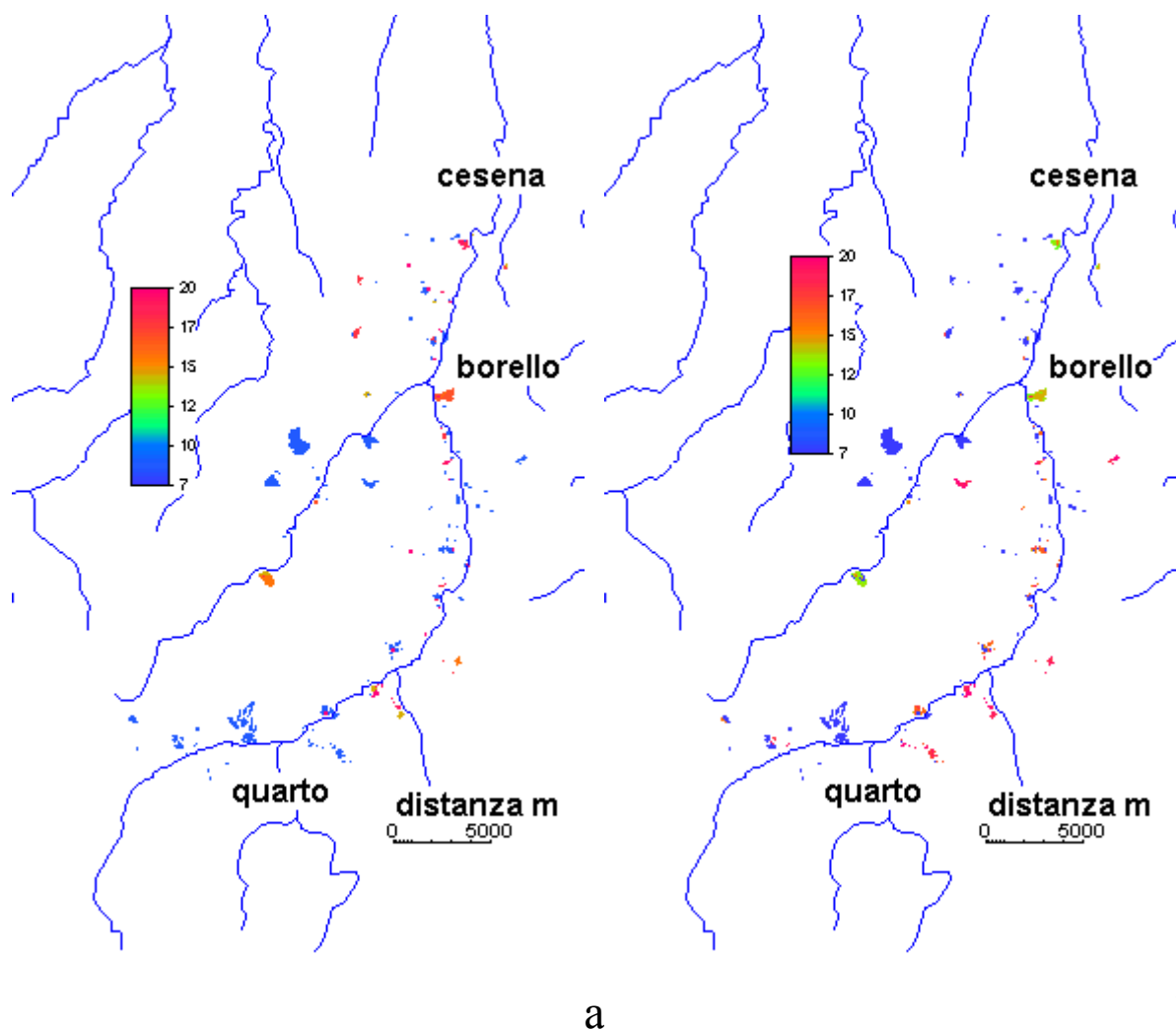


Figura 34 – mappa dei siti prioritari per inquinamento da reflui zootecnici: a – azoto da liquami; b – azoto da letami

Conclusioni e linee future di ricerca

Nel presente lavoro si è mostrato come sia possibile capitalizzare sulla descrizione concettuale dei fenomeni e sulla valutazione degli aspetti comparativi o di pattern spaziale per produrre una mappa di pericolosità relativa delle diverse fonti di inquinamento diffuso. Se il modello qui proposto sia efficace nel cogliere gli aspetti essenziali del fenomeno, e se sia possibile effettivamente utilizzarlo per migliorare la pianificazione del risanamento dei corpi idrici, sarà oggetto di approfondimenti futuri. In questa sede, ci si limita ad osservare che la descrizione comparativa, e il pieno sfruttamento degli strumenti GIS per la descrizione dei fenomeni in forma distribuita, consentono di mettere a punto sistemi di supporto alle decisioni che paiono di un certo interesse per lo sviluppo di piani di bacino e di strategie di controllo e monitoraggio degli spandimenti di reflui zootecnici. Ulteriori approfondimenti richiedono alcuni aspetti trattati in via speditiva e con ipotesi semplicistiche nel presente lavoro, fra cui sottolineiamo:

- la rilevanza – qui trascurata- dei singoli eventi di piena in luogo delle medie annuali per quanto riguarda i fenomeni di lisciviazione e di erosione;

- l'approssimativa ripartizione dei flussi di nutriente fra trasporto con il sedimento e lisciviazione in fase liquida, qui effettuata distinguendo semplicemente liquami e letami
- i criteri esplorativi per l'attribuzione delle dosi ai terreni; questi criteri dovrebbero essere sostituiti da una più oggettiva mappatura delle concentrazioni osservate sui terreni di spandimento, con la quale effettuare poi la valutazione qui proposta, con le opportune modifiche.

In definitiva, le tecniche di analisi qui discusse devono essere oggi classificate come tecniche esplorative, il cui utile impiego, grazie alla facilità di implementazione e alla bassa richiesta di dati in ingresso, è limitato alle fasi di mappatura e valutazione delle priorità ad un livello regionale di pianificazione, e non permette di escludere il ricorso a modelli e metodi più complessi e sofisticati in approfondimenti successivi locali.

Capitolo 7 – La modellazione di fenomeni le cui leggi non sono note: *case studies*

1- L'uso di tecniche di modellazione previsionale per l'utilizzazione ottimale dei database spazialmente distribuiti: applicazione di un sistema esperto nel campo della mappatura del rischio idrogeologico

Si riporta nel seguito uno studio condotto in collaborazione fra l'Autore e le dott.se L.Luzi (CNR-IRRS Milano) e P.Napolitano (Studio ACTA, Napoli), che è attualmente in corso di revisione da parte di referors della rivista internazionale *Environmental Geology*.

Introduction and general issues

In the last few years, a great development has been seen in the setup of spatial databases by regional land planning authorities all over EU. However, it seems that many databases are still ineffective for decision support, and the use of available data is very often quite naive. In particular, little consciousness about the modeling capabilities of GIS (i.e. capabilities to make predictions for rational decision support) is spread outside the academic or research institutes (e.g., Campbell and Masser, 1995). Very few local government institutions make use of predictive models as effective support to every day decisions.

Geographical information systems bring a great capability for detailed spatial features modeling, and most local administrations have now GIS technologies readily available. Can this great information potential be turned into an everyday life usage of more powerful methods by which to have an insight in physical phenomena?

The necessity of participative planning and goal sharing, when deciding about common resources, has brought to the attention of geoscientists the importance of giving an explanation about how they make the evaluations to be used in planning and decision support. Guzzetti et al. (2000) stress the role of geoscientific maps in the addressment of policy making and land use planning. According to the authors, a major role of hazard maps is to provide policy makers with a correct perspective of the problem, oriented to the definition of regulations for correct land exploitation.

Improved ease of communication about scientific results via graphical devices and products is perhaps inducing a deeper consciousness by stakeholders that there are reasons for a choice in planning, and that defending a goal needs to justify it on a shareable basis.

Predictive models, based on causal relationships between underlying physical phenomena, are thoroughly in use among hydrologists, geoscientists, environmental analysts and engineers, for applications in the field of natural risk assessment, natural resource management, pollution prevention and reclamation, and EIA. In the case of natural hazards such as landslides, however, it seems strikingly difficult to make reliable causal models applicable at a regional scale. Carrara et al. (1998) discuss the main causes of this difficulty, invoking both model and data limitations. Differently from other risk management contexts, little agreement has been reached about which quantitative models to use (Guzzetti et al., 2000).

The traditional approach to landslide hazard mapping relies on the expertise of geologists and geomorphologists to detect (by visual inspection of field or remotely observations) the features accounting for the occurrence of landslides. This brings to appropriate recognition of past occurrences,

but cannot support any prediction apart from the expert's opinion on the morphology and geotechnical behavior of different sites and formations.

In more recent years, geotechnical model-based zonation has been proposed (e.g. Van Westen, 1993; Liener and Kienholz, 1998). Computations based on geotechnical models or physically based index overlaying methods, however, are often not reliable although they express shareable concepts, due to lacking or low quality data.

Although in many cases simple mapping of observed phenomena allows to achieve good knowledge about land use limitations, it appears that a prediction made through "objective" models might be of interest, with limited arbitrary choices by the analyst, especially in the following cases:

- when social conflicts involved by planning assume relevant importance;
- when phenomena are not easily observable;
- when detailed mapping of the phenomena over the whole area of interest is too expensive, and a 'screening level' modeling is required for the identification of areas calling for further insights.

Generally speaking, the modeling process parallels decision making and works as a negotiation basis (Dutton and Kraemer, 1985). The rational justification of the hazard map, through methods in which the specialist's expertise is used in a reproducible modeling methodology, may contribute to the social construction of knowledge, i.e. the sharing of sound decision criteria between administrators, local communities and scientists (e.g. Innes, 1995).

This reason leads to seek for the use of probabilistic approaches to prediction. In this type of approach, prior knowledge of landslide occurrences is used to full extent to make probabilistic predictions via well-established parametric, fuzzy or stochastic map overlaying methods.

In the last years, many approaches of this kind have been explored (Carrara, 1983; Carrara et al., 1995; Luzi et al. 1998; Massari and Atkinson, 1998).

All these methods have been extensively compared using sensitivity analysis or the performance of different methods on the same case study (Kojima et al., 1998; van Westen, 1993). A major difficulty with these applications is about the comparison of different maps (Guzzetti et al., 2000).

Chung and Fabbri (1993) proposed a framework approach to the problem, referred to as the favourability function mapping. In their work, the authors show how a wide range of probabilistic, fuzzy and evidential functions can be used to detect the most favourable areas for the occurrence of phenomena, such as landslides or mineral deposits. These techniques allow inference calibration and validation, a feature that is common to other approaches as the neural and bayesian networks (Duda et al., 1976; Stassopoulou et al., 1998), and to mathematical modeling in general. In this way, a unique criterion for the comparison of different prediction maps is easily found in what Chung and Fabbri (1999) call the prediction rate, i.e. a measure of the goodness of the model's validation, as explained below. Applications of favourability functions, as the one presented here, aim at producing maps that contain at least as much of correct predictions as an expert scientist might express using rule-based judgement deriving from field experience. Of course it is necessary that experts follow from close the modeling, since many choices requiring deep knowledge and understanding of the phenomena are required during evaluation. In addition, spurious effects may arise due to mismatching the probabilistic hypotheses invoked for the variables, and to lacking and unreliable data (Guzzetti et al., 2000). Anyhow, using quantitative techniques, calibration and validation of the models supports transparency and rationality of the prediction. The favourability function modeling approach has been recently applied in some case studies with ad hoc surveying (Fabbri et al., 1998; Remondo et al., 1998).

The aim of this paper is to discuss the applicability of favourability function modeling in producing a hazard map for landslide occurrences using standard currently available databases, and to check how this method might improve the use of information in an existing database, compared with other techniques (like frequency mapping of landslides per lithological unit, or simple landslide inventory).

It is explained how favourability function modeling can be used as a conceptual scheme for the structuring of databases: data collection is strictly dependent on the theoretical framework in which information will be used.

Theoretical background

Many authors (Chung and Fabbri, 1993; Bonham Carter, 1994; Harris and Pan, 1999) have shown the use of numerical techniques to link the occurrence of a phenomenon of interest to the local value of some attributes deemed relevant for the phenomenon itself. The attributes are considered as evidence factors of the event, in the sense that the presence of each relevant attribute corresponds to a degree of “probability”, “possibility” or “likelihood” to find the event (Chung and Fabbri, 1993).

Suppose that A is the domain on which the analysis is performed, and F is the phenomenon of which the occurrence was checked. If r data layers are available, for each one m_k classes of attributes, $k=1, \dots, r$, are considered, a partition function can be defined for each data layer:

$$V_k: A \Rightarrow \{1, 2, \dots, m_k\}$$

That assigns each pixel in A one of the classes in layer k. Furthermore, another function can be defined for each layer:

$$R_k: \{1, 2, \dots, m_k\} \Rightarrow [a, b]$$

which maps the occurrence of each layer in a value falling inside the interval [a,b], where a and b depend on further assumptions made by the analyst (as it will be shown later). This value represents the degree of favourability, that is a measure of how reliable is the assumption that the phenomenon occurs once a particular class of the attribute is met.

The favourability function can then be defined as the functional composition of V and R for each data layer, i.e.

$$F_k = R_k \circ V_k$$

The interval extremes a, b must be assumed by the analyst according to his interpretation of the ‘reliability’: if it is considered that reliability is the same as ‘probability’, then $a=0$, $b=1$. If the measure of reliability is set equal to the certainty factor (Shortliffe and Buchanan, 1975; Heckermann, 1986), then $a=-1$, $b=1$. If a different technique is chosen, other values might be necessary.

The different interpretations of the favourability functions as used in the present work are reported.

If the favourability is assumed to coincide with the probability that a certain phenomenon F occurs given the occurrence of a set of attribute classes E_1, \dots, E_n , then according to Bayes’ theorem, under the hypothesis that E_1, \dots, E_n are conditionally independent, it can be written (Chung and Fabbri, 1999):

$$\begin{aligned} \text{Probability}\{F \text{ occurs given } E_1, \dots, E_n\} = \\ = P\{F / E_1 \dots E_n\} = (pps_1 * \dots * pps_n) * (ppa_1 * \dots * ppa_n) / (psF)^{n-1} * pps_{1 \text{ to } n} \end{aligned}$$

where:

pps_i, $i=1, \dots, n$ is the prior probability that a certain attribute class occurs, and can be estimated by the percentage of the total area where an attribute class occurs.

pps_{1 to n} is the prior joint probability of the attribute classes considered. This can be assumed as the percentage of the total area where all the classes occur together.

ppa_i, $i=1, \dots, n$ is the probability of finding F given the occurrence of the attribute class E_i . This can be computed according to the formula: $Ppa_i = 1 - (1 - (area_i)^{-1})^{nb(i)}$ (Chung and Fabbri, 1993) where $area_i$ is the area where class i is met, and $nb(i)$ is the area of class i where F is also met.

psF is the prior probability of F all over the area, and can be evaluated as the percentage of the total area where F is met.

According to this rule, a map can be computed for each combination of the attribute classes occurring. This can be done through a routine cross operation within the raster GIS used.

If certainty factors are used, then rules change according to the following:

the certainty factor for an attribute class can be defined as:

$$CF_I = [P\{F/E_I\} - P\{F\}] / [P\{F/E_I\}(1 - P\{F\})] \text{ if } P\{F/E_I\} > P\{F\}$$

$$CF_I = [P\{F/E_I\} - P\{F\}] / [(1 - P\{F/E_I\}) P\{F\}] \text{ if } P\{F/E_I\} < P\{F\}$$

with $I=1, \dots$, number of thematic data classes of the causal factors

for 2 classes, the certainty factor is computed according to the following rules:

$$CF_{1+2} = CF_1 + CF_2 - (CF_1 * CF_2), \text{ if both } CF_1 \text{ and } CF_2 \text{ are nonnegative}$$

$$CF_{1+2} = CF_1 + CF_2 / \{1 - \min(|CF_1|, |CF_2|)\}, \text{ if } CF_1 \text{ and } CF_2 \text{ have opposite sign}$$

$$CF_{1+2} = CF_1 + CF_2 + (CF_1 * CF_2), \text{ if both } CF_1 \text{ and } CF_2 \text{ are negative}$$

the procedure applies iteratively for more maps by computing first the $CF_{1+2}=CF_{12}$, then $CF_{13}=CF_{12+3}$ and so on.

As the last method, fuzzy sets theory (Zadeh, 1965) was applied by calculating the ‘fuzzy sum’, ‘fuzzy product’, ‘fuzzy and’, ‘fuzzy or’ and ‘fuzzy gamma function’. The membership functions were assumed to be equal to the estimates of the probability of finding F given the class E_I (Zadeh, 1968), i.e. ppa_i , being:

$$\text{‘fuzzy and’} = \min(ppa_i), I=1, \dots, n$$

$$\text{‘fuzzy or’} = \max(ppa_i), I=1, \dots, n$$

$$\text{‘fuzzy product’} = \prod(ppa_i), I=1, \dots, n$$

$$\text{‘fuzzy sum’} = 1 - \prod(1 - ppa_i), I=1, \dots, n$$

$$\text{‘fuzzy gamma operation’} = (\text{fuzzy sum})^\gamma (\text{fuzzy product})^{1-\gamma}$$

In this way, rules for map overlaying are defined so that the analyst can evaluate the influence of the different occurrences in attribute data all over the study area, in order to detect the favourability of sites for the occurrence of further phenomena. The results of these calculations are numbers expressing indexes of favourability with respect to the considered phenomenon. It must be noticed that, in addition to the described ones, many other different techniques can be used, as the weights of evidence (e.g. Cheng and Agterberg, 1999), the belief functions (Shafer, 1976), and linear regression over probabilities (Chung et al., 1995)

Chung and Fabbri (1993) also suggest a technique to cope with lacking information on evidence.

It must be noticed that prior probability psF needs to be estimated for the computation of certainty factors, but its use in absolute terms is meaningless since it is practically impossible to know the probability of future landslide occurrences. The prediction score must then be taken as an indicator of favourability to the phenomenon in general terms, and not as a numerical estimate of the hazard.

Application

The area taken for the case study is the Savio river catchment, province of Cesena, Emilia Romagna, in northern Italy (Figura 1).

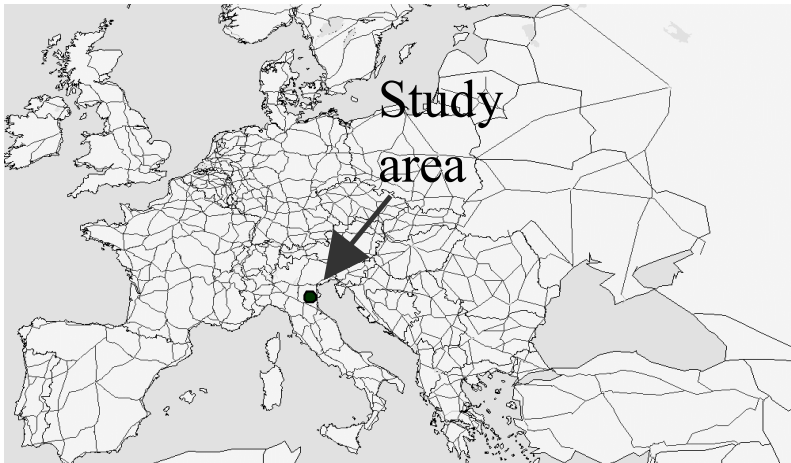


Figura 1- location of the area

A geological outline of the area indicates a basically sedimentary basin with the dominance of marls and sandstones (the “Marnoso Arenacea Romagnola” formation). More in detail, the three main following geological formations can be distinguished:

- (1) “Formazione marnoso-arenacea romagnola” (*Serravallian-Tortonian age*), made of arenaceous and pelitic gray turbidites, the main geological formation, laying on both sides of the main stream.
- (2) “Formazione gessoso-solfifera” (*Medium Messinian*), made of microcrystalline gypsum interbedded with marly-clayey and sandy layers, and of basal sulphur-bearing limestone.
- (3) “Formazione a colombacci” (*Medium-sup Messinian*), made of three facies, a pelitic, an arenaceous and a conglomeratic one, all containing limestone horizons.

Also, the “Marne di Verghereto” Formation is present, made of gray silty marls; the “Arenarie del M. Comero” Formation (sup. *Eocene*), and outcrops of sandstones and pliocenic clays, and chaotic “Argille Varicolori” clays.

The area is covered by a large number of landslides, occurring in most cases as slide type movements or debris flows, in different geological units. Furthermore, areas with rock falls and block translational movements are present but they were not analysed. The data used in the research was made available by the Regione Emilia Romagna Geological Survey (Regione Emilia Romagna, 1991).

The database used for the case study consists of thematic layers concerning:

- structural lineaments (faults, synclines and anticlines), scale 1: 50,000
- lithological units, scale 1:50,000
- land cover obtained from TM Landsat imagery according to the CORINE European Project Guidelines (Briggs and Martin, 1988), scale 1: 50,000
- digital terrain model (DTM) obtained from 50-m equidistance contour interpolation
- rainfall measurements at seven gauge stations over the area (Regione Emilia Romagna, 1996)
- digitized hydrographic network, scale 1: 10,000

It must be underlined that the data base has a very poor resolution, and in addition data are very inhomogeneous in scale. One should think that, in particular, topographic information is clearly too coarse when compared with average landslide dimension, thus becoming often not representative of actual sliding kinematics. It must be recalled that the aim of the study was to evaluate the predictive capability (in the sense defined above) of a real world database, rather than producing reliable hazard maps, and thus the best available information has been used without any further field investigation and

data capturing. As it will be highlighted in the following, the results of this evaluation give more input for database improvement, than prediction for land planning.

From the DTM a slope and an aspect map have been calculated and classified using a constant value range slicing interval.

A distance from the geological lineaments was also calculated, in order to appreciate the possible effect of structural disturbance on slope stability. The results were gridded on a raster map.

Rainfall data was analyzed to detect a relationship between elevation and annual rainfall amount. A regression equation for the two variables was found to be $y = 0,7086x + 708,19$ ($R^2=0.66$), x being elevation above sea level (m) and y the total mean annual rainfall over a more than 30 years long time series (mm/yr) (Regione Emilia Romagna, 1996). The equation was later used to obtain a continuous rainfall map, thus precisely reflecting the DTM: this is both a rainfall indicator, and an indicator of the relief potential energy.

It must be noticed that the regression curve is quite poorly fitting the rain gauge data, and further analysis is required in order to better delineate the actual rainfall distribution over the region.

Albeit a conceptual distinction can be made between factors needed for landslide occurrence, and factors just triggering landslides in presence of other necessary features, it was assumed that all these data layers be *a priori* meaningful.

As for the available landslide occurrence data, it has been possible to rely on the land instability inventory of the Regione Emilia Romagna (1991). It is important to point out that the database made available was structured since long time for GIS analysis (Artioli *et al.*, 1997). Moreover, data density and distribution was good enough to allow thinking about a statistically representative landslide population. It can be argued, in fact, that when the training data set for bayesian procedures is not big enough (and randomized enough) to be regarded as a realization of a regionalized random variable, probabilistic integration modeling is meaningless under the point of view of quantitative estimates, and in this case expert-judged *a priori* overall and data class-specific probabilities of landslides are needed. It is furthermore important to choose the type and the age of landslides to be used as training set, that need to be homogeneous. The analysis was performed on the “earth flow” and “slumped earth flow” type landslides (Varnes, 1958) that most frequently occurred in the considered area. In the present study, only the ones mapped as active were used.

The regional land instability inventory also considers rockfalls, block sliding, and potentially unstable areas, but these were not included in the analysis. Figura 2 shows the data layers used for the analysis.

All thematic data considered have in principle the possibility of mutual association. This would lead to a computational effort that might result useless due to considering redundant information. An association test has been performed over the seven themes used for the analysis (i.e. rainfall map, lithology, land cover, slope, aspect, distance to hydrographic network and distance from the lineaments). The seven themes have been classified into discrete legends and tested also with respect to the map of active landslides.

Four association indexes were calculated for each map pair (Bonham Carter, 1994; Press, 1986):

- the Chi-Square index
- the Cramers index
- the contingency index
- the joint information uncertainty score.

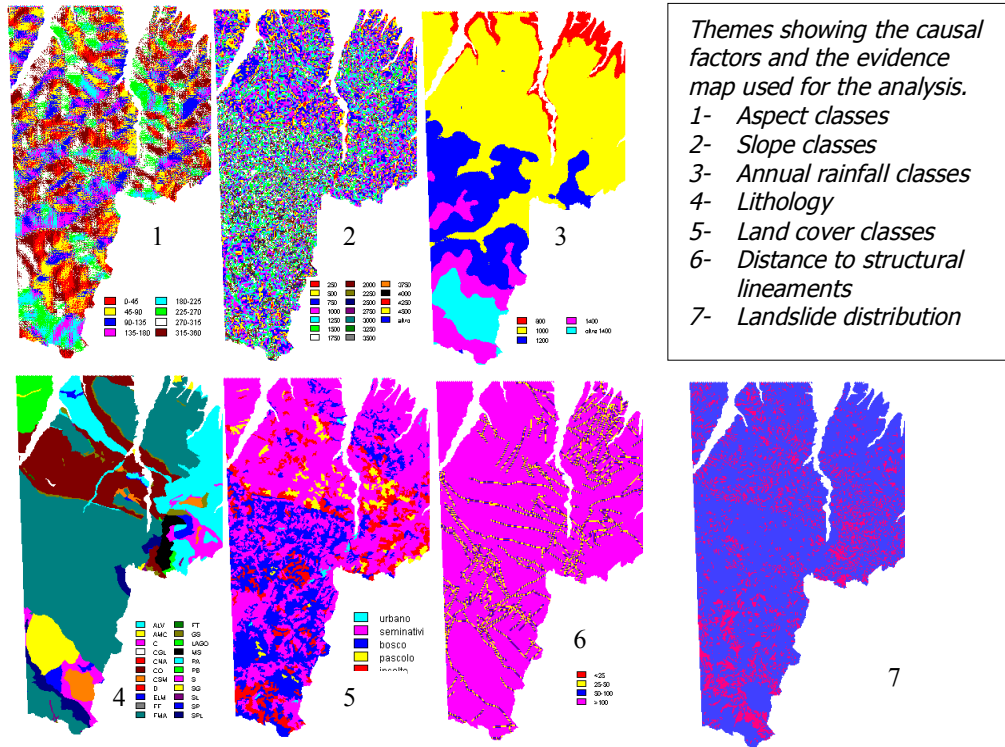


Figura 2– thematic maps showing the causal factors used for prediction

The first one is defined as :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(T_{ij} - T^*_{.ij})^2}{T^*_{.ij}}$$

where

$$T^*_{.ij} = \frac{(T_{.j} * T_{.i})^2}{T_{...}}$$

and $T_{..}$ =total number of pixels, $T_{i.}$ = no. of pixels in class i of map 1, $T_{.j}$ = no. of pixels in class j of map 2. The indexes n and m are the number of classes in map 1 and map 2, respectively.

The Cramers index (V) and the contingency index (C) are defined as:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{T_{..}M}}$$

$$C = \sqrt{\frac{\chi^2}{T_{..} + \chi^2}}$$

respectively, where the meaning of the symbols holds as before and M is the minimum of $(n-1, m-1)$, n and m being the number of data classes in each of the two maps.

The joint information uncertainty score for the pair of map A and map B is defined as:

$$U(A,B) = 2 \left[\frac{H(A) + H(B) - H(A,B)}{H(A) + H(B)} \right]$$

where

$$H(A) = -[\sum_{j=1}^n p_j \ln p_j]$$

$$H(B) = -[\sum_{i=1}^m p_i \ln p_i]$$

$$H(A, B) = -[\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}]$$

n being the number of classes in map A, m the one in map B, and P_{ij} the ratio of the number of pixels at the intersection of classes i and j in maps A and B respectively, to the total number of pixels. P_j denotes the total pixel number in class j of map A and P_i the total pixel of class i in map B.

The above indexes can be interpreted as a measure of association between map pairs. The Chi-Square index gives an absolute measure (upper unbounded) of the association, and is useless in itself; the V and C indexes provide a standardized measure in the range $[0,1]$ that allows to say that the closer they are to 1, the stronger the association is between the two maps. When used together, these three indexes provide an overall measure of association and allow to compare the different degree of association in pairs over a set of maps. In general, it can be noticed that the three indexes give very similar responses as expected. The joint information uncertainty score should be also used to confirm the pattern of association as detected by the previous indexes, and is supposed to vary between 0 (completely independent maps) and 1 (completely associated maps). Table 1 shows the indexes as computed for the maps described above.

Although the computed indexes cannot be used, in rigorous terms, to assess Bayesian conditional independence (which is a property much stronger than non-association), the measures of association they provide suggest that all data layers can be supposed to be independent.

As it comes out from the association analysis, it must be noticed that landslides show some association with lithology (the only theme also having non-irrelevant joint information uncertainty, U, with the landslide one), and a spatial trend associated with elevation/rainfall and land cover.

If one looks for association among causal factors, it must be noticed that lithology is associated with elevation/rainfall and land cover, while the association is weaker with slope, and even less with the other themes. The inadequate DTM available for the study seems to be a prime cause of this. All other associations can be considered irrelevant, apart from a weak association between slope and rainfall/elevation.

The analysis seems then to justify the choice made by the Regione Emilia Romagna Geological Survey, that used the lithological factor only to map the landslide hazard, through mapping the frequency of landslides per lithological unit.

During each run, only one half of the known landslides (chosen using a random sampling algorithm) was used to make the prediction map, while the remaining ones were considered as a validation data set.

Discussion of the results

The computation of favourability functions was performed for different modeling hypotheses as described below. The test on the predictive power of each computed favourability map has been done using the prediction rate curve (Chung and Fabbri, 1999). This curve is obtained by plotting the cumulative percentage of the study area sorted by decreasing value of the favourability value (according to the various rules as presented above) as abscissa, against the cumulative percentage of the landslide area as ordinate. The percentage of predicted landslides corresponding to, say, 20 per cent of highest value area is a good estimator of the predictive capability of the model. In a wider sense, the closer the curve approaches ordinate axis, the more the prediction fits. On the contrary, the more the curve approaches the 45° straight line, the less is useful to combine factors since the prediction is close to a random distribution of the favourability values.

	<i>lithology</i>	Land cover	aspect	slope	Rainfall	Distance from rivers	Distance to lineaments	INDEX
Landslides	14323.84	3896.73	1316.985	1122.374	5638.054	2015.259	105.83	Chi-square
	0.2169	0.1131	0.0658	0.0609	0.1361	0.0814	0.0186	Cramers V
	0.212	0.1124	0.0657	0.0607	0.1348	0.0811	0.0186	Contingency
	0.02	-	-	-	-	-	-	Uncertainty
Lithology		73615.45	23898.36	37642.06	225075.7	4254.247	10613.059	chi-square
		0.2459	0.106	0.0855	0.4308	0.1182	0.1078	Cramers V
		0.4413	0.27	0.3324	0.6528	0.1174	0.1835	contingency
		0.1	0.02	0.04	0.23	0.01	0.02	Uncertainty
Land cover			6060.324	25611.87	61260.3	7634.952	821.463	chi-square
			0.1398	0.1454	0.2243	0.1584	0.03	Cramers V
			0.0706	0.2792	0.4093	0.1564	0.0519	contingency
			-	0.03	0.07	-	0.04	Uncertainty
Aspect				6289.839	10158.14	1493.088	300.815	chi-square
				0.0431	0.0914	0.0554	0.0182	Cramers V
				0.1132	0.1798	0.0553	0.0314	contingency
				-	-	-	-	Uncertainty
Slope					41613.68	1230.77	1245.942	chi-square
					0.1853	0.0504	0.037	Cramers V
					0.3475	0.0503	0.064	contingency
					0.04	-	-	Uncertainty
Rainfall						501.429	2593.115	chi-square
						0.0406	0.0533	Cramers V
						0.0405	0.0919	Contingency
						-	-	Uncertainty
D.f.rivers							60.929	chi-square
							0.0141	Cramers V
							0.0141	contingency
							-	Uncertainty

Table 1 – Association measures between themes

Among the causal factors, it has been recognized that the hydrographic network plays a minor role since the detail to which it has been mapped is much higher than the precision of the other factors, and river segments appear to be ‘pervasive’, thus not allowing to link the landslide distribution with a distance from the hydrographic network. For this reason, it has been decided not to include rivers among the causal factors.

In Figura 3 the prediction rate of the six causal factors considered one by one is shown. In this case, the predictor is the conditional frequency estimating pp_{ai} , $I=1, \dots, n$ (conditional probability of finding the landslide occurrence, given class i) for each class in each theme.

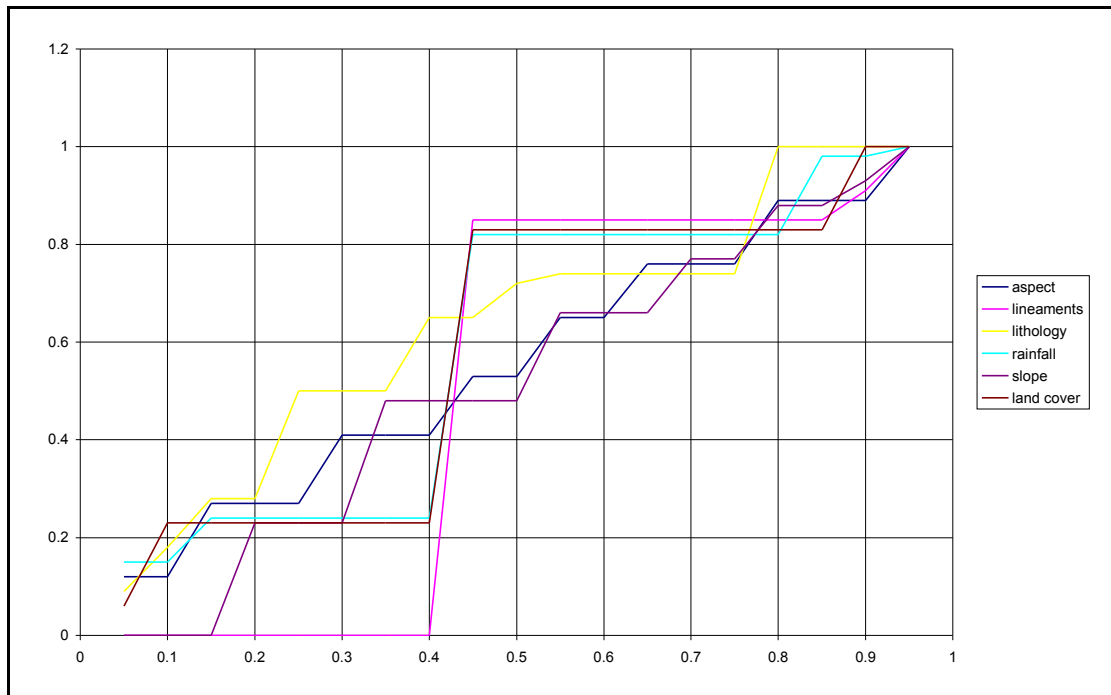


Figura 3- prediction rate of the considered causal factors, using the whole landslide polygons

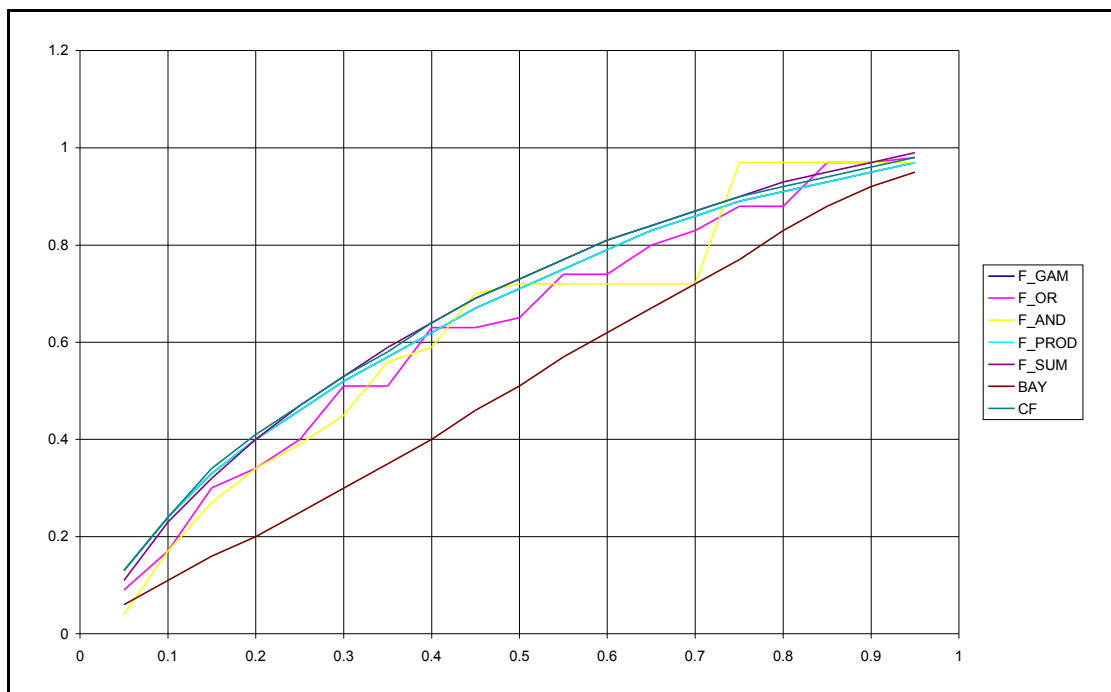


Figura 4- prediction rate of the seven predictors, using all six relevant causal factors and the whole landslide polygons

The first computation has been performed using as evidence data all polygons of the mapped active landslides. The landslides have been divided into two randomly sampled groups, one of which was used for calibration, and the other one for validation. The computation was performed using the three most relevant themes (lithology, land cover and elevation/rainfall) according to the previously described indexes. The prediction rate curves are shown in Figura 5.

A further computation was performed using all six factors, and the prediction rates are shown in Figura 4.

It has been noticed that all landslide bodies were mapped, and this might have induced some loss of precision, in that the combination of the causal factors that is met at the landslide trigger point is not the same as in the landslide toe. For this reason, a prediction has been drawn using the highest points only of the landslides, assuming that, given the kinematics of the mass movements considered, the trigger point must have been at the top. Under this assumption, the prediction rate of the six causal factors has been computed as shown in figura 6. The prediction rates of the seven predictors using three and six causal factors respectively are shown in Figura 7 and Figura 8.

As far as the input data are concerned, one can argue that using a better representation of slope, aspect and rainfall distribution (i.e. a more precise DTM, and a better regionalization of the rain gauge data) will allow to improve the results. As soon as new data will be available, the analysis can be repeated so to appreciate potential effects on the prediction.

From the comparison of the prediction rates one can assess that:

There seems to be no significant improvement when using six causal factors instead of the three more strictly related with landslides (lithology, land cover and rainfall); the prediction behaves very similarly in the two cases, being just the smoother the classification, the more factors are used.

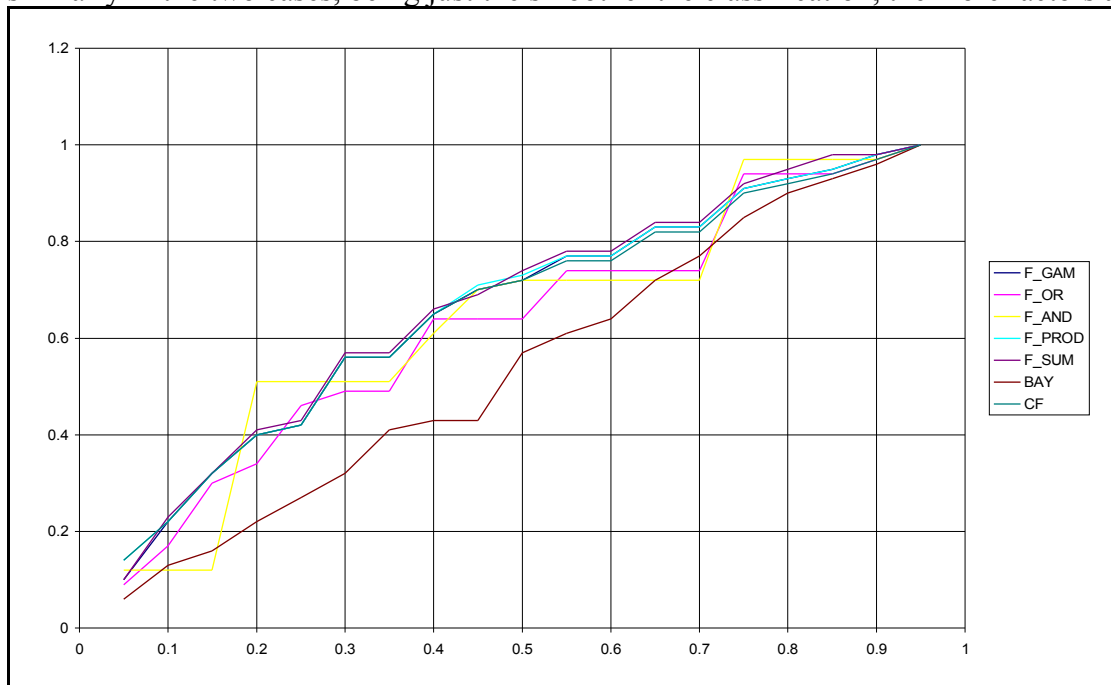


Figura 5- prediction rate of the seven predictors, using three causal factors (lithology, rainfall and land cover) and the whole landslide polygons

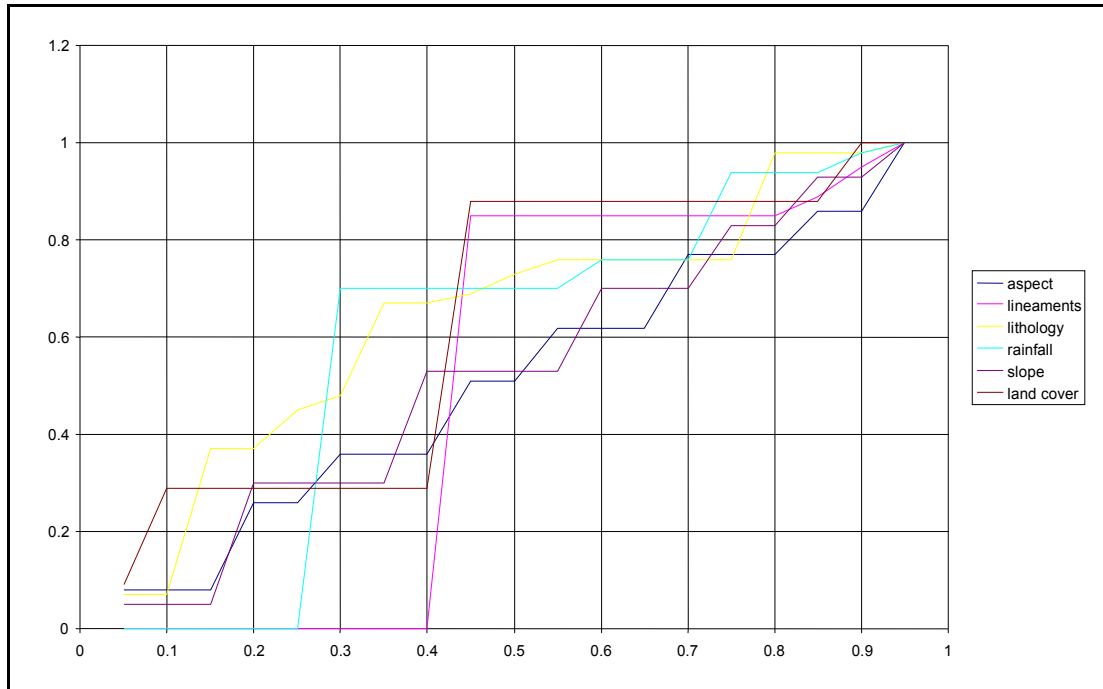


Figura 6- prediction rate of the causal factors, using the trigger points only (assumed as the top of the landslide body)

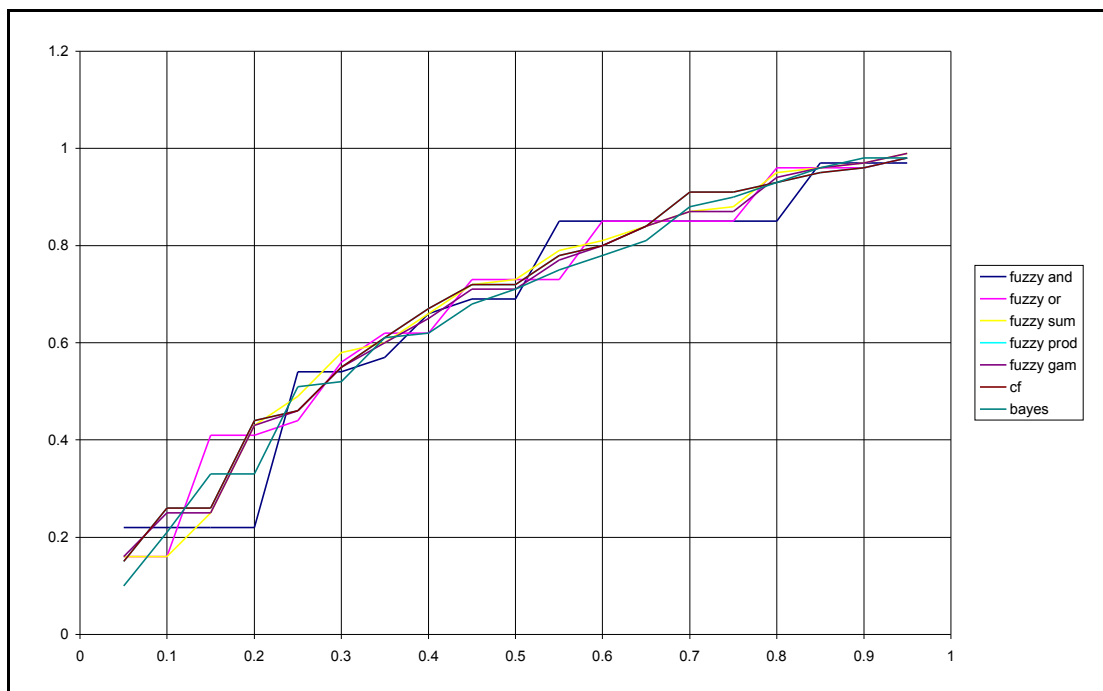


figura 7 – prediction rate of the seven predictors using three causal factors (lithology, land cover and rainfall) and the trigger points only

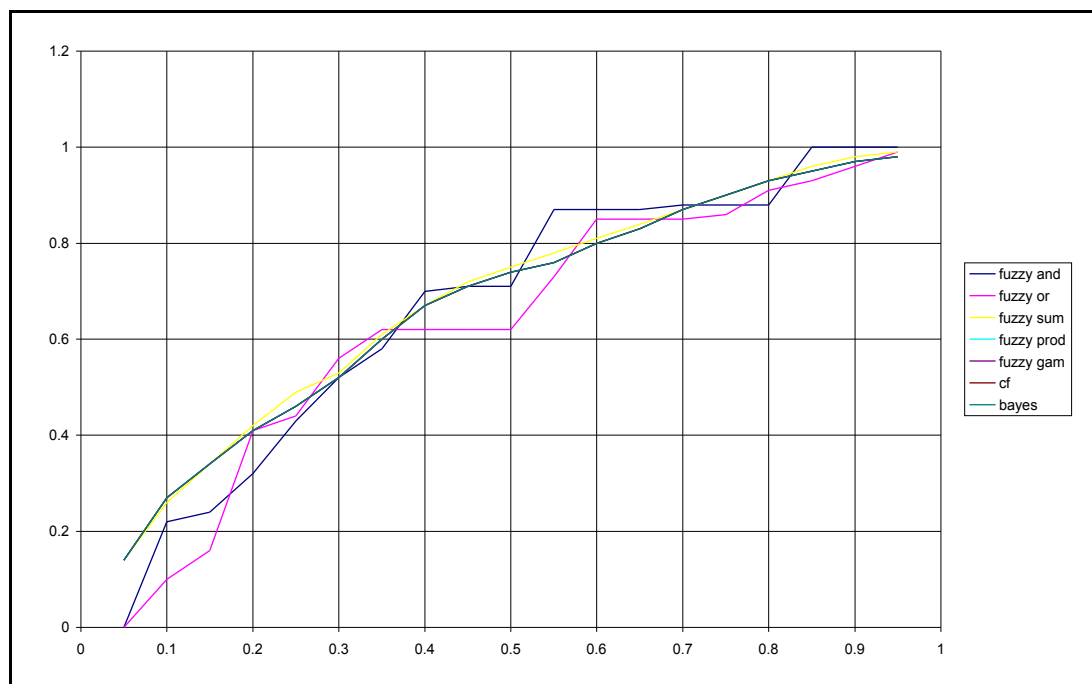


Figura 8 - prediction rate of the seven predictors using the six relevant causal factors and the trigger points of landslides.

