

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA**

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

**Dottorato di Ricerca in
Scienze Ambientali: Tutela e Gestione delle Risorse Naturali
XIX Ciclo
GEO/02 Geologia stratigrafica e sedimentologica**

**EVOLUZIONE IDROLOGICA ED IDROGEOLOGICA
DELLA PINETA DI SAN VITALE (RAVENNA)**

Tesi presentata da: Dott.ssa Beatrice M.Sole Giambastiani

Coordinatore:

Prof. Carlo Ferrari

Tutore: Prof. Giovanni Gabbianelli

Relatore: Prof. Marco Antonellini

A.A. 2006-2007

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
 PARTE I	
2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO	7
2.1. AREA DI STUDIO	7
2.2. ASSETTO GEOGRAFICO ED INQUADRAMENTO TERRITORIALE ...	8
2.2.1. Geologia e geomorfologia.....	8
2.2.2. Stratigrafia superficiale	11
2.2.3. Evoluzione storica recente dell'area	12
2.2.4. Pedologia.....	15
2.2.5. Uso del suolo	18
2.