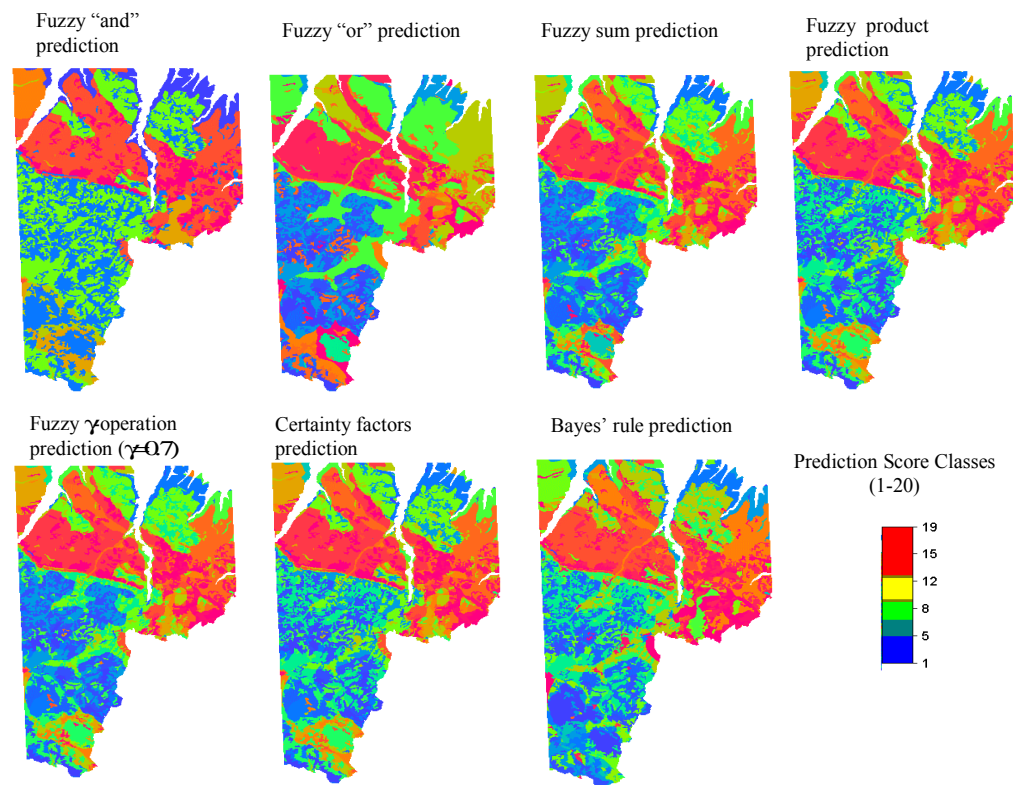


Figura 9 - prediction maps according to the seven predictors, using rainfall, lithology and land cover themes and the trigger points as evidences. The region is subdivided into equal area classes in increasing order of favourability (class 20=max favourability) according to the legend.

A further smoothing effect can be observed when all landslide bodies are used as evidences, instead of the trigger points only; this does not bring to a worsening of the overall predictive capability of the maps, but a less reliable mapping can be expected due to oversmoothing.

From the prediction rate diagrams it can be seen that the causal factors having higher predictive capability are in any case lithology (thus confirming the choice of the Regione Emilia Romagna Geological Survey to use this layer alone for hazard mapping), and then land cover and rainfall. All other themes are not relevant for prediction.

The seven predictors used in this case study behave very similarly in prediction, except for the case of bayesian probability – that is very sensitive to the actual dispersion of the data, and approaches a random prediction when all landslide bodies are used as evidences – and fuzzy ‘or’, ‘and’ in some cases. In general, it seems that the certainty factor predictor is the most useful method in this specific case study, although in each case some of the predictors are virtually identical.

Figura 9 shows the seven predictions in the case when the three more significant factors are used together with the only trigger points as evidence theme. This is the case, among those explored in this case study, that shows better prediction rates and should be considered as the best basis for landslide hazard zonation, given the present state of knowledge.

Conclusions

The approach hereby discussed allows land classification according to landslide hazard using numerical modeling (requiring less subjective expert’s judgements). It seems that, when an objective prediction can be extracted from a spatial database, then it can be said that the themes have some “system” added value, i.e. using all data together is better than using just some of them.

It must be highlighted that the approach here discussed starts from existing databases but keeps open to improvements in each theme’s knowledge. The best predictor among the various ones tested (certainty factors, bayesian probability, fuzzy operations; other techniques might be implemented as well) is simply chosen on the basis of its predictive capability, measured *a posteriori* using the prediction rate curves.

The analysis has led to recognize that the existing database is not adequate, however, for predictive modeling due to inadequate topographic data. This constitutes an input for the addressment of future survey and data capturing in order to define a better digital terrain model. As soon as the improved causal factor map is produced, or a new causal factor is supposed to be relevant for the phenomenon, the calculations can be repeated and a new prediction map can be issued. The validation using prediction rates allows to check for actual and effective improvements, and can be used to orient further efforts in data acquisition and geotechnical monitoring. For instance, in the present case study it has been shown that lithology, land cover and rainfall (represented by elevation, as described above) are the most relevant factors for landslides, and thus further analyses should be devoted to the investigation and mapping of these factors. Moreover it appears necessary to prepare and use a DTM with appropriate resolution, in order to check the influence of more detailed topographic data. The analysis disregarded other themes, such as the water table elevation, which in turn might become very important for an improved hazard mapping.

The hereby discussed approach is appealing because of its capability to be integrated in real world policy making, since modeling follows from close the stepwise decision process. The decision support capitalizes on the gradual accumulation of knowledge, which is commonly observed in physical planning.

2- Mappatura della propensione all'innescò di incendi boschivi mediante *favourability functions*: un caso di studio

Premesse

Gli incendi boschivi sono una delle criticità ambientali di cui negli anni più recenti è emersa l'importanza su tutto il territorio nazionale.

Si tratta di fenomeni difficilmente modellabili e prevedibili, sia perché l'innescò e la propagazione di un incendio dipendono in modo complesso dalla storia climatica locale nei giorni precedenti l'incendio (e quindi la modellazione richiede la conoscenza delle precipitazioni, dell'evapotraspirazione, del vento...), sia perché quasi sempre l'origine degli incendi è antropica, fortemente casuale e spesso volontaria, e ciò rende difficile ogni previsione.

D'altra parte, è oggi sempre più sentita l'esigenza di mappare le aree a maggiore propensione all'incendio, sia per la protezione civile, sia per la gestione del patrimonio forestale e del territorio in generale. A tal fine, le tecniche tradizionali possono essere divise in:

- metodi di indicizzazione sintetica *rule-based* (Bradshaw et al., 1983)
- metodi di indicizzazione sintetica *physically based* (Palmieri et al., 1992)
- metodi di simulazione fisica dei processi (p.es. Rothermel, 1972).

Nel primo caso, si danno regole empiriche per classificare il territorio sulla base di un punteggio di pericolosità.

Nel secondo caso, si usa un indice convenzionale collegato a grandezze fisiche significative per evidenziare le aree di maggiore criticità (per esempio un indice di aridità, connesso all'evapotraspirazione etc.).

Nel terzo caso, con l'uso di modelli matematici si simulano l'innescò e la propagazione dell'incendio secondo leggi fisiche di natura empirica o teorica.

Esistono esempi in letteratura di analisi condotte allo scopo di caratterizzare la distribuzione spaziale degli incendi su scala vasta (p.es. nazionale), per definire gradienti e zone a particolare propensione mediante le proprietà di autocorrelazione del fenomeno (Pereira et al., 1998). Generalmente, però, il procedimento per la localizzazione del rischio è più efficace se tiene conto di possibili variabili causali, anche per fornire indicazioni di controllo e di gestione.

Molti Paesi si sono dotati di un sistema standardizzato di indicizzazione del territorio in ordine al rischio di incendio. Si rinvia a Calabri (1996) per una breve introduzione sull'argomento.

In molte aree, è pressoché impossibile produrre una cartografia del rischio di incendio basata su informazioni meteorologiche, per via di una troppo frammentaria e incompleta disponibilità di dati.

In generale, è necessario pensare alle diverse fasi della analisi per la previsione e prevenzione degli incendi come ad un ragionamento in continuo, che procede da zonazioni di carattere generale, per giungere alla previsione specifica di dettaglio. Yuan (1997) propone un "ciclo dell'informazione" relativo agli incendi, costituito dall'integrazione sinergica di vari livelli di rappresentazione dei fenomeni a seconda delle scale spazio-temporali e delle finalità degli studi.

In questo spirito un approccio probabilistico non parametrico, che consenta di calcolare un indice di propensione al fenomeno per ogni punto del territorio, è da inserire in un quadro modellistico più complesso, e non sostituisce altre forme di analisi.

Nel presente studio si illustra un'applicazione di questo approccio al territorio del Comune di Sogliano al Rubicone, sito in area pedepenninica in provincia di Forlì-Cesena. Si tratta di un'area

prevalentemente arida, in cui le attività dominanti sono quelle zootecniche e, subordinatamente, quelle agricole. In totale, il Comune in esame è stato colpito da 37 incendi nel periodo 1994-1998, distribuiti come da Figura 35. Dunque il fenomeno degli incendi costituisce una priorità per gli interventi di protezione civile, ed è utile individuare le aree ‘calde’ per poter focalizzare la sorveglianza e il controllo. La mappatura che viene qui presentata consente di evidenziare queste aree in senso del tutto generale e di prima approssimazione, e non sostituisce modelli più raffinati e di maggiore capacità predittiva.

L’obiettivo è semplicemente di classificare il territorio in relazione alla pericolosità del fenomeno, ma le tecniche qui presentate consentono di compiere questa operazione in modo non dipendente dal giudizio soggettivo, e di controllare la bontà della classificazione. L’idea che sottende l’approccio qui presentato, noto come *integration modelling*, è di valutare l’influenza di vari fattori sulla possibilità che si verifichi un fenomeno. Sovrapponendo diversi tipi di informazioni (sull’uso del suolo, sulle grandezze meteorologiche e idrologiche, sulla topografia...) si dovrebbe poter estrarre un’indicazione che nessuno dei tematismi presi separatamente è in grado di dare.

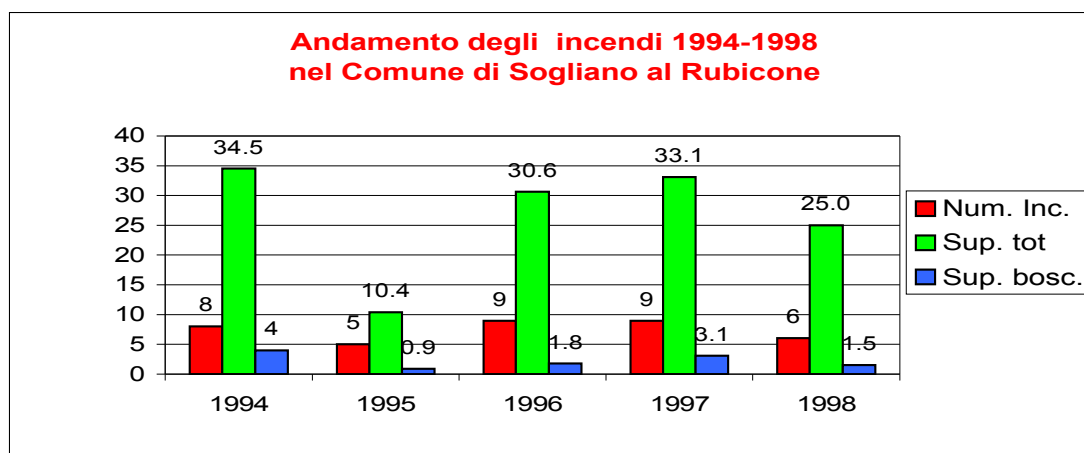


Figura 35 – incendi censiti nel Comune di Sogliano al Rubicone (1994-1998)

Aspetti metodologici e affidabilità: tecniche di *integration modelling*

Per *integration modelling* si deve intendere lo studio di fenomeni che si manifestano in relazione a determinate ‘cause’, attraverso l’analisi di queste ultime, ovvero l’uso congiunto di più tipi di dati per prevedere fenomeni che da essi in qualche modo dipendono.

Per rendere ‘oggettivi’ i criteri con cui operare l’integrazione di informazioni differenti, sono state sviluppate numerose metodologie, che tengono presente l’incertezza intrinseca dell’operazione: non si può affermare che, in corrispondenza del coesistere di più fattori di predisposizione per il fenomeno, questo si verificherà effettivamente, ma solo che la località in cui ciò si verifica è ‘propensa’ a detto accadimento. In generale, le metodologie possono essere assunte sotto la denominazione complessiva di ‘funzioni di propensione’ (*favourability functions*, Chung e Fabbri, 1993).

Nel seguito si esporranno brevemente le considerazioni teoriche che sottendono questo approccio. Il risultato di detta operazione è una mappa che riporta per ogni località un punteggio esprimente la *favourability*, o predisposizione, a che in essa si possa verificare un incendio.

Un vantaggio dell'approccio quantitativo è la possibilità di controllare l'affidabilità del risultato attraverso il test statistico del "prediction rate", come verrà illustrato in maggior dettaglio.

Supponiamo che A sia il dominio oggetto di analisi, ovvero la regione di studio. Sia poi F il fenomeno del quale si è rappresentata su una carta l'occorrenza in occasione di osservazioni di campagna (per esempio gli incendi avvenuti negli ultimi 5 anni). Se sono disponibili r insiemi di dati (*layers*) rappresentati ciascuno su una mappa (carta tematica) e coprente tutto A, possiamo definire per ciascuno di essi una 'funzione di partizione':

$$v_k: A \Rightarrow [1, 2 \dots n_k]$$

che assegna ad ogni punto (o *pixel*) di A una delle n_k classi nelle quali è diviso il layer k-esimo (per esempio, tale funzione potrebbe essere quella che ad ogni punto associa una classe vegetazionale (uso del suolo di appartenenza)).

Si può inoltre definire un'altra funzione:

$$R_k: [1, 2 \dots n_k] \Rightarrow [a, b]$$

che associa ad ognuna delle classi in cui è diviso il layer un valore compreso fra a e b, due numeri che devono soddisfare alcune proprietà. Il numero associato a ciascuna classe rappresenta il grado di favourability da associare ad ogni classe del layer nei riguardi di un dato fenomeno. Per esempio, si può dare a ciascuna classe di uso del suolo un valore di predisposizione all'innescò e propagazione di un incendio, ovvero un numero crescente con la predisposizione stessa. Questo valore di predisposizione è un indice della "ragionevolezza" che il fenomeno accada in presenza di una certa caratteristica del territorio. Definiamo allora la funzione di favourability come la composizione di R e V:

$$F_k = R_k \circ V_k$$

Gli estremi dell'intervallo, a e b, devono essere scelti dal modellista sulla base della propria interpretazione della "ragionevolezza": se questa viene interpretata come la probabilità dell'accadimento, allora deve essere $a=0$, $b=1$. Altre grandezze possono essere prese a misura della "ragionevolezza", come ad esempio le funzioni di appartenenza della teoria dei fuzzy sets (Zadeh, 1965, 1968), o i certainty factors (Shortliffe e Buchanan, 1975; Heckermann, 1986; cit. in Chung e Fabbri, 1993). In quest'ultimo caso, ad esempio, $a=-1$ e $b=1$.

Se la favourability è intesa come probabilità, si può invocare il teorema di Bayes, per cui la probabilità condizionata che si verifichi un fenomeno F, data la concomitante presenza degli attributi E_1, \dots, E_n (supposti fra loro condizionatamente indipendenti) è

$$\text{Prob}(F/E_1, \dots, E_n) = (\text{pps}_1 \dots \text{pps}_n) * (\text{ppa}_1 \dots \text{ppa}_n) / \text{ps}_F n - 1 * \text{pps}_1 \dots n$$

essendo:

pps_i ($i=1, \dots, n$) la probabilità a priori che una certa classe di attributo si verifichi sul dominio A

ppa_i ($i=1, \dots, n$) la probabilità che, data una certa classe di attributo, F si verifichi sul dominio A; essa è calcolata con la formula (Chung e Fabbri, 1993) $\text{ppa}_i = 1 - (1 - (\text{area}_i) - 1) \text{nb}(i)$, essendo $\text{area}(i)$ l'area di A dove si incontra la classe di attributo i-esima, e $\text{nb}(i)$ l'area di A dove insieme all'attributo i-esimo si incontra anche un'evidenza di F

$\text{pps}_1 \dots n$ la probabilità congiunta di E_1, \dots, E_n , ovvero la probabilità di incontrare tutti gli n eventi simultaneamente

ps_F la probabilità a priori di incontrare un'evidenza di F su A

Per applicare questa regola, si deve stilare una mappa per ciascuna combinazione delle classi di attributo che si identificano sul territorio. Questo viene fatto automaticamente in un GIS mediante l'operazione di cross, ovvero di identificazione di tutti i poligoni per i quali si assiste ad una combinazione unica degli attributi.

Se al posto della probabilità, valutata con la regola di Bayes, si ricorre ai certainty factors, occorre considerare invece le seguenti espressioni (Fabbri et al. , 1998).

I certainty factors per una classe di attributo possono essere definiti come:

$CF(i)=[Prob(F/Ei)-Prob(F)]/[Prob(F/Ei)(1-Prob(F))]$, se $[Prob(F/Ei)>Prob(F)]$

$CF(i)=[Prob(F/Ei)-Prob(F)]/[Prob(F)(1-Prob(F/Ei))]$, se $[Prob(F/Ei)<Prob(F)]$

essendo Prob(F) la probabilità a priori di incontrare un' evidenza di F; il certainty factor (CF) per un attributo varia fra -1 e 1, indicando per valori prossimi a -1 la tendenza del fenomeno ad accadere in assenza dell'attributo, e per valori prossimi a 1 la tendenza ad accadere in sua presenza.

Il certainty factor di due attributi è dato da:

$CF(1+2)=CF1+CF2- CF1*CF2$, se entrambi i CF sono non-negativi

$CF(1+2)=CF1+CF2/\min(\text{abs}(CF1),\text{abs}(CF2))$, se i CF hanno segno opposto

$CF(1+2)=CF1+CF2+ CF1*CF2$, se entrambi i CF sono negativi

La procedura si applica iterativamente per più attributi: $CF(1+2+3)=CF(1+2)+CF(3)+\dots$

Un'altra possibilità è quella di ricorrere alla logica fuzzy.

La logica fuzzy è formalmente analoga a quella classica booleana, salvo per il fatto che una affermazione non è mai semplicemente vera o falsa, ma possiede un grado di verità variabile fra zero e uno. Questo grado di verità è chiamato 'membership function', ed esprime il grado di appartenenza di un oggetto a un insieme. Spesso, per praticità, si tende a confondere la membership con la probabilità a priori che l'evento espresso dall'affermazione si verifichi (ppai, $i=1,\dots,n$). In tal caso, la funzione assume un valore che viene stimato dalla frequenza relativa di accadimento.

Per quanto detto, si definiscono le seguenti operazioni logiche:

fuzzy 'and'= $\min (ppai, i=1,\dots,n)$

fuzzy 'or'= $\max(ppai, i=1,\dots,n)$

fuzzy-prodotto= $\prod(ppai, i=1,\dots,n)$

fuzzy-somma= $(1-\prod(1-ppai), i=1,\dots,n)$

fuzzy- 'gamma operation'= $(\text{fuzzy-somma})^\gamma(\text{fuzzy-prodotto})(1-\gamma)$

(generalmente, $\gamma=0,7$)

In questo modo, si definiscono regole per la sovrapposizione di mappe, che consentono di valutare l'influenza degli eventi occorrenti in corrispondenza di determinati attributi sull'intera area di studio. Con una analisi più approfondita, si può comprendere qual è la combinazione dei vari attributi in corrispondenza della quale si ha massima propensione per l'accadimento del fenomeno in questione.

La metodologia ha come caratteristica fondamentale la possibilità di effettuare una predizione, o classificazione con individuazione delle aree a maggiore predisposizione, e contemporaneamente una validazione della stessa. Lo strumento statistico per validare la predizione è il prediction rate (Chung e Fabbri, 1996).

Il prediction rate è definito come la curva che si ottiene riportando in grafico l'area cumulata della regione in esame, ordinata per punteggio di favourability decrescente, e in funzione di essa la percentuale cumulata di incendi (fra quelli non usati per la calibrazione) che si incontrano in quell'area, e che quindi sono 'previsti' dal modello.

La curva del prediction rate indica la bontà del modello, trovandosi tanto più schiacciata sull'asse delle ordinate quanto maggiore è la capacità del modello di 'separare' in una piccola percentuale di area le zone effettivamente più pericolose. Una mappa a distribuzione completamente casuale del rischio di incendio avrebbe una curva del prediction rate uguale alla bisettrice del quadrante del grafico.

Dati utilizzati e risultati

I parametri utilizzati per determinare la predisposizione agli incendi rappresentano le tre categorie normalmente indicate in letteratura: fattori meteorologici, fattori topografici e fattori vegetazionali (Calabri, 1996). Essi sono stati scelti come segue:

aridità: influenza direttamente il contenuto d'acqua del combustibile, soprattutto di quello morto (in questo studio è stato utilizzato l'indice di aridità medio annuo di de Martonne);

esposizione: è un indicatore dell'irraggiamento solare e quindi della temperatura e dell'umidità;

uso del suolo: è un indicatore della presenza di biomassa, e cioè di combustibile utile all'innesco e alla propagazione dell'incendio;

pendenza: una elevata pendenza facilita l'avanzamento del fuoco verso le zone più alte, preriscaldando con la convezione dell'aria calda i combustibili sovrastanti non ancora interessati dalle fiamme;

quota topografica: è un indicatore dell'intensità del vento;

accessibilità, intesa come distanza dalle strade e quindi come possibilità di azione per gli incendiari.

La mostra i fattori causali utilizzati.

Per effettuare i calcoli, si è fatto ricorso alla mappa delle evidenze costituite dagli incendi verificatisi negli ultimi 5 anni.

La validazione normalmente si effettua dividendo i dati disponibili sull'evidenza del fenomeno in studio (gli incendi degli ultimi 5 anni) in due gruppi, uno solo dei quali deve essere utilizzato nei calcoli, e verificando se la predizione effettivamente afferma che i luoghi dove si trovano le evidenze non utilizzate sono predisposti per il fenomeno. Il test viene condotto ricorrendo al prediction rate come detto.

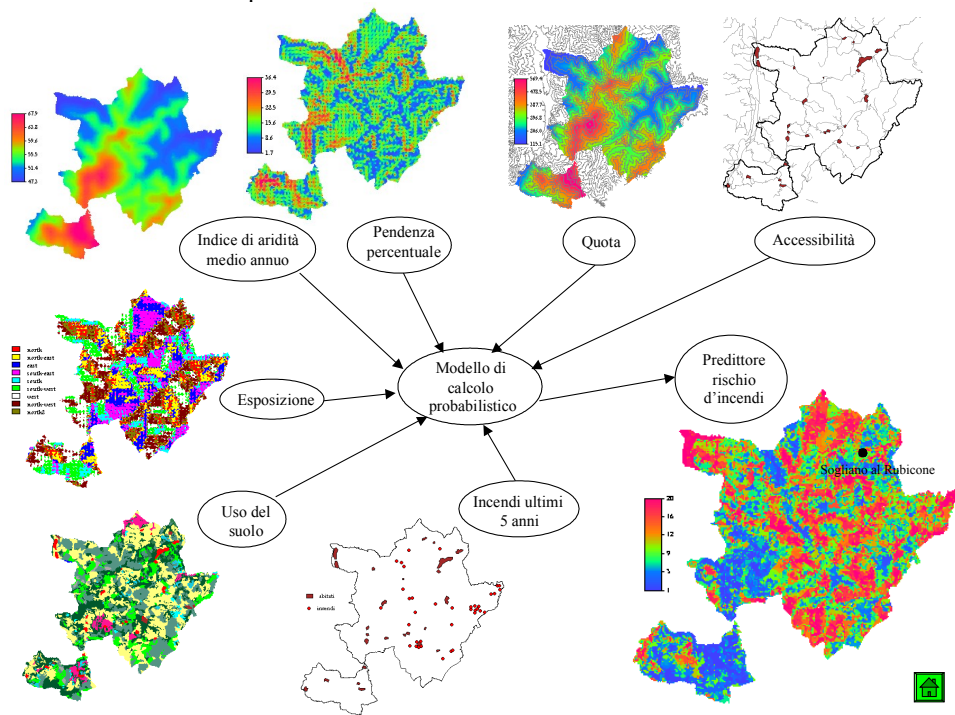


Figura 36- fattori causali utilizzati nella valutazione e schema di calcolo

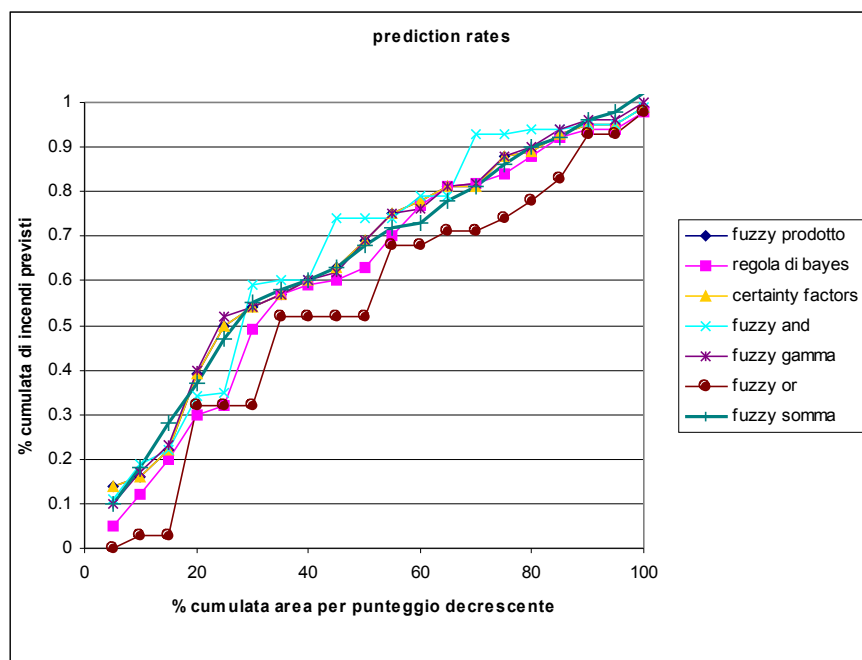


Figura 37 – prediction rates per i vari predittori

Dai risultati ottenuti appare che le varie tecniche portano a risultati diversi fra loro, attribuendo pesi diversi ai vari fattori che denotano, a priori, predisposizione all'innesco e propagazione degli incendi. Il modello probabilistico scelto per la predizione degli incendi è l'operazione di fuzzy-somma. Come si vede dal diagramma di Figura 37, questo modello presenta la parte iniziale del *prediction rate* più alta di tutti gli altri: a parità di area indagata, la fuzzy-somma è in grado di prevedere il numero più alto di incendi tra quelli che si sono già verificati. La Figura 38 riporta le mappe ottenute utilizzando i diversi predittori. E' importante sottolineare che la cosa vale nel caso specifico e per i dati disponibili, mentre non è vera in senso generale ed assoluto.

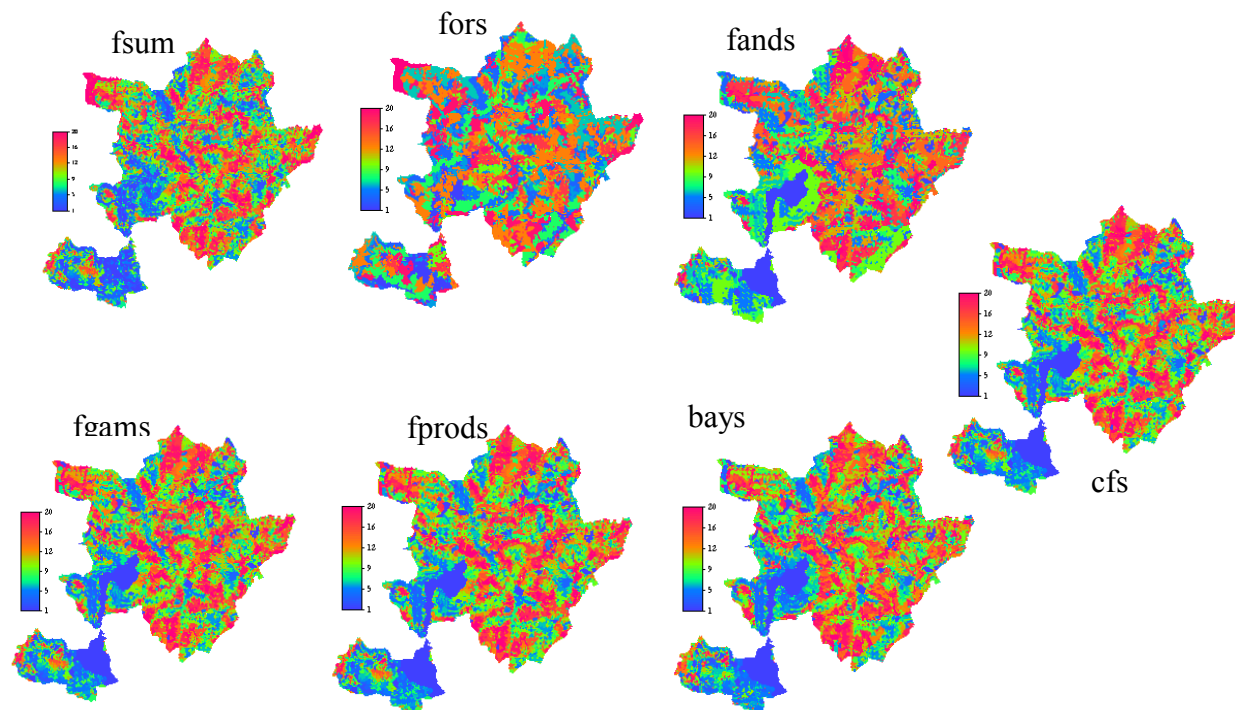


Figura 38- mappe della predisposizione all'incendio secondo le varie tecniche di calcolo

Conclusioni

La memoria ha illustrato l'applicazione di tecniche basate su favourability functions per la mappatura della predisposizione all'incendio boschivo. Si è fatto riferimento al caso di studio del Comune di Sogliano al Rubicone, in provincia di Forlì-Cesena.

Mediante le tecniche ricordate è stato possibile individuare aree giudicate a maggiore predisposizione, sulla base di alcuni fattori causali del fenomeno. Il test statistico basato sul *prediction rate* ha consentito di affermare che l'operazione di fuzzy-somma funziona meglio delle altre, in questo caso specifico, e pertanto può essere scelta come predittore.

Lo studio è essenzialmente una zonizzazione preliminare, ed è in grado di indicare le zone cui prestare particolare attenzione, mentre per una gestione operativa del fenomeno è necessario passare a indici di maggiore dettaglio fisico, aggiornati in tempo reale e che tengano conto dei vari fenomeni meteorologici, secondo un ciclo dell'informazione *sensu* Yuan, 1997.

3- Modellazione del potenziale minerario per l'estrazione di rame nella regione di Magondi, Zimbabwe

Il caso qui brevemente presentato è dato dal distretto di Magondi, una regione dello Zimbabwe nella quale si trovano alcune miniere di rame. Si desidera effettuare una mappatura del territorio sulla base della propensione alla presenza di mineralizzazioni di rame. Il caso è presentato sommariamente a titolo di esempio. Vari autori (Chung and Fabbri, 1993; Bonham Carter, 1994; Harris and Pan, 1999) hanno mostrato l'uso di tecniche numeriche per mettere in relazione l'occorrenza di un fenomeno di interesse con il valore locale di attributi ritenuti rilevanti per il fenomeno stesso. Questi attributi sono considerati fattori di evidenza nel senso che portano ad una definizione di "probabilità", "possibilità" o "verosimiglianza" per l'occorrenza dell'evento (Chung and Fabbri, 1993).

Questi ultimi autori definiscono un approccio-quadro di modellazione numerica che chiamano "favourability function modeling" (ibid.), che si è illustrato in precedenza e che viene qui riproposto.

In particolare, si è applicato un set di tecniche di predizione della favourability per il rinvenimento di giacimenti di rame nella regione di magoni, in Zimbabwe. I predittori sono: il teorema di Bayes, i certainty factors, la fuzzy-somma, il fuzzy-prodotto, il fuzzy-and, il fuzzy-or e la fuzzy-operazione gamma, già descritte nei paragrafi precedenti.

I dati disponibili, utilizzati per lo studio, sono:

una mappa della litologia dell'area, che mostra in particolare le litologie favorevoli per ospitare le mineralizzazioni (arkose e dolomite)

una mappa delle concentrazioni di metalli nei campioni di suolo prelevati su una griglia regolare di 500 m di lato a coprire tutta l'area

una mappa del segnale del campo magnetico totale misurato da apparecchio aereo, che rappresenta la prossimità del materiale di basamento igneo (ritenuto l'origine del minerale), sepolto sotto sedimenti magneticamente inerti, rispetto alla superficie terrestre

una mappa dei principali lineamenti strutturali (pieghe e faglie) dell'area (ritenute vie di migrazione preferenziale delle soluzioni mineralizzanti)

una mappa delle miniere esistenti, cui è stata data una estensione areale convenzionale, e che viene considerata, nell'elaborazione, come una mappa degli eventi osservati (ovvero effettiva presenza di mineralizzazioni).

In Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42 sono rappresentati i dati utilizzati. La mappa dell'anomalia geochimica è stata ottenuta per interpolazione dei dati esistenti, di tipo puntuale, circa le concentrazioni di rame.

Dettagli sulla struttura geologica dell'area possono essere reperiti in Kambewa, 1998, che cita a sua volta numerose fonti di letteratura al riguardo.

Da analisi geologiche precedenti (Kambewa, 1998; Lopez, 1998) si può assumere che:

le rocce che tipicamente ospitano la mineralizzazione di rame sono le Ariose del gruppo di Deweras (rocce porose e permeabili che consentono il passaggio delle soluzioni mineralizzate). Anche le dolomiti possono essere considerate come rocce favorevoli per ospitare la mineralizzazione.

La disconformità fra la copertura sedimentaria dell'area e il sottostante basamento igneo dell'Archeano è da guardare come la principale origine del metallo, oltre ad essere l'area dove è più probabile che la mineralizzazione si verifichi.

Le faglie e anticlinali sono da guardare come percorsi preferenziali per la migrazione delle soluzioni mineralizzate.

Anomalie geochimiche nei suoli sono da guardare come forti indicatori di mineralizzazione.

Da questo semplice modello geologico si possono dedurre quattro tipi di fattori che in qualche modo potrebbero indicare l'occorrenza di mineralizzazioni:

l'unità litologica

la distanza dal basamento igneo, ovvero lo spessore di sedimenti di copertura (legato al segnale di anomalia aeromagnetica)
la presenza di percorsi preferenziali di migrazione delle soluzioni mineralizzate (anticlinali e faglie)
le anomalie geochemiche.

Si è fatto uso di una campagna di prospezione geochemica su suoli a circa 4 m di profondità, a copertura di tutta l'area con maglia di campionamento di circa 500 m di lato. Una analisi esplorativa delle correlazioni fra i diversi elementi non manifesta un pattern di associazione chiaro fra le varie specie. La Tabella 17 mostra come le correlazioni siano sempre piuttosto basse. Si può verificare che nichel, piombo e cobalto non mostrano spiccati pattern di anomalia, avendo valori elevati e bassi sparsi su tutta l'area.

Inoltre, oro, argento e arsenico hanno valori sempre bassi e non hanno legami con i depositi di rame osservati. In definitiva, solo rame, zinco e ferro sono stati usati come indicatori geochemici di potenziale mineralizzazione. Calcolando i coefficienti di auto-krigeability e codispersione (p.es. Wackernagel, 1997) del rame rispetto agli altri elementi, si vede come lo zinco possa in effetti avere un ruolo nella definizione della distribuzione spaziale del rame (il coefficiente di autokrigeability ha un suo trend significativo) e come il cobalto e il ferro abbiano correlazione non intrinseca con il rame (Figura 44). Nel seguito dell'analisi, comunque, si è supposto per semplicità di poter approssimare la distribuzione spaziale della concentrazione di rame con il risultato del solo krigaggio ordinario di questa variabile.

Un'analisi esplorativa delle superfici di variografia ha invece mostrato che l'autocorrelazione spaziale delle variabili è isotropa.

In definitiva, si sono assunti sei fattori causali ritenuti significativi di mineralizzazioni di rame: l'intensità del campo magnetico da rilievo aereo, la concentrazione di rame, la concentrazione di zinco, la concentrazione di ferro, le classi litologiche e le lineazioni geologiche (anticlinali e faglie). Per l'analisi, sono state inoltre usate le informazioni sull'ubicazione di cinque miniere di rame note (chiamate rispettivamente Avondale, Schackleton, Alaska, Angwa, e Hans, come riportato nelle figure citate). Alle miniere è stata assegnata una dimensione convenzionale di 5 x 5 pixel (essendo un pixel pari a 100 m di lato).

I dati continui (concentrazioni e intensità di campo aeromagnetico) sono stati ricondotti a classi di dati, per avere una base omogenea di elaborazione, anche se recentemente sono stati proposti in letteratura metodi per effettuare analisi di favourability anche con variabili continue (Chung, 1999).

Per quanto riguarda i dati lineari (le lineazioni geologiche), si è scelto di costruire una mappa di distanza dalle linee e di classificare in intervalli discreti quest'ultima.

Dopo aver preparato i dati, si è effettuata un'analisi di sensitività della classificazione effettuata con le tecniche descritte ai paragrafi precedenti, procedendo al calcolo della favourability con quattro delle cinque miniere disponibili come evidence map, e verificando in quale classi di favourability andava a cadere la quinta.

In teoria, se la classificazione funziona, la miniera esclusa per il calcolo dovrebbe cadere in una classe di favourability elevata. Per lo studio corrente, si è deciso di accettare le classificazioni che giudicavano la miniera "di validazione" almeno nel 25% di area giudicata più favorevole.

Come era prevedibile, solo due dei sette predittori utilizzati hanno superato questo test con tutte e cinque le miniere note, e in particolare il fuzzy or e la fuzzy sum (come mostrato in Figura 45). È stata poi effettuata una analisi di sensitività rispetto ai vari layer di dati utilizzati, i cui risultati sono parzialmente mostrati, a titolo di esempio, in Figura 46.

Si è verificato che tutti i predittori utilizzati sono sensibili al dato di maggiore precisione disponibile (rappresentato dall'anomalia aeromagnetica), mentre si è visto che i predittori che si comportano peggio in base al criterio di cui sopra sono anche sensibili alla distanza dalle lineazioni geologiche. Occorre però ricordare che i dati utilizzati nel presente studio non sono da ritenersi del tutto significativi, e pertanto alcuni risultati dell'analisi di sensitività possono essere privi di un valore assoluto.

Concludendo, dall'analisi è stato possibile validare il modello concettuale proposto, dal momento che in effetti si può ottenere una predizione accettabile usando i fattori causali scelti, almeno con alcune delle tecniche testate (fuzzy or e fuzzy sum). Il modello mostra una certa capacità di verifica dei dati disponibili, e può essere utilmente impiegato per pianificare ulteriori prospezioni ed approfondimenti delle analisi. Le mappe di favourability con alcuni dei predittori sono mostrate a titolo di esempio in Figura 47.

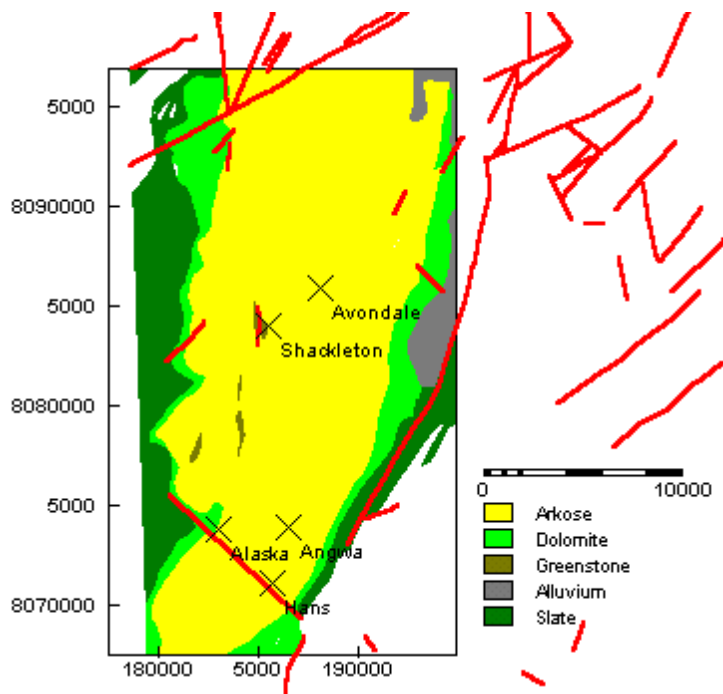


Figura 39- unità litologiche nell'area

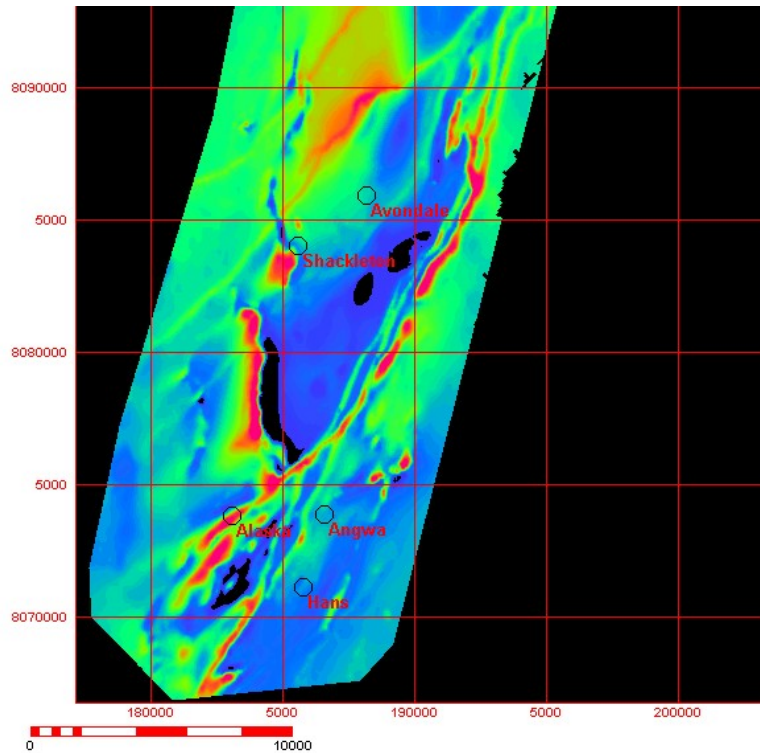


Figura 40 – mappa dell’anomalia aeromagnetica

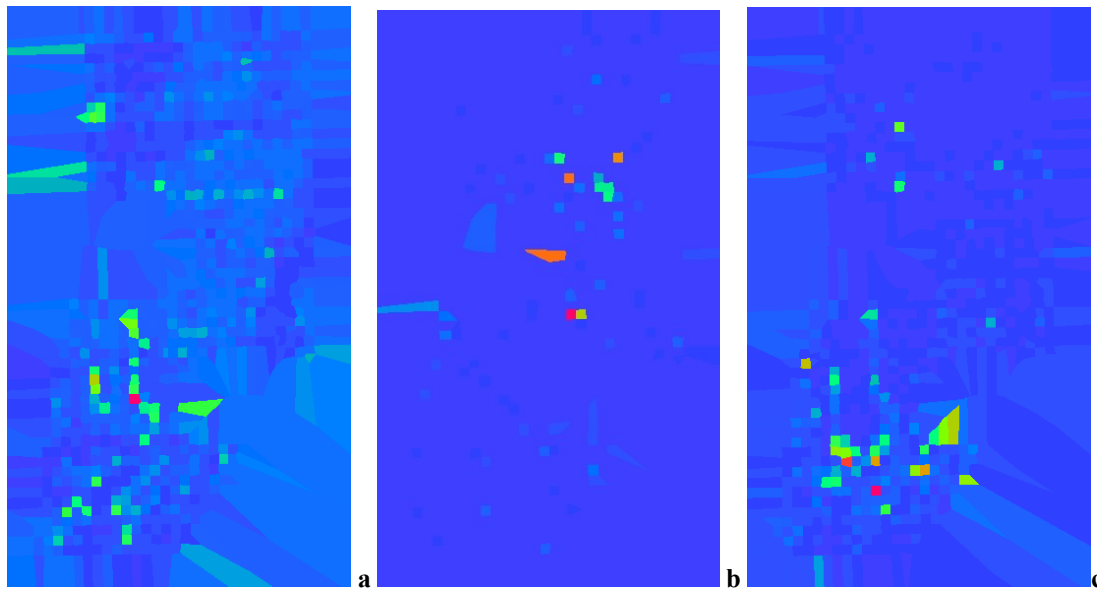


Figura 41 – distribuzione delle anomalie di ferro (a), zinco(b) e rame (c); le mappe hanno solo lo scopo di fornire una prima visualizzazione e sono frutto di interpolazioni *nearest neighbour*

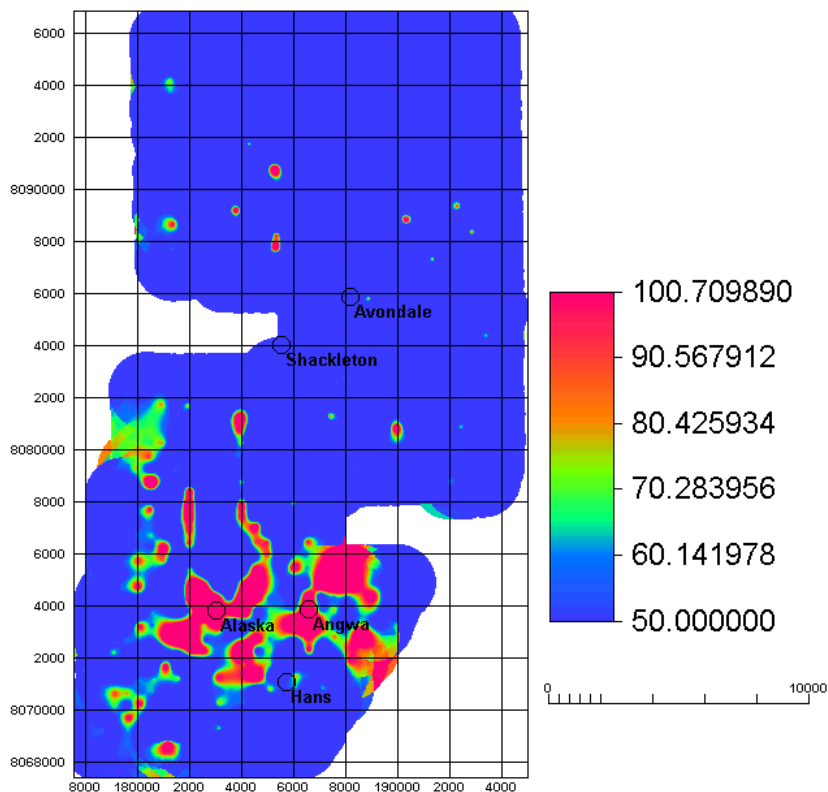


Figura 42 – mappa dell’anomalia geochimica di rame, valutata per krigaggio ordinario della log-trasformata delle concentrazioni e successiva antitrasformazione.

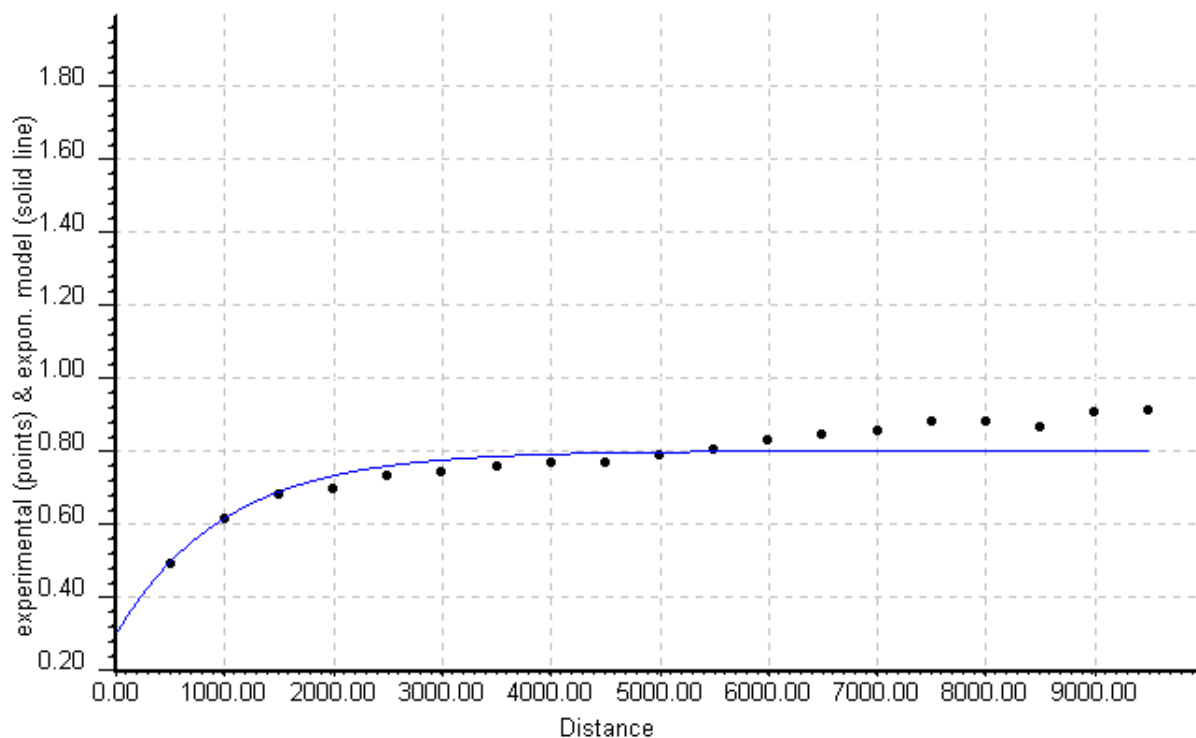


Figura 43 – variogramma della log-trasformata della concentrazione di rame.

CU	1									
PB	0.217514	1								
ZN	0.127237	0.230512	1							
FE	<u>0.399333</u>	<u>0.422935</u>	0.205321	1						
CO	<u>0.33941</u>	<u>0.328598</u>	0.188015	<u>0.703861</u>	1					
NI	0.088643	0.159756	0.050928	0.175653	<u>0.374099</u>	1				
AS	0.054031	0.023898	0.297403	0.110737	0.101505	0.05664	1			
AU	0.105329	0.020772	0.009198	0.020203	0.040742	0.042179	-0.00843	1		
AG	0.118025	0.045308	0.025826	0.060796	0.003236	0.002897	0.01292	0.071024	1	
	CU	PB	ZN	FE	CO	NI	AS	AU	AG	

Tabella 17 – matrice di correlazione fra le concentrazioni (sono sottolineate le correlazioni più alte)

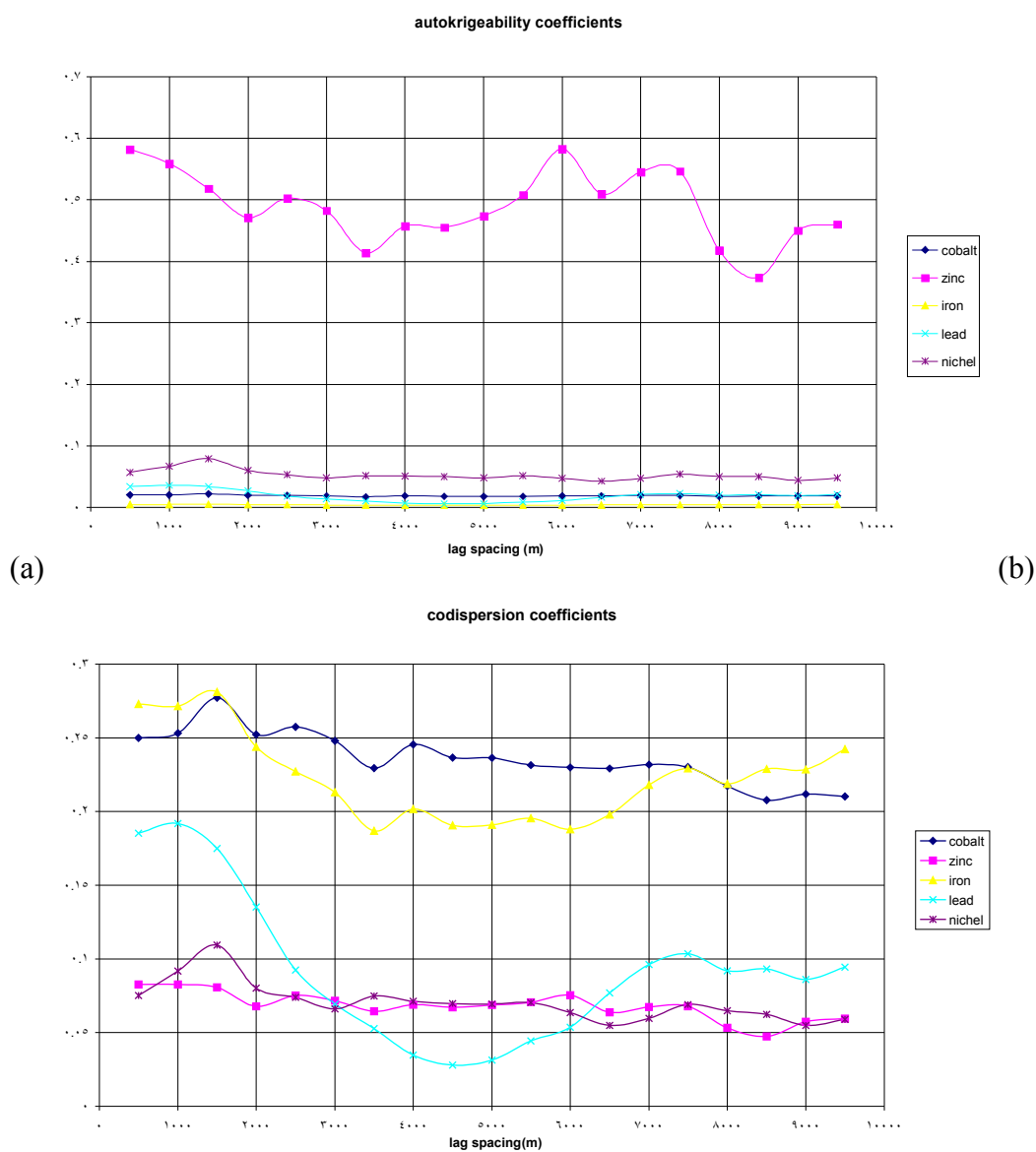


Figura 44 – coefficienti di autokrigabilità (a) e codispersione (b) di varie specie chimiche con il rame.

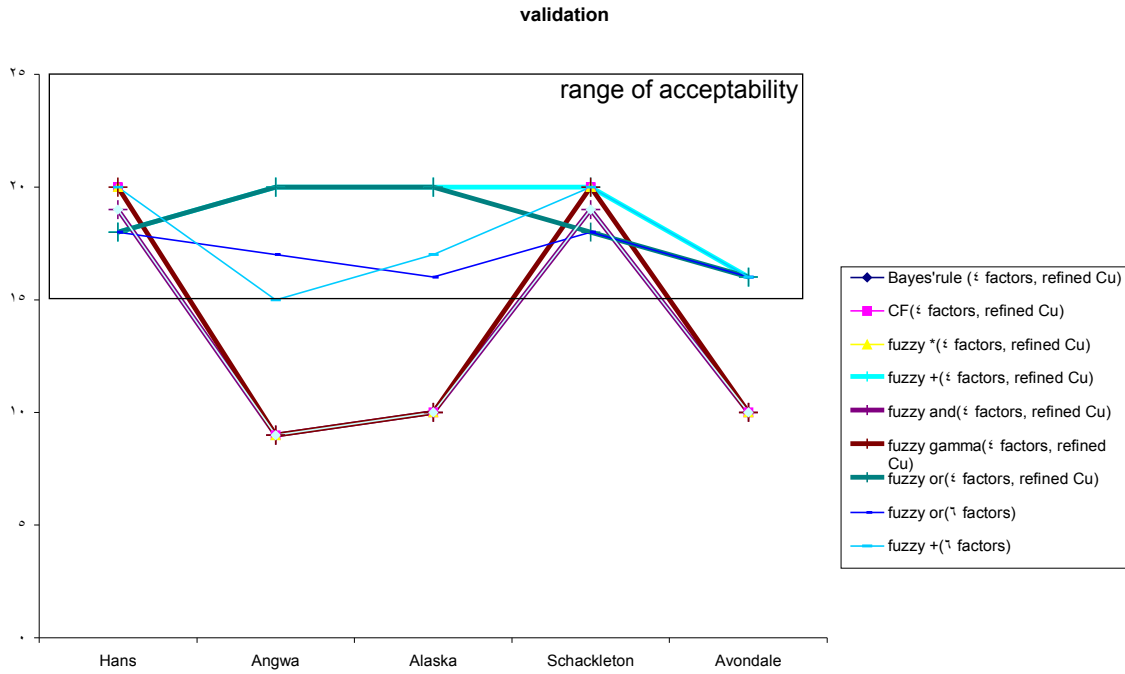
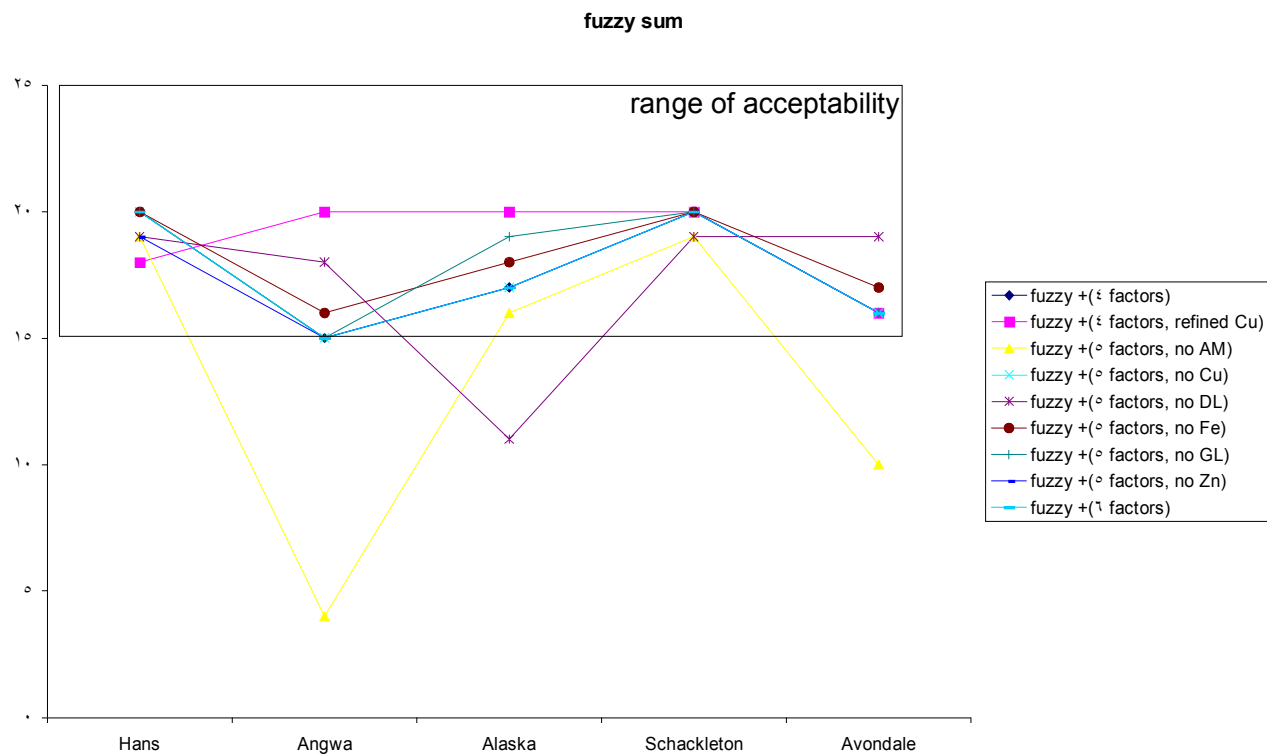
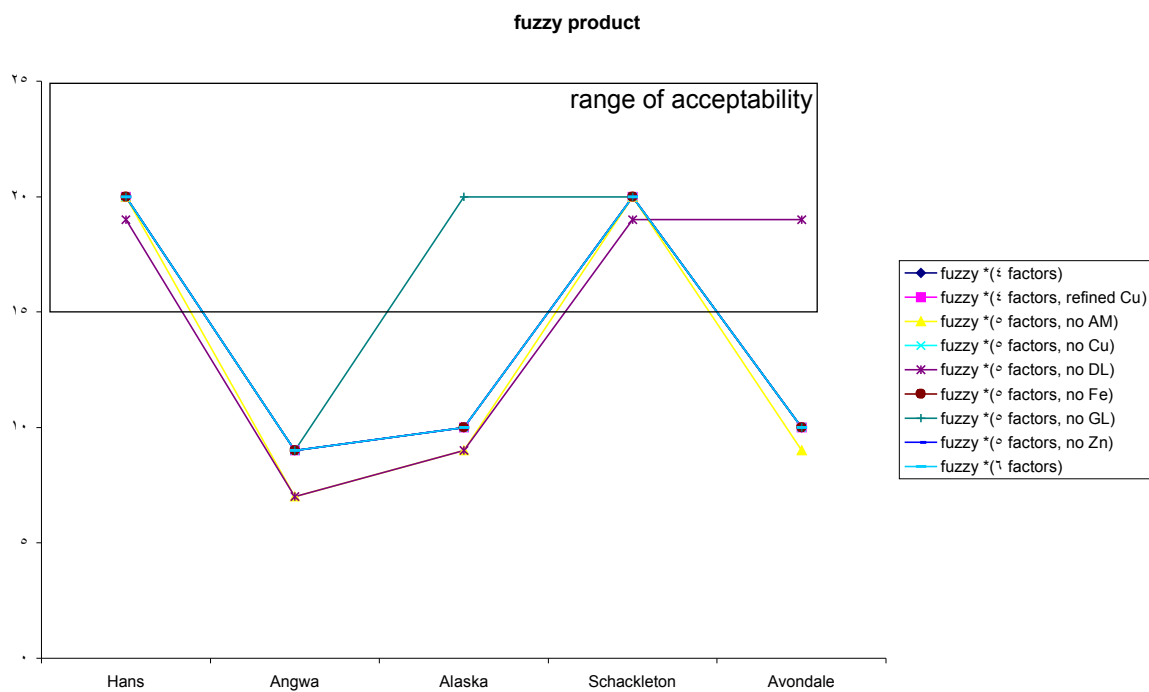


Figura 45- validazione della predizione fatta con quattro e sei fattori



(a)



(b)

Figura 46 – due casi di analisi di sensitività.

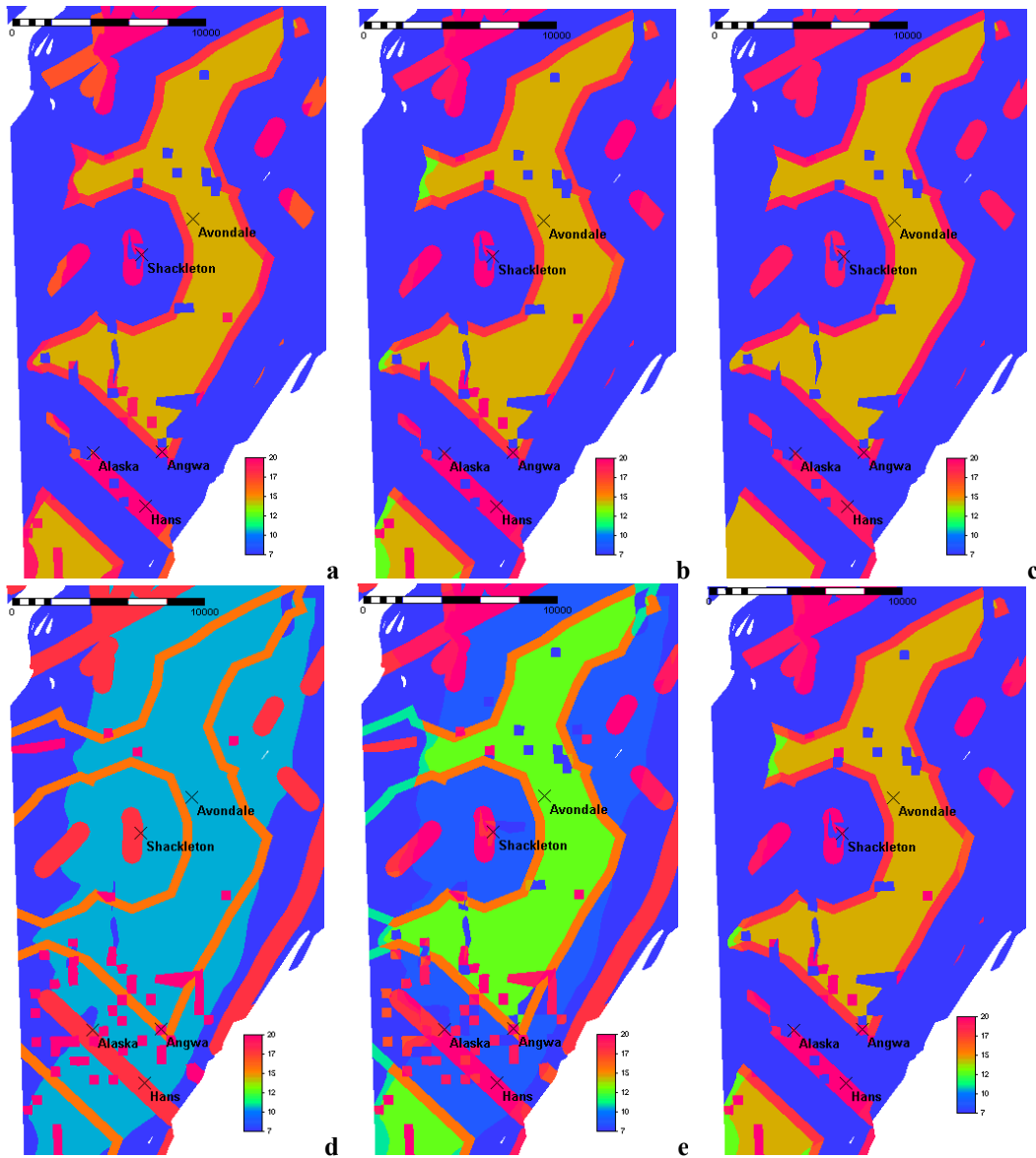


Figura 47 – esempio di mappe della predizione: a=teorema di Bayes; b=certainty factors; c= fuzzy-and; d=fuzzy or; e=fuzzy-somma; f=fuzzy-prodotto

Capitolo 8 – Il giudizio razionale

1- Un approccio geografico multicriterio per la valutazione dell'impatto ambientale da attività estrattive

Introduzione

Nel settore delle attività estrattive per l'approvvigionamento di materiali di seconda categoria (attività di cava), la pianificazione a livello regionale o provinciale non utilizza a tutt'oggi strumenti di valutazione dell'impatto ambientale (p.es. Morris e Therivel, 1995; Vanclay e Bronstein, 1995) "strategico". Inoltre, la procedura di valutazione dell'impatto ambientale per la singola area estrattiva quasi sempre ricorre a metodi di tipo sintetico, quali quelli matriciali (Prezioso, 1995), nei quali non è del tutto trascurabile la soggettività di giudizio sugli effetti ambientali dell'insediamento industriale. Con questi metodi, il livello d'impatto è espresso da un valore rappresentativo del giudizio complessivo di un'azione su una componente ambientale. Conseguentemente, viene a mancare ogni informazione sull'intero spettro di intensità e sulla distribuzione spaziale degli effetti indotti su tutta la regione limitrofa al centro estrattivo.

In entrambi i casi, è estremamente rilevante la componente geografica nella valutazione degli impatti (Malczewski, 1999), sia per stabilire una localizzazione ottimale delle cave, sia per individuare e mitigare gli effetti indesiderati di queste ultime.

D'altra parte, un tale approccio è applicabile solamente se le informazioni sull'ambiente fisico e socioeconomico, nel quale si inserisce l'attività estrattiva in progetto, sono disponibili in un formato cartografico numerico, e quando si dispone di un GIS (sistema informativo geografico) per le analisi previsionali sugli effetti delle attività stesse.

Molte Regioni italiane sono oggi dotate di archivi cartografici e software dedicati a trattare i relativi dati su base informatica, ma appare, per lo più, poco diffusa la consapevolezza che i software utilizzati per la cartografia hanno anche notevoli capacità di analisi territoriale, e consentono di implementare modelli matematici con un alto grado di completezza e di capacità predittiva.

La costruzione di un sistema previsionale, a supporto delle decisioni amministrative e di piano, che consenta di rispondere, con ragionevole affidabilità, a domande del tipo "cosa succede se...", richiede di integrare (Ye et al., 1996):

- una banca di dati alfanumerici;
- un sistema di carte geografiche, per la rappresentazione dei dati;
- un modello o un sistema di equazioni per descrivere i fenomeni.

Mentre in passato si riscontrava uno scollamento fra i modellisti e coloro che si occupavano di banche dati e cartografia, oggi il fatto che esistano software di tipo GIS che consentono anche di programmare alcuni tipi di modelli matematici previsionali spinge ad una unificazione fra le discipline dell'acquisizione e gestione dei dati, e quelle dell'analisi degli stessi e di simulazione.

I modelli matematici distribuiti di tipo tradizionale (a elementi finiti, differenze finite, ecc.) ricorrono alla risoluzione di equazioni complesse e ad una descrizione in termini formali dei sistemi fisici; per contro, la modellistica basata sui GIS sfrutta relazioni per lo più empiriche o formule analitiche, per la deduzione delle grandezze di interesse, a partire dalla conoscenza di proprietà spaziali elementari, quali, ad esempio, la distanza, la contiguità, le variazioni qualitative o quantitative di un attributo lungo un percorso, sfruttando la struttura di calcolo definita dall'algebra delle mappe (Burrough, 1996).

Nel presente studio si è fatto ricorso ad algoritmi basati essenzialmente su proprietà di distanza, ed i modelli impiegati sono riconducibili ad una mappatura di distanze, da differenti sorgenti, pesate secondo criteri che hanno un proprio e definito significato fisico.

Descrizione dei fenomeni e valutazione degli impatti

Spesso, a partire da “azioni” (cause) si valutano, direttamente, gli impatti (positivi o negativi) sull’ambiente ed il territorio; in questo studio è apparso più corretto introdurre un passaggio intermedio consistente nell’analizzare i diversi fenomeni fisici (o effetti) prodotti da ogni “azione”, e per ogni effetto si è valutato l’impatto. Questo secondo passaggio impone il ricorso a criteri di valutazione quasi sempre soggettivi, condivisibili in misura variabile. Pertanto, occorre che il confronto sul giudizio d’impatto sia sottoposto a discussione razionale per decidere se possa essere ritenuto soddisfacente, o come debba essere modificato. Viceversa, la caratterizzazione degli effetti può essere fatta con metodi molto spesso oggettivi (quali i modelli matematici), e sui quali generalmente si riscontra una larga convergenza di giudizio (Figura 48).

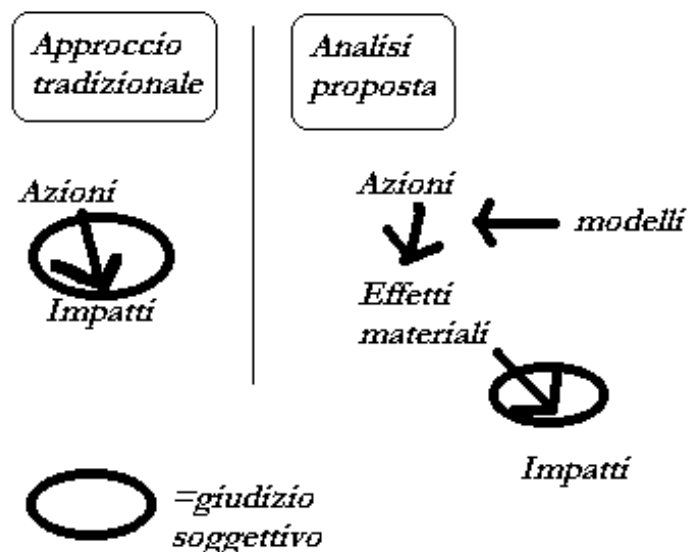


Figura 48– Schema concettuale dell'approccio tradizionale e di quello adottato nel presente studio per la VIA.

La Tabella 18, che indica gli effetti principali delle attività estrattive sui “comparti ambientali”, mette in evidenza come i metodi per descriverli siano in numero piuttosto limitato. Infatti, per ciascun effetto o fenomeno fisico generato, si possono individuare, al più, alcuni modelli o metodi razionali di descrizione, che consentono di valutarne la distribuzione spaziale e l'intensità quantitativa. In alcuni casi (per esempio quando si tratta di sistemi socio – economici o di stock delle risorse naturali) non si può fare a meno di ricorrere a termini di valutazione soggettivi, ma si ritiene che sia relativamente facile pervenire a valutazioni condivise almeno in linea di massima.

L'assegnazione di un giudizio di impatto è invece frutto di un'attività valutativa che introduce sempre elementi non completamente oggettivi. Infatti, essa dipende dal sistema etico di riferimento del valutatore, dai rapporti di forza fra le parti variamente interessate che devono pervenire alla decisione da elementi di natura, tutto sommato, imprevedibile e contingente.

Comparto ambientale interessato dai fenomeni	Effetti o fenomeni fisici	Metodi disponibili per descrivere i fenomeni
Atmosfera (rumore)	Rumore prodotto dalla coltivazione e dal trasporto connesso; sovrappressioni in aria (air blast) indotto da volate	Modelli empirici deterministici di propagazione del rumore (per fenomeni non impulsivi); equivalenze empiriche per i rumori impulsivi; metodi deterministici di integrazione delle equazioni delle onde
Atmosfera (particolato solido)	Dispersione di particolato solido in aria e di eventuali altri inquinanti	Modelli box, modelli gaussiani, modelli lagrangiani o euleriani di integrazione numerica dell'equazione parabolica diffusivo – convettiva
Acque superficiali e sotterranee	Modificazioni idrologiche, idrogeologiche e geomorfologiche; aumento del carico di sedimenti nei corsi d'acqua per erosione di superficie denudate; scarico di acque di lavorazioni contenenti particolato solido e/o inquinanti	Modelli empirici (ad es. Universal Soil Loss Equation per la previsione dell'erosione locale media annua); bilanci di massa; analisi di dettaglio con modelli di flusso e trasporto delle acque sotterranee; modelli di qualità delle acque superficiali (es. equazione di Streeter e Phelps)
Litosfera	Instabilità dei versanti indotta dagli scavi e dalle discariche; vibrazioni indotte da esplosivi e demolitori idraulici	Modelli geomeccanici per la valutazione della stabilità (deterministici o probabilistici); modelli empirici (es. IRSM)
Paesaggio percepito	Impatto visivo generato dai fronti di scavo, dalla discarica e dagli impianti dell'insediamento industriale	Analisi della morfologia del terreno e calcolo dell'area nella quale gli oggetti sono visibili (viewshed); analisi geometrica della porzione di fronte di scavo visibile da varie posizioni; analisi qualitative di simulazione fotorealistica.
Paesaggio come insieme di ecosistemi	Effetti di "disturbance" indotti dalla cava, dalla discarica e dall'insediamento industriale.	Analisi delle reti e dei mosaici ecologici e delle modificazioni indotte alle loro caratteristiche funzionali; indicizzazione sintetica; modelli previsionali di disturbo e di resilienza; analisi multicriteri della trasformazione attraverso più layers tematici.
Sistemi socio – economici	Occupazione, effetti socio – economici indotti	Analisi ad hoc, statistiche descrittive.
Risorse naturali	Modificazione degli stock naturali del sito (suolo vegetale, biomasse, geomasse, ecc.)	Bilanci di massa, considerazioni ad hoc

Tabella 18– Effetti materiali indotti dall'attività estrattiva

Le numerose ricerche rivolte ad individuare metodi di valutazione che portino a decisioni il più possibile condivise, a minimizzare le possibilità di arbitrio soggettivo, e a consentire che ogni valutatore, a partire dagli stessi elementi di conoscenza del problema, pervenga alla stessa conclusione, non hanno ancora individuato una metodologia che soddisfi l'obiettivo (Munda, 1995).

In questo studio è stato affrontato il problema della valutazione di impatto ambientale di una cava utilizzando:

un set di modelli cartografici (basati per lo più su modelli matematici descrittivi dei fenomeni fisici, e sull'incrocio di informazioni geografiche secondo opportuni criteri), caratterizzanti gli effetti o i fenomeni provocati dall'attività estrattiva;

un set di 'leggi di impatto', che consentano di valutare l'impatto di ciascun fenomeno, preso separatamente, sul territorio, assegnando un valore a ciascun punto dello spazio su una scala normalizzata;

una scala delle priorità, che consente di assegnare un peso a ciascun effetto ed ai suoi impatti. I pesi sono stati ottenuti con la tecnica del confronto a coppie di Saaty (1977, 1980).

La via per cave a cielo aperto

Per valutare la fattibilità e l'efficienza dell'approccio geografico multicriterio per la valutazione dell'impatto ambientale prodotto da attività estrattiva a cielo aperto, è stato preso in considerazione un progetto per la coltivazione di calcare in una cava a cielo aperto in Toscana.

Il metodo di coltivazione e le fasi elementari di sviluppo previste dal progetto (splateamento a gradone unico con rotazione del fronte), permettono di attenuare al massimo grado le modificazioni alla morfologia dell'area (che è di tipo collinare con quote variabili tra 150 e 500 metri s.l.m.), ed inoltre permettono l'immediato intervento di ripristino della vegetazione in ogni platea, rendendo minima l'entità dell'impatto visivo.

Gli effetti ed i fenomeni fisici indotti dall'attività della cava di calcare si possono sostanzialmente ricondurre a: rumori; polveri; vibrazioni e sovrappressioni in aria; impatto visivo; modifica degli ecosistemi.

Le due figure seguenti (Figura 49, Figura 50) rappresentano, rispettivamente, la carta dell'uso del suolo della regione circostante la cava con l'indicazione delle sorgenti e degli effetti elementari indotti e la vista tridimensionale della cava di calcare ricavata dal calcolo del DEM (Digital Elevation Model).

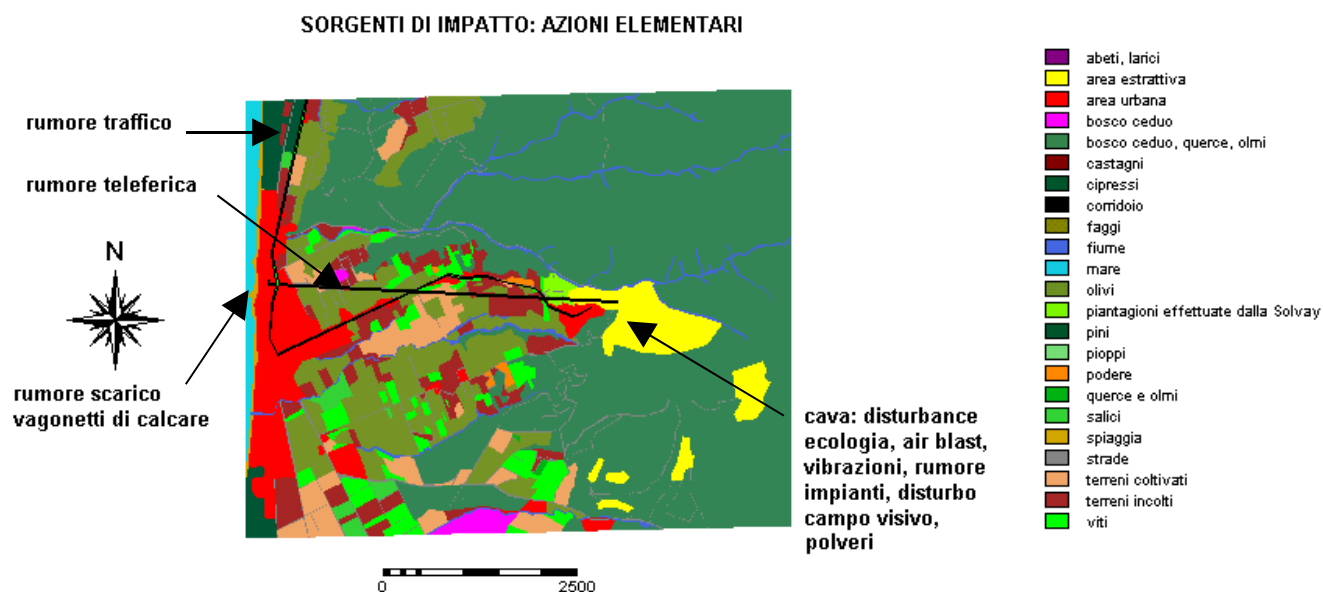


Figura 49– Carta dell'uso del suolo e delle sorgenti di impatto generato dell'attività industriale.

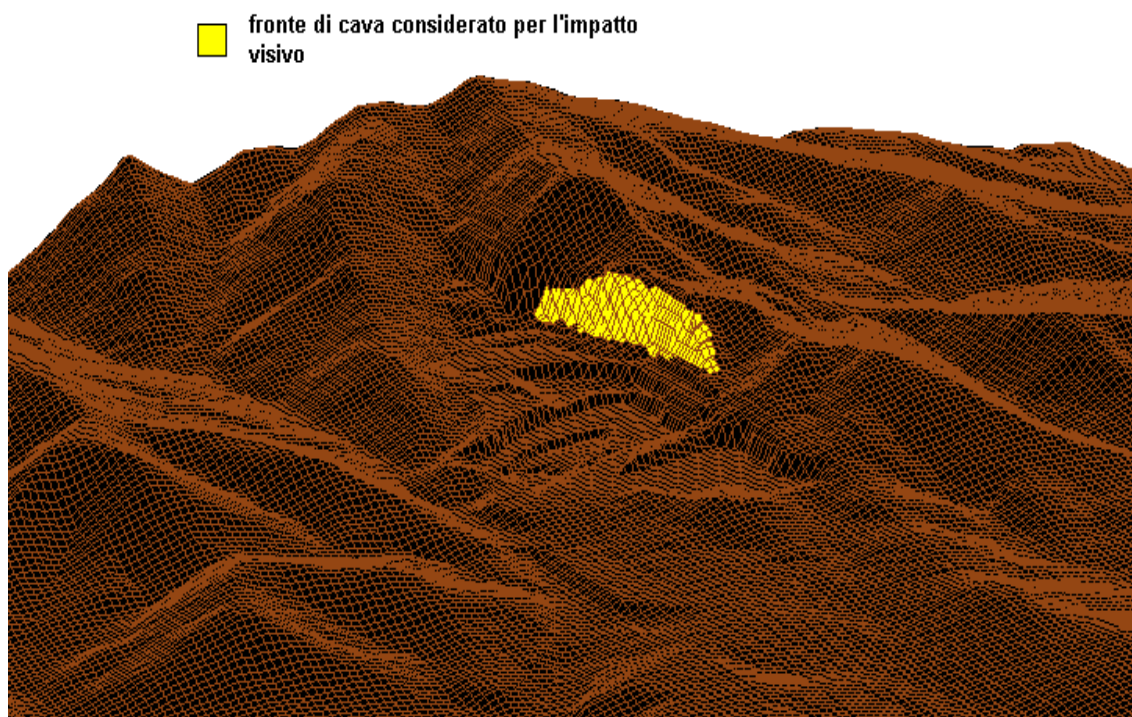


Figura 50– Grafico volumetrico della zona di interesse e fronti della cava visti da un osservatore posto a Nord – Ovest rispetto alla cava.

Rumore

Le sorgenti di rumore più significative sono l’impianto di trattamento del minerale (frantumazione, carico e scarico del materiale nelle tramogge, vagliatura, ecc.), il trasporto e, più in generale, la movimentazione del calcare, il trasporto dei materiali, gli spostamenti delle macchine operatrici, la teleferica, lo scarico del minerale nella stazione di arrivo della teleferica.

La mappa del rumore è stata ottenuta a partire dal valore del LeqA (livello equivalente continuo di pressione sonora ponderato in curva A) di ogni sorgente elementare ricorrendo alle formule di propagazione dei fenomeni acustici, considerando le attenuazioni causate dalle condizioni ambientali (ISO 9613-II, 1996): la divergenza geometrica, l’assorbimento dell’aria, l’assorbimento del suolo e la diffrazione.

Di seguito sono riportate le relazioni per il calcolo del LeqA, la mappa dei valori di questa grandezza (Figura 52) e la carta della zonizzazione acustica preliminare condotta in base ai criteri indicati nella L. 4457/95 (Figura 53).

Il livello equivalente viene definito come:

$$LeqA [dBA] = 10 \cdot \log \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m 10^{0.1 [L_{p(ij)} + A_{f(i)}]} \right] \right\}$$

dove:

n = è il numero di sorgenti;

j = indice corrispondente a ciascuno degli 8 valori medi standard della frequenza (da 63 Hz a 8 kHz)

A_r = è il peso ponderato secondo la curva A per la frequenza f ;

L'attenuazione (dBA) è stata calcolata come somma dei diversi effetti secondo la somma:

$$Att = Att_1 + Att_2 + Att_3 + Att_4$$

In cui Att_1 è la divergenza geometrica, Att_2 è l'assorbimento da parte dell'aria, Att_3 è l'assorbimento da parte del suolo e Att_4 è la diffrazione del suono dovuta alle barriere acustiche.

La divergenza geometrica è data da (dB):

$$Att_1 = 20 \log(r) + 11$$

l'assorbimento dell'aria (dB):

$$Att_2 = \alpha r/1000$$

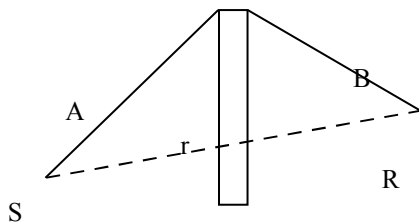
l'assorbimento del suolo (dB):

$$Att_3 = Att_s + Att_m + Att_r$$

L'effetto delle barriere (dB) è dato da:

$$Att_4 = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}}$$

Ove: r = distanza geometrica in linea retta dalla sorgente, α = coefficiente di assorbimento acustico dell'aria (dB/m), λ = lunghezza d'onda del suono (m), ed N è un indice dato dalla formula seguente (riferita ai simboli di Figura 51):



$$N = \frac{r}{\lambda} (A + B - r)$$

Figura 51– Schema di calcolo della diffrazione dovuta ad una barriera (S = sorgente, R = recettore).

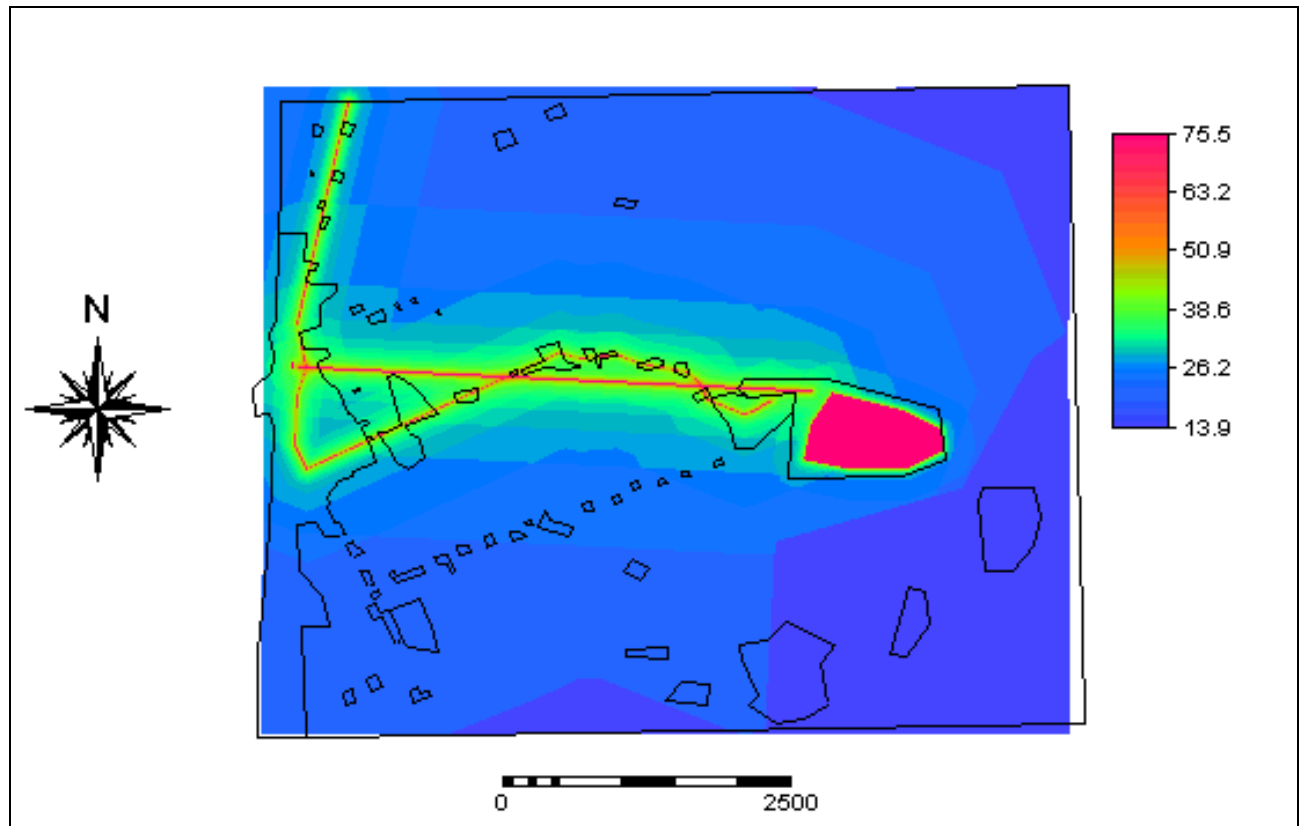


Figura 52 – Valori, calcolati secondo la norma ISO 9613-II, del LeqA (dBA) nella zona della cava

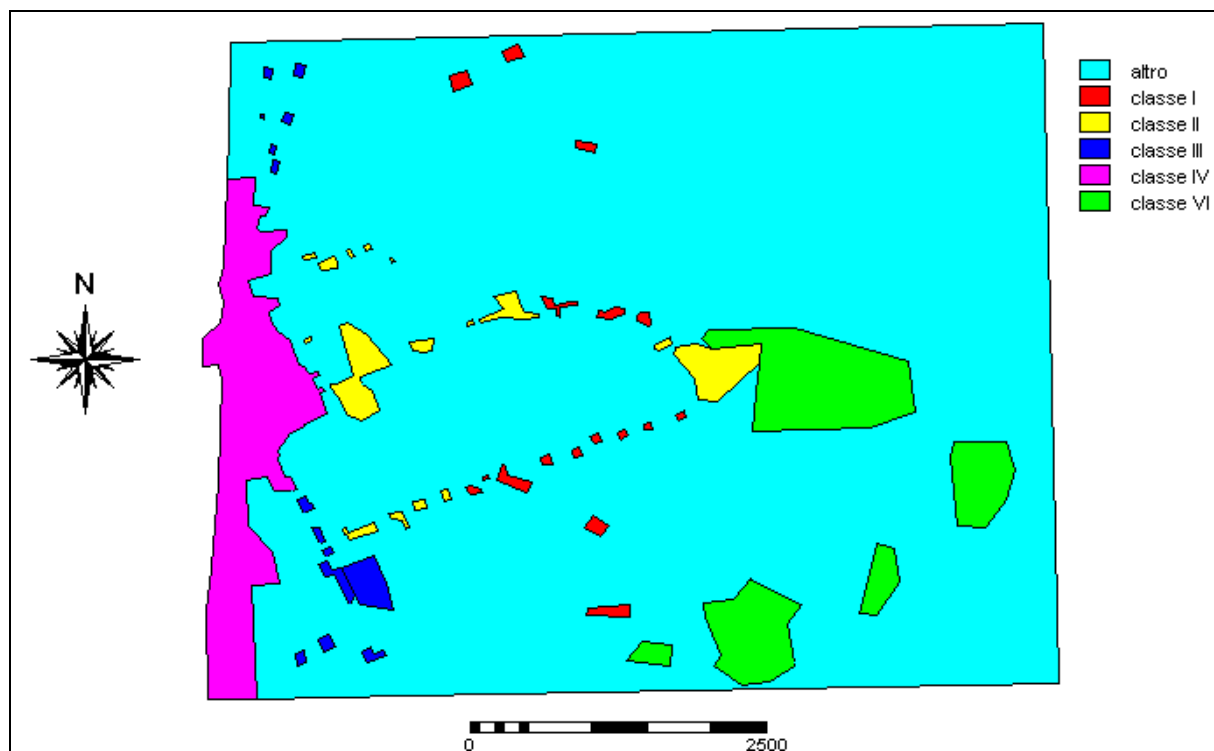


Figura 53– Carta della zonizzazione acustica ai sensi della L. 447/95**Polveri**

L'inquinamento provocato dalla dispersione di polveri è stato attribuito fundamentalmente all'abbattimento (volate), alla movimentazione del materiale ed allo stoccaggio dell'abbattuto al piede del gradone.

Le emissioni possono essere caratterizzate tramite appropriate campionamenti e la distribuzione spaziale delle concentrazioni può essere definita a partire dai dati sperimentali tramite adatti modelli geostatistici. In questo caso, in mancanza di un numero adeguato di campioni si è preferito fare ricorso a valori tratti da un'ampia casistica riferibile ad attività di cava del tutto simili a quella esaminata in termini di potenza dell'impianto, organizzazione del lavoro, caratteristiche dell'impianto di trattamento, materiale estratto, ecc. Nella Tabella 19 sono riportati i valori del particolato solido disperso in aria, corrispondente alla quantità di minerale trattato dalle singole sorgenti di polvere individuate nella cava esaminata.

Fase di lavorazione	Quantità di materiale	Quantità specifica di polvere emessa	Quantità oraria di polvere emessa
Abbattimento	1200 t/h	0,067 kg/t	80 kg/h
Movimentazione	1200 t/h	0,021 kg/t	25 kg/h
Stoccaggio		1 kg/ha/giorno	0,0275 kg/h

Tabella 19 – Quantità di particolato solido emesso in aria dalle più significative sorgenti della cava sorgenti

La dispersione delle polveri è stata studiata in prima approssimazione adottando un modello di tipo *box* per lo *screening* degli effetti, in quanto capace di fornire le prime indicazioni sugli effetti di diluizione del particolato in atmosfera, sotto le seguenti ipotesi:

- l'inquinamento riguarda un volume di controllo a forma di parallelepipedo con geometria indicata nella Figura 54, in cui viene immessa globalmente una portata in massa m_k d'inquinante A_k ;
- l'aria all'interno del parallelepipedo è considerata perfettamente miscelata;
- il vento soffia con velocità costante u , diretta parallelamente ad un lato di lunghezza B (in assenza di affidabili rilievi sperimentali, si è assunto un valore, ritenuto cautelativo, di $u = 3$ m/s; questa scelta è giustificata dall'interesse puramente esplorativo della modellazione a questo stadio di approfondimento);
- il regime è stazionario per quanto concerne la quantità di polvere totale M (la quantità di polvere rimossa per diluizione atmosferica dal volume di controllo eguaglia ad ogni istante la portata in massa immessa) $\Rightarrow \frac{\Delta M}{\Delta t} = 0$;
- la massa volumica dell'aria, cioè la concentrazione di polveri sospese, è costante all'interno del volume di controllo;
- non ci sono reazioni chimiche;
- la concentrazione iniziale d'inquinante è nulla.

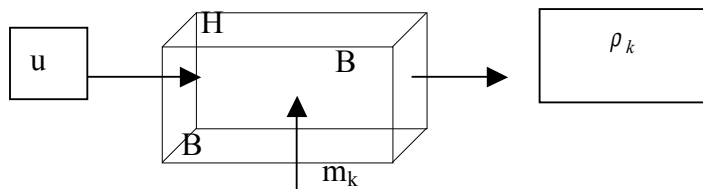


Figura 54– Schema del Modello BOX: all’ingresso (velocità del vento e portata in massa dell’inquinante) si associa come uscita del modello la concentrazione di quest’ultimo.

Effettuando, per il parallelepipedo considerato, il bilancio di massa di A_k (espresso in $\mu\text{g}/\text{m}^3$), si ha:

$$\rho_k = \frac{m_k}{u * B * H}$$

L’uso del volume di controllo, nel quale il lato B del parallelepipedo viene fatto coincidere con la distanza dalla sorgente, ed in cui si assume un’altezza H (“altezza di miscelazione”) pari a 100 m dal piano di campagna – in assenza di rilievi meteorologici affidabili – consente di visualizzare ad un primo livello di approssimazione l’effetto di diluizione cui vanno incontro le polveri prodotte in cava. Nella Figura 55 è riportata la densità di concentrazione di polveri nel territorio circostante la cava.

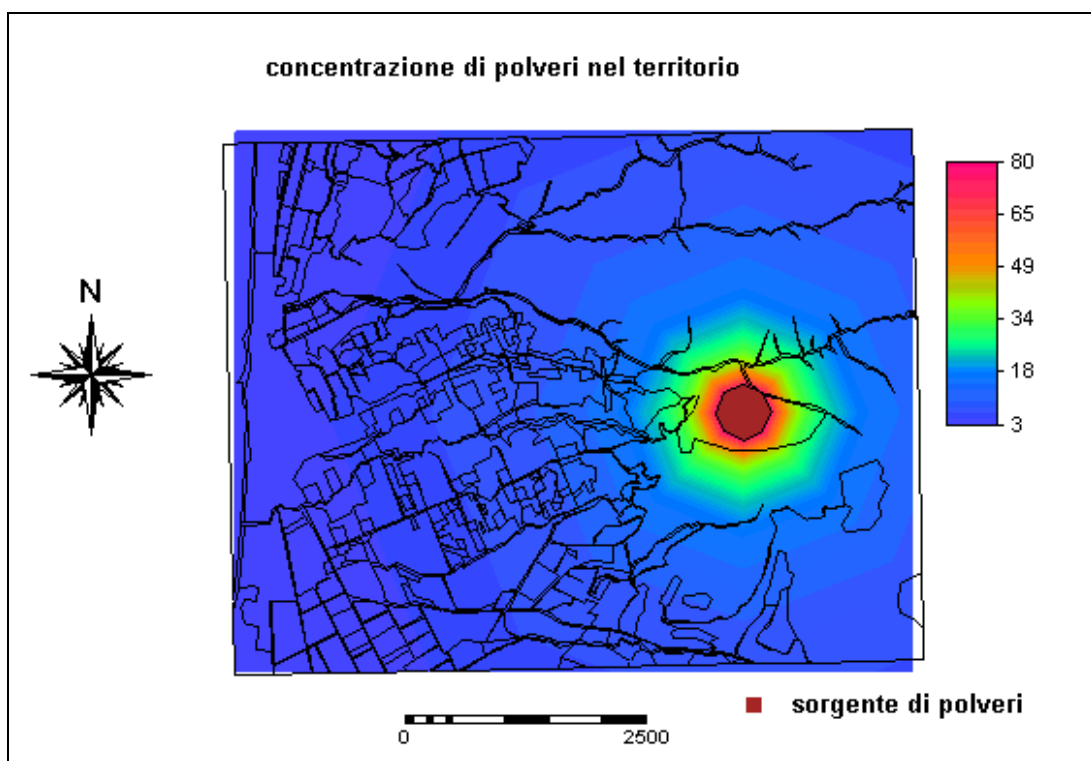


Figura 55– Mappa della distribuzione di polvere generata dalle attività di cava (concentrazioni in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Come si può notare, il modello di screening adottato per stimare la distribuzione dei valori della concentrazione di polveri sul territorio è isotropo e può fornire solo elementi di giudizio di prima

approssimazione. Gli ulteriori approfondimenti della ricerca sono stati indirizzati ad analizzare l'applicabilità ed i vantaggi conseguibili ricorrendo a modelli più complessi che effettivamente descrivano il fenomeno nelle diverse condizioni ambientali.

Vibrazioni nei terreni

Un vasto numero di ricerche teorico – sperimentali, sugli effetti dinamici indotti dalle volate, hanno portato a correlare i parametri fisici del fenomeno vibratorio con i danni. Una delle grandezze più utilizzate è la velocità massima di vibrazione delle particelle del terreno in prossimità delle strutture da salvaguardare. Il criterio della velocità massima è stato recepito da numerose normative, ampiamente riportate dalla letteratura specialistica (Cancedda et al., 1980), ed uno dei parametri esaminati nelle Raccomandazioni dell'ISRM (ISRM, 1994).

Le numerose leggi di correlazione tra la distanza dal punto di esplosione, la quantità di esplosivo che detona istantaneamente ed il punto di misura sono di forma esponenziale, del tipo:

$$V_{\max} = K \cdot R^{-n} \cdot Q^b$$

ove:

K, n, b sono parametri che dipendono dal tipo di volata, di esplosivo e dalle caratteristiche della formazione rocciosa;

R è la distanza dal punto di sparo (m);

Q è la quantità di esplosivo per ritardo (kg).

I valori proposti per i coefficienti b ed n sono vari (Cancedda et al., cit.).

Introducendo il concetto di distanza scalata si può scrivere la precedente relazione nel modo seguente:

$$V_{\max} = K \cdot \left(\frac{R}{Q^c} \right)^{-b}$$

dove R/Q^c è la distanza scalata.

Per c sono stati assunti valori variabili da 0.33 a 1. In altri termini, il valore massimo della velocità delle particelle o di una sua componente (verticale, longitudinale, trasversale) è dipendente dalla distanza scalata. In funzione dei valori limite di velocità delle particelle e di questa relazione, sono state proposte normative di sicurezza che impongono valori della distanza scalata:

$$\frac{R}{Q^c} > D_s$$

I valori dei coefficienti K e b sono stati assunti simili a quelli ottenuti in ammassi rocciosi carbonatici analoghi a quello coltivato dalla cava presa in considerazione da questa ricerca. Nella Tabella 20 sono riportati per ogni componente della velocità massima i valori dell'intercetta K e degli esponenti ottenuti con analisi di regressione.

roccia	Componente della velocità [cm/s]	b	K
--------	----------------------------------	---	---

calcare	V_v	1,553	37,042
	V_l	1,632	68,905
	V_t	1,654	56,517

Tabella 20– Coefficienti, ottenuti con analisi di regressione, della legge di decadimento della velocità, di vibrazione della particelle, con la distanza scalata [12]

La Figura 56 riporta la distribuzione dei valori massimi delle velocità di vibrazione delle particelle del terreno, indotta dal passaggio dell'onda sismica generata dalle volate in cava. La Figura 57 mostra la classificazione del territorio in base al comportamento nei confronti dei fenomeni vibratorii (DIN standard 4150).

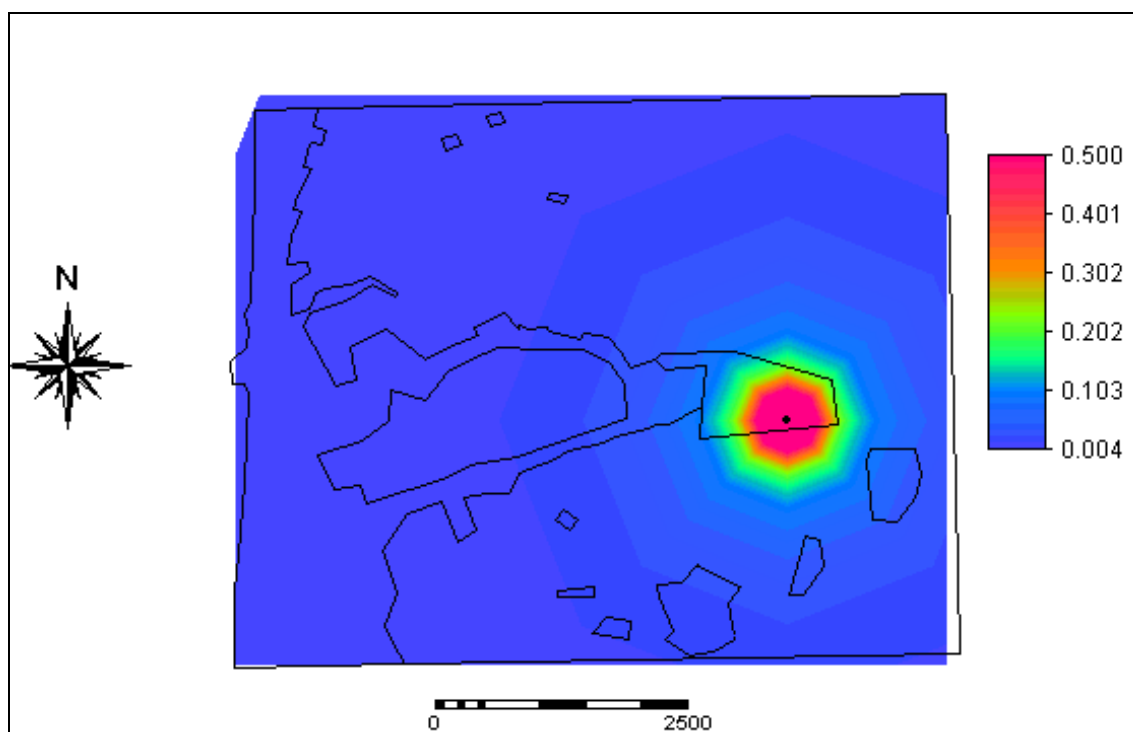


Figura 56– Effetti indotti da volate. Distribuzione dei valori massimi dello pseudovettore della velocità di vibrazione delle particelle. I valori sono espressi in cm/s.

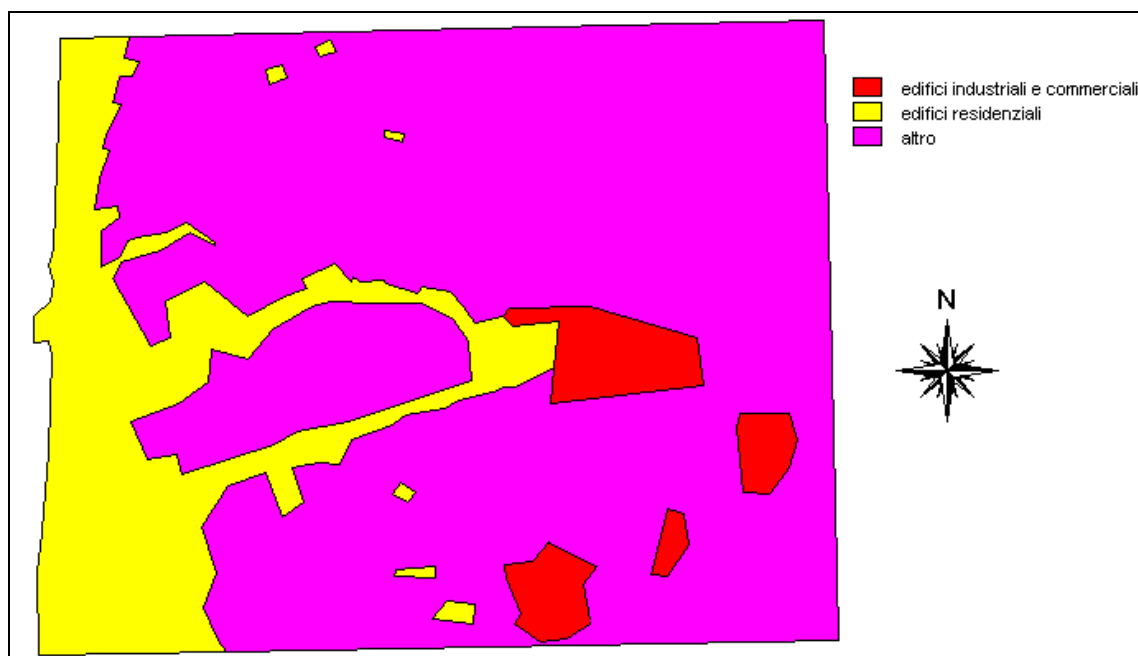


Figura 57– Zonizzazione del comportamento del territorio rispetto ai fenomeni vibratorii secondo la norma DIN Standard 4150.

Air blast

La detonazione di cariche esplosive causa un'onda di sovrappressione in aria (*air blast*) che può provocare danni alle strutture e recare grave disturbo acustico. L'analisi del fenomeno è piuttosto complessa, soprattutto per quanto riguarda la valutazione dell'ampiezza del picco dell'onda di pressione. L'onda sonora generata da un'esplosione è tipicamente un fenomeno impulsivo, e conseguentemente la valutazione dell'impatto acustico derivante dalla detonazione delle mine deve seguire logiche diverse rispetto al caso dei fenomeni acustici precedentemente trattati. La stima del livello sonoro, in funzione della distanza dalla sorgente, può essere ottenuta ricorrendo alla seguente relazione di tipo empirico (Kinney *et al.*, 1985; Baker, 1973; Granstrom, 1956; Berry *et al.*, 1994):

$$P = K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-n}$$

dove:

P = pressione sonora istantanea nel punto di misura, (Pa);

D = distanza dal punto di misura dall'esplosione, (m);

Q = carica istantanea, (kg);

K, n = coefficienti sperimentali.

Nella Figura 58 sono riportati i valori della pressione indotta in aria dalle volate.

valori del livello di pressione sonora indotti dall'esplosione [dB]

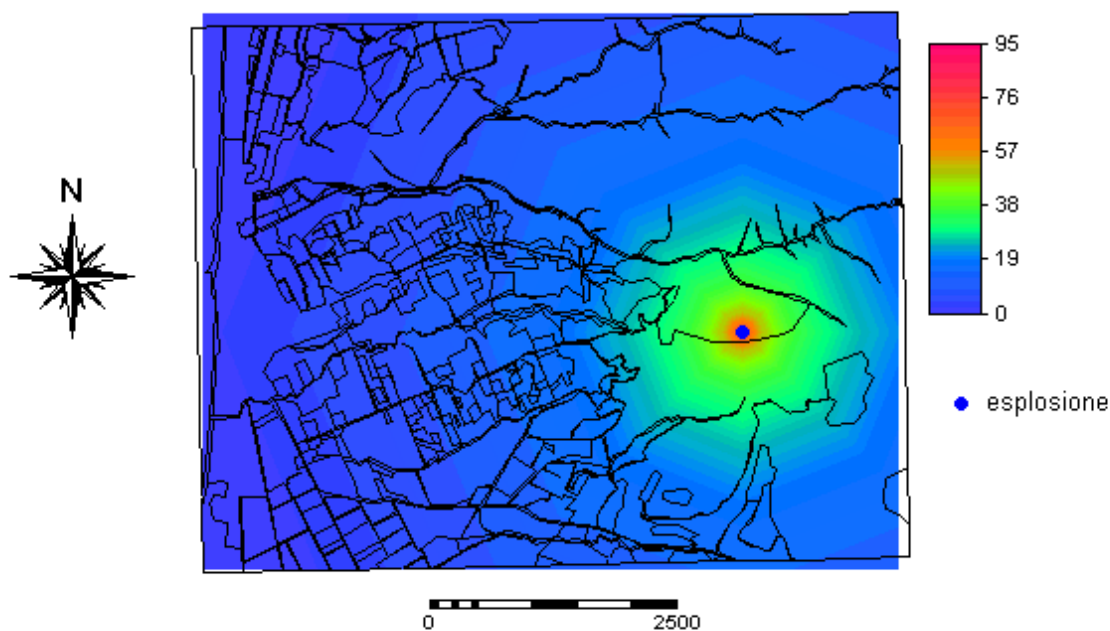


Figura 58– Distribuzione dei valori del livello di pressione in aria indotti da volate (valori in dB)

Nello studio della legge di propagazione della sovrappressione si è supposto che lo strato atmosferico, sede del fenomeno, sia immobile e omogeneo. In realtà, tali condizioni sono del tutto improbabili e occorrerebbe tenere conto dei valori puntuali del vento, dello stato termico e dell'umidità. Anche la morfologia e la natura del terreno possono dare luogo a fenomeni di riflessioni o di assorbimenti localizzati dell'onda di pressione. Il limitato numero di ricerche sull'argomento e la tipologia dell'impatto ambientale indotto dalla variazione impulsiva della pressione in aria che, per le volate adottate nella cava studiata, è circoscritto vicino al punto dell'esplosione, giustificano il ricorso all' algoritmo ora descritto, che è valido per propagazione isotropa.

Disturbance ecologica

Si è scelto di seguire un approccio, oggi largamente condiviso, allo studio degli impatti sugli ecosistemi, interpretando il paesaggio stesso come "sistema di ecosistemi" (Ingegnoli, 1994). Se con il termine ecosistema si intende rappresentare l'insieme degli organismi viventi nel territorio e la loro interazione con il substrato fisico, ogni paesaggio può essere analizzato come insieme di ecosistemi differenti (boschi, siepi, strade, ecc.) chiaramente distinguibili l'uno dall'altro.

Per valutare il disturbo ecologico che l'attività estrattiva presa in considerazione induce sul paesaggio, si è adottato l'Indice di Biopotenzialità Territoriale (Btc) (Ingegnoli, 1994, 1996) valutandone la variazione dalle condizioni precedenti l'insediamento estrattivo (Figura 59) allo stato attuale (Figura 60). La Btc è un indicatore sintetico calcolabile a partire da considerazioni sul concetto di stabilità resistente (resistance stability) dei principali tipi di ecosistemi della biosfera, e dai loro dati metabolici

(biomassa, produzione primaria lorda, respirazione). L'indice è espresso in $\text{Mcal}/\text{m}^2/\text{anno}$. Una gamma di valori indicativi della Btc è stata calcolata sulla media di elementi paesistici (macchie paesistiche) tipici dell'Europa centro – meridionale, elencati con riferimento a naturalità ed antropicità (Ingegnoli, 1994). Al livello di screening proprio dell'analisi svolta, si è utilizzato questo indice come desunto da detta tabulazione, mentre per analisi più specifiche è possibile perfezionare il calcolo (Ingegnoli, 1996).

Si assegna ad ogni macchia paesistica della zona esaminata un valore di Btc.

Ogni macchia del paesaggio è idealmente divisa in due parti: il nucleo (core), o parte interna della macchia, e il bordo (buffer), o parte esterna della macchia.

Si suppone che il valore di Btc sia costante all'interno del nucleo, ed invece nella fascia di bordo il valore vari linearmente fra i due valori di nucleo delle macchie confinanti, come è indicato negli schemi della Figura 61.

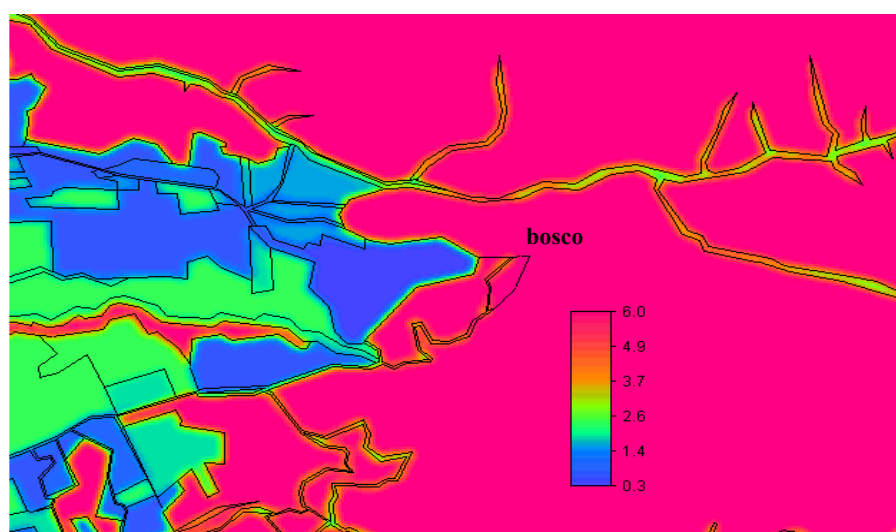


Figura 59– Situazione della Biopotenzialità Territoriale (Btc) prima dell'insediamento della cava. Sulla destra è rappresentata l'ampia macchia boschiva interessata dall'insediamento industriale (valori in $\text{Mcal}/\text{m}^2/\text{anno}$).

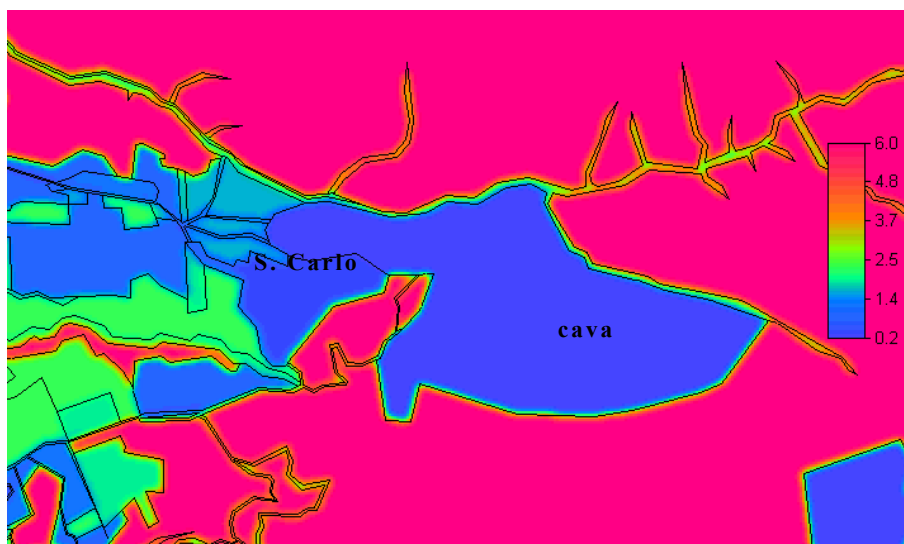


Figura 60– Vista ravvicinata della mappa della biopotenzialità Territoriale (Btc) dopo l'insediamento della cava (valori in Mcal/m²/anno). Si nota che la cava provoca un drastico calo della Btc, che si estende al di là dei confini fisici del sito industriale con la legge di variazione convenzionalmente assunta.

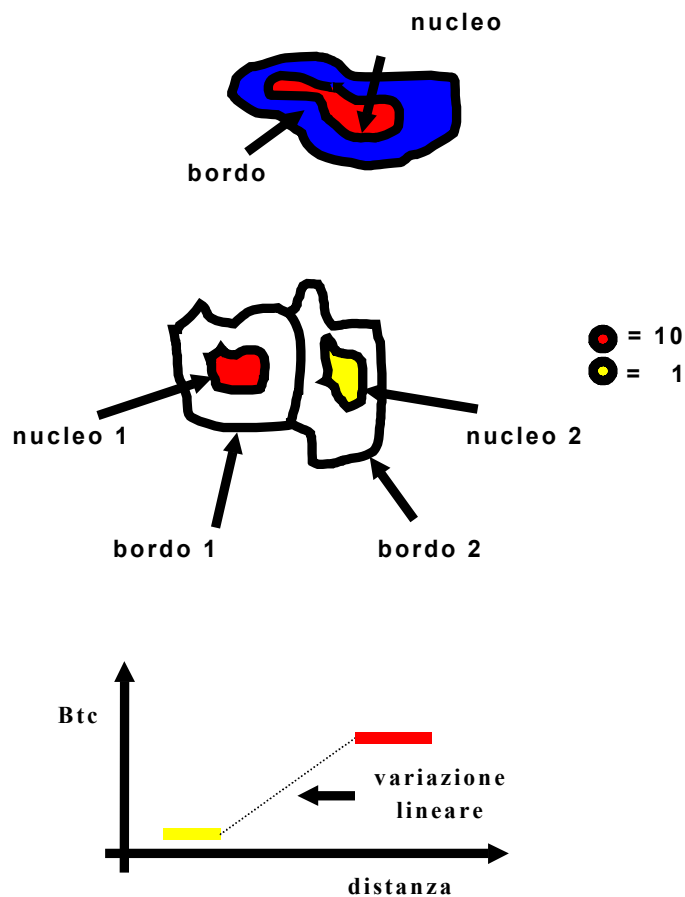


Figura 61– Concetto di macchia o ecosistema definito tramite il nucleo ed il bordo, e schema della variazione del valore di Btc tra due ecosistemi adiacenti.

Impatto visivo

L'impatto visivo di una cava, o di un grande scavo, sul paesaggio si può ricondurre a due fatti essenziali: il primo è dato dal grado di contrasto tra il nuovo aspetto delle zone scavate rispetto alle circostanti; il secondo è legato all'estensione del disturbo ed è riconducibile ai volumi scavati ed in particolare alla superficie del fronte di scavo visibile sui piani dello scenario paesaggistico.

In questo studio si è scelto di utilizzare come indicatore di impatto visivo la percentuale di area occupata dalla superficie di cava rispetto all'area del campo visivo umano ad una data distanza. Il campo visivo umano può essere sinteticamente rappresentato attraverso un'ellisse con le caratteristiche geometriche dello schema di Figura 62.

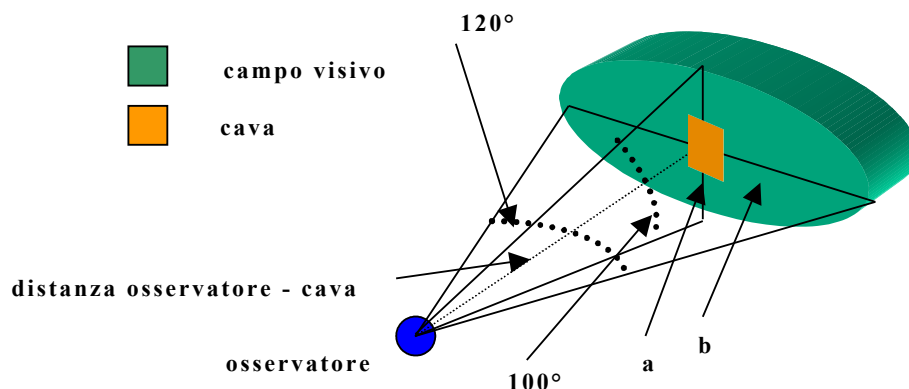


Figura 62– Schema della geometria del campo visivo umano

Nello schema, sono indicati i parametri geometrici che vengono calcolati come segue:

- semiasse minore $a = \text{distanza osservatore - cava} * \text{tg}(50^\circ)$
- semiasse maggiore $b = \text{distanza osservatore - cava} * \text{tg}(60^\circ)$

L'area del campo visivo vale $a * b * \pi$;

In questo modo, per ogni distanza osservatore – cava e per ogni angolazione è possibile stimare, almeno in prima approssimazione, la percentuale di area occupata dalla cava rispetto all'area osservata dal campo visivo umano; come è intuitivo, questa percentuale diminuisce per motivi puramente geometrici all'aumentare della distanza dalla cava.

Per individuare i punti da cui la cava è visibile (*viewshed* o bacino di influenza visiva dell'oggetto) ci si è basati sul modello digitale del terreno o DEM (Digital Elevation Model) (Patrono e Saldana, 1997) della zona della cava, suddividendo il fronte di scavo in strisce verticali di ampiezza unitaria (un pixel) per le quali fosse possibile assumere un'altezza del fronte di scavo costante e pari alla media. Il calcolo fornisce una mappa di tipo binario, in cui viene assegnato il valore 1 ai pixel da cui il fronte è visibile, il valore 0 ai pixel rimanenti. Sommando per ogni pixel il valore (0 o 1) riferito ad ognuna delle strisce, e moltiplicando questo valore per l'area di ciascuna striscia, si ottiene per ogni punto il valore dell'area del fronte di scavo visibile. Effettuando il rapporto fra l'area così calcolata e l'area del campo visivo sopra definita, si ottiene la mappa dell'indicatore di impatto visivo già ricordato (Figura 63).

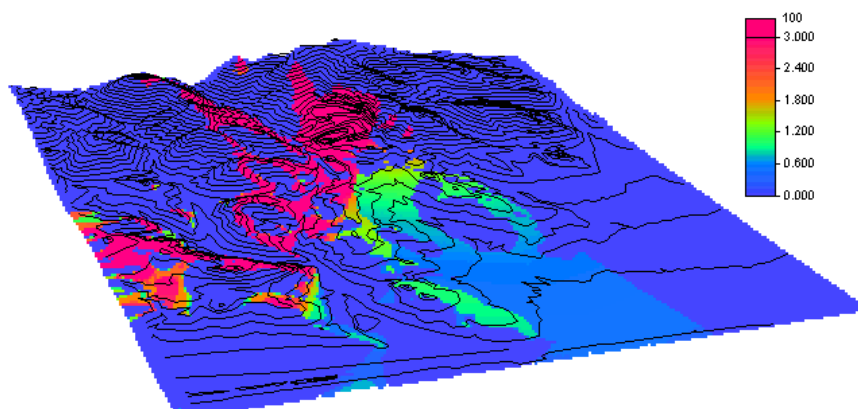


Figura 63– Visualizzazione volumetrica della mappa dei valori del rapporto (espresso come percentuale) tra area occupata dalla superficie di cava e area del campo visivo umano (si noti che, per evidenziare la variazione dell'indicatore, si è effettuato uno *stretching* lineare dei valori fra lo 0 ed il 3%)

La valutazione e sovrapposizione dei vari impatti

Non esistono regole generali che indichino come convertire i dati di intensità dei fenomeni materiali (livelli di rumore, concentrazione di polvere, velocità delle vibrazioni, impatto visivo, ecc.), che sono potenziali *indicatori* di impatto, in *indici* assoluti di impatto ambientale. In questo studio si è scelto di individuare soglie significative di questi indicatori, alle quali viene assegnato un valore nella scala degli impatti (y) convenzionalmente variabile fra 0 e 10, come già proposto in molti altri studi di impatto ambientale (Vismara, 1992).

Come criterio generale, si è deciso di assegnare alla grandezza y il valore 10 in corrispondenza dei punti che hanno valori immediatamente inferiori alle soglie limite di normativa, quando questa esiste³⁴; il valore 5 ai punti corrispondenti ai valori guida; il valore 0 ai punti che corrispondono all'assenza di impatto. Nei casi in cui una normativa non è disponibile, o non ha senso parlare di soglie, si è normalizzato sulla scala dell'impatto y l'intero range dei valori.

I punti così ottenuti, disposti nel diagramma degli impatti (valore dell'indicatore, impatto), devono essere riportati ad una funzione continua, per poter classificare un *range* continuo di valori degli indicatori in un *range* altrettanto continuo di impatti. Nel caso in esame si è scelto di procedere effettuando un'analisi del *best fit* e di utilizzare la funzione di regressione così calcolata per ciascun caso. Occorre notare che la procedura ha lo scopo di riclassificare il valore degli indicatori in un valore di impatto su scala normalizzata; pertanto, non si può affermare che esista una procedura migliore delle altre, occorre invece giustificare razionalmente le scelte fatte, e sottoporre a discussione i risultati che discendono da queste scelte. La valutazione dell'impatto deve essere giudicata e validata non sulla base della sua oggettività, ma della sua capacità di rappresentare effettivamente gli impatti percepiti, il che richiede non un calcolo ingegnerizzabile, ma una notevole capacità interpretativa della previsione di impatto, nell'evidenziare le forme e le distribuzioni dei disturbi.

A titolo d'esempio, si riporta la valutazione dell'indice di impatto per le polveri. Il DPR 203/88 fornisce, per la qualità dell'aria, il valore limite ed il valore guida, riportati qui di seguito.

Polveri	Valore guida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valore limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Particelle sospese	50	150

Tabella 21– Concentrazioni in aria ammesse per le polveri

I valori dell'indice d'impatto sono assegnati considerando il possibile aumento della concentrazione di polveri, provocato dalle attività di cava, rispetto al valore guida ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) già supposto presente nell'aria.

³⁴ Si ritiene legittima questa assunzione dal momento che i limiti, per i casi considerati, sono stati valutati *safe side* per cui, anche con valori vicini alla soglia, non si hanno situazioni che da elevati *impatti* degenerino in veri e propri *rischi*.

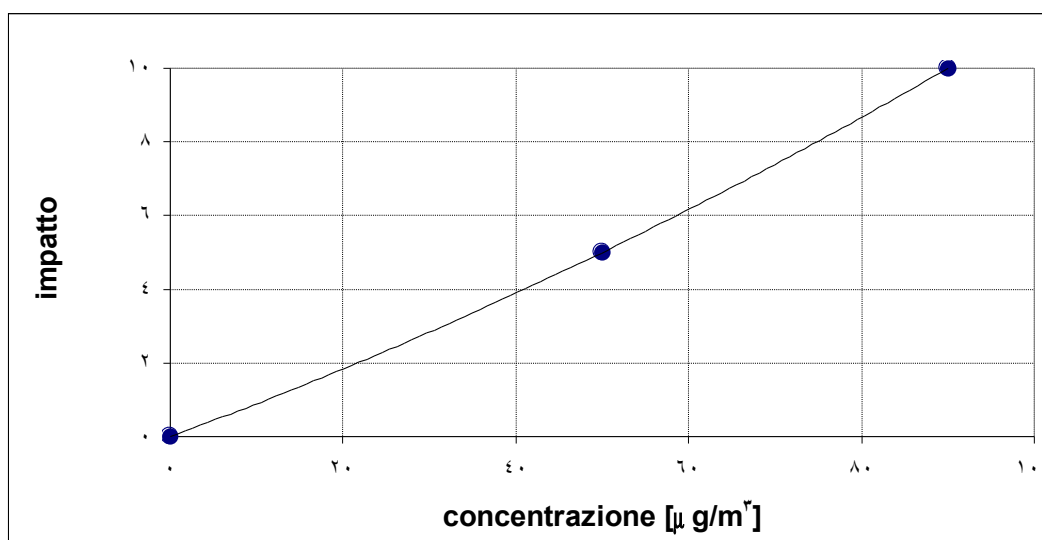
Tabella 22– Valori dell'indice d'impatto corrispondenti alle concentrazioni di polveri nell'aria

Indice d'impatto (y)	Concentrazione di polvere indotta dalle lavorazioni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentrazione totale nell'aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0	0	50
5	50	100
10	≥ 90	≥ 140

Con riferimento al diagramma di impatto di Figura 64, l'analisi di regressione ha fornito la seguente di correlazione tra la funzione impatto e la concentrazione di polveri:

$$y_p = 0,0003 \cdot x^2 + 0,0861 \cdot x$$

Con analoghe procedure si ottengono gli impatti per tutte le azioni considerate.

**Figura 64– Indici di impatto per le polveri corrispondenti a tre diverse concentrazioni in aria**

L'indice d'impatto ambientale globale è stato calcolato come somma pesata tra i vari indici, tutti sulla stessa scala, ottenuti analogamente all'esempio descritto. Il peso (importanza) assegnato ad ogni indice d'impatto (e quindi ad ogni azione) è stato ricavato attraverso la tecnica di analisi multicriterio nota come Analytical Hierarchy Process (Saaty, 1980), che consiste in un'analisi dell'importanza relativa tra gli impatti, confrontati a due a due.

Con tale approccio, si costruisce una matrice (che risulta essere una matrice reciproca), assegnando alla posizione (i, j) un valore variabile da 1 a 9 (Tabella 23) a seconda del livello di superiorità dell'importanza dell'impatto i sull'impatto j. Se l'impatto j è più importante dell'impatto i, si assegna alla posizione (i, j) l'inverso del valore (1/3, 1/5 ecc.). La matrice assegnata nello studio descritto è mostrata in Tabella 24.

Si può dimostrare (Saaty, 1977) che il vettore dei pesi da assegnare ai diversi impatti è l'autovettore normalizzato associato all'unico autovalore non nullo della matrice stessa, che nel caso studiato è risultato pari a:

$$\lambda_{\max} = 6,1378$$

La Tabella 25 riporta i pesi calcolati con il metodo descritto.

Importanza	Definizione
1	Medesima importanza
3	Importanza moderatamente superiore
5	Importanza superiore
7	Importanza nettamente superiore
9	Assoluta predominanza
2,4,6,8	Valori intermedi fra i precedenti

Tabella 23– Valori di superiorità di importanza

	Rumore	Polveri	Air blast	Vibrazioni	Impatto visivo	Disturbance ecologica
Rumore	1	3	4	5	1/4	1/2
Polveri	1/3	1	2	3	1/5	1/3
Air blast	1/4	1/2	1	2	1/7	1/5
Vibrazioni	1/5	1/3	1/2	1	1/9	1/7
Impatto visivo	4	5	7	9	1	2
Disturbance ecologica	2	3	5	7	1/2	1

Tabella 24– Matrice dei confronti a coppie

Azione	Rumore	Polveri	Air blast	Vibrazioni	Impatto visivo	Disturbance ecologica
pesi normalizzati	0,1630	0,0816	0,0500	0,0326	0,4271	0,2457

Tabella 25– Pesi normalizzati

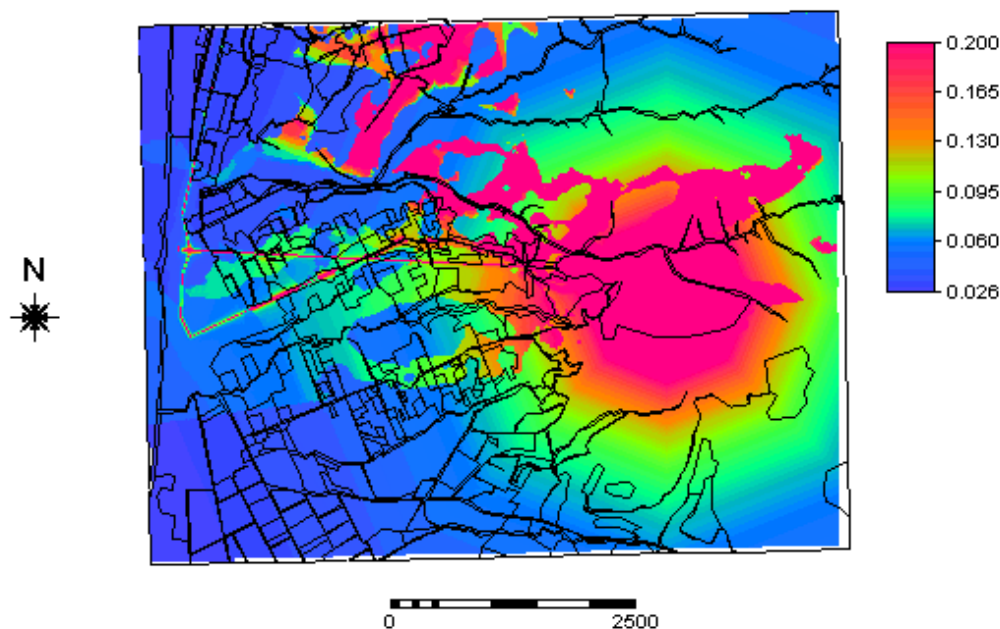


Figura 65– Impatto ambientale globale ottenuto per somma pesata dei valori normalizzati degli impatti. I valori hanno significato all'interno di una scala di condizione relativa, e non assoluta; possono pertanto essere utilizzati solo per visualizzare le aree sottoposte a maggiore impatto all'interno del contesto di studio.

Per verificare che i pesi trovati siano corretti, si ricorre all'indice di consistenza della matrice, da calcolare secondo quanto riportato in Saaty, 1977: questo indice deve risultare inferiore ad 1 ed il più possibile vicino a 0. Se l'indice di consistenza ha valore maggiore di 1, significa che vi sono delle incongruenze nell'assegnazione dei valori d'importanza nella matrice dei confronti a coppie. La verifica, che è unicamente di tipo logico, conferisce rigore all'intero processo di confronti multipli. Nel caso della cava presa in considerazione, l'indice di consistenza è risultato essere molto basso e pari a $\mu = 0,0276$. Bisogna comunque sempre tenere presente che ciascun giudizio di confronto è viziato dalla soggettività di chi lo esprime, ma si ritiene più facile accordarsi su un confronto a coppie che su una scala di importanza complessiva. Questo ha portato alla scelta del metodo del confronto a coppie rispetto alle molte alternative disponibili fra le tecniche di analisi multicriterio. La Figura 65 riporta la mappa dei valori di impatto complessivo ottenuto.

L'uso degli indici complessivi di impatto a supporto delle decisioni

Lo spirito con cui si esegue la valutazione di impatto è, in ultima analisi, di individuare le zone a maggiore impatto e le cause da cui esso dipende. Si ritiene che l'approccio proposto offra la possibilità di simulare tutti gli scenari conseguenti ad interventi finalizzati alla mitigazione degli impatti stessi. Ad esempio, l'effetto in termini di variazione degli indici di impatto di un rilevato con funzione di barriera acustica e visiva, messo in opera nella zona ovest dell'area estrattiva, è mostrato dalla Figura 66.

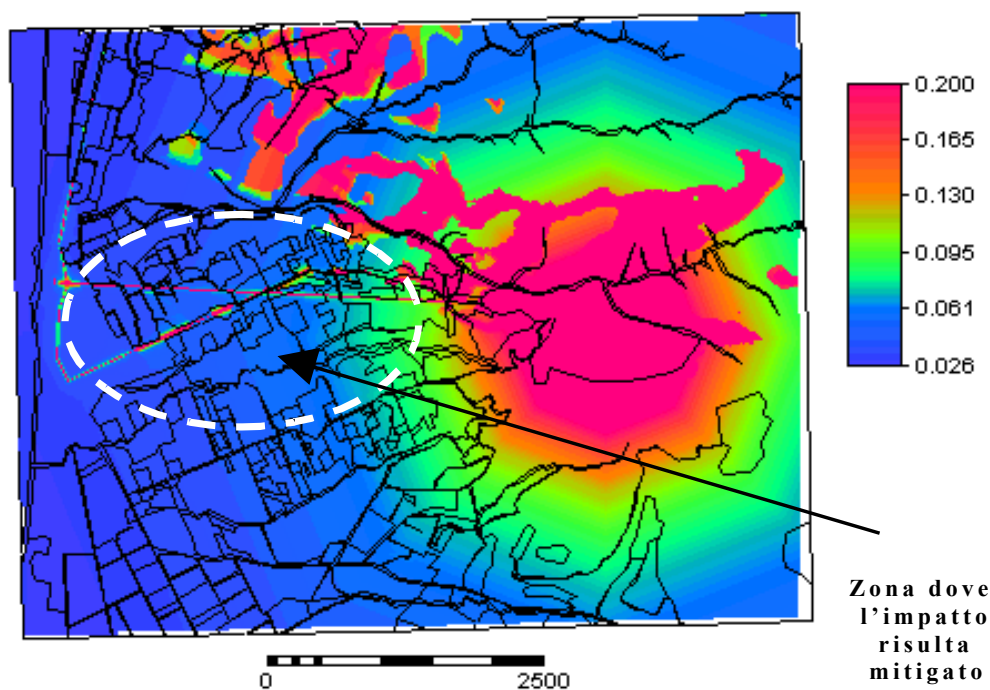


Figura 66– Esempio di effetto della mitigazione dell'impatto visivo ed acustico

L'esempio illustra come la VIA possa essere uno strumento di supporto al progettista per: correggere e ottimizzare gli aspetti delle lavorazioni già esistenti che più danneggiano l'ambiente fino ad arrivare ad un compromesso che soddisfa tutte le parti in causa; operare una scelta che sia la più corretta ed oggettiva possibile tra una serie di alternative di progetto riguardanti l'avviamento dell'attività estrattiva.

Ancora una volta si rimarca l'interpretazione 'anti-positivista' della VIA: non si tratta di un metodo formale standardizzabile per estrarre valutazioni con pretesa di oggettività, ma di un processo interattivo nel quale i progettisti, gli analisti e i pianificatori si incontrano con le varie parti coinvolte, mettendo al centro della discussione gli effetti materiali valutati per vari possibili scenari. Il passaggio dalla stima degli effetti materiali al giudizio del loro impatto ha il compito di evidenziare, sulla base di un giudizio soggettivo ma razionalmente giustificabile, il complesso dei fenomeni che deriva dall'interazione di molteplici impatti elementari. Il metodo proposto, che ricorre ad una tecnica multicriterio di confronto a coppie e a strumenti di modellistica cartografica all'interno dello stesso

software applicativo, sembra mostrare buona capacità di soddisfare sia le esigenze di valutare gli effetti materiali, sia quelle di fornire un giudizio di facile lettura e di pronto utilizzo nella discussione.

Conclusioni

L'applicazione di tecniche di analisi basate sui GIS, per la valutazione dell'impatto ambientale delle attività estrattive, consente di sfruttare in modo ottimale:

l'insieme degli elementi di conoscenza sul contesto territoriale, in cui si vuole attivare l'insediamento industriale;

la descrizione matematica previsionale di fenomeni fisici indotti dalla cava.

al fine di caratterizzare gli impatti stessi e di controllare l'efficienza ed efficacia degli interventi di mitigazione.

I GIS costituiscono l'ambiente ideale per l'implementazione di questo tipo di procedura, perché consentono un input ed un output cartografico dei dati e facilitano perciò l'inserimento del calcolo proposto all'interno dei processi di piano (Pistocchi, 1999). Nel caso studiato, sono stati trascurati molti aspetti di dettaglio, ed in particolare una modellazione della dispersione di polveri che tenga conto del tipo di terreno, dell'orografia e della direzione prevalente del vento. I risultati esposti sono relativi solo ai passi iniziali del programma di ricerca, che prevede, tra l'altro, di inglobare nella procedura algoritmi più evoluti per la modellistica della fase atmosferica ed un approfondimento degli aspetti relativi ai fenomeni dell'air blast e delle vibrazioni del terreno. Attualmente si stanno analizzando gli effetti, sulla valutazione degli impatti relativi a questi due fenomeni, di opportuni pesi sulle distanze, derivanti dalla considerazione dei diversi materiali geologici attraversati dall'onda di pressione.

Un altro aspetto da studiare è la possibilità di utilizzare valori caratteristici della distribuzione dei valori numerici considerati (le mappe degli impatti) nel contesto di un quadro (ad esempio matrice AEVIA: Ballestrazzi e Imolesi, 1994) di indici di impatto. L'utilità di questo tipo di schemi è ancora importante, soprattutto in sede di confronto complessivo fra alternative (più cave poste in diversi contesti) ed esplicitazione dell'ordine di preferenza. A tale scopo, possono essere utilizzati come punteggi in ingresso nelle matrici, opportunamente riorganizzate, i parametri statistici dell'istogramma dei valori delle mappe di impatto (massimo, media, mediana, ecc.).

Al momento pare possibile concludere che il pieno sfruttamento sia dei dati spazialmente distribuiti circa il territorio in cui si collocherà la cava, sia della conoscenza "a valore aggiunto" derivante dalla modellazione previsionale dei fenomeni fisici, consentono di caratterizzare in maniera piuttosto completa il progetto e i suoi effetti sull'ambiente, nonché di indirizzare le scelte progettuali e valutarne l'efficacia e sostenibilità.

2- Un approccio-quadro integrato per la localizzazione ottimale delle attività estrattive e gli usi del suolo indesiderati

Introduzione

In generale, si può descrivere il problema della pianificazione territoriale fisica come problema di minimizzazione dei conflitti negli usi diversi e fra loro competitivi delle risorse naturali e del territorio. In particolare, questo è vero allorché si tratta di localizzare usi del suolo localmente non desiderati. Lober (1995) fornisce una discussione delle esigenze di integrazione fra la modellistica e le analisi relative ai fattori fisici determinanti le scelte di piano, e la comprensione della risposta dei sistemi sociali in condizioni in cui si debbano prendere decisioni che limitano gli interessi di alcuni o di tutti i gruppi interagenti sul territorio.

Nel supportare la costruzione di consenso e la definizione di possibili soluzioni di compromesso, si sono messi a punto negli anni numerosi tipi di tecniche di analisi multicriterio (p.es. Malczewskij, 1999), che spesso oggi sono viste come “modelli” dai quali può scaturire una risposta dotata di qualche superiore virtù “scientifica” rispetto alle altre procedure, formali ed informali, con le quali si può pervenire ad una decisione (si veda p.es. l’uso delle tecniche di supporto alle decisioni fatto in Canziani *et al.*, 2000).

Nel presente lavoro si adotta il punto di vista per cui l’analisi multicriterio è *un’arte del mettere sul tavolo della discussione le considerazioni appropriate per il giudizio razionale* di una situazione cui il piano dà risposte, e per escludere dal novero delle decisioni possibili quelle che manifestano conseguenze indesiderate su alcuni aspetti ritenuti vincolanti.

Le tecniche di analisi multicriterio presentano il vantaggio innegabile di costringere i diversi attori sociali a dare un peso – un’importanza relativa- a tutte le istanze espresse a proposito del problema considerato. Si può pertanto ritenere che, una volta garantito che siano stati scelti i criteri appropriati, e che di ciascuno sia possibile definire un indicatore rappresentativo, le tecniche di analisi multicriterio forniscano un catalizzatore di consenso al processo di discussione politica. L’aspetto problematico dell’analisi multicriterio, per cui essa non può essere guardata tecnocraticamente come metodo di soluzione automatica dei problemi, è più nella *scelta di criteri appropriati*, rappresentativi degli aspetti rilevanti di una decisione, e di indicatori adeguati per ciascuno di essi, che non nel *valore dei pesi degli stessi, del metodo di combinazione dei criteri e di definizione dell’ordine di preferibilità delle alternative di scelta*. Gli indicatori, generalmente derivanti dall’elaborazione di dati provenienti da monitoraggi o da modelli di calcolo, devono soddisfare requisiti essenziali di trasparenza, riproducibilità, capacità di sintesi ed esaustività nel descrivere l’aspetto del problema cui si riferiscono. Fusco Girard e Nijkamp (1997) e Bettini (1996) fra gli altri discutono le caratteristiche sulla cui base scegliere un insieme di indicatori appropriato.

Quanto poi alla scelta delle regole sintattiche con cui combinare i vari criteri e i loro indicatori per ottenere il giudizio complessivo di ognuna delle alternative di scelta ai fini della loro graduatoria, si ritiene che solo *il test empirico e contingente*, ogni volta, *di numerosi metodi* possa fornire lo spettro dei possibili esiti della decisione in base ai criteri adottati, e che sia quindi necessario valutare la sensitività della decisione rispetto alla tecnica di combinazione dei criteri (si veda Napolitano e Fabbri, 1995; Napolitano, 1997).

In ultima istanza, quando è ben caratterizzato lo spettro di variabilità delle decisioni razionali (ovvero di tutte le decisioni cui si potrebbe pervenire adottando in modo consistente i criteri condivisi) rimane comunque un passaggio irriducibilmente soggettivo e oggetto di valutazioni politiche oltre che tecniche la presa della decisione.

Nel seguito si descrive un caso di studio in cui si ritiene che l’uso di tecniche formalizzate di analisi multicriterio faciliti la discussione razionale e catalizzi il raggiungimento di un possibile consenso. Nello spirito delle osservazioni di cui sopra, si è proceduto a una accurata valutazione di sensitività del giudizio rispetto ai criteri e rispetto alle tecniche di combinazione degli stessi, limitandosi per semplicità a due possibili approcci (la somma pesata e il TOPSIS).

Descrizione dell’area di studio e posizione del problema

Si è concentrata l’attenzione sull’area di studio del bacino del fiume Savio, in provincia di Forlì-Cesena. La scelta del bacino idrografico come unità di pianificazione di riferimento (p.es. Cannata, 1993) è stata fatta in linea con le indicazioni della normativa esistente in materia di difesa del suolo e di uso delle risorse naturali. Per l’area esiste una pianificazione di livello provinciale delle attività estrattive (piano infraregionale, PIAE) a norma delle disposizioni della Regione Emilia Romagna.

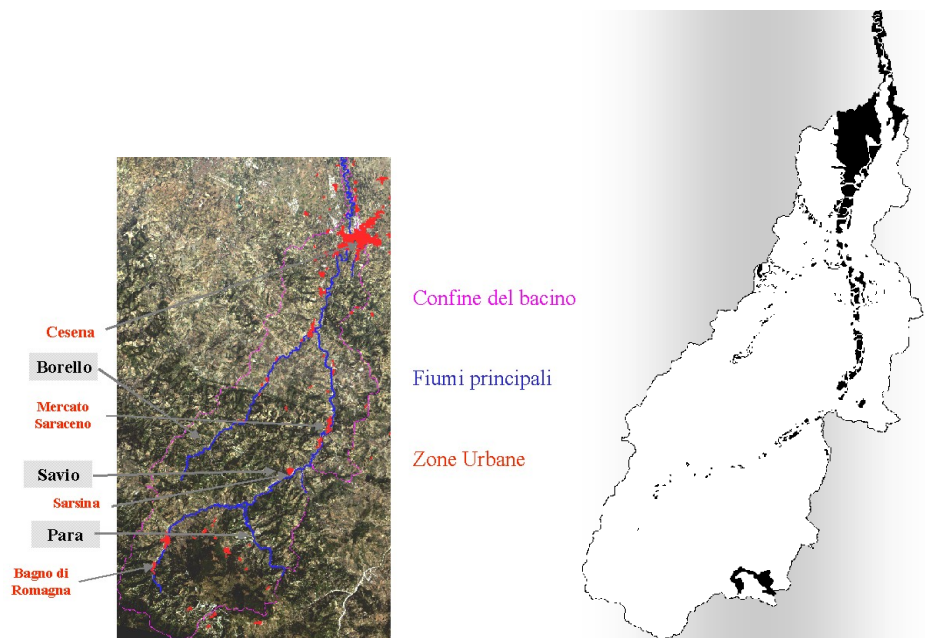


Figura 67 – localizzazione dell'area e visualizzazione dei giacimenti di interesse per lo studio.

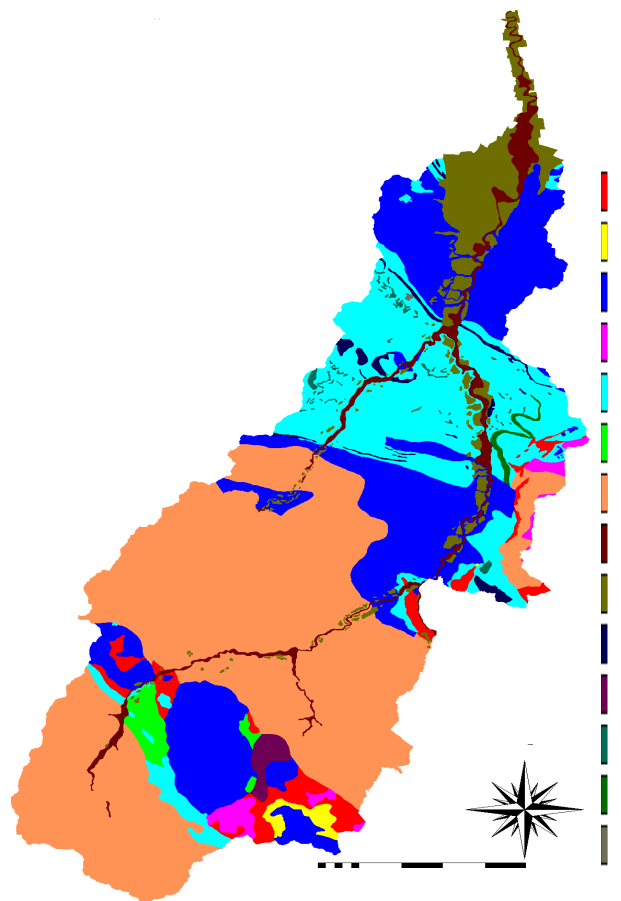


Figura 68- unità litologiche principali: a) complesso caotico delle "argille scagliose" e terreni argilloso marnosi caotici (Cretaceo-Eocene); b) calcare a briozoi della formazione di S. Marino e calcareniti (Miocene inferiore e medio); c) molasse con sottili intercalazioni marnose della formazione marnoso-arenacea (Miocene); d) calcari marnosi, calcari marnosi alt. a marne, marne calcaree e marne arenacee (Miocene medio-Eocene); e) argille, argille marnose e marne argillose (Pleistocene- Tortoniano); f) blocchi e detriti arenacei su rocce marnose o su "argille scagliose" (Olocene); g) alternanze di arenarie e marne della formazione marnoso-arenacea (Miocene); h) alluvioni ghiaioso-sabbiose o sabbiose (Olocene); i) alluvioni terrazzate e terreni alluvionali della pianura (Olocene-Pleistocene); l) gessi ed altre rocce della formazione gessoso-solfifera (Messiniano); m) blocchi e detriti calcarei (Olocene); n) conglomerati (Messiniano); o) molasse in alternanza con argille sabbiose (Pliocene); p) detriti di varia litologia derivanti da attività mineraria.

Il PIAE dell'assemblea dei comuni per la programmazione dell'ambito territoriale cesenate (Assemblea dei Comuni del Cesenate, 1995) interessa quindici Comuni: Bagno di Romagna, Borghi, Cesena, Cesenatico, Gambettola, Gatteo, Longiano, Mercato Saraceno, Montiano, Roncofreddo, Sarsina, Savignano sul Rubicone, S. Mauro Pascoli, Sogliano al Rubicone e Verghereto.

Solamente alcuni di essi rientrano all'interno del bacino del Savio: Sarsina e Mercato Saraceno rientrano totalmente nel bacino, Verghereto rientra per circa il 75 %, Bagno di Romagna per circa il 53 %, Cesena per circa il 45 %, Roncofreddo per circa il 19 % e Sogliano per circa il 22 %.

I dati raccolti ed elaborati nel Piano Infraregionale delle Attività Estrattive provengono da sopralluoghi e rilievi diretti sul terreno, dall'insieme dei Piani Comunali delle Attività Estrattive adottati o in adozione nel territorio in esame, dalla documentazione regionale e locale disponibile presso l'Assemblea dei Comuni Cesenate, da stime quantitative relative ai consumi riscontrati in passato in particolari settori e da una specifica indagine conoscitiva, attuata sia mediante interviste dirette

informali (associazioni di categoria, esperti ecc.), sia attraverso l'invio di schede appositamente predisposte ai Comuni interessati dall'attività estrattiva, ai Comuni privi di questa attività, agli esercenti le cave, ai titolari degli impianti di trasformazione e agli enti interessati ai prodotti dell'attività estrattiva. Una valutazione critica dell'insieme dei dati disponibili e verifiche dirette hanno tuttavia consentito di inquadrare la situazione in atto e di fare ragionevoli previsioni circa le future necessità di materiali litoidi, sulle quali basare il dimensionamento del piano.

Per la stima del fabbisogno di materiale litoide, si considera che i comuni appartenenti al bacino idrografico del Savio richiedano circa la metà del fabbisogno stimato dal PIAE per i quindici comuni dell'Assemblea. È una approssimazione dettata dalla difficoltà di reperire informazioni riguardanti l'effettiva richiesta da parte di ciascun Comune appartenente al bacino del Savio. Per la quantificazione dei fabbisogni nel decennio di attuazione del Piano Infraregionale delle Attività Estrattive i materiali litoidi sono stati suddivisi nelle seguenti categorie:

- a) materiali per l'edilizia residenziale, turistico ricettiva, industriale-artigianale (con riferimento alla pianificazione urbanistica);
- b) materiali per insediamenti, spazi e attrezzature pubbliche (con riferimento alla pianificazione urbanistica);
- c) materiali per opere pubbliche infrastrutturali, come strade, acquedotti, fognature ecc. (manutenzione o nuova costruzione secondo le programmazioni comunali e degli Enti istituzionali operanti nell'area in oggetto);
- d) materiali per l'industria (attività in atto o in progetto note);
- e) materiali per murature in pietrame, per rivestimenti ecc.

I risultati delle analisi del PIAE hanno portato alle seguenti quantificazioni:

- a- Il fabbisogno decennale previsto è di molasse (arenarie localmente dette "tufo") per 11040000 mc, materiali argillosi (2100000 mc), ghiaie e sabbie alluvionali (3600000 mc);
- b- Il quantitativo di materiale litoide richiesto dai comuni ricadenti nel bacino: molasse 5520000 mc; ghiaie e sabbie alluvionali 1800000 mc.
- c- Il quadro generale delle disponibilità estraibili dalle cave in atto ricadenti all'interno del bacino del Savio è di 8210000mc di arenarie e 200000 mc di ghiaie e sabbie.
- d- Si ritiene necessario estrarre 1200000 mc di ghiaie e sabbie, mentre il fabbisogno di arenarie è soddisfatto dalle cave esistenti.

Il problema è di scegliere la localizzazione delle attività estrattive in modo da soddisfare il fabbisogno espresso dalle precedenti analisi, mantenendo al minimo il livello di interferenza con gli altri sistemi del territorio, che in questo caso, e allo scopo di una prima valutazione, sono stati identificati nel sistema degli equilibri naturali, dell'opposizione della popolazione ai disturbi locali indotti dalle attività di coltivazione, e delle potenzialità agricole. Ovviamente, possono essere identificati e formalizzati altri criteri che qui non sono stati studiati. Si sottolinea che, a parere di chi scrive, l'aspetto più problematico del *decision making* non è nella scelta delle tecniche formali di valutazione, bensì nella possibilità di definire criteri appropriati e un indicatore corretto per ciascuno di essi, che restituisca una buona rappresentazione degli aspetti differenziali del criterio, ovvero delle differenze fra i vari punti del territorio che il criterio evidenzia o deve evidenziare. Gli indicatori non devono quindi essere strumenti per la simulazione del funzionamento di processi e strutture "reali", ma solo tecniche di classificazione appropriate. Di seguito si descrive con qualche dettaglio la metodica con cui sono stati costruiti gli indicatori scelti, fermo restando che per ulteriori approfondimenti è sempre possibile acquisire nuovi dati, utilizzare modelli di maggiore dettaglio o semplicemente aggiungere nuovi criteri.

Nel procedimento, l'uso di un sistema informativo geografico (GIS) riveste un ruolo non solo strumentale, ma anche di strutturazione del ragionamento e di supporto alla comunicazione dei risultati, dal momento che la rappresentazione e il giudizio sui criteri avviene in modo distribuito sul territorio e deve quindi rispondere ad una logica di tipo cartografico. Come apparirà dall'illustrazione del procedimento, l'uso dei GIS rende fattibili un gran numero di esperimenti numerici sui dati che facilitano la disamina degli indicatori e la loro scelta valutando quali fra essi danno un'immagine più credibile del territorio.

Un presupposto del lavoro è che i modelli debbano essere costruiti anche in assenza di dati approfonditi, non con la speranza di ottenere in automatico risposte ai problemi, ma con l'obiettivo di chiarire i problemi stessi ed evidenziare eventuali vuoti di conoscenza. Alcuni passaggi potranno perciò essere eccessivamente semplificativi, ma hanno il solo scopo di gettare un seme di discussione fondato sul livello attuale di conoscenza, e non di fornire una risposta in forma chiusa.

I criteri adottati

Un criterio tecnico-minerario

Il primo criterio adottato è quello del vantaggio comparativo di tipo tecnico-minerario. Questo è ben descritto, per il problema in esame, da un indice di costi relativi sia all'impianto dell'attività, sia al trasporto del materiale estratto. I costi dovranno essere riferiti all'unità di volume del materiale estratto, dal momento che piccoli giacimenti possono non essere economicamente significativi a causa di elevati costi iniziali di impianto.

Non potendo prendere in considerazione al livello della pianificazione tutti i costi da sostenere per la cava, si sono valutati solo i più significativi fra quelli "differenziali", che variano in base alla scelta della localizzazione dell'attività estrattiva: il risultato di questa sezione di analisi non ha la pretesa di definire il margine del cavatore, ma solo di dare un'indicazione sui siti che comportano meno costi, sia dal punto di vista del trasporto del materiale estratto verso la sua destinazione successiva, sia relativamente alla realizzazione di viabilità. Lo spirito della modellazione è quello di produrre valutazioni comparative e non assolute. Allo stesso modo, non si pensa di poter quantificare tutti i benefici del cavatore; si cercherà solo di stimare, in maniera molto approssimativa, la quantità di prodotto che si potrà estrarre dal giacimento. Saranno quindi determinati, per ogni pixel della zona in esame: i costi per la realizzazione di nuova viabilità di servizio per l'accesso alla cava; i costi di trasporto, riferiti al metro cubo di materiale; la stima della quantità di materiale estraibile. Le tre grandezze verranno valutate in maniera semplificativa considerando rispettivamente tre sottoindici:

- I_{CC} : valutazione dei costi per la costruzione di viabilità;
- I_{CTi} : valutazione dei costi di trasporto per il materiale "i";
- I_{PAi} : valutazione della produzione attesa di materiale "i".

Si ricorda che il materiale qui considerato è ghiaia o sabbia, che in prima approssimazione viene considerato omogeneo.

Una volta calcolati i tre sottoindici per l'intera area da sottoporre a valutazione, con la procedura descritta nelle pagine seguenti, si riassume la valutazione di convenienza economica in un indice generale, rappresentativo del criterio minerario (I_{CM}). L'espressione proposta per l'indice complessivo di vantaggio economico-minerario è la seguente:

$$I_{CM} = \frac{I_{CC}}{I_{PAi}} + I_{CTi}$$

Ovviamente, l'indice assunto qui ha un significato generale e metodologico, mentre per le varie situazioni specifiche potrebbero essere assunte altre voci di costo, come ad es. quella relativa allo smaltimento in discarica dello scarto.

Nel seguito si discuteranno le varie componenti dell'indice "minerario", a cominciare dalla voce del costo di costruzione delle strade.

È impossibile valutare, senza un progetto di massima, il costo effettivo da sostenere per realizzare il sistema di comunicazione viaria tra l'ipotetico sito di cava e la viabilità ordinaria. Per la sua determinazione sarebbe necessario conoscere con precisione il tracciato della strada. Per questa ragione, nella procedura vengono proposti indici comparativi: essi non danno il reale costo da sostenere per la realizzazione delle opere, ma comunque sono *realistici*, nel senso che rispettano la scala delle priorità dei diversi siti, relativamente ai costi da sostenere per la realizzazione delle strade. Si è preferito dare dimensioni monetarie all'indice (£/m³), per poter effettuare confronti con l'indice dei costi di trasporto.

Per valutare i costi di realizzazione della viabilità di cava, sarà necessario, prima di tutto, la misura della distanza dalla strada esistente più vicina. Se la strada andrà realizzata su un terreno con una certa pendenza α , essa avrà una lunghezza minima effettiva:

$$l_1 = \frac{d}{\cos(\alpha)}$$

dove d è la distanza in pianta dalla cava alla strada più vicina. Se, inoltre, la pendenza del terreno (α), è maggiore della pendenza massima superabile dai comuni mezzi impiegati in cava (γ), allora sarà necessario realizzare una strada il cui tracciato (rappresentato in rosso in Figura 69), avrà una lunghezza minima l_2 , equivalente alla lunghezza della linea in colore blu nella stessa figura, che vale:

$$l_2 = \frac{d \times \text{tg}(\alpha)}{\sin(\gamma)}$$

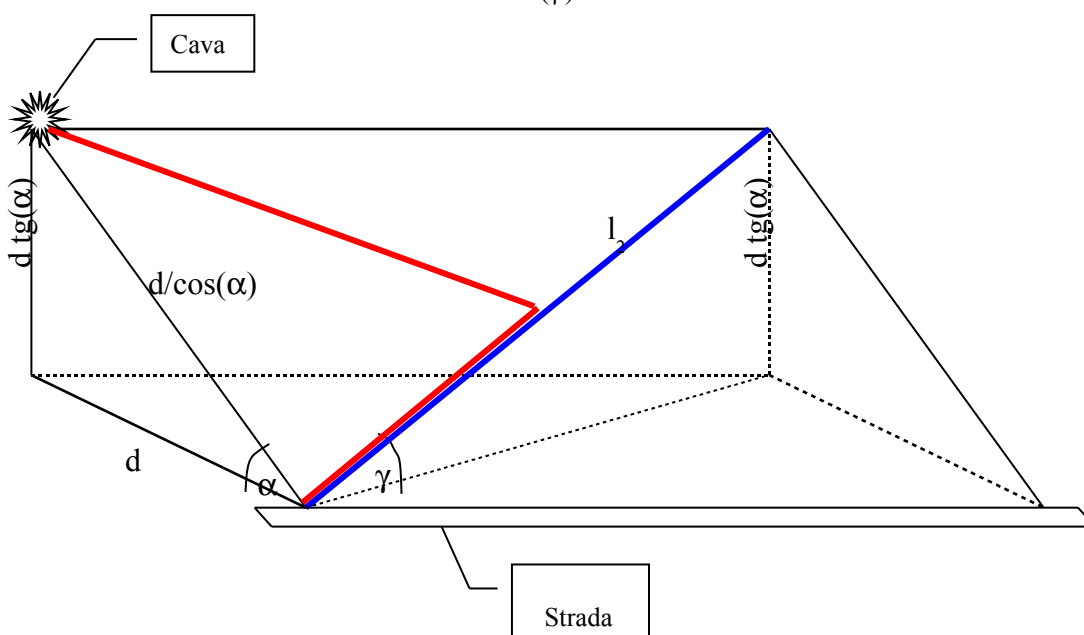


Figura 69- schema per il calcolo della lunghezza delle strade di accesso

In termini di modellazione GIS, queste considerazioni equivalgono ad impostare il calcolo di una distanza pesata con pesi:

$$\frac{1}{\cos(\alpha)} \quad \text{se } \alpha \leq \gamma$$

$$\frac{\text{tg}(\alpha)}{\sin(\gamma)} \quad \text{se } \alpha > \gamma$$

a partire da un modello digitale del terreno che consenta di valutare α in ogni pixel. In questo modo, si ottiene una mappa il cui valore in ogni punto riporta la lunghezza minima necessaria per la realizzazione di una strada fino alla strada esistente più vicina. Bisognerà solo moltiplicare il valore

presente in ogni cella per il costo di realizzazione della strada, CR (in £/m), per avere il valore dell'indice dei costi di costruzione, che risulta indipendente dal tipo di materiale estratto:

$$I_{cc} = L \times CR \quad [£]$$

Essendo L la lunghezza della strada sopra determinata, e CR il costo unitario di realizzazione.

In generale, occorrerà tenere conto dell'influenza del materiale del substrato, delle condizioni morfologiche e topografiche nelle quali si deve realizzare la strada, ai fini della determinazione dei costi di costruzione.

Il valore CR in verità dipenderebbe da tantissimi fattori (pendenza del terreno, tipo di strada, opere d'arte...); assegnando un valore medio alla costante CR si deve essere ben consci di aver realizzato una approssimazione grossolana, ma necessaria per poter ridurre l'indice a valori monetari confrontabili con i costi di trasporto.

Il problema è qui accennato ma non viene affrontato per semplicità, in mancanza di una mappa geologico-tecnica adeguata. Si rinvia ad Akinyede (1990) per una approfondita discussione circa la costruzione di sistemi informativi geotecnici distribuiti per la valutazione dei costi di realizzazione delle strade e la selezione dei percorsi ottimali sotto il profilo tecnico-economico.

L'indice dei costi di trasporto dovrà contenere una indicazione sul costo da sostenere per il trasporto del materiale estratto, dalla cava verso la sua successiva destinazione. Si propone pertanto, per il materiale considerato (si noti che a seconda del tipo di materiale possono verificarsi differenze notevoli nelle modalità, e quindi nei costi, di trasporto) l'indice $I_{CT} = CT/c1$, dove CT= costi di trasporto riferiti alla singola corsa del mezzo di trasporto, e c1= costante da valutare caso per caso.

Il valore di c1 rappresenta, nel caso di estrazione di sabbie e pietrisco considerato nel seguito, il cui trasporto avviene su gomma, il valore in metri cubi trasportati dal camion che effettua il trasporto dalla cava alla destinazione successiva. Anche in questo caso, si deve dare una stima di questa grandezza; si tratta comunque di un'approssimazione, ma più accettabile di quella precedente sul costo di realizzazione della strada. È necessario fare un'ipotesi sul mezzo che effettuerà il trasporto e considerarne i dati tecnici. I costi di trasporto CT saranno valutati a partire da due grandezze, calcolate per ogni pixel della mappa raster della zona in esame:

1. la distanza viaria minima dal punto che indica la destinazione successiva all'estrazione del materiale considerato D_{vi} ;
2. il tempo di percorrenza, TP_i , seguendo il percorso determinato.

Moltiplicando poi i valori ottenuti, rispettivamente per il costo chilometrico e per il costo orario di trasporto e sommandoli, si avrà il valore dei costi di trasporto associati ad ogni possibile localizzazione dell'attività estrattiva. Sarà necessario, prima di tutto, stabilire la destinazione del materiale estratto in cava:

- Se si sta valutando la localizzazione della cava di un materiale da lavorare in un frantoio, sarà necessario disporre della mappa di localizzazione dei frantoi esistenti: questa dovrà essere realizzata in modo da avere dei valori definiti solo nelle celle in cui sono localizzati i frantoi, e indefiniti altrove.
- Se si sta valutando la localizzazione di una cava di argilla, o di un qualsiasi altro materiale con una destinazione obbligata verso un particolare impianto di lavorazione, si procederà ad effettuare la procedura già vista, ponendo però come punto origine da cui calcolare la distanza, l'impianto stesso.
- Più in generale, per un materiale che non abbia una destinazione ben precisa, si può calcolare la distanza dalle vie di comunicazione principali. Poiché alla scala di dettaglio di questa analisi, non si hanno quasi mai informazioni molto precise riguardo alla destinazione del materiale, si può procedere in questo modo anche con i materiali argillosi e con quelli da frantoio già visti; può succedere, per esempio, che il materiale estratto dalla cava abbia diversi impieghi a seconda della qualità od altro.

Nella generalità dei casi, quindi, si procederà al calcolo della distanza dalle vie di comunicazione principali. Questo viene fatto ricorrendo a *routine* di analisi spaziale tipiche di quasi tutti i GIS di tipo raster.

Per la valutazione dei tempi di percorrenza sarebbero necessari i dati sulla velocità media di un automezzo, stimati per ogni tratto della rete viaria, tenendo conto delle potenzialità del mezzo, dei limiti prescritti dal Codice della strada e delle condizioni medie di traffico. A tal fine, è necessario effettuare una stima, anche molto approssimata, della velocità media che il camion potrebbe avere, in funzione del tipo di strada percorsa. Assegnando come velocità media in pianura, su strade extraurbane, il valore del limite di velocità previsto dal Codice della Strada in base al tipo di strada percorsa (Autostrada, o strada extraurbana), e dei valori inferiori per le provinciali e le comunali. Tali valori andrebbero diminuiti di una percentuale in funzione della topografia della zona. Non disponendo del valore di pendenza media delle singole strade, si sono assunte, nel caso esemplificativo sotto riportato, i seguenti valori:

- Velocità media di un automezzo, in pianura, su strade extraurbane poco trafficate:
- 80 km/h sulle autostrade e superstrade
- 70 km/h sulle statali
- 60 km/h sulle provinciali
- 50 km/h sulle comunali
- Riduzione percentuale in base alla topografia della zona³⁵:
- meno 30% su strade di collina
- meno 50% su strade di montagna
- Velocità media imposta nell'attraversamento di centri urbani e di strade particolarmente trafficate:
- 20 km/h

Per avere il tempo di percorrenza totale, comprensivo cioè anche del percorso fatto lungo la viabilità di cava, bisognerà semplicemente aggiungere ai valori presenti nelle celle, la quantità:

$$TPVC = L' / VMVC$$

dove:

L' = distanza dalla strada più vicina

$VMVC$ = velocità media stimata sulla viabilità di cava.

La mappa risultante riporterà in ogni punto il tempo di percorrenza fino alla destinazione considerata.

L'indice dei costi di trasporto (in andata e ritorno) può ora essere definito, in ogni poligono della mappa Risovinc, per ogni materiale "i", come:

$$ICTi = (CO \times 2 \times TPVC + CC \times 2 \times Distviar / 1000) / c1$$

dove:

CO = costo orario del trasporto

CC = costo chilometrico del trasporto

$C1$ = metri cubi trasportati dal camion

Il valore del costo orario e del costo chilometrico del trasporto possono essere facilmente reperiti presso le varie associazioni di categoria degli autotrasportatori.

I due indici di costo dell'attività estrattiva devono essere raffrontati ad un indice di valore della produzione, esprimendo ognuno sulla stessa scala di valori. Sarebbe possibile stimare il valore della produzione attesa di una cava solo avendo a disposizione dati ben precisi riguardo l'estensione del giacimento e il progetto di coltivazione, riportante il valore in metri cubi che si prevede di estrarre durante la vita della cava. A livello di pianificazione, quando ancora questi dati non sono disponibili, si propone di basarsi sulle seguenti considerazioni di massima.

Innanzitutto, si presuppone che la produzione attesa sia proporzionale all'estensione areale della zona in cui è permesso installare la cava. Questo non è necessariamente vero, in quanto possono esistere dei fattori, non quantificabili al livello di dettaglio di questa analisi, che potrebbero portare ad una diminuzione del valore così ottenuto. Sarebbero da valutare, per esempio:

- la consistenza del giacimento (che andrà valutata tramite dei sondaggi);
- i metodi di coltivazione (in base ad una buona scelta si può sfruttare tutto il giacimento, o solo in parte);

³⁵ *Andrà quantificata con valori-soglia di pendenza l'appartenenza ad una o all'altra classe*

- il tipo di recupero a cui sarà destinata la cava dopo il suo esaurimento (in un recupero forestale si possono lasciare delle pendenze maggiori rispetto ad un recupero agricolo);
- scelte strategiche riguardo al materiale in esame (è possibile che si voglia salvaguardare il giacimento per l'uso futuro, e quindi sfruttarlo solo in percentuale minima)
- la effettiva disponibilità dei terreni (non è detto che un proprietario terriero voglia cedere il suo terreno per realizzare un'attività estrattiva o il sistema della viabilità di accesso).

In senso generale, in luogo della mappa delle aree si dovrebbe considerare una mappa dei volumi. Questa, in assenza di una precisa conoscenza tridimensionale dei giacimenti, può essere tuttavia stimata, ad un primo livello, a partire dalla mappa delle aree e dalle conoscenze geologiche disponibili. Questo lungo e complesso passaggio non è stato compiuto, esulando dagli scopi del lavoro, nel caso di studio esemplificativo di seguito riportato. Si è ipotizzato semplicemente che i volumi fossero tutti proporzionali alle relative aree planimetriche dei giacimenti, con la stessa costante di proporzionalità (lo stesso spessore medio). E' di per sé evidente il limite approssimativo della scelta.

Le aree disponibili, assunte quindi come indicatore dei volumi di giacimento disponibili (pur con le limitazioni dette), sono ricavate dal "ritaglio" del territorio con le zonizzazioni di vincolo delle varie norme e dei piani vigenti nell'area (Figura 70).

Si definisce in generale l'indice di produzione attesa come: $I_{pai} = A_i \times H_i \times \eta_i$

dove :

- A_i = superficie asportabile del giacimento
- H_i = costante da valutare caso per caso
- η_i = rendimento dell'operazione di estrazione

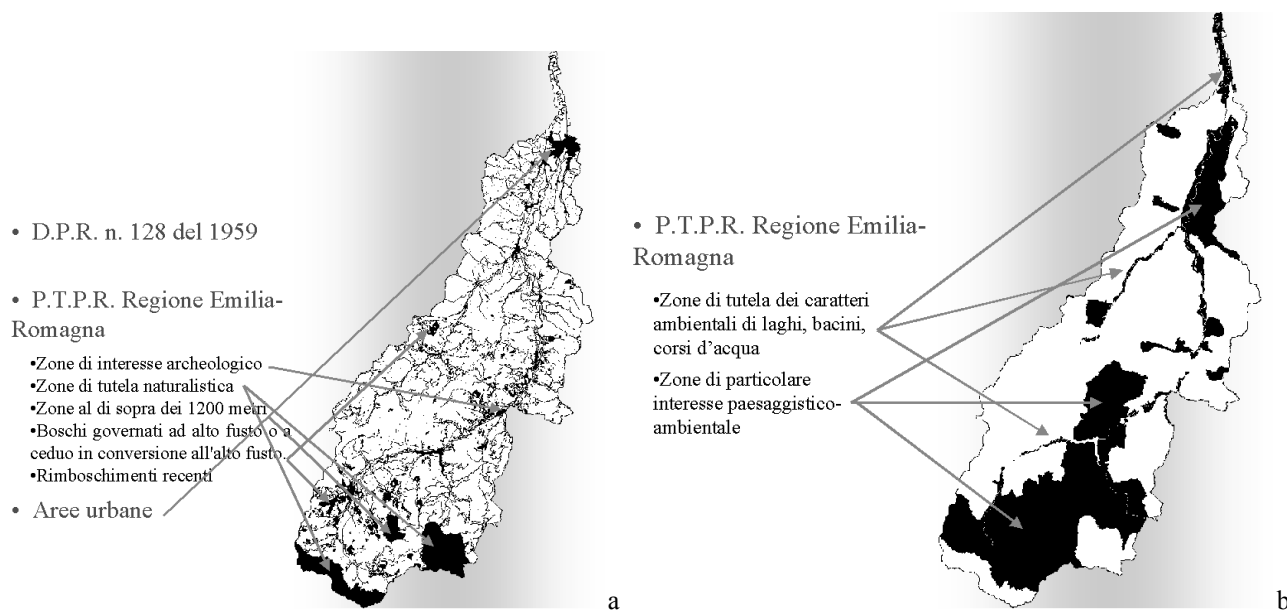


Figura 70 – vincoli da norme nazionali e regionali: a- vincoli inderogabili; b- vincoli derogabili

La costante H_i ha le dimensioni di una lunghezza: essa dovrebbe approssimare l'altezza media del fronte in modo da dare una stima del volume totale di materiale asportato.

La costante η_i invece considera che non tutto il materiale rimosso è da anettere alla produzione; nella determinazione del suo valore devono essere considerati:

- la presenza di intercalari sterili, e
- la quantità di sfrido stimato in base al tipo di coltivazione.

Nel caso in esame, si è assunto H_i e η_i costante su tutta l'area.

Avendo determinato una mappa per ciascuno dei tre indicatori tecnico-economico, si può produrre, attraverso una semplice *map calculation*, la mappa dell'indice di vantaggio tecnico-economico ("criterio minerario"):

$$I_{CM} = \frac{I_{CC}}{I_{PAi}} + I_{CTi}$$

La mappa raster così creata è un segnalatore del costo unitario di estrazione in ciascun punto del territorio, e può essere standardizzata fra 0 e 1, con valori vicini ad 1 nel caso dei siti più favorevoli, attraverso la formula:

$$S = 1 - \frac{I_{CM} - I_{CM \min}}{I_{CM \max} - I_{CM \min}}$$

dove:

S = punteggio normalizzato da zero a uno
 ICMmax = massimo valore dell'indice nella mappa
 ICMmin = minimo valore dell'indice nella mappa

Un criterio di opposizione sociale

Il secondo criterio qui proposto riguarda l'opposizione sociale attesa. Poiché si tratta di un fenomeno estremamente complesso e spesso di difficile previsione, nella pratica si è sempre evitato di dargli una rappresentazione "scientifica". Si conviene con Lober (1995), tuttavia, che spesso la mancata considerazione di questo tipo di criterio produce scenari di piano che sono difficilmente realizzabili a causa di una protesta, che assume le forme della sindrome NIMBY (Not In My BackYard, "non nelle giardino di casa mia") ed è difficile da gestire negli ordinari processi di *decision making*. Lober (ibid.) fornisce un approccio empirico mettendo la percentuale della popolazione che si oppone al progetto (nel caso, impianti di trattamento dei rifiuti) in relazione logaritmica con la distanza dal sito del progetto. Ovviamente, il modello proposto funziona sulla base di dati sperimentali affidabili ed è estremamente sensibile al tipo di progetto. Nel caso delle attività estrattive non esistono elementi per la valutazione dei coefficienti di un simile modello, ed è anche da dimostrare che la struttura generale di tipo logaritmico abbia una sua validità. Nel caso esemplificativo sotto riportato si è preferito considerare come indice di opposizione sociale la semplice densità di abitazioni in un raggio di 800 metri: più elevato sarà il suo valore, maggiore sarà la popolazione contraria alla nuova attività estrattiva. Per una migliore rappresentazione del criterio, è parso soddisfacente riportare questo indicatore su scala logaritmica, in analogia con il lavoro di Lober (cit.), ma ovviamente si tratta di una prima ipotesi di lavoro che dovrà essere adeguatamente affinata. A livello metodologico generale, si segnala invece l'opportunità di tenere in considerazione un criterio di questo tipo per minimizzare gli effetti che un "tema paura" (Luhmann, 1983) come la localizzazione di un uso del suolo non del tutto desiderato o indesiderato può provocare. In definitiva, l'espressione adottata per l'indice di opposizione sociale, dopo averne normalizzato il valore, è:

$$IOP = \frac{\ln(ncase800m + 1)}{\ln(\max ncase800m)}$$

Essendo $ncase800m$ il numero di case in un intorno locale di raggio pari a 800 m.

Un criterio di *land evaluation*

Il terzo criterio concerne usi del suolo alternativi, e in particolare usi di tipo agricolo. Il rationale che sottende questo criterio è che, a parità degli altri criteri, dovrebbero essere destinate ad attività estrattiva le aree con minore vocazione agricola, quali risultano da una *land evaluation* allo scopo. Lo stesso discorso potrebbe essere fatto per tutte le altre alternative di uso economico del suolo, ma ci sembra che l'agricoltura sia l'unica, in pratica, ad essere veramente alternativa alle attività estrattive, anche per il fatto che sfrutta equilibri naturali o seminaturali che le cave distruggono per diversi anni dopo il loro termine, e che invece non sono rilevati nella stessa misura per altri usi del suolo.

La valutazione dell'attitudine agronomica dei suoli, operazione generalmente complessa e richiedente un'*expertise* di tipo specialistico (si veda p.es. Davidson, ...), è stata condotta nell'ambito di questo studio ricorrendo ad alcuni criteri generali reperibili in bibliografia (Giardini, 1995) e opportunamente pesati con un'analisi multicriterio basata sul metodo additivo con la tecnica dell'*Analytical Hierarchy Process* (Saaty, 1977, 1980).

I criteri (le proprietà dei suoli) e i relativi pesi sono riportati in Tabella 26. I suoli sono stati poi classificati in accordo con questi criteri, a partire dai dati della carta pedologica regionale in scala 1:250.000 (Regione Emilia Romagna, 1994) e dall'indice di De Martonne, calcolato dai dati di temperatura e precipitazione regionalizzati sull'area per regressione multipla rispetto alla distanza dalla linea di costa e alla quota topografica (Pistocchi e Neri, 2000) a partire dalle osservazioni del Servizio Idrografico e Mareografico Italiano (Regione Emilia Romagna, 1996).

I dettagli sull'assegnazione dei giudizi possono essere reperiti in Micaroni, 2000.

PROPRIETÀ =>	PENDENZA	PROFONDITÀ	DISPONIBILITÀ IDRICA	DISPONIBILITÀ NUTRIENTI	DISPONIBILITÀ OSSIGENO
Peso	0,4604	0,2528	0,1057	0,1057	0,0754

Tabella 26– criteri e relativi pesi usati per la valutazione agronomica dei terreni.

Un criterio di protezione della natura

Il quarto criterio riguarda il valore della conservazione della natura. Anche in questo caso, si ha a che fare con una grande difficoltà di definizione del criterio e di un indicatore appropriato per rappresentarlo. In molti casi di studio sono riportate applicazioni di indici derivanti dall'ecologia e dall'ecologia del paesaggio (p.es. Ingegnoli, 1994; Ingegnoli, 1996). Altre volte si ricorre a indicatori scelti sulla base di ragionamenti qualitativi di tipo booleano, come in McHarg, 1969. Pearce e Turner (1989) forniscono una approfondita discussione dei principi economici sui quali è possibile basare un'analisi del valore della conservazione della natura. In questa applicazione si è scelto semplicemente di combinare in un unico indicatore, con pesi arbitrariamente fissati nel 25 % e 75% rispettivamente, gli indicatori parziali di qualità delle associazioni vegetali preesistenti alla cava, e di visibilità del sito nel raggio di 1 km (ovvero percentuale dell'area nel raggio di un km da cui il sito via via considerato è visibile). Si noti che adottare un raggio di influenza elevato porta a giudicare meglio visibili i crinali e i punti alti, mentre un raggio più piccolo porta a giudicare meglio visibili i fondovalle. La scelta della distanza significativa ai fini della visibilità deve essere fatta a buonsenso, anche in relazione agli interventi di ripristino previsti. Nel caso specifico, si è pensato che le cave di crinale fossero più facilmente schermabili rispetto alle cave di fondovalle, mentre in altri casi il discorso può essere esattamente ribaltato.

Per quanto concerne la qualità della vegetazione presente, si è adottato il punteggio di qualità riportato in Tabella 27, da considerarsi come una prima ipotesi di lavoro. Si tratta di una scala di scelta arbitraria basata sull'interpretazione, fornita da un tecnico, delle associazioni presenti nell'area (Cassani, 2000) a partire dai dati della cartografia forestale, che definisce una *funzione di membership* rispetto all'insieme delle associazioni di elevata qualità vegetazionale, nel senso della logica fuzzy (Zadeh, 1965; si veda anche Burrough, 1986; Burrough e McDonnel, 1998; Bonham Carter, 1994). Ai cedui composti in abbandono, cedui in conversione e fustaie viene assegnato il punteggio massimo di appartenenza a questo insieme (valore 1) mentre alle aree prive di vegetazione viene assegnato il valore minimo (0).

VOTO	DESCRIZIONE
0.0	Aree prive di vegetazione
0.1	Aree non governate (vegetazione in genere molto scadente)
0.2	Castagneti da frutto non coltivati (abbandonati)

0.3	Boschi governati a ceduo
0.4	Boschi governati a ceduo, invecchiati
0.5	Boschi governati a ceduo a sterzo
0.6	Boschi governati a ceduo semplice, matricinato
0.7	Idem, con numero di matricine >120/Ha
0.8	Idem, in abbandono
0.9	Boschi governati a ceduo composto
1.0	Ceduo composto in abbandono, Ceduo in conversione e Fustaie

Tabella 27 – scala di qualità delle tipologie di vegetazione nell’area

E’ bene sottolineare che molti altri fattori potrebbero essere inclusi ai fini di produrre un indice di valore della conservazione della natura. Ad esempio, la densità di copertura vegetale, indicatore di protezione antierosivo e di rallentamento dei deflussi per intercezione, può entrare a far parte del giudizio, così come la presenza di endemismi botanici, geosculture e altre particolarità naturalistiche. Visto il carattere metodologico del presente lavoro, e vista la scarsa rilevanza di altri fattori nel caso di studio specifico, ci si è limitati ai due aspetti sopra ricordati, che comunque rappresentano i due più significativi.

Altri possibili criteri

Si possono inglobare nella valutazione altri criteri, fra i quali merita di essere citato il beneficio recato dall’attività estrattiva alla laminazione delle piene creando capacità di invaso in zone esondabili. Nel caso specifico, si è preferito escludere questo criterio non disponendo di dati utilizzabili in pratica, anche se certamente si tratta di un punto meritevole di approfondimento futuro.

Rappresentazione degli indicatori per i criteri scelti nel caso di studio

La Figura 71 mostra le mappe dei vari indicatori utilizzati per la costruzione delle mappe dei criteri.

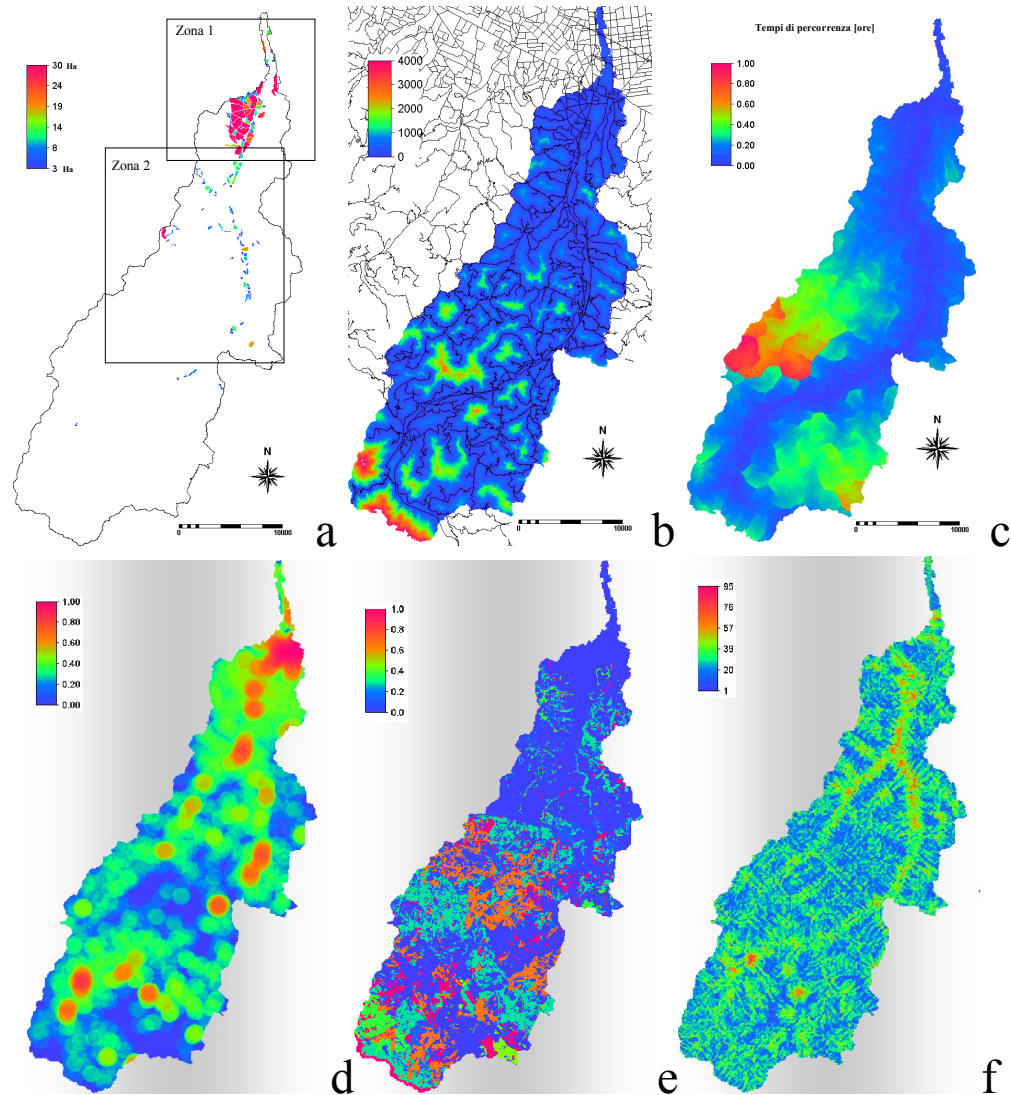


Figura 71: a- aree disponibili; b- lunghezza delle strade di accesso da realizzare; c- tempi di percorrenza; d – indice di opposizione sociale; e- indice di qualità della vegetazione; f- indice di visibilità.

Le mappe degli indicatori, combinate come detto nei paragrafi precedenti, sono state poi normalizzate fra i valori di zero (corrispondente al minimo valore assunto dall'indicatore sulla mappa, e 1, corrispondente al massimo). I criteri così normalizzati possono essere utilizzati nelle tecniche di analisi multicriterio come quelle di seguito illustrate.

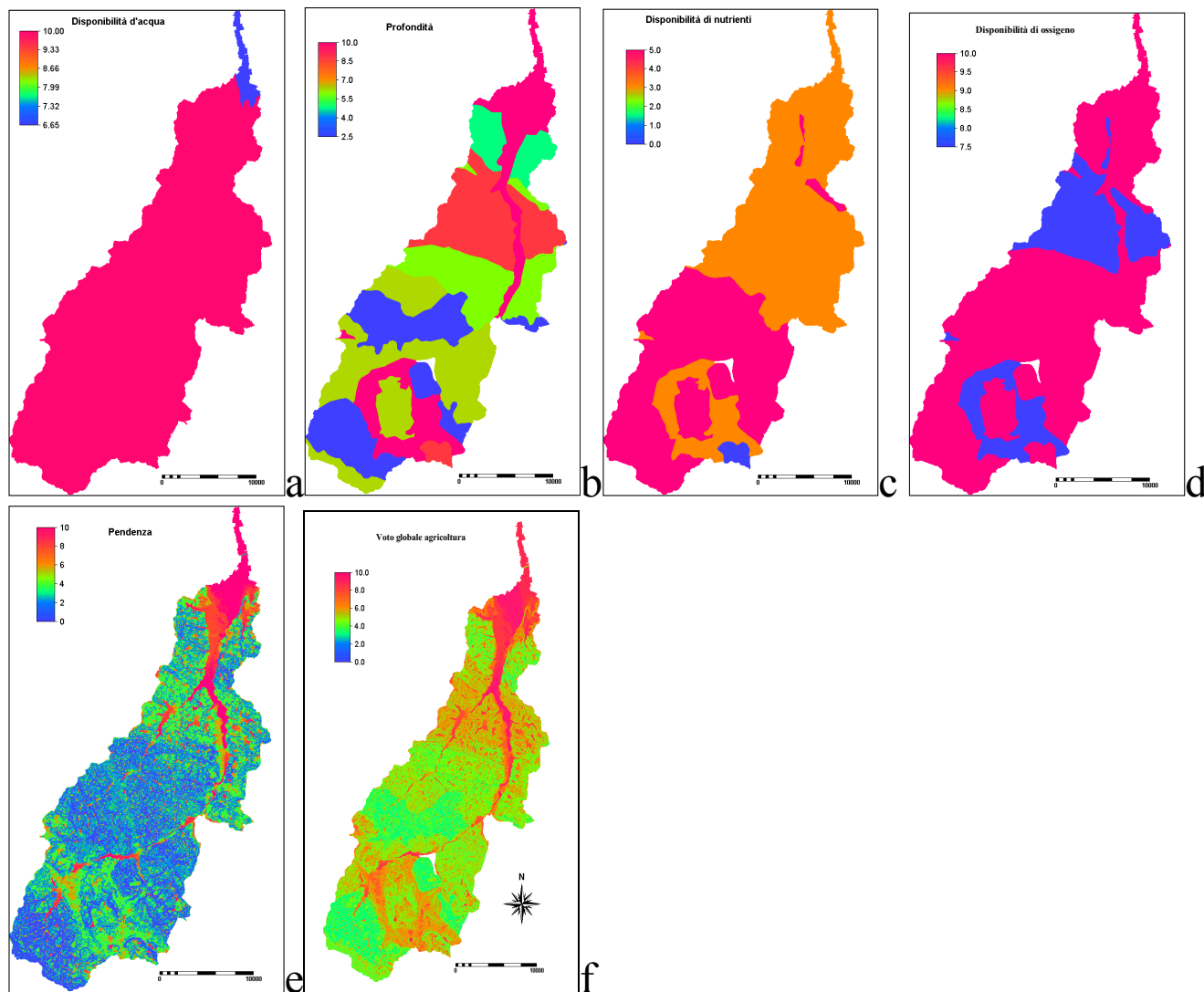


Figura 72: criteri relativi alla *land evaluation* agricola (a-e) e mappa finale di valore agricolo (f)

Tecniche di combinazione dei criteri

Esistono vari metodi di combinazione dei criteri. Nel presente lavoro ci si limita ai due più noti, il metodo della somma pesata (regole additive) e il metodo del punto ideale (TOPSIS).

In entrambi i metodi, occorre assegnare un peso a ciascun criterio. Per ottenere i pesi si può procedere in vari modi, di cui il più semplice è la procedura euristica (a buon senso) mentre uno dei più robusti dal punto di vista teorico è l'Analytical Hierarchy Process di Saaty (cit.), o metodo del confronto a coppie, di cui sono state proposte numerose varianti.

Le regole additive (*map overlaying*) sono sicuramente le più conosciute e le più largamente usate.

Il punteggio totale di ciascuna alternativa è ottenuto sommando il prodotto dei valori di ogni criterio per il peso relativo associato.

La regola decisionale valuta ogni alternativa A_i con la seguente formula:

$$A_i = \sum_j w_j \cdot x_{ij}$$

dove x_{ij} è il punteggio della i -esima alternativa rispetto al j -simo criterio, e w_j è il peso del criterio j normalizzato a 1.

Nel caso in esame l'applicazione di questo metodo, avendo già normalizzato le mappe dei criteri tra il valore 0 e il valore 1, si riduce semplicemente a due *map calculation*:

- moltiplicazione delle mappe raster rappresentative dei criteri per i pesi rispettivi
- somma delle mappe risultanti

Questo permette, di ordinare le alternative rispettando le priorità definite dai criteri e di scegliere la localizzazione ottimale.

Il metodo del punto ideale ordina un insieme di alternative sulla base della distanza dal punto ideale. Questo punto rappresenta un'ipotetica alternativa che massimizza il valore di ogni criterio.

La separazione è misurata in termini di distanza metrica. Usando la distanza euclidea la regola decisionale si basa sulla misura del valore:

$$s_{i+} = \sqrt{\sum_j w_j^2 \cdot (v_{ij} - v_{+j})^2}$$

dove v_{ij} è il valore standardizzato del criterio j per l' i -esima alternativa

v_{+j} è il valore ideale per il criterio j .

La realizzazione pratica di questa regola decisionale una volta standardizzate le mappe dei criteri e definiti i pesi relativi consiste nel:

- determinare il massimo valore (v_{+j}) per ognuna delle mappe dei criteri (il valore rappresenta il punto ideale)
- determinare il minimo valore (v_{-j}) per ognuna delle mappe dei criteri (il valore rappresenta il punto ideale negativo)
- calcolare la distanza tra il punto ideale e ogni alternativa

$$s_{i+} = \sqrt{\sum_j w_j^2 \cdot (v_{ij} - v_{+j})^2}$$

- calcolare la distanza dal punto ideale negativo e ogni alternativa:

$$s_{i-} = \sqrt{\sum_j w_j^2 \cdot (v_{ij} - v_{-j})^2}$$

- calcolare la vicinanza relativa dal punto ideale usando l'equazione:

$$c_{i+} = \frac{s_{i-}}{s_{i+} + s_{i-}}$$

(dove c_{i+} è compreso tra 0 e 1: più il suo valore si avvicina all'unità, più l'alternativa si avvicina al punto ideale).

L'analisi per la sovrapposizione dei criteri è partita dalla scelta dei pesi per ciascuno di essi, effettuata con il metodo del confronto a coppie di Saaty. In questo metodo, come ben noto, si costruisce una matrice reciproca dei punteggi di un confronto fra coppie di criteri, secondo i codici di Tabella 28.

INTENSITÀ DI IMPORTANZA RELATIVA	DEFINIZIONE
1	Uguale importanza
2	Da uguale importanza a moderata priorità
3	Moderata priorità
4	Da moderata a forte priorità
5	Forte priorità

6	Priorità da forte a molto forte
7	Priorità molto forte
8	Priorità da molto a estremamente forte
9	Estrema priorità

Tabella 28 – valori di importanza relativa nell’analisi gerarchica di Saaty (metodo del confronto a coppie)

	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4
Criterio 1	1,00	3,00	3,00	7,00
Criterio 2	0,33	1,00	1,00	5,00
Criterio 3	0,33	1,00	1,00	4,00
Criterio 4	0,14	0,20	0,25	1,00

Tabella 29 – matrice del confronto a coppie fra i criteri

w1	w2	w3	w4
0,5324	0,2132	0,1996	0,0548

Tabella 30 – pesi dei criteri derivanti dalla matrice del confronto a coppie di Tabella 29

Nel caso in esame, si è costruita la matrice di riferimento mostrata in Tabella 29, da cui derivano con il procedimento standard i pesi di Tabella 30. La matrice è stata verificata sotto il profilo della consistenza del giudizio, utilizzando gli indici proposti da Saaty (1977), e si può quindi ritenere esprimere un giudizio coerente. I criteri possono quindi essere sovrapposti usando questi pesi, una volta che siano stati normalizzati fra 0 e 1.

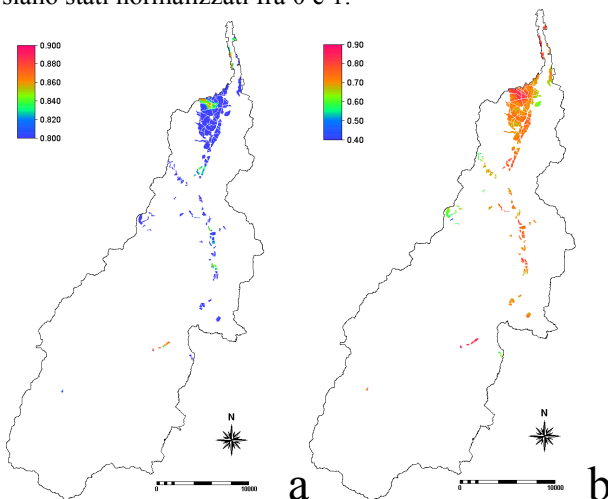


Figura 73: aree consigliate per le attività estrattive secondo il metodo TOPSIS (a) e il metodo additivo (b); si noti che il punteggio complessivo, senza significato in termini numerici assoluti, è stato normalizzato fra i valori di 0 e 1.

La mappa che si ottiene nei due casi, a rappresentare le localizzazioni ottimali, è pressoché identica (Figura 73). È da osservare che il metodo additivo separa maggiormente le aree (i punteggi hanno

range più ampio) rispetto al TOPSIS, il che è riflesso dalla diversa scala cromatica delle due mappe. Tuttavia il *ranking* (ordine di preferibilità) della varie aree si diversifica di poco fra i due metodi (a tal proposito si veda la Figura 74 che riporta l'istogramma della mappa-differenza di punteggio fra i due metodi).

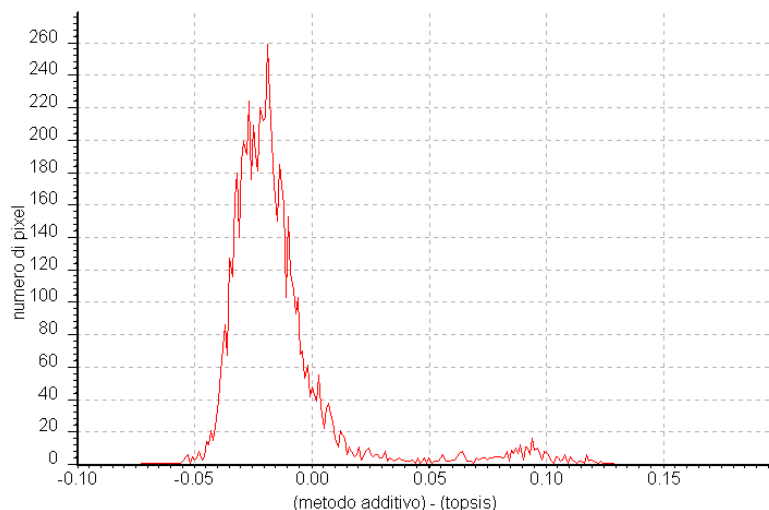


Figura 74: distribuzione delle differenze di punteggio fra le due mappe

Il giudizio espresso con i due metodi è comunque frutto di una valutazione soggettiva che viene introdotta al livello della costruzione della matrice dei confronti a coppie, o più in generale al livello della scelta dei pesi. Per verificare la robustezza del giudizio espresso, si è effettuata un'analisi esplorativa di sensitività che è consistita nell'aumentare il peso del criterio minerario (Tabella 31). Con questo metodo, si è evidenziata una modifica delle mappe del giudizio finale mostrate in Figura 73. Tuttavia, è stato possibile verificare che gli scostamenti sono contenuti, come mostrato a titolo di esempio dai diagrammi di dispersione di Figura 75, riferiti alla modifica del giudizio con il metodo additivo. La sensitività del giudizio al variare del peso del criterio minerario non pare significativamente diversa per i due metodi, per cui a questo livello non emergono indicazioni a favore di alcuno dei due.

Incremento 20% peso criterio minerario	w1	w2	w3	w4
	0,4259	0,2664	0,2528	0,0548
Incremento 40% peso criterio minerario	w1	w2	w3	w4
	0,3194	0,3196	0,3060	0,0548

Tabella 31 – pesi assegnati nell'analisi di sensitività

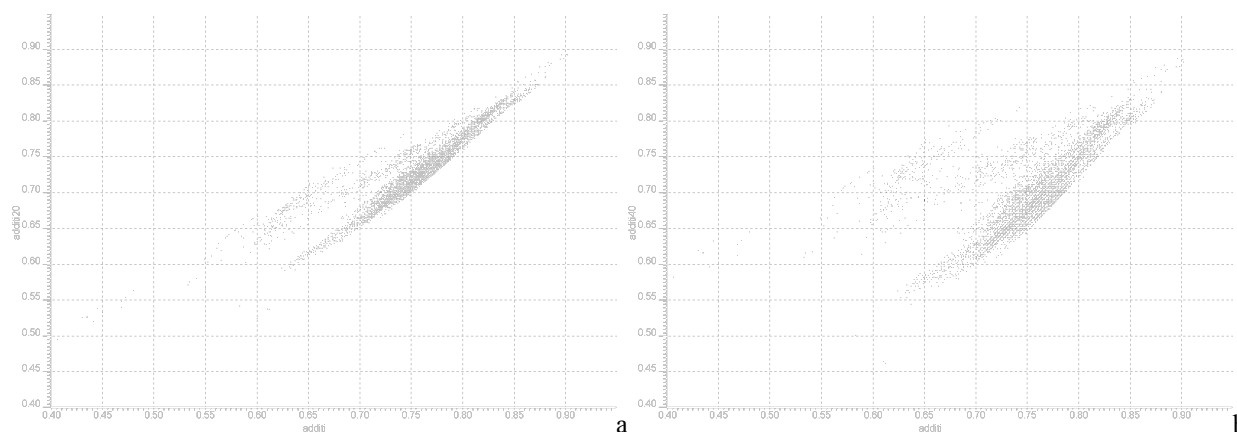


Figura 75 - scostamenti del giudizio per diminuzione del peso del criterio minerario: a- del 20%; b- del 40% (caso del metodo additivo)

Infine, è stata fatta un'analisi di sensitività immaginando di “deformare” il giudizio il più possibile a favore del criterio di *nature conservation*. Questo punto di vista di “*deep ecology*” può essere sostenuto, nell'ambito di un'analisi multicriterio, solo all'interno dell'intervallo di accettabilità degli indici di consistenza della matrice dei confronti a coppie. Questo significa che chiunque voglia sostenere la causa della nature conservation deve comunque confrontarsi con tutti gli altri criteri messi sul tavolo della discussione, e deve assegnare un giudizio (ed un peso) a ciascuno di essi

in modo consistente. La Tabella 32 illustra la matrice dei confronti a coppie costruita con la logica e gli obiettivi “*deep ecology*”.

La nuvola di dispersione fra i valori del giudizio assegnato da questo punto di vista, e i valori che si sono ottenuti con la matrice di riferimento (Tabella 29) è riportata in Figura 76.

CRITERI	CRITERIO 3	CRITERIO 2	CRITERIO 4	CRITERIO 1
Criterio 3	1,00	3,00	5,00	5,00
Criterio 2	0,33	1,00	3,00	3,00
Criterio 4	0,20	0,33	1,00	1,00
Criterio 1	0,20	0,33	1,00	1,00

Tabella 32 – matrice dei confronti a coppie da un punto di vista “*deep ecology*” (da confrontarsi con Tabella 29)

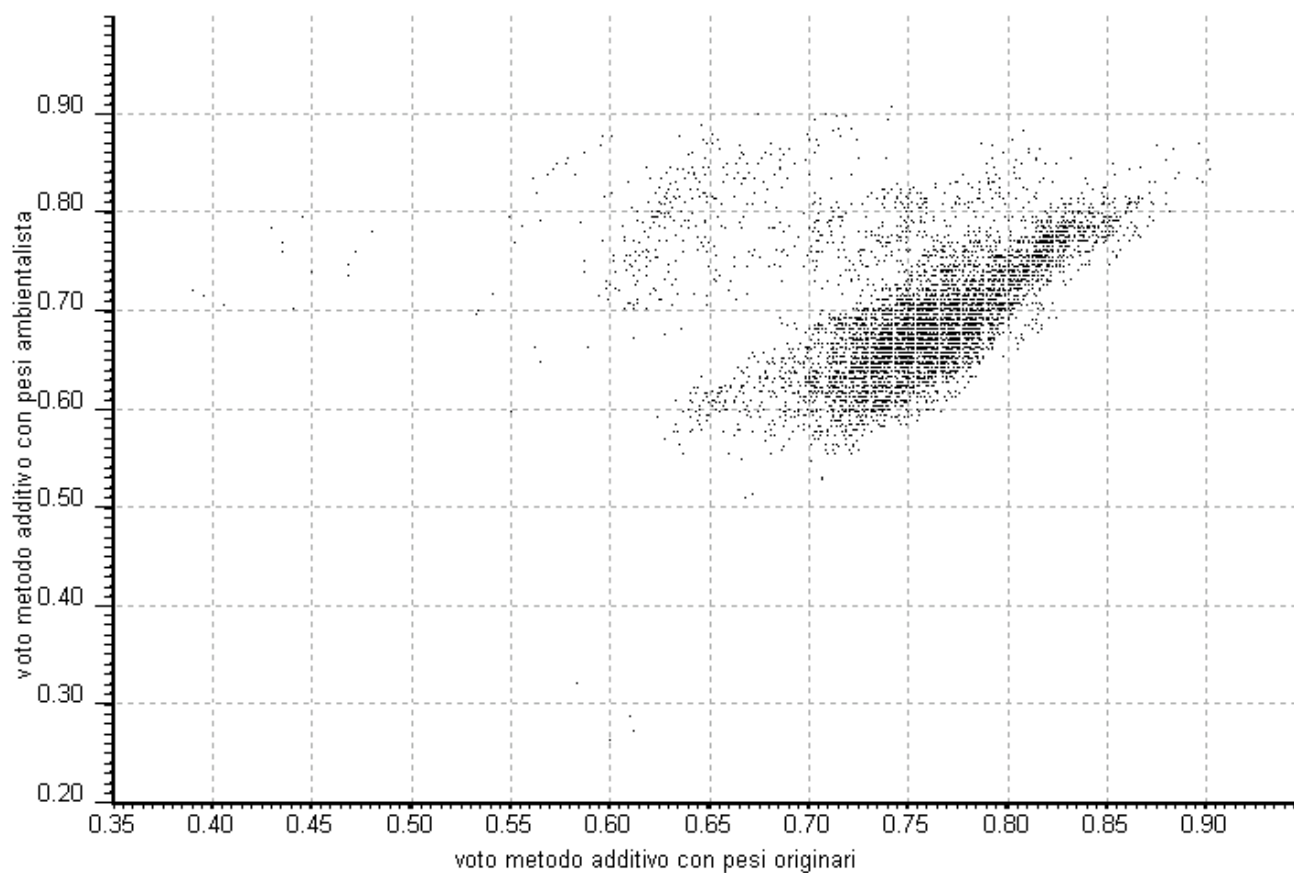


Figura 76 – nuvola di dispersione dei valori fra il giudizio originario e quello “*deep ecology*”

È importante osservare che questa modifica dei pesi produce un’alterazione considerevole del *ranking* delle aree consigliate per la coltivazione, come si evince dalla distribuzione dei valori più alti nella mappa finale ottenuta in questo caso (Figura 77), dove si nota che le aree giudicate prioritarie non coincidono più con quelle di Figura 73.

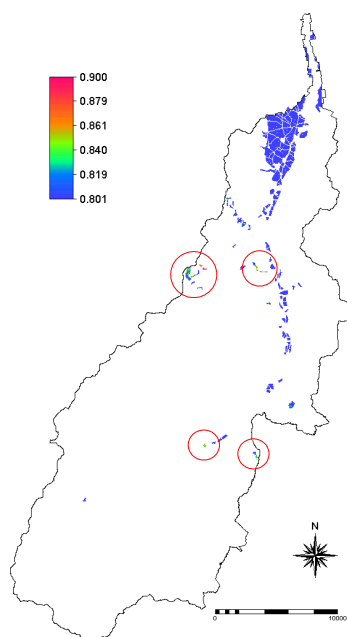


Figura 77 – aree giudicate favorevoli in base al punto di vista “*deep ecology*”

È interessante osservare che lo spostamento delle aree favorevoli può essere in qualche modo valutato alla luce degli altri criteri. In particolare, si può osservare che la distribuzione dell'indice di costo minerario per le aree individuate con la matrice di Tabella 29 aveva valore medio di 163 £/mc e deviazione standard di 122 £/mc, mentre nel caso del giudizio con i pesi derivanti dalla matrice di Tabella 32 il valore medio dell'indice sulle aree selezionate è di 1183 £/mc, con deviazione standard di 711 £/mc. Questo non deve essere interpretato in termini rigidi, dal momento che l'indice di costo minerario è orientativo e non tiene conto, per esempio, dei costi di recupero ambientale; tuttavia, l'osservazione rispecchia il fatto che, adottando un punto di vista più vicino al criterio della conservazione della natura, tendono ad essere meglio valutate le soluzioni subottimali dal solo punto di vista tecnico-economico. Si deve comunque ricordare che l'introduzione di ulteriori vincoli di piano e l'imposizione di specifiche per il recupero ambientale delle cave tendono a ridurre il divario fra i giudizi. In termini assoluti, se si accetta l'ipotesi di considerare l'indicatore di costo come un costo di prima approssimazione, si può concludere che, su un prezzo di mercato del materiale compreso fra £ 30.000 e £40.000, l'accoglimento delle proposte del punto di vista “*deep ecology*” non renderebbe comunque antieconomica la coltivazione. Questo è vero, naturalmente, sotto la condizione di validità in prima approssimazione dell'indicatore di costo proposto.

Conclusioni

Si è proposta una metodica di costruzione del consenso attorno alla localizzazione delle attività estrattive, in un caso di studio usato a scopo puramente esemplificativo. Il metodo, che si basa sulla definizione di mappe di indicatori di convenienza economica, di valore della conservazione della natura, di valore delle attività agricole alternative, e dell'opposizione sociale, dovrebbe consentire un più semplice raggiungimento di compromessi a partire dall'obbligo per ognuno degli attori sociali coinvolti di considerare tutti i criteri messi sul tavolo della discussione al fine di esprimere il proprio (sogettivo) giudizio. L'uso poi di tecniche di combinazione dei criteri si è rivelato poco influente ai fini della scelta del sito, almeno limitandosi al metodo TOPSIS e alla somma pesata, mentre maggiore importanza hanno i pesi assegnati a ciascun criterio. Anche se si è visto che per piccole variazioni dei pesi l'analisi multicriterio è stabile, almeno nel caso esaminato e presumibilmente in ciascun caso in cui non vi siano criteri a comportamento “catastrofico” (come può essere un criterio che ha valore elevatissimo per uno o pochi gruppi sociali e valore nullo o quasi per gli altri), è possibile che il giudizio venga “deformato” in maniera anche inaccettabile dall'adozione, da parte di un gruppo di interesse, di pesi troppo sbilanciati a favore di un solo o di pochi criteri. Il vantaggio di impostare un sistema di supporto alle decisioni, in casi di questo genere, è nel mantenere sotto controllo gli effetti che ogni giudizio di parte può provocare. In particolare, si è visto come il giudizio dal punto di vista della *deep ecology* possa essere verificato, almeno in linea di principio, anche dal punto di vista tecnico-economico. In tal modo, è ipotizzabile che, garantito che si mettano sul tavolo indicatori significativi ed appropriati, capaci di esprimere realisticamente il valore dei diversi siti dell'area in esame sotto i diversi profili (economico, ambientale, sociale...), si possa pervenire al consenso in modo più rapido e con allocazione più efficiente delle risorse.

In conclusione, si ritiene che in molti casi la “tecnicizzazione” dei processi di piano ricorrendo a sistemi multicriteriali di supporto alle decisioni porti ad un miglioramento delle decisioni medesime, a condizioni di impostare il problema nell'ottica della costruzione del consenso e non del *problem solving* automatico. In particolare, occorrerà sviluppare diverse prove numeriche e simulazioni di risultati conseguenti allo spostamento del giudizio di uno o più gruppi sociali.

A tal fine, la valutazione della sensitività del modello di decisione al variare dei pesi dei vari gruppi, e la quantificazione delle conseguenze di un giudizio sui parametri di controllo più significativi degli altri gruppi sociali (p.es., come mostrato, l'effetto di una politica *deep ecologist* sul risultato tecnico-economico della coltivazione) sono strumenti indispensabili per favorire un processo decisionale fattivamente caratterizzato da prerogative di razionalità comunicativa (Habermas, 1981).

Ringraziamenti

I dati utilizzati nell'esempio di calcolo proposto sono stati forniti dall'arch. Roberto Cimatti e dal dott. Roberto Gabrielli della Provincia di Forlì-Cesena, dalla quale provengono anche le informazioni relative al Piano Infraregionale delle Attività Estrattive.

3-Pianificazione ambientale e sistemi di supporto alle decisioni: il caso di Sogliano al Rubicone

Introduzione

In vari contesti si parla oggi di pianificazione ambientale (p.es. Legge Regionale Liguria, n. 36/1997; Legge Regionale Toscana, n.5/1995; Alberti *et al.*, 1994; Bettini, 1996): è diffusa l'esigenza di integrare nei processi di decisione sul territorio la conoscenza dei sistemi naturali e degli effetti che l'azione dell'uomo può avere su essi. La pianificazione ambientale dovrebbe distinguersi dalle forme tradizionali di urbanistica e pianificazione, per l'interesse esplicito verso:

- la tutela degli equilibri e la sostenibilità in termini ambientali delle scelte di piano;
- la valorizzazione delle risorse naturali come elemento di qualità e di sviluppo della comunità che le utilizza.

Esistono già alcuni strumenti urbanistici che si sono fatti carico della pianificazione ambientale (p.es. Reggio Emilia, 1999). Tuttavia, pochi di essi sono collegati a sistemi previsionali in grado di valutare le conseguenze delle scelte di piano sui sistemi ambientali.

L'esigenza di una capacità previsionale si manifesta ogni volta che si voglia effettuare una valutazione ambientale delle strategie (VAS, o *strategic environmental assessment*, SEA) o, il che rappresenta la valutazione duale, si debba reperire una localizzazione "ottimale" per le attività economiche.

Nel presente contributo si descrive l'approccio seguito nella messa a punto di un quadro ambientale per il Comune di Sogliano al Rubicone (Preger *et al.*, 2000).

Si tratta di un piccolo comune collinare della Provincia di Forlì-Cesena (Figura 78), caratterizzato da una bassa densità di popolazione e con pesanti limiti fisici all'uso di un territorio, che comunque fornisce spunti progettuali interessanti per uno sfruttamento razionale, attento agli equilibri naturali, delle risorse. Nel mettere a punto un quadro ambientale, da utilizzarsi poi come base di supporto alla stesura del Piano Regolatore Generale, si è partiti dalla considerazione delle domande che possono sorgere dal piano, e si sono costruiti anche dati e modelli previsionali orientati a dare risposte adeguate.

Si è affrontato il problema di quale modello fosse più opportuno a descrivere ciascuno dei fenomeni di rilievo, optando per schemi quantitativi deterministici in alcuni casi, schemi quantitativi probabilistici in altri, e analisi morfologiche sinottiche di tipo tradizionale in altri ancora. La raccolta dei dati è stata sviluppata in senso strettamente orientato alla messa a punto degli strumenti previsionali. E' apparso chiaramente che i livelli di analisi ambientale accessibili dipendono dalla disponibilità dei dati e dagli obiettivi di conoscenza. L'analisi ambientale proposta viene presentata come un esempio di studio basato su una *concezione del territorio come oggetto di modellistica*: occorre innanzitutto identificare i problemi rilevanti (*scoping*), operazione intrinsecamente qualitativa, e successivamente formulare le domande in termini modellistici (cioè individuando lo schema previsionale che può in qualche modo darci le risposte).

Il passo della formulazione delle domande è quasi sempre carente nei piani urbanistici: spesso le cartografie di analisi prodotte non hanno alcuna capacità predittiva. Il nodo fondamentale delle analisi ambientali è nella necessità di mettere a punto un quadro utile per la valutazione delle scelte, e ciò può essere ottenuto solo dopo aver dato le esigenze e gli obiettivi in forma chiara e distinta.

Questa fase preliminare, che può essere gestita interamente all'interno dei pacchetti GIS tradizionali, che invece sono oggi utilizzati quasi solo per le loro potenzialità grafiche o di gestione dei dati.

La necessità di analisi di maggiore dettaglio è quasi sempre assente, e comunque spetta a livelli operativi successivi.



Figura 78 – localizzazione dell'area

Identificazione dei problemi e formulazione delle domande in termini modellistici

Nel caso del Comune di Sogliano al Rubicone, i problemi della pianificazione sono quasi tutti di tipo “non urbano”, vista la bassa densità di popolazione e la modesta domanda di trasformazione del territorio a scopo sia residenziale, sia produttivo.

Un problema rilevante è invece la caratterizzazione dei vincoli esistenti, sia per opera degli strumenti di piano sovraordinati, sia per effetto dei sistemi naturali. La Tabella 33 riporta il quadro delle mappe di analisi messe a punto.

Si vuole sottolineare che, a differenza delle cartografie di analisi che solitamente accompagnano i piani, molte delle mappe in questo caso sono modelli previsionali: sistemi di equazioni o relazioni concettuali che associano ad un ingresso (una variazione dello stato attuale del territorio) un'uscita (una risposta, in termini di un indice ritenuto significativo).

Ciò significa che, se si fanno ipotesi di piano relative a determinate azioni, interventi migliorativi ecc., le mappe possono venire direttamente modificate fornendo l'indicazione quantitativa delle variazioni prodotte dall'azione. In tal modo, è possibile effettuare le valutazioni strategiche di

impatto ambientale che consentono di simulare gli scenari futuri prodotti da ciascuna ipotesi di piano.

Chiaramente, alcune delle mappe hanno un significato diretto, mentre altre devono essere valutate in termini di maggiore complessità (p.es. nel caso, in riferimento alla Tabella 33, della carta delle risorse percettive).

CARTA	SIGNIFICATO	OBIETTIVI
Vincoli vigenti	Piano Territoriale di Coord. Prov., Vincolo Idrogeologico ...	Inserimento PRG nel quadro generale di piano (prov.le e reg.le)
ecologia del paesaggio	corridoi di spostamento per la fauna, per collegare fra loro aree di pregio naturalistico ('reti ecologiche')	Dove costruire siepi, fare rimboschimenti, rinaturalizzare i corsi d'acqua...
l'inquinamento che interessa direttamente la salute umana	sorgenti di inquinamento (rumore, elettromagnetico e aria) e loro intensità	verificare la salubrità del territorio esistono zone in cui il campo elettromagnetico è pericoloso, l'aria inquinata, di rumore eccessivo?
il bilancio idrologico	pioggia, infiltrazione, scorrimento superficiale, evapotraspirazione, indice di aridità	Irrigazioni, acqua da bere, acqua per le attività produttive, difesa dagli incendi, difesa dalle piene, laghetti collinari
l'erosione dei suoli	perdita potenziale indicativa di suolo agrario (t/ ha/ anno)	Pratiche di regimazione dei campi, difesa del suolo
l'inquinamento delle acque e dei suoli	sorgenti di inquinamento (zootecnia, agricoltura, insediamenti) e loro intensità	Identificare e mitigare gli inquinamenti
i dissesti idrogeologici	percentuale di ciascun micro-bacino interessata da frane	Convivere con le frane: interventi urgenti e comportamenti corretti
il rischio d'incendio	indice di predisposizione al verificarsi degli incendi	Dove effettuare controllo e prevenzione più attenti?
il paesaggio come risorsa percettiva	caratteristiche del paesaggio di Sogliano che possono colpire il visitatore	Promozione e tutela del paesaggio e delle bellezze storiche e naturali

Tabella 33 – quadro dei problemi e formulazione delle domande in termini modellistici

Il quadro ambientale è stato messo a punto in base a un *concetto modellistico* del territorio: si è cercato non tanto di sottolineare alcuni aspetti rilevanti o rappresentare i dati disponibili, quanto di prevedere le dinamiche in atto e descrivere i meccanismi di funzionamento.

Le mappe seguono una *semantica disgiuntiva*, nel senso che separano le informazioni rappresentando non più di un attributo per volta, oppure una *semantica sinottica*, se sovrappongono nella stessa rappresentazione elementi conoscitivi ed informazioni di tipo diverso, come nelle tavole tradizionali delle analisi urbanistiche.

Il modello di dati raster si applica in genere meglio per la semantica disgiuntiva, che spesso deriva da elaborazioni con modelli matematici svolte sulla cella elementare (pixel), mentre il modello vettoriale si presta per la semantica sinottica, consentendo di visualizzare anche oggetti diversi (punti, linee e poligoni).

La modellazione di primo livello e l'estrazione di indicazioni a supporto del piano

Per gli scopi di inquadramento del presente lavoro, si è potuto svolgere tutto il processo di modellazione previsionale all'interno del GIS che è servito anche per l'elaborazione delle cartografie.

Il vantaggio di lavorare in un unico ambiente operativo è chiaro soprattutto considerando che i modelli previsionali sono già resi disponibili in formati che consentono agli operatori degli enti locali di svolgere ulteriori elaborazioni, qualora ciò sia necessario.

Per quanto al momento sia ancora difficile pensare ad un uso corrente della modellistica come modo normale di valutare i piani e i loro effetti, è prevedibile che in un prossimo futuro, a seguito di una maggiore consapevolezza da parte degli enti stessi dei vantaggi derivanti dall'uso dei sistemi di supporto alle decisioni nella gestione del territorio. Chiaramente, è richiesta una *costruzione sociale* della tecnologia e dei metodi per effettuare le previsioni (si veda ad es. Campbell, 1999), e non si può pensare che questi vengano imposti dall'esterno in tempi rapidi.

Ci deve essere una fase di incontro e scoperta dello strumento da parte degli operatori, che sia lo spunto per una appropriazione e per l'utilizzo quotidiano.

Lo scopo del presente lavoro, nella consapevolezza di questa esigenza, è solo di indicare una possibilità da percorrere.

Il concetto di base della modellistica svolta all'interno dei GIS è la rappresentazione degli oggetti del territorio sotto forma di mappe.

La mappa è l'ente matematico sul quale si svolgono le elaborazioni. I modelli matematici di cui si è fatto uso hanno riguardato:

- bilancio idrologico (Pistocchi e Neri, 2000a)
- perdita di suolo agrario media annua (*ibid.*)
- inquinamento di origine diffusa da fonti agricole (*ibid.*)
- pericolosità dell'insacco degli incendi (Pistocchi e Neri, 2000b)
- simulazione di spostamento di organismi attraverso reti ecologiche (con i metodi illustrati in Geneletti e Pistocchi, 2000).

Ciascun modello ha consentito di produrre una mappa a semantica disgiuntiva, esprime la distribuzione di un indice, che in ciascun caso rappresenta il risultato di un calcolo e sintetizza lo stato di una componente del quadro ambientale.

Sempre a semantica disgiuntiva è la carta del dissesto idrogeologico, che esprime tuttavia la distribuzione delle frane e non costituisce un modello.

Il modello consente di prevedere le variazioni dell'indice al variare dello scenario territoriale disegnato dal piano.

Si vuole sottolineare che ogni cartografia costituisce una predizione del comportamento del territorio, e viene utilizzata per classificare quest'ultimo.

Gli strumenti per effettuare la predizione possono essere estremamente vari, ma la strategia e lo spirito di fondo rimangono gli stessi: si ritiene che ogni applicazione di pianificazione ambientale debba basarsi su una predizione/classificazione del territorio in relazione ai fenomeni rilevanti per le scelte, e che pertanto l'analisi sia giustificata solo nella misura in cui consente di pervenire ad una classificazione affidabile e scientificamente fondata.

Nello studio in esame, sono state prodotte altre carte, a semantica sinottica, secondo metodi tradizionali dell'analisi urbanistica. Esse comprendono la carta dei vincoli vigenti, la carta delle risorse percettive e la carta delle possibili fonti di inquinamento che interessa la salute umana (aria, rumore, campi elettromagnetici).

Con questi metodi è possibile effettuare valutazioni di massima che comunque costituiscono un supporto per le decisioni. Lo svantaggio della semantica sinottica è che non si ottengono indicazioni precise sulla risposta del territorio ad una certa politica.

Si ricorre ad analisi di questo tipo ogni volta che non è possibile individuare un indice sintetico rappresentativo.

È emblematico a questo proposito il caso delle risorse percettive: la carta indica gli elementi dominanti il paesaggio nelle varie zone. E' chiaro che si possono riportare le variazioni degli elementi dominanti, e quindi costruire una mappa del paesaggio percepito in uno scenario futuro. Tuttavia, è impossibile dire a priori quale sarà l'effetto dei cambiamenti sulle proprietà del territorio. Indicazioni di questo genere possono solo derivare da una valutazione *ad hoc*.

Ciascuna mappa può essere usata ai fini del supporto alle decisioni, nel senso che imponendo opportuni criteri di pianificazione si estraggono le aree dove è prioritario l'intervento.

Ad esempio, si possono definire i criteri riportati in Tabella 35. I risultati corrispondenti sono riportati in Figura 80, Figura 81 e Figura 82, rispettivamente. In maniera del tutto analoga si può dare risposta a molte delle domande riportate nella terza colonna di Tabella 33.

Occorre sottolineare che non solo ciascuna carta rappresenta un modello previsionale del territorio in ordine ad un certo aspetto, ma che l'insieme delle carte consente anche di effettuare previsioni complessive: il sistema di carte è a sua volta un modello del territorio.

Per esempio, si possono imporre opportuni criteri con i quali selezionare le aree idonee o non idonee all'urbanizzazione.

Nel caso in esame, si è prodotta la classificazione riportata in Figura 79. I criteri di modellazione utilizzati per produrla sono riportati in Tabella 34.

La Tabella 35, la Figura 80, la Figura 81 e la Figura 82 riportano altri esempi relativi alla localizzazione di laghetti collinari, interventi di mitigazione dell'inquinamento diffuso e dell'erosione.

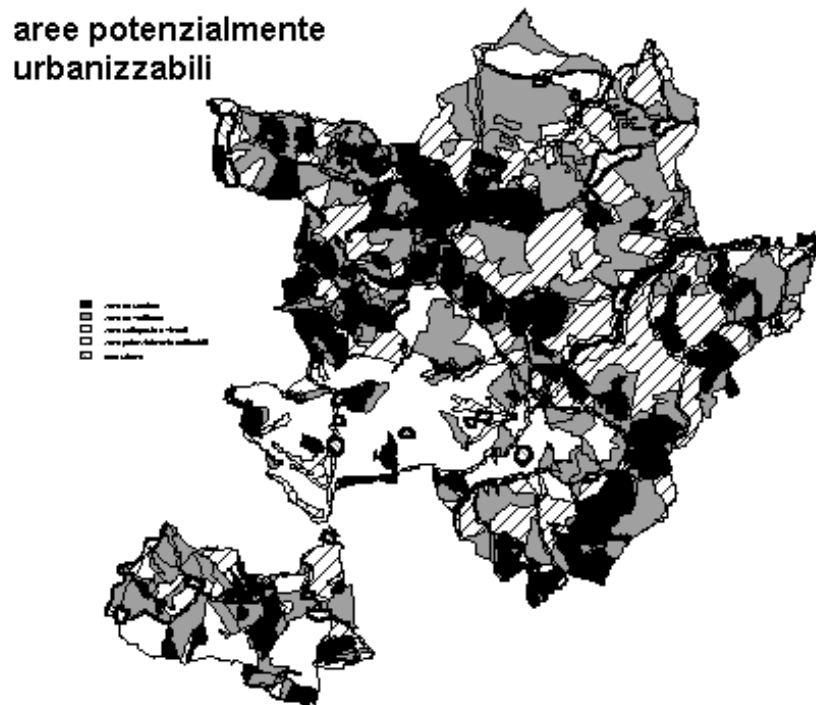


Figura 79-delimitazione per esclusione delle zone potenzialmente urbanizzabili

Tematismo	Rappresentazione
Calanchi	
- Calanchi	Nero
- Area calanchiva	Rigato
- Matrice	Bianco
Fasce di tutela idraulica	
- Fascia 1	Nero
- Fascia 2	Rigato
- Fascia 3	Rigato
Acclività	
- > 50%	Nero
- 35 – 50%	Grigio
- 0 – 35%	Bianco
Pericolosità sismica	
- Molto alta	Rigato
- Alta	Rigato
- Altro	Bianco
Indice pericolosità dissesto frane attive e quiescenti	
- Alto	
- Medio	Nero
- Basso	Grigio Bianco
Rappresentazione	Significato
Nero	Aree da scartare
Grigio	Aree da verificare
Rigato	Aree sottoposte a vincoli
Bianco	Aree potenzialmente urbanizzabili

Tabella 34 – criteri per la definizione del territorio potenzialmente urbanizzabile. In caso di sovrapposizioni, conta il giudizio più restrittivo.

Ambito e criterio	rappresentazione	Significato
Lotta all'inquinamento diffuso delle acque e dei suoli		
- Ntot > 10	Nero	Aree di intervento prioritario per la lotta all'inquinamento diffuso
- Ntot < 10	Bianco	Aree in cui non è urgente un intervento
Sistemazioni idraulico-agrarie		
- Suolo eroso > 40 t/ha anno	Nero	Aree di intervento prioritario per la lotta all'erosione
- Suolo eroso < 40 t/ha anno	Bianco	Aree in cui non è urgente un intervento
Protezione e riqualificazione di reti ecologiche		
- Vicinanza di corridoi interrotti	Rigato	Aree idonee ai rimboschimenti
Realizzazione di piccoli invasi		
Se: runoff annuo > 200 [mm]		
e: permeabilità formazionale = bassa		
⇒ se:		
- uso del suolo = zone agricole	Nero	Aree idonee per piccoli invasi
- rischio incendi > 16	Nero	Aree idonee per piccoli invasi
altrimenti	Bianco	Aree non idonee

Tabella 35- criteri per la localizzazione ottimale degli interventi di gestione ambientale



Figura 80- siti idonei per i laghetti collinari

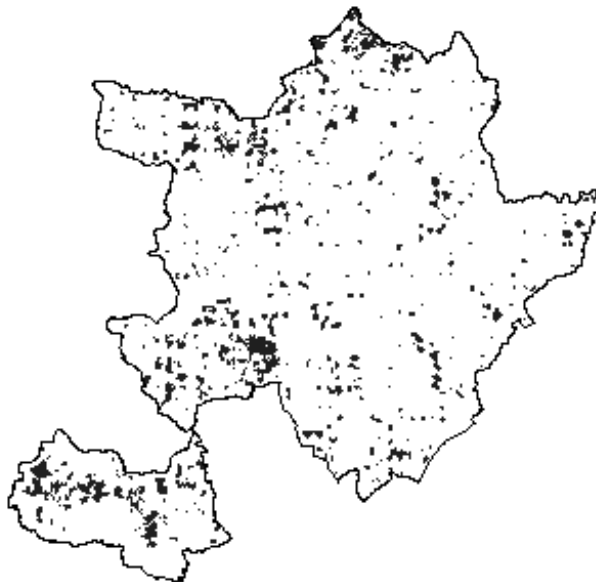


Figura 81- siti prioritari per la lotta all'erosione

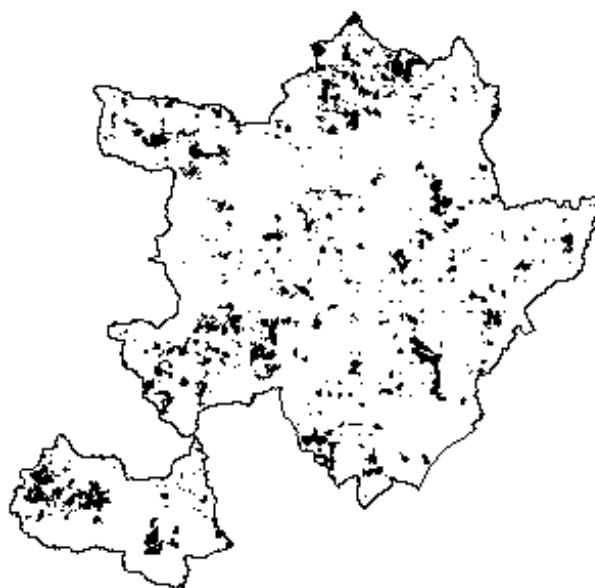


Figura 82-siti prioritari per la lotta all'inquinamento diffuso

In alcuni casi, il modello fornisce uno spunto per la pianificazione direttamente, quando si consideri il significato dell'*output* prodotto. Ad esempio, nel caso del modello di simulazione degli spostamenti di organismi lungo reti ecologiche, si ottengono come risultato i percorsi che effettivamente connettono macchie di habitat, e quelli "a fondo cieco", consentendo di localizzare le aree che richiedono interventi di rimboscimento e miglioramento delle condizioni di naturalità (Figura 83).

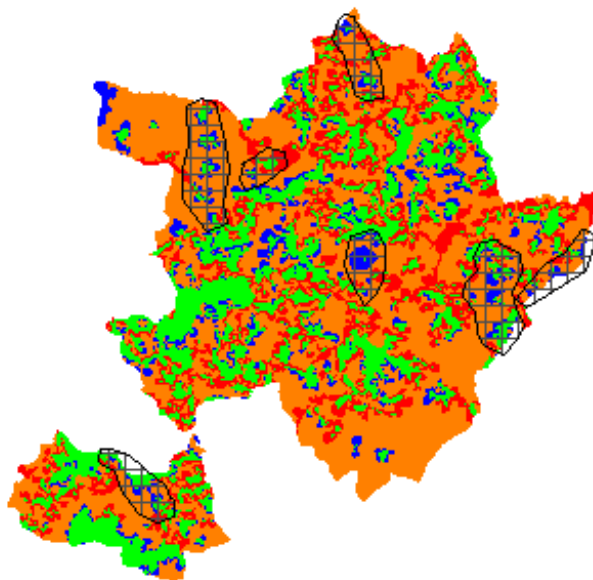


Figura 83– zone favorevoli per la ricomposizione di reti ecologiche (in blu sono rappresentati i corridoi a fondo cieco, in rosso quelli che collegano macchie di habitat, raffigurata te in verde).

In generale, si può affermare che l'analisi dovrebbe costituire un'euristica per il progetto, e che la pianificazione ambientale dovrebbe quindi vedere la ricerca e caratterizzazione scientifica del territorio come uno spunto al "progettare con la natura" (McHarg, 1969).

Conclusioni

Si è illustrata una applicazione della modellistica cartografica a supporto delle decisioni. Si è mostrato come in alcuni casi sia significativo integrare modelli previsionali nel processo di piano, al fine di ricavare indicazioni sugli effetti di determinate azioni sullo scenario futuro del territorio. Mentre la tradizione analitica dell'urbanistica ha finora privilegiato analisi di tipo sinottico, oggi da più parti si richiama l'importanza dell'uso di analisi basate su una semantica disgiuntiva, soprattutto quando si voglia valutare la sostenibilità delle scelte.

In particolare, per verificare la sostenibilità dello sviluppo sono sempre più diffusi indici prestazionali (p.es. Simonovic, 1998) . Tuttavia, se gli indici non sono collegati ad un modello che permetta di prevedere gli effetti su di essi delle decisioni, non è praticabile alcuna valutazione ambientale delle strategie, come invece è richiesto dalle normative recenti (p.es. la Legge Regionale Emilia Romagna, n.20/2000) per gli strumenti di piano locali.

Nel presente lavoro non si è discusso delle caratteristiche e dell'affidabilità dei modelli utilizzati, rinviando per questo alla letteratura specifica citata a proposito di ciascun modello.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito degli studi preliminari alla stesura del Piano Regolatore Generale del Comune di Sogliano al Rubicone. Si ringraziano l'ing. Dante Neri, che ha sviluppato le elaborazioni cartografiche, e i geoll. Alfredo Ricci e Michele Lambertini, che hanno condotto le analisi geologiche utilizzate per la presente memoria.

4- Integrazione di GIS, simulatori stocastici di domanda e modelli fluidodinamici per la valutazione delle reti di distribuzione del gas e la pianificazione energetica nella città di Forlì

Introduzione e descrizione generale del problema

Il presente lavoro illustra una ricerca condotta al fine di organizzare le conoscenze sul comportamento idraulico della rete del gas di Forlì, mettere a punto un sistema di supporto alle decisioni e verificare con esso un insieme di possibili scenari in relazione allo sviluppo della città, alle dinamiche dell'insediamento industriale e agli investimenti in impianti richiesti. Il lavoro, di carattere interdisciplinare e orientato alla modellistica integrata di sistemi fisici e antropici strettamente interrelati (Couclelis, 2000) quali la domanda di gas da varie utenze e il funzionamento idraulico della rete di distribuzione, si colloca all'interfaccia fra la pianificazione territoriale e l'ingegneria delle reti. Le diverse tecniche di modellazione sono state integrate usando uno schema *loose coupling* (Burrough, 1996; Goodchild, ...) fra procedure di analisi statistica (sviluppate nell'ambiente *spreadsheet* Excel 2000[®]), la modellazione fluidodinamica (effettuata in ambiente MatLab[®] 4.0), e le analisi geografiche (in ILWIS 2.23[®]).

La rete di distribuzione del gas di Forlì è stata realizzata negli anni ... a fronte di una crescente domanda di gas metano in sostituzione dei combustibili tradizionali. Allo stato attuale, è organizzata con uno schema di adduzione all'utenza in tubazioni di IV specie (*sensu* decreto...) e uno di distribuzione di V specie, che giunge a molte utenze industriali e, attraverso cabine di riduzione di pressione, all'utenza di tipo civile in bassa pressione (VI specie). L'alimentazione avviene al momento da tre cabine di I salto che spillano dal metanodotto SNAM, site a Roncadello, Balzella e Rio Becca, indicate in figura . CIS s.p.a. ha disposto di trasferire la cabina di I salto di Balzella a Villa Selva (vedere figura), per fare fronte ad un atteso sviluppo industriale nel settore e ad una possibile acquisizione di nuove utenze nei comuni limitrofi ad est.

La Figura 84 riporta lo schema generale della rete.

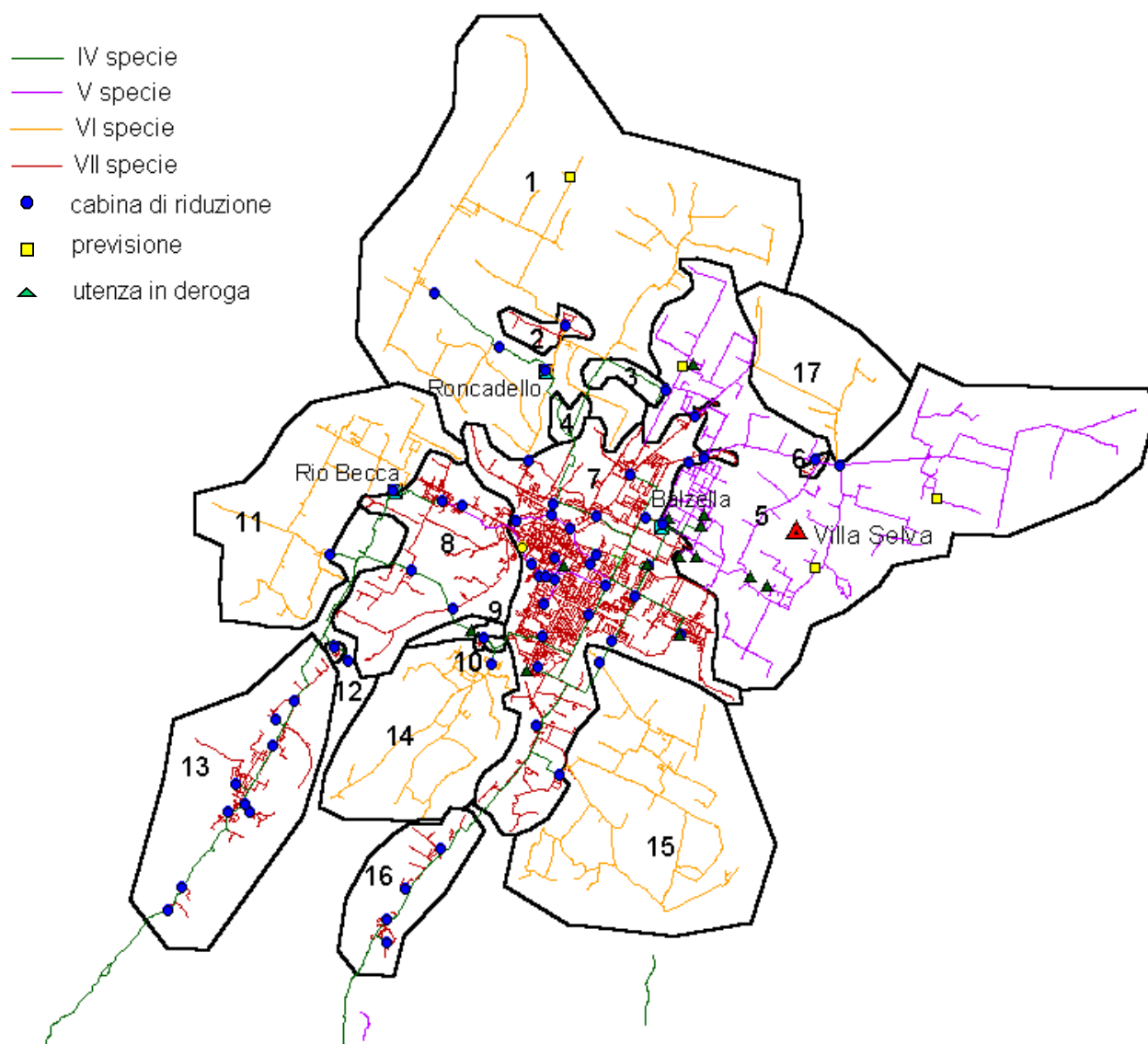


Figura 84 – quadro della città di Forlì con schema delle reti di distribuzione del gas.

La domanda complessiva di gas ha fatto registrare, negli ultimi anni, un considerevole aumento, secondo il trend illustrato in Figura 85 . Come si può vedere, l'aumento è legato essenzialmente all'utenza civile, per il graduale processo di sostituzione di altri combustibili per riscaldamento. È pertanto prevedibile che il trend si riduca considerevolmente nei prossimi anni con la completa conversione dei sistemi di riscaldamento civile al gas. Le “utenze in deroga”, rappresentative dei consumi per scopi produttivi, esprimono invece una domanda che può essere ritenuta approssimativamente costante e che assume un carattere relativamente imprevedibile, a causa della sua stretta dipendenza dagli specifici processi produttivi.

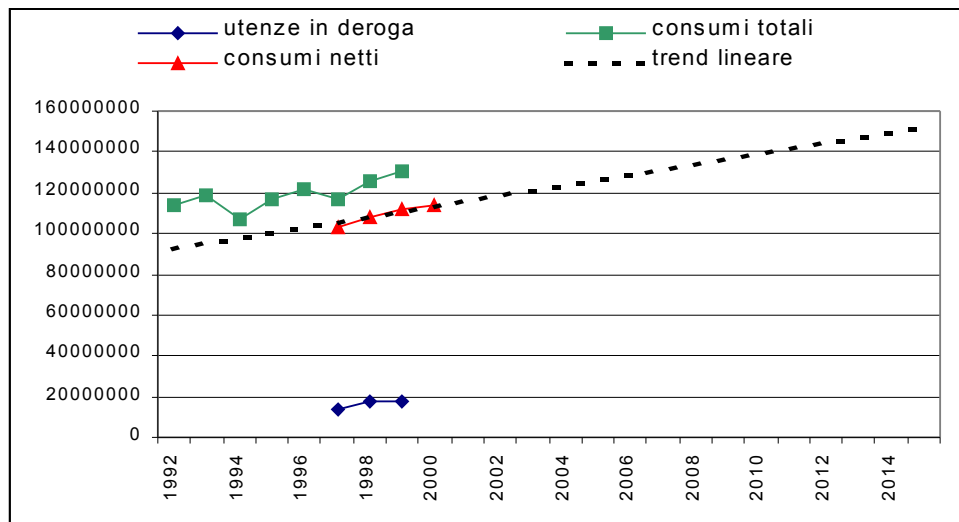


Figura 85 – andamento dei consumi complessivi annui di gas(mc) negli anni.

Il Piano Regolatore Generale di Forlì (Comune di Forlì, 2000) ha fissato le previsioni di sviluppo residenziale, dalle quali può essere stimata la variazione di domanda per usi civili. Inoltre, sono stati individuati i poli di sviluppo tecnologico, concentrati in prevalenza nei settori settentrionali ed orientali del territorio comunale.

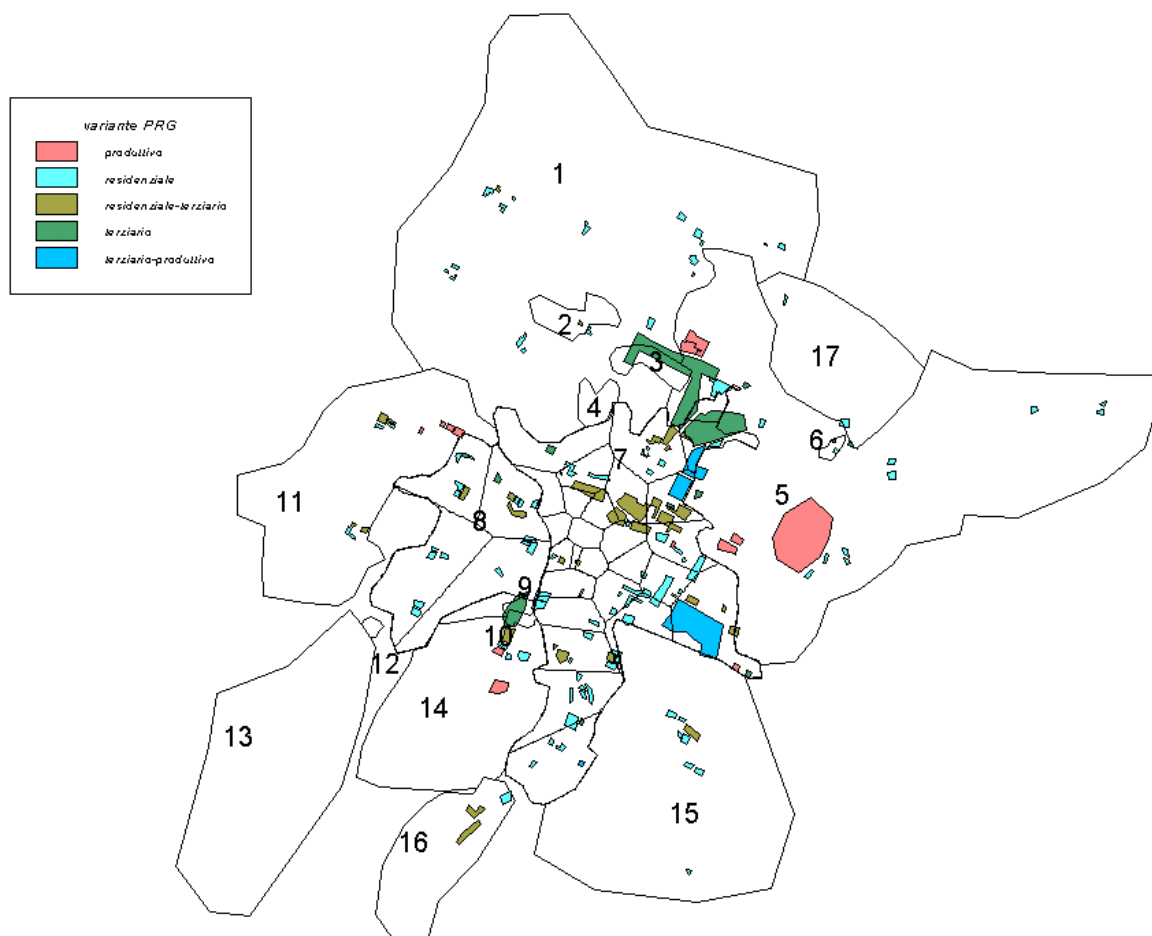


Figura 86 – previsioni di sviluppo della città di Forlì

In relazione agli obiettivi di sviluppo sostenibile e di contenimento delle emissioni, il Piano Energetico Comunale della città di Forlì (CIS, 1999) ha individuato una serie di strategie riguardanti, fra le altre cose, la realizzazione di impianti di cogenerazione e teleriscaldamento in alcuni poli cittadini ritenuti favorevoli (a causa della concentrazione di utenze gas-esigenti). Questi interventi riguarderanno tuttavia gli aspetti impiantistici locali, mentre non modificheranno in maniera apprezzabile l'assetto complessivo della rete.

Analisi e modellazione della domanda

Come noto, mentre è relativamente semplice effettuare misure complessive del consumo istantaneo della rete, è assai difficile misurare simultaneamente in tutti i punti la portata prelevata. D'altra parte, i modelli fluidodinamici basati sulle equazioni di continuità e del moto qui impiegati richiedono, come nell'approccio classico al problema, di assegnare portate uscenti in tutti i nodi che rappresentano prelievi di gas. Si pone quindi il problema di mettere a punto uno stimatore della domanda, che garantisca il rispetto del bilancio di massa (la quantità di gas complessivamente prelevata deve essere uguale alla somma delle portate spillate ai nodi) e consenta una descrizione realistica delle effettive condizioni di funzionamento della rete (e in particolare l'andamento delle pressioni). Nella ricerca qui descritta, si è proceduto alla messa a punto di uno stimatore della domanda che garantisca il rispetto del bilancio di massa, secondo lo schema di Figura 87. Lo schema suppone che la distribuzione temporale sia di tipo stocastico, quella spaziale di tipo deterministico, e che la distribuzione complessiva dei consumi possa essere ottenuta con le semplici regole di combinazione assegnate. Nel seguito si descriveranno in maggiore dettaglio le componenti dello schema.

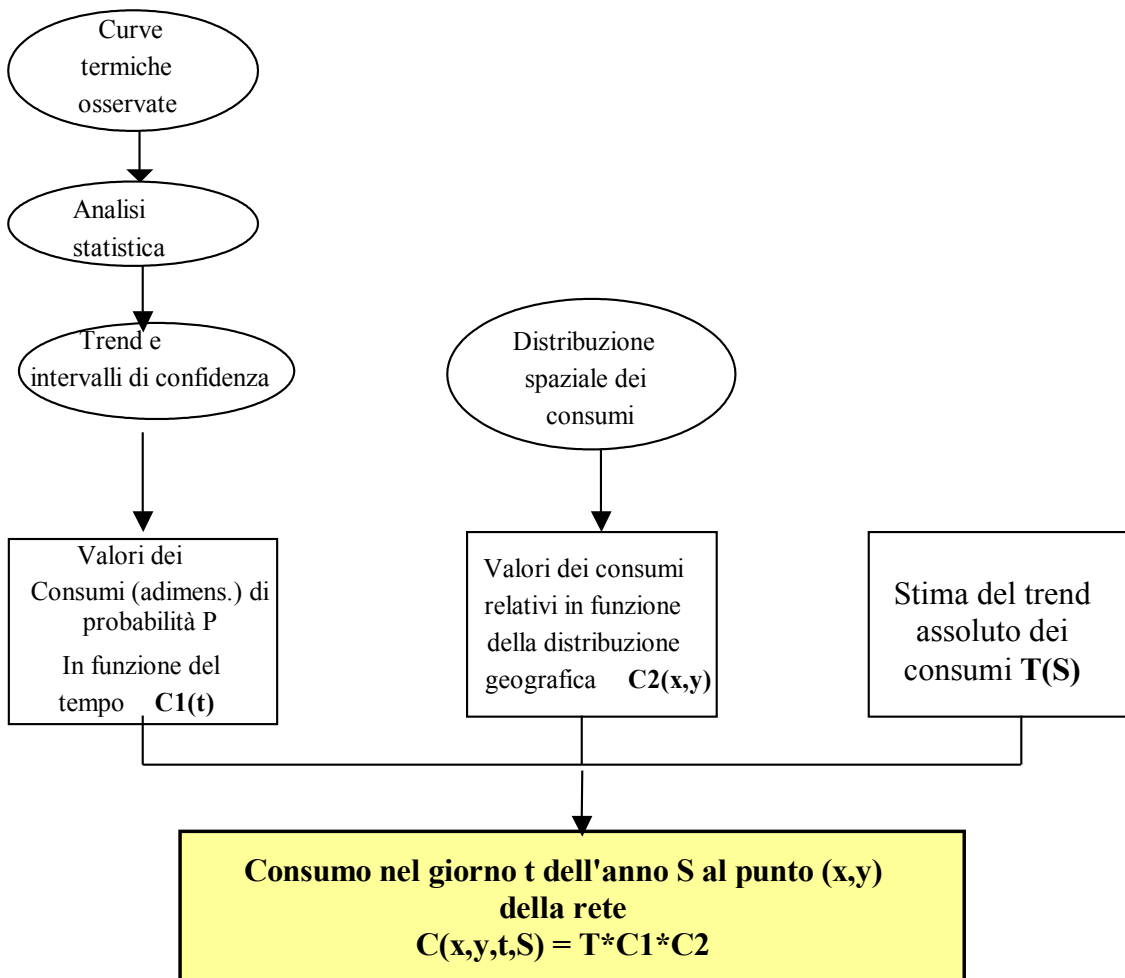


Figura 87 – flow chart dello stimatore della domanda

Andamento temporale

Per la stima della distribuzione temporale dei consumi, si è fatto riferimento alle serie storiche disponibili. Queste coprono nove anni (1991-1999) e riportano il consumo giornaliero complessivo come percentuale totale del consumo annuo. La disponibilità delle serie in tale forma, come di

prassi nella gestione del servizio gas, ha evitato la necessità di una adimensionalizzazione delle serie (Figura 88).

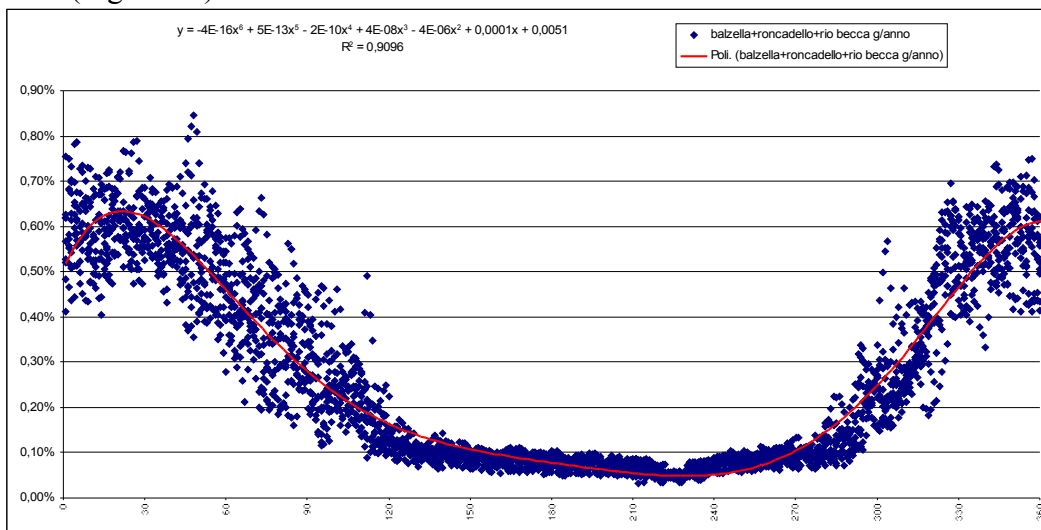


Figura 88 – serie dei consumi disponibili

Da una analisi esplorativa dei dati, è stato possibile individuare a buonsenso tre “stagioni” o periodi subannuali omogenei nelle serie dei consumi (Tabella 36).

Le “stagioni” sono caratterizzate da una varianza omogenea rispetto ad una media che esprime il trend dei consumi in ciascuna di esse.

Stagione 1	Stagione 2	Stagione 3
15 novembre - 31 marzo	1 aprile - 30 aprile ; 10 ottobre - 14 novembre	1 maggio - 9 ottobre
$\sigma^2 = 1,52E-06 \cong \text{costante}$	$\sigma^2 = 7,98E-07 \cong \text{costante}$	$\sigma^2 = 4,42E-08 \cong \text{costante}$

Tabella 36– caratteristiche delle tre “stagioni” individuate

Sui dati di ogni stagione, depurati del trend (che è stato valutato per regressione polinomiale a tentativi con criteri di massimo coefficiente di regressione), è stata fatta un’analisi di distribuzione di probabilità. Come previsto in base al teorema del limite centrale, la distribuzione dei consumi, somma di un numero elevato di consumi individuali a distribuzione di probabilità qualunque, è risultata di tipo normale per tutte le stagioni, con livello di significatività di 0.05 secondo il test di Pearson. Le statistiche descrittive sono riportate in Tabella 37.

Statistiche	z - stagione 1	Z - stagione 2	z - stagione 3
Media campionaria	2,60022E-05	-0,00017581	4,49151E-05
Varianza campionaria	7,9158E-07	5,27324E-07	2,25872E-08
Deviazione standard	0,000889708	0,000726	0,00015029
Minimo	-0,002510	-0,0023439	-0,0004392
Massimo	0,003219	0,0030207	0,0006468
N° dati	1096	594	1458

Tabella 37– statistiche descrittive dei dati analizzati

In base all’analisi statistica, si è proceduto a costruire le “curve termiche” (ovvero gli andamenti dei consumi durante l’anno) “estremanti” di assegnato livello di probabilità p%(Figura 89). Queste curve rappresentano i limiti entro cui, con assegnato livello di probabilità, si troverà la curva termica effettiva. P.es. se vogliamo sapere in quale intervallo la curva potrà oscillare con probabilità di non superamento p=5%, possiamo affermare che essa sarà sempre al di sotto della curva del 95% di probabilità riportata in Figura 89.

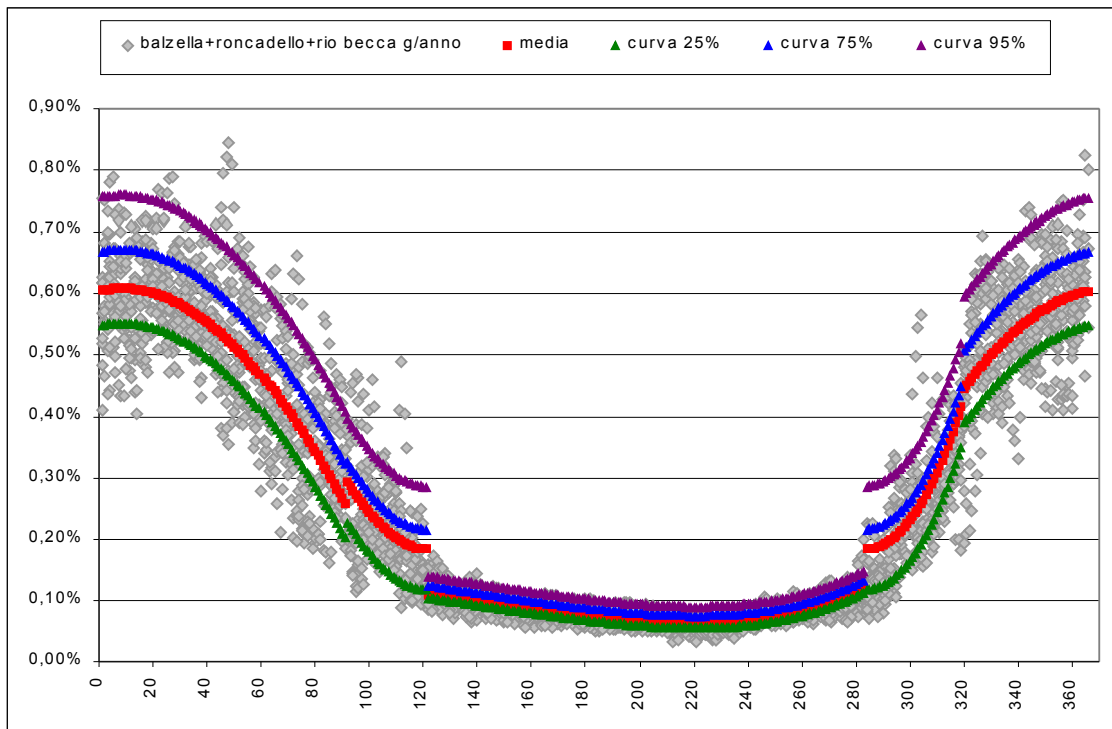


Figura 89 – curve termiche estremanti per vari livelli di probabilità

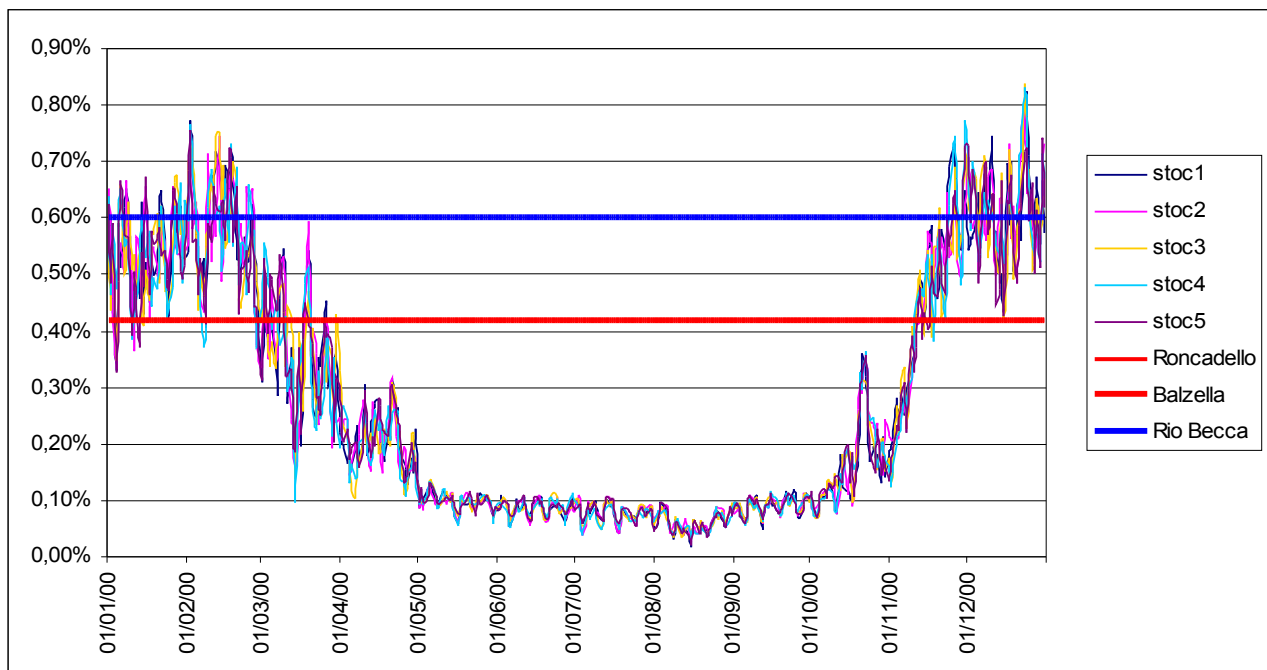


Figura 90 – Uso del processo stocastico della domanda per l’analisi della distribuzione dei giorni in cui viene ecceduta la potenzialità della rete, ipotizzando di alimentare quest’ultima con due sole delle tre cabine. Le linee orizzontali, che rappresentano la potenzialità di servizio in assenza della cabina di cui portano il nome, corrispondono alle portate limite erogabili, valutate con la simulazione idraulica di cui in seguito.

Le elaborazioni ora illustrate hanno lo scopo di caratterizzare la domanda per eventi “di progetto”, ovvero condizioni estreme della rete. Per riprodurre più significativamente la variabilità della domanda nel corso dell’anno, la curva termica può anche essere caratterizzata come processo stocastico, e quindi, messo a punto il modello del processo con le procedure classiche dell’analisi statistica (p.es Maione e Moisello, 1995), possono essere generate un numero molto grande di serie sintetiche di domanda, tutte caratterizzate dagli stessi parametri statistici della serie usata per la calibrazione del modello. Queste serie sintetiche possono essere impiegate per analisi di affidabilità della rete e

valutazioni circa l'opportunità di manutenzioni preventive e altri accorgimenti gestionali. Ad esempio, può essere valutato il rischio di insufficienza della rete o la durata attesa dei disservizi nell'ipotesi di blocco di una delle cabine di I salto per un numero assegnato di giorni (Figura 90). Nel caso in esame, il modello scelto per il processo stocastico, il cui autocorrelogramma sperimentale è riportato in Figura 91, è un autoregressivo di ordine 10, in cui si rispecchia una lunghezza plausibile della "memoria" del sistema, legata alla persistenza delle variabili climatiche che influenzano i consumi.

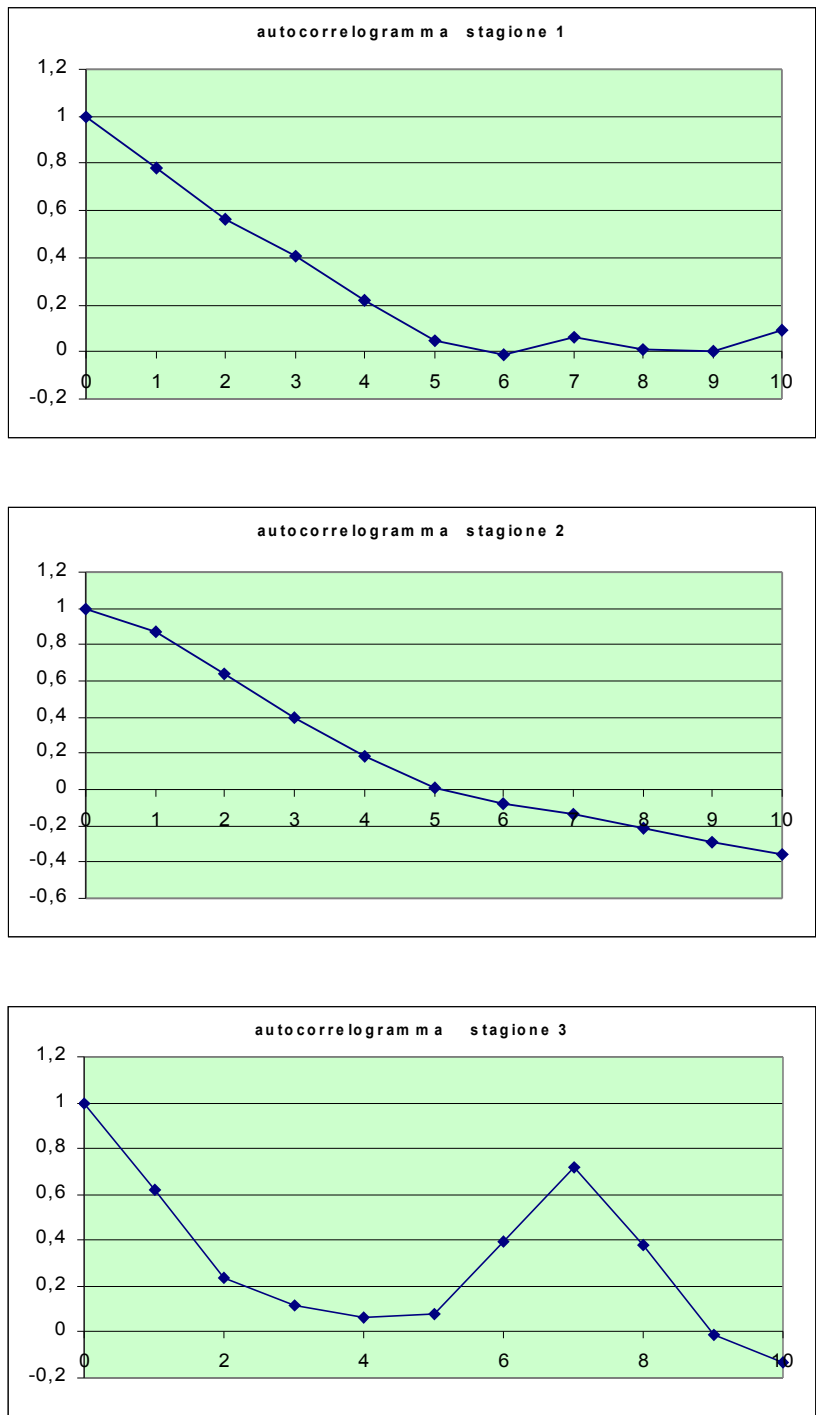


Figura 91 – autocorrelogramma empirico dei consumi giornalieri

Distribuzione nello spazio

Per simulare la distribuzione nello spazio, si è proceduto all'attribuzione alle cabine di riduzione dei consumi registrati alle utenze secondo il database non georeferenziato di CIS s.p.a. Sono stati assegnati i consumi nominali contabilizzati, e si è riportato il totale in ogni zona fra quelle individuate come omogenee (Figura 84); il consumo assegnato ai nodi in

ogni zona è il consumo totale diviso per il numero totale di nodi nella zona. I valori dei consumi sono stati adimensionalizzati e normalizzati in modo che la loro somma fosse uguale ad 1, di modo che ad ogni zona è stato associato un peso esprimente la percentuale del consumo totale istantaneo che avviene in quella zona. Nelle aree servite da più cabine di riduzione della pressione, ove è difficile assegnare con certezza i consumi ai nodi, si è assegnata ad ogni cabina l'area geografica individuata con il criterio del *nearest neighbour* (poligoni di Thiessen). La Figura 92 illustra la divisione convenzionale effettuata, sulla base della localizzazione delle cabine di riduzione.

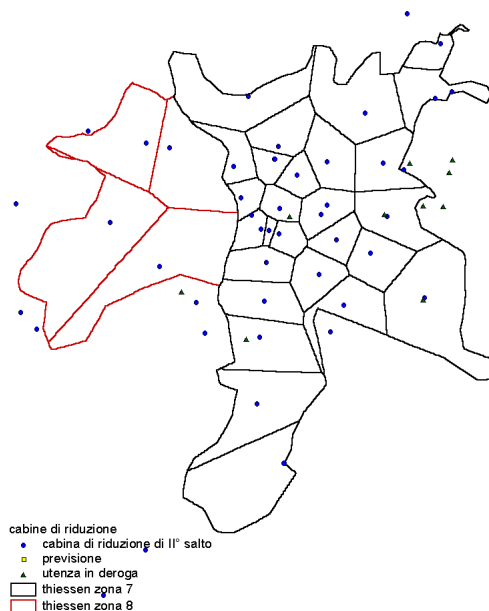


Figura 92 – cabine di riduzione e attribuzione delle aree di influenza.

Per quanto riguarda la distribuzione spaziale in corrispondenza dello scenario di attuazione del Piano Regolatore, si è valutata in ciascuna delle zone individuate l'incidenza percentuale dell'incremento volumetrico per le destinazioni residenziale e terziaria, e si è provveduto all'incremento conseguente dei pesi delle aree. Successivamente si sono rinormalizzati i contributi delle varie aree in modo che la loro somma fosse unitaria. Per quanto riguarda i consumi industriali, che come detto hanno caratteristiche difficilmente prevedibili, si è scelto di non effettuare una assegnazione sistematica alla rete. Escludendo le utenze industriali, la rete risulta meno "carica" rispetto alle potenzialità massime, e la differenza fra queste ultime e le condizioni di uso per un dato scenario rappresenta un "potenziale industriale di riserva" che può essere valutato quantitativamente in ogni scenario sulla base del modello idraulico di seguito descritto.

Valutazione idraulica della rete

Agli scopi della pianificazione territoriale e della gestione della rete, è sufficiente simulare il comportamento di quest'ultima in moto permanente, essendo i fenomeni transitori di interesse per il funzionamento di manufatti locali e per alcune operazioni gestionali "minori". La simulazione idraulica di moto permanente si basa sulla soluzione delle equazioni di flusso lungo i tronchi della rete e di bilancio delle correnti di massa ai nodi, come ben noto. Le formule che possono essere impiegate per descrivere il moto del gas sono la formula empirica di Colebrook (p.es. Citrini e Noseda, ...), che tiene conto delle condizioni di moto sia di tipo laminare, sia di tipo turbolento, e una varietà di equazioni empiriche, tra le quali le più utilizzate sono quella di Renouard e quella di Weymouth (p.es. Ghelli, 1997), valide in moto turbolento. Occorre segnalare che dal punto di vista teorico la formula ritenuta più affidabile è quella di Colebrook, mentre le altre due formule, che forniscono valori fra loro congruenti, tendono a sovrastimare le perdite di carico e risultano quindi maggiormente cautelative in sede di progetto. Nello spirito di costruire un sistema di supporto alle decisioni, si è fatto uso di tutte e tre le formule ricordate, per garantire un quadro diagnostico completo in corrispondenza di ogni scenario. La prima soddisfa l'esigenza di riprodurre in modo più realistico il funzionamento del sistema, mentre le seconde consentono di verificare diverse ipotesi progettuali con coefficienti di sicurezza ingegneristicamente adeguati. I passi per la simulazione della rete prevedono:

1. calcolo del consumo di progetto e sua ripartizione ai nodi della rete, con l'introduzione di coefficienti di punta e di contemporaneità secondo la prassi corrente dell'idraulica delle reti; questo viene fatto attraverso:

- a. scelta di $T(S)$ = consumo complessivo dell'anno S
- b. calcolo di $T(S)*C1(t)$ = consumo complessivo del giorno t dell'anno S
- c. calcolo di $T(S)*C1(t)*C2(x,y)$ = consumo di ogni cabina di riduzione per il giorno t dell'anno S. Il valore $C2(x,y)$ è assegnato ad ogni cabina di riduzione esistente nella rete attraverso la procedura illustrata precedentemente
- d. correzione per tenere conto degli effetti subgiornalieri (portata oraria di punta e consumo contemporaneo), attraverso (1) Individuazione della quota del totale di consumo residenziale/variabile (cv) e industriale/costante (cc) a seconda del tipo di utenze servite dalla cabina considerata; (2) Assegnazione del coefficiente di max consumo orario (%) per la quota di consumo variabile $cov = 7.5\%$ (equivalente a un coefficiente di punta di 1.8); (3) Assegnazione del coefficiente di consumo orario (%) per la quota di consumo costante $coc = 4.17\% = 100/24\%$ (ipotesi che il consumo costante – industriale, dipendente da processi produttivi ragionevolmente omogenei durante il giorno- sia ripartito uniformemente durante le 24 ore); (4) Assegnazione del coefficiente di contemporaneità che tiene conto del fatto che i consumi dei vari utenti non avvengono tutti simultaneamente $c = 0.7$ (questo corrisponde ad assumere un coefficiente di punta reale di 1.25 anziché 1.8)
- e. calcolo della portata totale di scenario in ogni nodo (x,y), secondo la formula:

$$Q [mc/h] = c*[T(S)*C1(t)*C2(x,y)*cv*cov + T(S)*C1(t)*C2(x,y)*cc*coc]$$

2. assegnazione delle condizioni al contorno (pressione imposta in una delle cabine di immissione e controllo della congruità delle pressioni risultanti di conseguenza alle altre cabine)
3. soluzione delle equazioni fluidodinamiche per la rete in moto permanente;
4. incremento della portata in alcuni nodi (quelli suscettibili di sviluppo industriale) secondo opportune ipotesi, fino al punto al quale la rete, simulata di conseguenza, mostra pressioni troppo basse in almeno un nodo
5. registrazione della portata incrementale in dette condizioni (potenziale industriale di riserva).

Nelle figura seguenti vengono riportati a titolo di esempio alcuni scenari simulati. È importante sottolineare, comunque, che l'utilità del sistema di supporto alle decisioni è nella possibilità di verificare un gran numero di scenari, ipotesi di funzionamento e varianti alla rete, che non si prestano a essere facilmente sintetizzati.

A proposito della rappresentazione dei risultati, si è scelto di interpolare i valori delle pressioni ai nodi come se fossero dati puntiformi. Di conseguenza si è ottenuta in ciascun caso una superficie di pressione continua, che può essere rappresentata come una mappa bidimensionale a gradazioni cromatiche o a curve di livello. Ovviamente questo ha un senso solo in termini di rappresentazione, mentre la pressione varia solo lungo i tronchi della rete e con legge nota, il che impedirebbe di eseguire l'interpolazione con i criteri usati (nella fattispecie, una interpolazione lineare bidimensionale).

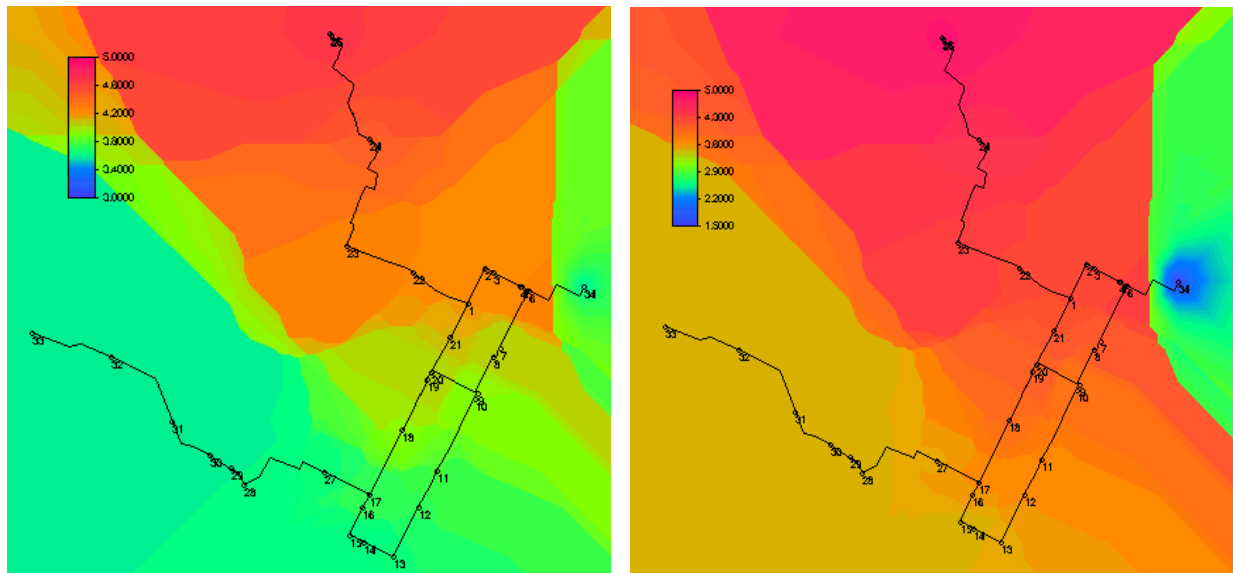


Figura 93 – simulazione della rete di IV specie; situazione attuale (sinistra) e situazione con consumi da PRG 2015 (destra)

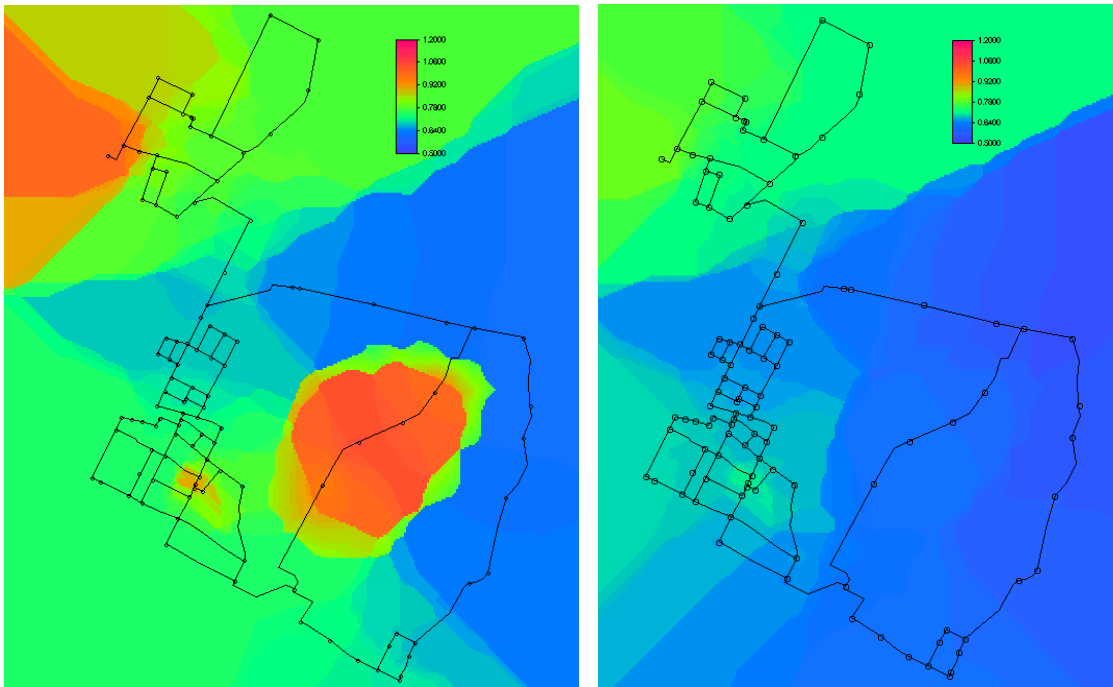


Figura 94 – simulazione della rete di V specie; trasferimento della cabina di I salto a Villa Selva (sinistra) e situazione attuale (destra), in entrambi i casi con consumi attuali.

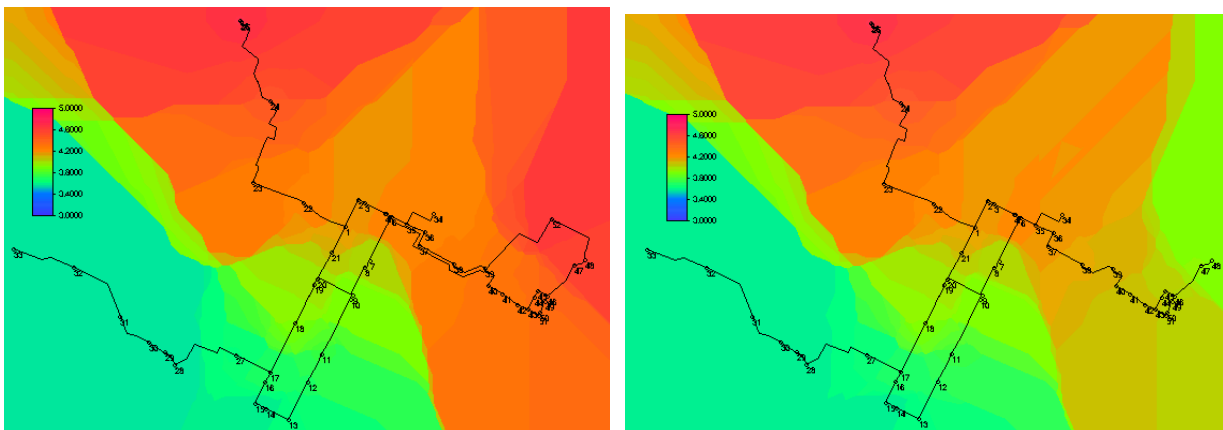
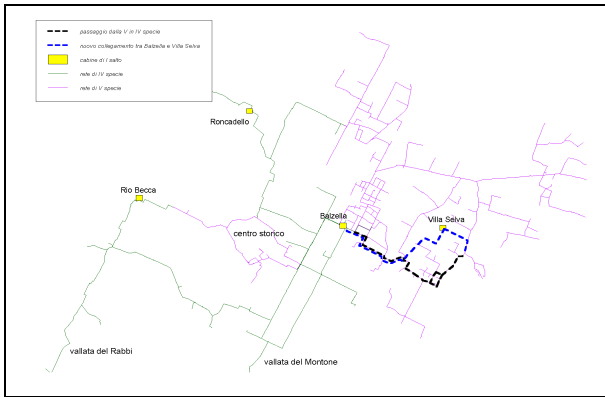


Figura 95 – esempio di simulazioni per il confronto fra due schemi progettuali: collegamento di una cabina con rete magliata (sinistra) o mensola (destra)

Valutazione multicriteriale degli scenari di progetto

L'uso finale di un sistema di supporto alle decisioni è la valutazione dei diversi possibili scenari. Questa valutazione può essere condotta con tecniche di tipo formale, come le varie metodologie di analisi multicriterio (MCA: p.es. Malczewski, 1999). In casi come quelli simulati, tuttavia, le variabili di tipo geografico-ambientale sono piuttosto ridotte in numero, per le caratteristiche particolari degli interventi richiesti (quasi tutti al solo livello impiantistico, e quindi non coinvolgenti variabili di pianificazione generale) e le decisioni devono essere prese quasi esclusivamente sulla base di considerazioni tecnico-economiche. In casi come questo, è raccomandabile l'impiego di tabelle riassuntive di confronto fra le varie ipotesi, lasciando alla discussione informale anziché ad una procedura come quelle citate la decisione. A titolo di esempio, si riporta in Figura 96 una tabella comparativa di sintesi, messa a punto per un caso specifico.



NB – L'incertezza sui costi è dovuta al fatto che l'intervento richiede l'adeguamento degli allacciamenti esistenti.

Ipotesi	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi	Consumi cabine I salto da PRG 2015 [mc/h]	Costo indicativo [ml]
-----	⇒ Conversione dei tubi di V specie in IV specie	⇒ Breve tempo di realizzazione ⇒ Soddisfamento della richiesta di Agrieuropa ⇒ Costi da definire	⇒ Sbilanciamento della rete di V specie ⇒ Soluzione intermedia dato che non prevede lo spostamento della cabina di I salto di via Balzella a Villa Selva	Roncadello = 34571 Balzella = 33361 Rio Becca = 6368	?
-----	⇒ Collegamento tra Balzella e Villa Selva con tubo DN 350 ⇒ Collegamento tra Villa Selva e punto A (inizio feeder per Agrieuropa) con tubo DN 300	⇒ Soddisfamento della richiesta di Agrieuropa ⇒ Rete di IV e V specie bilanciate ⇒ Ottimo potenziale di riserva industriale per il polo produttivo di Villa Selva (33000 mc/h) ⇒ Soluzione di lungo periodo	⇒ Tempi di realizzazione più lunghi della soluzione precedente	Roncadello = 33641 Villa Selva = 34261 Rio Becca = 6368	700 - 900
----- +	⇒ Conversione dei tubi di V specie in IV specie ⇒ Collegamento tra Balzella e Villa Selva con tubo DN 300 ⇒ Collegamento tra Villa Selva e punto A con tubo 300 ⇒ Unione nel punto A tra i due tratti di IV specie (conversione + nuova costruzione)	⇒ Soddisfamento della richiesta di Agrieuropa ⇒ Rete di IV e V specie bilanciate ⇒ Buon potenziale di riserva industriale per il polo produttivo di Villa Selva (18000 mc/h) ⇒ Tempi di realizzazione modulari ⇒ Soluzione di lungo periodo	⇒ Costi elevati	Roncadello = 33641 Villa Selva = 34261 Rio Becca = 6368	615 - 780 + ?

Figura 96 –esempio di tabella comparativa di sintesi fra due interventi

Bibliografia

1. Abbagnano, N., Storia della filosofia, vol. VI, La filosofia del XX secolo, TEA, Roma, 1993.
2. Achache, G., La prudence: une morale du possible, Collection Morales "Autrement", Paris, 1996
3. Ackoff, R.L., The art of problem solving, John Wiley & Sons, New York, 1978
4. AgNPS: Agricultural Non Point Pollution Model, User's Guide, v.4.2, North Central Soil Conservation Research Lab., Morris, Minnesota, 1994
5. Ahern, J., Spatial Concepts, planning strategies and future scenarios: a framework method for integrating landscape ecology and landscape planning, in Klopatek, J.M., Gardner, R.H., (eds.) Landscape ecological analysis: issues and applications, Springer-Verlag, NY, 1999.
6. Akinyede, J.O., Highway cost modelling and route selection using a geotechnical information system, PhD Thesis, Technical University of Delft, 1990
7. Alberti, M., Solera, G., Tsetsi, V., La città sostenibile: analisi e proposte per un'ecologia urbana in Europa, Franco Angeli, 1994
8. Albrecht, J.H., Universal GIS Operations for Environmental Modeling, Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, 1996; URL: http://bbq.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/jochen_albrecht/jochen.santafe.html
9. Alessio, G., Besio, M., Bobbe, A., Colombo, A., Frigo, E., La conoscenza per il piano: le molteplici rappresentazioni della realtà ambientale, in Besio, M., Monti, C., (eds.) Dal cannocchiale alle stelle, strumenti per il nuovo piano, F. Angeli, Milano, 1999
10. Altobelli, A., Feoli, E., Ourabia, L., An overview of landscape structure through the application of fractal dimension to remotely sensed images using GIS technology, in prep., 1999.
11. Altshuler, A., The city planning process, Cornell Univ. Press, Ithaca, 1965
12. Andreottola, G., Canziani, R., Cossu, R., Rimozione biologica dei nutrienti dalle acque di scarico, Ist. Per l'Ambiente, Milano, 1990
13. Arnold, J.G., Williams, R., Srinivasan, R., King, K.W., SWAT, The soil and water assessment tool, Manual; URL: <http://www.brc.tamus.edu/swat>
14. Artioli, G.P., Baldini, U., De Nardo, M.T., Farina, M., Palumbo, A., Pignone, R., Tomassetti, C., Viel, G., Area metropolitana di Bologna, stato di avanzamento delle ricerche, in Atti del Convegno 'Geologia delle Grandi aree urbane', Progetto Strategico del CNR, Bologna, 1997 (in Italian)
15. Arts, G.H.P., Buuren, M. van, Jongman, R.H.G., Nowicki, P., Wascher, D., Hoek, I.H.S., (eds.), Ecological Networks, Special Issue, Landschap n.3, 1995.
16. Assemblea dei Comuni del Cesenate per la programmazione, Piano Infraregionale delle Attività Estrattive, approv. GR Emilia Romagna n. 2395 del 27 giugno 1995
17. Ave, G., Verso un protocollo di lettura dei piani urbanistici, Urbanistica Informazioni, n.139, 1995
18. Baczko, B., L'utopia, tr. It. Einaudi, Torino, 1978
19. Baer, W.C., General Plan Evaluation Criteria, An Approach to making better plans, Journal of the American Planning Association, vol. 63, No. 3, 1997
20. Bagli, S., Pistocchi, A., A method for map-based advection-dispersion modelling: the integration of environmental models in spatial decision support systems; 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000; URL: <http://www.colorado.edu/research/cires/banff/upload/541/>
21. Baker, W. E., Explosions in Air, University of Texas Press, Austin, London, 1973

22. Ballestrazzi, P. e E. Imolesi, Criteri di stima dei rischi ecologici dell'attività estrattiva: analisi costi benefici e valutazione d'impatto ambientale. *Quarry & Construction*, XXII, n°5, 1996
23. Barazzuoli, P., Micheluccini, M., Salleolini, M., Salvadori, L., Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: applicazione del metodo di Kennessey al bacino del torrente Farma e sua verifica con i calcoli di bilancio, *Boll. Soc. Geol. It.*, n.105, 1986
24. Barthes, R., *Miti d'oggi*, 1956, tr.it. Einaudi, Torino
25. Bartolommei, S., *Etica e Natura: una "rivoluzione copernicana" in etica?* Laterza, Roma-Bari, 1995
26. Basley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., ANSWERS, a model for watershed planning, *Transactions of ASAE*, pp. 938-944, 1980
27. Bateson, G., *Mente e Natura. Un'Unità Necessaria*, 1979, tr.it. Adelphi, Milano.
28. Batu, V., A generalized 3D analytical solute transport model for multiple rectangular first-type sources, *J. Of Hydrology*, 174, 57-82, 1996
29. Batu, V., A generalized 3D analytical solute transport model for multiple rectangular first-type sources, *J. Of Hydrology*, 174, 57-82, 1996
30. Bellmann, R.E., Zadeh, L.A., Decision Making in a fuzzy environment, *Management Sciences*, vol. 17, no. 4, 1971
31. Benson, P.E., CALINE3, a versatile dispersion model for predicting air pollutant levels near highways and arterial streets, OTL, Ca, 1979
32. Berger, J., Guidelines for landscape synthesis: some directions – old and new, *Landscape and Urban Planning*, n. 14, 1987.
33. Bernini, F., Padoa-Schioppa, E., Stima della biopotenzialità territoriale, in Ingegnoli, V., (ed.), *Esercizi di ecologia del paesaggio*, CittàStudi, Milano, 1997.
34. Berry, J.K., Cartographic modeling: the analytical capabilities of GIS, in Goodchild, M.F., Parks, B.O., Steyaert, L.T., (eds) *Environmental modeling with GIS*, Oxford University Press, New York, 1993
35. Berry, P., Dantini, E.M., Stima delle sovrappressioni in aria generate da volate in galleria, *Quarry and Construction*, XXXII, n° 12, pp. 79 – 87, 1994
36. Berry, P., Pistocchi, A., A multicriterial geographical approach for the environmental impact assessment of open pit quarries, in Singhal, R.K., Mehrotra, A.K., (eds) *Environmental Issues and management of waste in energy and mineral production*, Balkema, Rotterdam, 2000
37. Berry, P., Pistocchi, A., Neri, D., Un approccio geografico-multicriterio per la valutazione di impatto ambientale da attività estrattive, *Genio Rurale*, n.3, 2000
38. Besio, M., Le tecnologie GIS nel trasferimento dal progetto di conoscenza al progetto di piano, in Besio, M., Monti, C., (eds.) *Dal cannocchiale alle stelle, strumenti per il nuovo piano*, F. Angeli, Milano, 1999
39. Besussi, E., *Mondi artificiali*, in Cecchini, A., (a cura di) *Meglio meno, ma meglio: automi cellulari e analisi territoriale*, F. Angeli, Milano, 1997
40. Bettini, V., *Elementi di ecologia urbana*, Einaudi, Torino, 1996
41. Beven, K.J., A discussion of distributed hydrological modeling, in Abbot, M.B., Refsgaard, J.C., (eds) *Distributed Hydrological Modeling*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996
42. Beven, K.J., Moore, I. D., *Terrain analysis and distributed modelling in Hydrology*, Wiley, New York, 1993
43. Bloch, E., *Il principio speranza*, 1959, tr.it. Einaudi, Torino
44. Bonham-Carter, G., *GIS for geoscientists, modeling with GIS*, Elsevier, New York, 1994
45. Borges, J.L., "Tutte le opere", vol. I, Mondadori, Milano, 1984
46. Boyd, R., Kuhn, T.S., *La metafora nella scienza*, tr.it. Feltrinelli, Milano, 1983

47. Bradshaw, L.S.; Deeming, J.E.; Burgan, R., Cohen, J.D., The national fire danger rating system, Gen. Tech. Report INT-169, Ogden, UT, USDA Forest Service, 1983
48. Bridgewater, P.B., Landscape ecology, GIS and nature conservation, in: Haines-Young, R., Green, D.R., Cousins, S., (eds.), Landscape ecology and GIS, Taylor & Francis, London, 1993.
49. Briggs, D.J., and Martin, D.M., CORINE: an environmental information system for the European Community, European Environment Review 2(1), 29-34, 1988
50. Brown, L.C., and T.O. Barnwell.. The enhanced stream water quality model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user manual. EPA-600/3-87/007. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, 1987
51. Burrough, P.A., De Jong, S.M., A fractal approach to the classification of mediterranean vegetation types in remotely sensed images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n.8, 1995.
52. Burrough, P.A., McDonnell, R., Principles of GIS, II ed., Oxford University Press, London, 1998
53. Burrough, P.A., Opportunities and limitations of GIS based modeling of solute transport at the regional scale, in Corwin, D.L., Loague, K., Application of GIS to the modeling of non point source pollutants in the vadose zone, SSSA special publication N. 48, Madison, 1996
54. Calvino, I., Palomar, Einaudi, Torino, 1983
55. Calvino, I., Six Memos for the next millennium; tr.it. Lezioni Americane, Mondadori, Milano, 1984
56. Campbell, H.J., Institutional consequences of the use of GIS, in Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W., (Eds.), Geographical Information Systems, John Wiley & Sons, New York, 1999
57. Campbell, H.J., Masser, I., GIS and organizations: how effective are GIS in practice?, Taylor & Francis, London, 1995
58. Campbell, S., Green Cities, Growing Cities, Just Cities? Urban planning and the contradictions of sustainable development, Journal of the American Planning Association, vol. 62, No. 3, 1996
59. Campos Venuti, G., Generazioni di Urbanisti, F. Angeli, Milano, 1986
60. Cancedda, A.; Dantini, E.M.; Carastro, M.; Scavo subacqueo nel porto di Olbia. Problemi di sicurezza connessi con le volate. Quaderni dell'IAM, ottobre, 1980 ed. Istituto di Arte Mineraria, Facoltà di Ingegneria, Università di Roma "La Sapienza"
61. Cannata, P.G., Governo dei bacini idrografici, ETAS, Milano, 1993
62. Cannata, P.G., I fiumi della terra e del tempo, F. Angeli, Milano, 1986
63. Cantin, J.F., Integration of numerical models and field characterizations into a georeferenced system for oil spill emergency response in the StLawrence River, 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000; URL: <http://www.colorado.edu/research/cires/banff/upload/512>
64. Canziani, R., Ragazzi, M., Tonolli, E., Applicazione di un modello decisionale per la gestione dei rifiuti solidi al caso del Trentino, RS- Rifiuti Solidi, n.3, maggio-giugno 2000
65. Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., GIS based techniques for mapping landslide hazard, in Carrara, A., Guzzetti, F., (eds.) Geographical Information Systems in assessing natural hazards, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995
66. Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., Current limitations in modeling landslide hazard, in Buccianti, A., Nardi, G., Potenza, R., (eds.) Proceedings of the fourth annual conference of the International Association for Mathematical Geology, De Frede ed., Naples, 1998
67. Carrara, A., Multivariate Models for landslide hazard evaluation, Mathematical Geology, vol. 15, n. 3, 1983

68. Casalicchio G., Bracciaferri, P., Riferimenti per l'approntamento di piani di concimazione, AIA (Ass. Italiana Allevatori), Roma, 1993.
69. Casalicchio G., Vianello G., Elementi di Pedologia, CLUEB, Bologna, 1979.
70. Cassani, G., comunicazione personale, 2000
71. Cecchini, A., (a cura di) Meglio meno, ma meglio: automi cellulari e analisi territoriale, F. Angeli, Milano, 1997
72. Chan, T.O., Williamson, I.P., The different identities of GIS and GIS diffusion, *International Journal of Geographic Information Science*, vol. 13, No 3, pp. 267-281, 1999
73. Charbeneau, R.J., Weaver, J.W., Lien, B.K., The Hydrocarbon Spilling Screening Model, User's manual, USEPA, 1995
74. Cheng, Q., Agterberg, F.P., Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping, *Natural Resources Research*, vol. 8, n. 1, 1999
75. Chiang, W.H., Kinzelbach, W., Rausch, R., Aquifer Simulation model: groundwater flow and transport modeling, Gebr. Borntraeger Verl., Berlin-Stuttgart, 1998
76. Chiarello, E., Jolion, J.M., Amoros, C., Regions growing with the stochastic pyramid: application in landscape ecology, *Pattern Recognition*, n. 1, vol. 29, 1996.
77. Chierici, G.L., Principi di ingegneria dei giacimenti petroliferi, ediz. non comm. AGIP, Milano, 1990
78. Chung, C.F., Fabbri, A.G. 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, vol. 65, n. 12, pp. 1389-1399.
79. Chung, C.F., Fabbri, A.G., Prediction models in spatial data analysis, Draft manuscript, May 1999
80. Chung, C.F., Fabbri, A.G., van Westen, C.J., Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation, in Carrara, A., Guzzetti, F., (eds.) *Geographical Information Systems in assessing natural hazards*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995
81. Chung, C.F., Fabbri, A.G., The representation of geoscience information for data integration, *Non Renewable Resources*, 1993
82. Ciancarella, L., Craglia, M., Ravaglia, E., Secondini, P., Valpreda, E., La diffusione dei GIS nelle amministrazioni locali italiane, F. Angeli, Milano, 1998
83. CIS- Consorzio Intercomunale Servizi, Piano Energetico-Ambientale per il Comune di Forlì, 1999
84. Clark Labs, IDRISI 32 User Manual, Worcester, Ma, 1998
85. Clements, F.E., Plant succession: an analysis of succession of vegetation, *Canegie Inst. Wash. Publ.* 242, 1916
86. Commoner, B., Il cerchio da chiudere, Garzanti, Milano, 1972
87. Comune di Cesena, Settore Programmazione Urbanistica, COMPACT: A control and management panel for the quality of life in the city of tomorrow, proposta di progetto di ricerca nell'ambito del V programma quadro di finanziamento della ricerca scientifica e tecnologica dell'Unione Europea, DG XII, a cura di Biscaglia, A., Pistocchi, A., Dall'Ara, E., Farabegoli, A., Tondelli, S., Secondini, P., febbraio 2000
88. Comune di Forlì, Piano Regolatore Generale, 2000
89. Comune di Reggio Emilia, Piano Regolatore Generale, Norme Tecniche di Attuazione, 1999
90. Corradini, C., Melone, F., Smith, R.E., Modelling Infiltration during complex rainfall sequences, *Water Resources Research*, 30(10): 2777-2784, 1994
91. Cortellini, L., La distribuzione dei reflui zootecnici, in Tabaglio e Spallacci, cit., 1993
92. Costanza, R., Ruth, M., Using dynamic modeling to scope environmental problems and build consensus, *Environmental management*, vol. 22, No 2, pp. 183-195, 1998
93. Couclelis, H., Chapter 2: Modeling frameworks, paradigms, and approaches, in Clarke KC, Parks BE, and Crane MP (eds): *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*. New York: Longman & Co., 2000.

94. Couclelis, H., GIS without computers: building geographical information science from the ground up, in Kemp, Z., (Ed.) Innovations in GIS –4 : selected papers of the fourth national conference on GIS research UK, Taylor & Francis, London, 1997
95. Couclelis, H., Liu, X., The geography of time and ignorance: dynamics and uncertainty in integrated urban-environmental process models, in Proceedings of the 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000. URL: <http://www.colorado.edu/research/cires/banff/upload>
96. Couclelis, H., Space, Time, Geography, in Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W., (Eds.), Geographical Information Systems, John Wiley & Sons, New York, 1999
97. Couclelis, H., The notion of prior structure in urban modeling, Environment and planning A, No. 16, 1984
98. Crocioni, G., Verso la pianificazione strategica. Note sulla pianificazione provinciale e comunale in Emilia Romagna, in Besio, M., Monti, C., (eds.) Dal cannocchiale alle stelle, strumenti per il nuovo piano, F. Angeli, Milano, 1999
99. Dantini, E.M., Carastro, M., Onde sismiche dovute a volate in cava: ricerca sperimentale di una distanza di sicurezza, L'ingegnere, 1976.
100. Davidson, D.A., The evaluation of land resources, Longman Ltd., Harlow, 1992
101. De Bono, E., Il pensiero laterale, tr.it. Rizzoli, Milano, 1967
102. De Fouquet, Ch., Simulation conditionnelle d'une fonction aleatoire et de ses derives partielles, Tech. Note Centre de Geostatistique, Ecole de Mines de Paris, Fontainebleau, 1997
103. De Jong, S., Riezebos, H.Th., SEMMED: a distributed approach to soil erosion modelling, in Remote Sensing '96-Spiteri (ed.)- Balkema, Rotterdam, 1996.
104. De Mauro, T., Minisemantica, Laterza, Bari, 1982
105. Decouflé, L'An 2000, Paris, 1975; cit. in Baczko, 1978
106. De Jong, S.M., Riezeboos, H.Th., Assessment of erosion risk using multitemporal remote sensing data and an empirical erosion model, Department of Physical Geography, University of Utrecht, 1992
107. Dematteis, G., Progetto implicito: il contributo della geografia umana alle scienze del territorio, F. Angeli, Milano, 1995
108. Desmet, P. J. J., Govers, G., GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information, Catena, 25, 389-40, 1995.
109. Desmet, P.J.J., Govers, G., A GIS procedure for automated calculation of the USLE LS factor on topographically complex landscape units, J. of Soil and Water Conservation, 51, 427-433, 1996
110. Domenico, P.A., Schwartz, F.W., Physical and Chemical Hydrogeology, Wiley, New York, 1990
111. Dosi, P. (a cura di) Programma SINA: relazione preliminare; Bozza vers. 03, doc. tecnica ARPA Regione Emilia Romagna, Direzione Tecnica, Bologna, 1998
112. DPR 24 maggio 1988, n. 208, "Attuazione delle direttive CEE concernenti norme in materia di qualità dell'aria, relativamente a specifici agenti inquinanti, e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali, ai sensi della legge 16 aprile 1987, n.183"
113. Duda, R., Hart, P., Nilsson, N., Subjective bayesian methods for rule-based inference systems, in Proceedings of the National Computer Conference, Vol. 45, AFIPS, 1976
114. Duhem, P., La teoria fisica: il suo oggetto e la sua struttura, 1906; tr.it. Il Mulino, Bologna
115. Dutton, W.H., Kraemer, K.L., Modeling as negotiation: the political dynamics of computer models in the policy process, Ablex Publishing Corporation, Norwood, 1985
116. Eco, U., Segno, Mondadori, Milano, 1980

- 117.Egler, F.E., *The way of science. A philosophy of ecology for the Layman*, Haffner, NY, 1970.
- 118.Eigen, M., Winkler, R., *Il gioco*, Adelphi, Milano, 1986 (ed. orig. 1975)
- 119.ERSO, Regione Emilia Romagna, *I suoli della collina cesenate*, Bologna, 1990
- 120.ESRI ArcInfo 4.0 User's manual, 1995
- 121.ESRI ArcView GIS User's manual, 1998
- 122.ESRI Avenue Customization and application development for ArcView, 1996
- 123.Fabbri, A.G., Napolitano, P., C.F.Chung, L.Zezere, A.B.Fereira, E.Reis, *Modelling landslide hazard north of Lisbon, Portugal, Using favourability functions*, in Buccianti, A., Nardi, G., Potenza, R., (eds.) *Proceedings of the fourth annual conference of the International Association for Mathematical Geology*, De Frede ed., Naples, 1998
- 124.Fabos, J.G., *From parks to greenways into the 21th century*, ASLA Annual Meeting. *Proceedings, American Society of Landscape Architects*, Washington, 1991.
- 125.Faludi, A., *Planning theory*, Pergamon, Oxford, 1973.
- 126.Farinelli, F., *I segni del mondo: immagine cartografica e discorso geografico in età moderna*, La Nuova Italia, Firenze, 1992
- 127.Ferrari, P., *Assegnazione del traffico alle reti di trasporto*, in Aa.vv., *Manuale dell'Ingegnere*, Zanichelli-ESAC, Bologna, 1996.
- 128.Feyerabend, P.K., *Ambiguità e armonia*, tr.it. Laterza, Bari, 1996
- 129.Feyerabend, P.K., *Contro il metodo. Per una teoria anarchica della conoscenza*, 1975, tr.it. Feltrinelli, Milano
- 130.Feyerabend, P.K., *Dialogo sul metodo*, tr.it. Laterza, Bari, 1989
- 131.Forman, R.T.T. , Godron, M., *Landscape Ecology*, Wiley, New York, 1986
- 132.Freeze, R.A., Harlan, R.L., *Blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response model*, *J. Hydrology* 9, 237-258, 1969
- 133.Frere M. H., Ross, J.D., Lane, L. J., *The Nutrient submodel*, in USDA, cit., 1980
- 134.Friedmann, J., *Pianificazione e dominio pubblico*, 1987, tr.it.Dedalo, Bari
- 135.Fusco Girard, L., Nijkamp, P., *Le valutazioni per lo sviluppo sostenibile della città e del territorio*, Franco Angeli, Milano 1997
- 136.Gambolati, G., Putti, M., Paniconi, C., *Three dimensional model of coupled density-dependent flow and miscible salt transport*, Chapter 10 in Bear, J., et al., *Seawater intrusion in coastal aquifers*, Kluwer, Dordrecht, 1999
- 137.Gardner, R.H., Milne, B.T., Turner, M.G., O'Neill, R.V., *Neutral Models for the analysis of broad scale landscape pattern*, *Landscape Ecol*, n.1, 1987.
- 138.Geddes, P., *Città in evoluzione*, tr.it. Mondadori, Milano, 1911
- 139.Geertmann, S., *Tecnologia dell'informazione geografica e pianificazione fisica strategica: ostacoli e promesse*, in Besio, M., Monti, C., (eds.) *Dal cannocchiale alle stelle, strumenti per il nuovo piano*, F.Angeli, Milano, 1999
- 140.Geneletti, D., *Using classification and spatial index techniques on remotely sensed data for environmental impact assessment*, *Proceedings of the 28th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, Cape Town 27-31 March 2000.
- 141.Geneletti, D., Pistocchi, A. , 2000: *L'ecologia del paesaggio come metodo nella pianificazione territoriale: riflessioni su un caso di studio*, accettato per la pubblicazione su *Genio Rurale-Estimo e Territorio*
- 142.Giardini, L., *Agronomia Generale*, Pàtron, Bologna 1986
- 143.Giles, R.H., Trani, M.K., *Key elements of landscape pattern measures*, *Environmental Management*, n.4, vol. 23, 1999.
- 144.Gillies, D., *Philosophy of science in the twentieth century: four central themes*, Blackwell, London, 1993
- 145.GIS/EM 4 Workgroups, *final report*, in *Proceedings of the 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and*

- Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000 (forthcoming electronic version on CD-ROM)
146. Giunta Regionale Emilia Romagna, La regione globale, documento di indirizzo per la pianificazione regionale ed infraregionale, Bologna, 1998
 147. Givone, G.: comunicazione ad una tavola rotonda presso Villa Nazareth, Roma, 1993
 148. Golden Software, Surfer 7.0 User's Guide, 1998
 149. Golley, F.B., Bellot, J., Interactions of landscape ecology, planning and design, Landscape and Urban Planning, n. 21, 1991.
 150. Goodchild, Geographical information science, International Journal of GIS, vol. 6, No. 1, 1992
 151. Goodchild, M.F., DIGITAL EARTH, Keynote address, 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000 (a)
 152. Goodchild, M.F., The current status of GIS and spatial analysis; J. Geograph. Sys., 2: 5-10, 2000 (b)
 153. Goodchild, M.F., What is geographic information science?, NCGIA Core Curriculum in GIScience, 1997; URL: <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u002/u002.html>
 154. Gorte, B., Probabilistic segmentation of remotely sensed image, PhD thesis, Twente University, ITC, Enschede, 1999
 155. Granstrom, S. A., Loading Characteristics of Air Blasts from Detonating Charges, Handlingar n° 100, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1956
 156. Gunn, A.S., Vesilind, P.A., Environmental Ethics for engineers, Lewis P.C., New York, 1986
 157. Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., Carrara, A., Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber river basin, Central Italy, Environmental Management, vol. 25, n. 3, 2000
 158. Habermas, J., Teoria dell'agire comunicativo, 1981, tr.it. Il. Mulino, Bologna
 159. Hardin, G., The tragedy of the commons, Science, vol. 62, pp. 1243-1248, 1968
 160. Harris, D.V., Pan, G., Mineral favorability mapping: a comparison of artificial neural networks, logistic regression, and discriminant analysis, Natural Resources Research, vol. 8, n. 2, 1999
 161. Heckermann, D., Probabilistic interpretation of the MYCIN's certainty factors, in Kanal, L.N., Lemmer, J.F., Uncertainty in Artificial Intelligence, New York, Elsevier, 1986
 162. Heidegger, M., Linguaggio tramandato e linguaggio tecnico, tr.it. ETS, Pisa, 1951
 163. Heidegger, M., Sentieri interrotti, 1936, tr.it. Bompiani, Milano
 164. Heller, A., La teoria dei bisogni in Marx, 1974, tr.it. Feltrinelli, Milano
 165. Hossain, M.A., Modeling advective-dispersive transport with reaction: an accurate explicit finite difference model, Appl. Math. And Comput., 102, 101-108, 1999
 166. Hossain, M.A., Yonge, D.R., Simulating advective-dispersive transport in groundwater: an accurate finite difference model, Appl. Math. And Comput., 105, 221-230, 1999
 167. Humboldt, A. von, Ideen zu einer geographieder pflanzen nebat einem naturgemalde der tropenlander, Tubingen, 1807.
 168. Hunziker, M., Kienast, F., Potential Impacts of changing agricultural activities on scenic beauty – a prototypical technique for automated rapid assessment, Landscape ecology, 14: 161-176, 1999
 169. Husserl, E., La crisi delle scienze europee e la filosofia trascendentale, 1936, tr.it. Saggiatore, Milano
 170. ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives), Aalborg Charter, 1994; URL: <http://www.iclei.org>
 171. ILWIS Development Team, ILWIS 2.2 Reference Guide, ITC, Enschede, 1997

172. ILWIS Development Team, ILWIS 2.2 User's guide, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences ITC, Enschede (NL) 1997
173. Ingegnoli, V. (A cura di), Esercizi di ecologia del paesaggio, CittàStudi, Milano, 1996
174. Ingegnoli, V., Fondamenti di ecologia del paesaggio. Studio dei sistemi di ecosistemi, CittàStudi, Milano, 1994
175. Innes, J., Information in communicative planning, University of California at Berkeley, Working Paper 679, 1995
176. Innes, J., Planning theory's emerging paradigm: communicative action and interactive practice, *Journal of Planning education and research*, vol. 14, nb. 3, 1995
177. Innes, J.E., Planning through consensus building: a new view of the comprehensive planning ideal, *Journal of the American Planning Association*, vol. 62, No. 4, 1996
178. ISRM, Raccomandazioni per il monitoraggio delle vibrazioni indotte dal brillamento di cariche esplosive, Ed. sc. Italiane, *Rivista Italiana di Geotecnica*, anno XXVIII, n°4, ott. – dic. 1994
179. Istituto Nazionale di Economia Agraria, RICA Italia – Strutture e Redditi delle Aziende Agricole, INEA 1997
180. ITC, Principles of Geographical Information Systems-core curriculum textbook, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, 1999
181. Ivanov P., Masliev I., Kularathna M., Kuzmin A., Somlyody L. (1995) DESERT: DEcision Support System for Evaluating River Basin sTrategies. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) Working Paper WP-95-23
182. Jantsch, E., Design for evolution. Self-organisation and planning in the life of human systems, Braziller, NY, 1975.
183. Jongman, R.H.G., Ecological Networks in Europe: congruent developments, in Arts, G.H.P., Buuren, M. van, Jongman, R.H.G., Nowicki, P., Wascher, D., Hoek, I.H.S., (eds.), Ecological Networks, Special Issue, *Landschap* n.3, 1995.
184. Journel, A.G., Huijbregts, C.J., Mining geostatistics, Academic Press, London, 1978
185. Julien, P.Y., Simons, D.B., Sediment transport capacity of overland flow, *Trans. ASAE*, 28, 755-762, 1985
186. Kay, J.J., Ecosystems as self organizing holarchic open systems: narratives and the second law of thermodynamics, in Jørgensen, S.E., Müller, F., (eds) *Handbook of ecosystem theories and management*, CRC Press, Lewis Publishers, 2000
187. Kenkel, N.C., Walker, D.J., Fractals in the biological sciences, *Coenoses*, n. 11(2), 1996.
188. Kent, T.J., The urban general plan, Chandler P.C., San Francisco, 1964
189. King, J.L., Kraemer, K.L., Models, facts and the policy process: the political ecology of estimated truth, in Goodchild, M.F., Parks, B.O., Steyaert, L.T., (eds) *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, Oxford, 1993
190. Kinney, F. K.; Graham, K. J., Explosives Shocks in Air, Springer – Verlag, N.Y., 1985
191. Kliskey, A.D., Linking the Wilderness Perception Mapping concept to the Recreation Opportunity Spectrum, *Environmental Management*, Vol.22, N.1, 1998
192. Knaapen, J.P., Scheffer, M., Harms, B., Estimating habitat isolation in landscape planning, *Landscape and Urban Planning*, n.23, 1992.
193. Koolhaas, R. and Mau, B., The generic city, in S,M,L,XL, Taschen, Frankfurt, 1997
194. Kuhn, T. S., The structure of scientific revolutions, (II ed.) The University of Chicago Press, Chicago, 1970
195. Kuhn, T., The Structure of scientific revolutions, (Ied.) The University of Chicago Press, Chicago, 1962
196. Kuhn, W., Semantics of Geographical Information, GeoInfo, Department of Geoinformation, Technical University of Vienna, 1995
197. Lakatos, I., Falsification and the methodology of Scientific research, 1970; tr.it. in Lakatos, Musgrave, *Critica e crescita della conoscenza*, Feltrinelli, Milano, 1970.

- 198.Lancellotta, R., Geotecnica, Zanichelli, Bologna, 1995
- 199.Langevelde, F. van, Habitat Connectivity and fragmented nuthatch populations in agricultural landscapes, PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1999.
- 200.Lanzani, A., Il territorio al plurale: interpretazioni geografiche e temi di progettazione territoriale in alcuni contesti locali, F.Angeli, Milano, 1991
- 201.Laszo, E., Introduction to systems philosophy: towards a new paradigm of contemporary thought, Gordon & Breach, NY, 1972.
- 202.Laszo,E., Goals for the mankind, 1974, tr.it. Mondadori, Milano
- 203.Lavers, C.J., Haines-Young, R., Equilibrium landscapes and their aftermath: spatial heterogeneity and the role of new technology, in: Haines-Young, R., Green, D.R., Cousins, S., (eds.), Landscape ecology and GIS, Taylor & Francis, London, 1993.
- 204.Legge 26 ottobre 1995, n. 447, "Legge quadro sull'inquinamento acustico"
- 205.Legge Regionale Emilia Romagna, n.20/2000
- 206.Legge Regionale Liguria, n. 36/1997
- 207.Legge Regionale Toscana, n.5/1995
- 208.Little, C.E., Greenways for America, J.Hopkins Univ. Press, Baltimora, MD, 1990
- 209.Liu, L., A cell-based distance decay model for studying water quality in relation to non-point source pollution; Proceedings of the 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000. URL: <http://www.colorado.edu/research/cires/banff/upload/209>
- 210.Lober, D.J., Resolving the siting impasse: modeling social and environmental localtional criteria with geographic information systems, Journal of the American Planning Association, vol. 61, No. 4, 1995
- 211.Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W., (Eds.),Geographical Information Systems, II ed., John Wiley & Sons, New York, 1999
- 212.Lorenzini, E., Verifica del modello Bioplume III, Tesi diploma in Ingegneria dell'Ambiente e delle Risorse, Università di Bologna, 1999
- 213.Lovelock, J., Gaia, a new look at life on earth, Oxford, New York, 1979
- 214.Luhmann,N., Comunicazione Ecologica, 1983, tr.it. F.Angeli, Milano
- 215.Luzi, L., Pergalani, F., Terlien, M.T.J., A probabilistic approach to assess uncertainty of landslide vulnerability to earthquakes, in Buccianti, A., Nardi, G., Potenza, R., (eds.) Proceedings of the fourth annual conference of the International Association for Mathematical Geology, De Frede ed., Naples, 1998
- 216.Lynch, K., A theory of Good city form, 1974; tr. it. Progettare la città, ETAS, Milano
- 217.Lynch, K., L'immagine della città, Marsilio, tr.it. Padova, 1964
- 218.Lyotard, F., La condizione postmoderna, tr.it. Feltrinelli, Milano, 1978
- 219.MacArthur, R.H., Wilson, E.O., The theory of island biogeography, Princeton Univ.Press, Princeton, NJ, 1967.
- 220.Mackay, D., Paterson, S., Cheung, B., Neely, W.B., Evaluating the Environmental behaviour of chemicals with a level III fugacity model, Chemosphere, 14, 9335-374, 1985
- 221.Maidment, D., Environmental Modeling within GIS, in Goodchild, M., Steyaert, L., Parks, B.(princ.eds.), GIS and environmental modeling: progress and research issues, GIS World, Fort Collins, 1996
- 222.Maidment, D., GIS and Hydrologic modeling, in Goodchild, M., Steyaert, L., Parks, B.(eds.), Environmental Modeling with GIS, Oxford University Press, Oxford, 1993
- 223.Maione, U., Le piene fluviali, La Goliardica, Pavia, 1995
- 224.Maione, U., Moisello, U., Elementi di statistica per l'idrologia, La Goliardica Pavese, 1994
- 225.Malcevski S. et. al, Reti ecologiche ed interventi di miglioramento ambientale, Il Verde Editoriale, Milano, 1996.

- 226.Malczewski, J., GIS and multicriteria decision analysis, John Wiley & sons, New York 1999
- 227.Maldonado,T., Critica della Ragione Informatica, Feltrinelli, Milano, 1997
- 228.Mandelbrot, B., Les objets factales: forme, hasard et dimension, Flammarion, Paris, 1975.
- 229.Marletto, V., Zinoni, F., CRITERIA: bilancio idrico e GIS per la prevenzione dell'impatto ambientale di origine agricola, Quaderno Panda-Miraaf, I sistemi informativi territoriali per la gestione dell'agro-ambiente, a cura di C.Gipponi, 1996
- 230.Marsily, G. de, Quantitative Hydrogeology- groundwater hydrology for engineers, Academic Press, San Diego, 1986
- 231.Martin, D., Atkinson, P., Innovations in GIS application? Computers, Environment and urban systems, No 24, pp 61-64, 2000
- 232.Massari, R., Atkinson, P.M., Using the Gibbs sampler in mapping susceptibility to landsliding, in Buccianti, A., Nardi, G., Potenza, R., (eds.) Proceedings of the fourth annual conference of the International Association for Mathematical Geology, De Frede ed., Naples, 1998
- 233.Matheron, G., Spatial Variation. Springer, berlin, 1960
- 234.Mazza, L., Teoria dell'urbanistica, CELID, Torino, 1987
- 235.Mazza,L., Planning as a moral craft. Notes in the margin of the commentary on John Friedmann's book, in Planning Theory Newsletter, 3, 47-50, 1990
- 236.McHarg, I., Design with nature, 1969: Natural History Press, Garden City, NY; tr.it. Muzzio, Padova
- 237.McHarg, I., Ecology and design, in Thompson, G.F., Steiner, F.R.,(eds.), Ecological design and planning, Wiley, NY, 1997.
- 238.McKinney, D.C., Tsai, H., Solving groundwater problems using multigrid methods in a grid-cell based GIS, in Goodchild, M., Steyaert, L., Parks, B.(princ.ed.), GIS and environmental modeling: progress and research issues, GIS World, Fort Collins, 1996
- 239.McLoughlin, La pianificazione urbana e regionale, tr.it. Marsilio, Padova, 1969
- 240.Meijerink, A.M.J., Brouwer, H.A.M., Mannaerts, C., Valenzuela, C., Introduction to the use of GIS for practical hydrology, ITC publication n. 23, Enschede, 1993
- 241.Meltzer, M.I., Hastings, H.M., The use of fractals to assess the ecological impact of increased cattle population: case study from the Runde Communal Land, Zimbabwe, Journal of Applied Ecology, n. 29, 1992
- 242.Mendes, J.F.G., Motizuki, W.S., Urban quality of life evaluation scenarios based on trade off and risk attitudes: the case of Sao Carlos in Brazil, submitted for publication to Environment and Planning A, jan. 2000
- 243.Menzel, R.G., Enrichment ratios for water quality modeling, in USDA, cit. vol. III, 1980
- 244.Micaroni, G., Proposta metodologica e applicazione sperimentale di una procedura di localizzazione ottimale delle attività estrattive, tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Dip. Ing. Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Università di Bologna, relatore prof. P.Berry, correlatore ing. A.Pistocchi, Bologna, 2000
- 245.Microsoft, Excel 97 User's Manual, 1997
- 246.Mintzberg, H., The rise and fall of strategic planning, Prentice-Hall, London, 1994
- 247.Mitas, L., Mitasova, H., Brown, W. M., Astely, M., Interacting fields approach for evolving spatial phenomena: application to erosion simulation for optimised land use. URL: <http://www.cecer.army.mil/grass/viz/SF.final/mitas.html>
- 248.Mitas, L., Mitasova, H., Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. Water Resources Research, 33(9):1754-1762,1998.
- 249.Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L.R., Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS, Int. J. GIS, vol. 10, n. 5, 629-641, 1996
- 250.Monod, J., Il caso e la Necessità; tr.it. Mondadori, Milano, 1942

- 251.Monti, C., Sistemi informativi, metodi di valutazione, modelli di gestione: nuovi strumenti per nuovi contenuti, in Besio, M., Monti, C., (eds.) Dal cannocchiale alle stelle, strumenti per il nuovo piano, F.Angeli, Milano, 1999
- 252.Morgan R.P.C., Morgan D.D.V., Finney, H.J., A predictive model for the assessment of soil erosion risk, *J. Agric. Eng. Res.* 30, pp. 245-253
- 253.Morgan R.P.C., *Soil Erosion & Conservation*, Longman Scientific & Technical, London, 1995.
- 254.Morgan, R.P.C., Morgan, D.D.V., Finney, H.J., Stability of agricultural ecosystems: documentation of a simple model for soil erosion assessment, IIASA Collaborative Paper CP- 82- 50, 1982
- 255.Morin, E., *Introduzione al pensiero complesso*, 1990, tr.it. Sperling e Kupfer, Milano
- 256.Morris, P., Therivel, R., *Methods of Environmental Impact Assessment*, UCL Press, London, 1995
- 257.Mumford, L., *La città nella storia*; tr.it. Bompiani, Milano, 1968
- 258.Mumford, L., *The culture of cities*, New York, Harcourt Brace & Co., 1938
- 259.Munda, G., *Multicriteria Evaluation in a fuzzy environment; theory and applications in ecological economics*, Physica Verlag, Heidelberg, 1995
- 260.Napolitano, P., Fabbri, A.G., Single parameter sensitività analysis for aquifer vulnerabilità assessment using DRASTIC and SINTACS, *HydroGIS 96: Application of GIS in Hydrology and water resources management*, conference Proceedings, Vienna, 1996
- 261.Napolitano, P., GIS for aquifer vulnerabilità assessment in the Piana Campana, Southern Italy, using the DRASTIC and SINTACS methods, MSc Thesis, ITC, Enschede, 1995
- 262.National Academy of Sciences (NAS), *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process*. National Academy Press. Washington, D.C., 1983
- 263.Naveh, Z., *Landscape ecology as an emerging branch of human ecosystem science*, *Adv.Ecol.Res.*, n.12, 1982
- 264.Ndubisi, F., *Landscape ecological planning*, in Thompson, G.F., Steiner, F.R.,(eds.), *Ecological design and planning*, Wiley, NY, 1997.
- 265.Norma DIN standard 4150, “Valori limite per il vettore risultante dai massimi delle velocità vibratorie dei terreni in relazione alle tipologie strutturali interessate”
- 266.Norma ISO 9613 – 2: *Acoustic attenuation of sound during propagation outdoors – general methods of calculation*, International Standard 1996
- 267.Norma ISO 9613 – 2: *Acoustic attenuation of sound during propagation outdoors – general methods of calculation*, International Standard 1996
- 268.Odum, H.T., *Systems ecology*, Wiley, N.Y., 1982
- 269.Onsrud, H.J., *Tragedy of the Information Commons*, in Fraser Taylor, D.R., *Policy Issues in modern cartography*, Pergamon, 1998
- 270.Opdam, P., *Metapopulation theory and habitat fragmentation: a review of holartic breeding bird studies*, *Landsc.ecol.*, n.4, 1991.
- 271.Openshaw, S., *Neural Networks, genetic and fuzzy logic models of spatial interaction*, *Environment and planning A*, vol. 30, pp 1857-1877, 1998(b)
- 272.Openshaw, S., Openshaw, C.A., *Artificial intelligence in geography*, Wiley, Chichester, 1997
- 273.Openshaw, S., *Towards a more computationally minded scientific human geography*, *Environment and planning A*, vol. 30, pp 317-332, 1998(a)
- 274.Ortega y Gasset, J., *La ribellione delle masse*, 1930; tr.it. Il Mulino, Bologna, 1962
- 275.Ortolano, L., Sheperd, A., *Environmental Impact Assessment*, in Vanclay, F., Bronstein, D.A., *Environmental and social impact assessment*, Wiley, New York, 1995
- 276.Palmieri, S. , Inghilesi, R., Siani, A.M., Martellacci, C., *Un indice meteorologico di rischio per incendi boschivi*, *Boll.Geofisico*, Anno XV, n.5, dic. 1992

277. Patrono, A., and Saldaña, A., Modeling with neighbourhood operators, ILWIS 2.1 application guide, ILWIS Department-ITC, Enschede, 1997.
278. Patrono, A., Feoli, E., Characterisation of landscape pattern for environmental assessment. A GIS approach based on remotely sensed data, Proc. of the 3rd Joint European Conference on GIS, Vienna, 1997.
279. Patrono, A., Theory and practice in landscape analysis for environmental impact assessment, ITC Lecture Notes, ESM.2, 1995
280. Pearce David W. – Turner R. Kerry, Economia delle risorse naturali e dell'ambiente, Il mulino, 1991.
281. Peirce, C.S., Semiotica: I fondamenti della semiotica cognitiva, tr.it. Einaudi, Torino 1980
282. Pereira, J.M.C., Carreiras, J.M.B., Perestrello de Vasconcelos, M.J., Exploratory data analysis of the spatial distribution of wildfires in Portugal (1980-89), Geographical Systems, vol. 5, 1998
283. Petersen, R.C., The Rce: a riparian channel and environmental inventory for small streams in agricultural landscape, Freshwater Biology, March 1991.
284. Pignatti, S., Ecologia del paesaggio, UTET, Torino, 1994.
285. Pistocchi A., Rappresentazione GIS-based dei processi idrologici, Pubbl. Interna DICMA, Bologna, 1998.
286. Pistocchi, A., Bettini, S., Miserocchi, R., Modellazione previsionale GIS-based dell'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole. Un caso di studio. Ingegneria Ambientale, n.2 – febbraio 2000
287. Pistocchi, A., Neri, D., Analisi GIS-based dei fenomeni idrologici per la pianificazione territoriale, Ingegneria ambientale, n. 7-8, 2000 (a)
288. Pistocchi, A., Neri, D., Il sistema di supporto alle decisioni sull'ambiente e il territorio per il piano regolatore di Sogliano al Rubicone (FC) , Comune di Sogliano al Rubicone, 2000(c)
289. Pistocchi, A., Neri, D., Mappatura della propensione all'insacco di incendi boschivi mediante favourability functions: un caso di studio, Genio Rurale-Estimo e Territorio, n. 6, 2000 (b)
290. Pistocchi, A., Sistemi informativi geografici e pianificazione delle attività estrattive, Quarry & Construction, giugno 1999.
291. Platone, Cratilo, in: Tutte le opere, ed. critica a cura di G.Reale, Rusconi, Milano, 1993.
292. Popper, K., La logica della scoperta scientifica, 1934, tr.it. Laterza, Bari
293. Preger, E., Pistocchi, A., Neri, D., Zampagna, A., 2000: Indirizzi per il Piano Regolatore del Comune di Sogliano al Rubicone e Quadro Conoscitivo Ambientale, Sogliano al Rubicone – documentazione tecnica dell'Amministrazione
294. Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, V.T., Numerical Recipes: the art of scientific computing, Cambridge University Press, Cambridge, 1986
295. Prezioso, M., La base geoeconomica della Valutazione di Impatto Ambientale, Pacini, Pisa, 1995
296. Prigogine, Y., Introduction to thermodynamics of irreversible processes, Wiley, New York, 1967
297. Prigogine, I., Nicolis, G., Biological order, structure and instabilities, Quarterly Review of Biophysics, n.4, 1971.
298. Provincia di Forlì-Cesena, Qualità dei fiumi: 12 anni di monitoraggio, Forlì, 1999
299. Rafai, H., Newell, C.J., Gonzales, J.R., Dendrou, S., Kennedy, L., Wilson, J., Bioplume III User's manual, USEPA, 1998
300. Rawls, J., Una teoria della giustizia, 1971; tr. It. Il Saggiatore, Milano, 1983
301. Regione Emilia-Romagna-Prov. Forlì-Cesena, Carichi teorici e reali di fosforo e azoto su tre corsi d'acqua dell'Emilia-Romagna, Bologna, 1994/1996.
302. Regione Emilia Romagna - Servizio Cartografico, Carta dei Suoli 1:250.000 – Legenda della Carta dei Suoli, Servizio Cartografico - Regione Emilia-Romagna, Bologna 1994

- 303.Regione Emilia Romagna - Servizio Sviluppo Sistema Agro-Alimentare e Servizio Cartografico, Carta dei Suoli 1:250.000 – Catalogo regionale dei principali tipi di suolo agricolo di collina e montagna, Servizio Cartografico – Regione Emilia-Romagna, Bologna 1996
- 304.Regione Emilia Romagna, Piano Territoriale Paesistico Regionale, Bologna, 1991
- 305.Regione Emilia Romagna, Servizio Cartografico e Geologico, Le frane in Emilia Romagna, documentazione tecnica interna, 1999
- 306.Regione Emilia Romagna, Servizio Cartografico, Ufficio Pedologico, La carta dei suoli dell'Emilia Romagna alla scala 1:250.000; Legenda e Note Illustrative. Bologna, 1994.
- 307.Regione Emilia Romagna, Servizio Meteorologico Regionale – Tavole climatologiche dell'Emilia Romagna, 1951-94; Bologna, 1996
- 308.Regione Emilia Romagna, Servizio Meteorologico Regionale, I numeri del clima, Bologna, 1995
- 309.Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Impatto dell'uso agricolo del suolo sul dissesto idrogeologico (area pilota collina cesenate), Collana Studi e Ricerche, 1995.
- 310.Regione Emilia-Romagna, Serv. Informativo e statistica, Uff. Cartografico, I suoli della collina cesenate, 1990.
- 311.Regione Emilia-Romagna, Serv. Meteorologico Regionale, I numeri del Clima (temperature, precipitazioni, vento), Tavole climatologiche dell'Emilia-Romagna (1951-1994), Bologna, 1995.
- 312.Rejeski, D., GIS and risk: a three culture problem, in Goodchild, M.F., Parks, B.O., Steyaert, L.T., (eds) Environmental Modeling with GIS, Oxford University Press, Oxford, 1993
- 313.Remondo,J., Diaz de Teran, J.R., Marquinez, J., Menendez, R., Napolitano, P., Fabbri,A.G., Chung, C.F., Geologic hazard zonation by a fuzzy set favourability function applied in the Basque Country, Spain, in Buccianti, A., Nardi, G., Potenza, R., (eds.) Proceedings of the fourth annual conference of the International Association for Mathematical Geology, De Frede ed., Naples, 1998
- 314.Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised Universal Soil Loss Equation, USDA Agriculture Handbook no. 703, 1997
- 315.Restaino, F., Habermas, in Fornero, Storia della Filosofia, vol.VIII-2, La filosofia contemporanea, TEA, Roma, 1997
- 316.Rickards,T., Creativity at work, Gower, Brookfield, 1988
- 317.Rinaldi, S., Soncini-Sessa, R., Stehfest, H., Tamura, H., Modeling and Control of River Quality, McGraw Hill, New York, 1979
- 318.Rinaldi, S., Soncini-Sessa, R., Stehfest, H., Tamura, H., Modeling and Control of River Quality, McGraw Hill, New York, 1979
- 319.Rothermel, R.C., A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, Research Paper INT-115, USDA Forest Service, 1972
- 320.Saaty T. L., The Analytic hierarchy process, McGraw-Hill, , New York 1980 Gorte, B., Tools for advanced image processing and GIS using ILWIS, ITC publication n. 24, Enschede, 1995
- 321.Saaty, T. *The Analytical Hierarchy Process for decision in a complex world*, RWS Publication, Pittsburgh, 1980
- 322.Saaty, T.L., *A scaling method for priorities in hierarchical structures*, *Journal of mathematical psychology* 15, 234-281, 1977.
- 323.Schmithüsen, Allgemeine vegetationsgeographie, De Gruyter &Co., Berlin, 1961.
- 324.Schnoor,G., Environmental Modeling, Wiley, New York, 1997
- 325.Schon, D., The reflexive practitioner, 1983; tr. It. Dedalo, Bari, 1993

- 326.Schot, P.P., Dijst, M.J., Development of generic framework for interactive integrated physical planning, Proceedings of the 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000. URL: <http://www.colorado.edu/research/cires/banff/upload/209>
- 327.Secchi, B., Il racconto urbanistico, Einaudi, Torino, 1984
- 328.Secondini, P. (cur.), Un laboratorio per la pianificazione, CLUEB, Bologna, 2000.
- 329.Secondini, P., Sistemi informativi geografici e pianificazione territoriale: note introduttive, CLUEB, Bologna, 1992
- 330.Secondini, P., Sistemi informativi geografici e processo di pianificazione nella pubblica amministrazione: alcune riflessioni con riferimento al contesto italiano, in Ciancarella, L., Craglia, M., Ravaglia, E., Secondini, P., Valpreda, E., La diffusione dei GIS nelle amministrazioni locali italiane, F.Angeli, Milano, 1998
- 331.Secondini, P., Sistemi informativi geografici, nuove forme del piano e comportamenti etici del pianificatore, in Monti, C. e Besio, M. (cur.), Dal cannocchiale alle stelle, strumenti per il nuovo piano, F.Angeli, Milano, 1999
- 332.Sequi P. (a cura di), Chimica del suolo, Patron Ed., Bologna.
- 333.Sequi, P. (cur.) Guida alla lettura ed interpretazione del codice di buona pratica agricola per la protezione delle acque dai nitrati, Edagricole, Bologna, 1999
- 334.Sereni, V., Storia del paesaggio agrario italiano, Laterza, Bari, 1961.
- 335.Shafer, G., A mathematical theory of evidence, Princeton University Press, Princeton, 1976
- 336.Shafer, G., A mathematical theory of evidence, Princeton University Press, Princeton, 1976
- 337.Shannon, C.E., Weaver, W., The mathematical theory of communication, Urbana, Illinois Univ. Press, 1962.
- 338.Shannon, The mathematical Theory of Communication, Bell Systems Technical Journal, vol. 27, 1948
- 339.Shortliffe, E.H., Buchanan, B.G., A modeling of inexact reasoning in medicine, Mathematical Biosciences, v.3, 1975
- 340.Siligardi, M., Ecologia del paesaggio e sistemi fluviali, in Ingegnoli, V., (ed.), Esercizi di ecologia del paesaggio, CittàStudi, Milano, 1997.
- 341.Simon, H.A., Models of Man, Social and Rational, Wiley, New York, 1957
- 342.Simonovic, S.P., Water resources engineering and sustainable development. Conferenza d'apertura del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Atti, vol. V, Catania, 1998
- 343.Smith, A., La ricchezza delle nazioni: Abbozzo, ed. it. SE, Torino, 1990
- 344.Smith, R.F., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., Unkrich, C.L., KINEROS, a kinematic runoff and erosion model, in Computer models of Watershed hydrology-Singh (ed.), Water Resources Publications, Highland Ranchs, Colorado
- 345.Smith, S.J., Kissel, D.E., Williams, J.R., Nitrate production, uptake and leaching, in USDA, cit. vol. III, 1980
- 346.Smyth, C. S., A representational framework for geographic modeling, in Egenhofer, M. J., Reginald G. Golledge, R.G.(Eds.) Spatial and temporal reasoning in geographic information systems, Oxford University Press, New York, 1998.
- 347.Stassopoulou, A., Petrou, M., Kittler, J., Application of a bayesian network in a GIS based decision making system, International Journal of Geographical Information Science, vol. 12, n. 1, 1998
- 348.Stow D.A., The role of geograhic information systems for landscape ecological studies, in Landscape Ecology and Geographic Information Systems, Haines-Young et al. (ed), Taylor & Francis, 1993.
- 349.Streeter, H.W. and Phelps, E.B., US Public Health Service, Bulletin No.146, 1925

- 350.Tabaglio, V. , Spallacci, P., I principi agronomici della concimazione con reflui zootecnici, in CRPA, Manuale per la gestione e l'utilizzazione agronomica dei reflui zootecnici, Regione Emilia Romagna, Assessorato all'Agricoltura, 1993
- 351.Taylor, K., Walker, G., Abel, D., A framework for model integration in spatial decision support systems, *Int.J.Geographical Information Science*, vol. 13, No. 6, 533-555, 1999
- 352.Taylor, N., Mistaken interests and the Discourse model of planning, *Journal of the American Planning Association*, vol. 64, No. 1, 1998
353. Taylor, P.J., "GKS", *Political Geography quarterly*, 3, 211-212, 1990
- 354.The Mathworks, Inc., *Matlab User's Manual*, 1998
- 355.Theilard de Chardin P., Il fenomeno umano, in *Opere*, tr. It. Il Saggiatore, Milano, 1955
- 356.Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., *Introduction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*, Thornthwaite Ass., Lab. Of Climatology, Elmer, N.Y., 1957
- 357.Timmons, D.R., Holt, R.F., Soluble N and P concentrations in surface runoff water, in *USDA*, cit. vol. III, 1980
- 358.Toffoli, T., Margolus, N., *Cellular Automata Machines: a new environment for modeling*; MIT Press, Cambridge, 1987
- 359.Troll, C., *Luftbildplan und ökologische bodenforschung*, Z. Ges.Erdkunde, Berlin, 1939.
- 360.Turner, M.G., *Landscape ecology: the effect of pattern on process*, *Annu.Rev. Ecol.Syst.*, n.20, 1989.
- 361.U.S. EPA. (1989). *Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I. Human Health Evaluation Manual (Part A)*. OERR. Washington, D.C. OERR 9200 6-303-894
- 362.U.S., Department of Defense, *GMS: Groundwater Modeling System*, version 2.1 reference manual, 1998
- 363.U.S.EPA. "Framework for Ecological Risk Assessment", 1998
- 364.U.S.EPA. "Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities". Peer Review Draft 1998
- 365.URL 1, <http://www.regione.emilia-romagna.it/carto/reper/defaulta.htm>.
- 366.USACE, Hydrologic Engineering Center, *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*, version 2.2, Davis, Ca, 1998
- 367.USDA, *CREAMS Manual*, 3 voll., Conservation Research Report N. 26, may 1980
- 368.USDA, *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*, Agriculture Handbook n. 703, Tucson, 1997
- 369.USEPA, *DRASTIC*, a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, doc. 600/2-87, 1987
- 370.USEPA, Office of Air quality planning and standards, *ISC3 Dispersion Models*, User's manual, Research Triangle Park, NC, 1995
- 371.Van Eyk, J., *Petroleum bioventing*, Balkema, Rotterdam, 1997
- 372.Van Herwijnen, M., *Spatial Decision Support for Environmental Management*, PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 1999
- 373.Van Westen, C.J., *Application of Geographical Information Systems to landslide hazard zonation*, PhD Thesis, technical university of Delft, ITC publication n. 15, 1993
- 374.Vanclay, F., Bronstein, D., *Environmental and social impact assessment*, J.Wiley & Sons, Chichester, 1995
- 375.Varnes, D.J., *Landslide types and processes*, in Eckel, E.B.(ed.), 'Landslides and engineering practice', Special Report 29, HRB, Washington, 1958
- 376.Vernadsky, W.I., *The biosphere and the noosphere*, *Am.Scient.* n.33, 1945.
- 377.Vigano', P., *La città elementare*, Skira, Milano, 1996
- 378.Vismara, R., *Ecologia applicata*, Hoepli, Milano, 1992
- 379.Von Neumann, J., *Theory of Self-producing automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1966

380. Waddington, L.H., *Towards a theoretical biology*, Holdine, Chicago, 1975.
381. Wesseling, C.G., Karssenbergh, D., Burrough, P.A., Deursen, W. van, *Integrating dynamic environmental models in GIS: the development of a dynamic modeling language*, *Transactions in GIS*, 1, 40-48, 1996
382. Westervelt, J.D. Shapiro, M. *Combining Scientific Models into Management Models; Proceedings of the 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs*. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000. URL: <http://www.colorado.edu/research/cires/banff/upload/209>
383. Westervelt, J.D., Hopkins, L.D., *Modeling mobile individuals in dynamic landscapes*, *Int.J.of GIS*, n.3, vol. 13, 1999.
384. Williams, T., Colin, K., *GNUplot, an interactive plotting program*, 1986
385. Wischmeier, W.H., Smith, D.D., *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*, Washington D.C., USDA Agricultural Research Service Handbook n. 537, 1978
386. Wittgenstein, L., *Philosophische untersuchungen*, Blackwell, London, 1953
387. Woodward, D., *The image of spherical Earth*, in *Perspecta*, n.25, 1989
388. Wright, D.F., Bonham Carter, G.F., *VHMS favourability mapping with GIS-based integration models, Chisel Lake-Andreson Lake area*, in Bonham Carter, G.F., Hall, G.E.M., (eds.) *EXTECH I: a multidisciplinary approach to massive sulfide research in the Rusty Lake -Snow Lake Greenstone Belts, Manitoba*, Geological Survey of Canada, Bull. 426, 1996
389. Wyatt, R., *Computer Aided Policy Making: lessons from strategic planning software*, E&FN Spon, London, 1999
390. Yapa, L., *Why GIS needs postmodern social theory, and vice versa*, in Fraser Taylor, D.R. (ed.) *Policy issues in modern cartography*, Elsevier, New York, 1998
391. Yatabe, S.M., Fabbri, A.G., *Artificial intelligence in the geosciences: a review*, in *Geomathematics and geostatistics analysis applied to space and time dependent data*, in *Sci. de la terre, Sér. Inf.*, Nancy, n. 27, 1988
392. Yeh, G., Cheng, J., Cheng, H.P., Lin, H.J., Richards, D., Talbot, C., Jones, N., *FEMWATER: a three dimensional finite element computer model for simulating density dependent flow and transport in variably saturated media*, Technical Report CHL-97-12, July 1997
393. Yuan, M., *Use of knowledge acquisition to build wildfire representation in Geographical Information Systems*, *Int. Jour. Of Geogr. Information Science*, vol. 11, no. 8, 1997
394. Zadeh, L.A., *Fuzzy logic, neural networks and soft computing*, *Communications of the ACM*, vol. 37, No. 3, 1994
395. Zadeh, L.A., *Fuzzy sets*, *IEEE Informatics and Control*, n.8, 1965
396. Zadeh, L.A., *Probability measures of fuzzy events*, *Jour. Math. Analysis and application*, v.10, 1968
397. Zannetti, P., *Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software*, Van Nostrand Reinold, N.Y., 1990.
398. Zheng, C., *A modular 3D transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of cotaminants in groundwater systems*, USEPA, R.S. Kerr ERL, Ada, OKL, October 1990
399. Zonneveld, W., *Conceptsvorming in de ruimtelijke planning. Patronen en processen (Vol.1) Encyclopedie van planconcepten (Vol.2)*. *Planologische Studies 9*, Planologisch en Demografisch Instituut, Universiteit van Amsterdam, 1991.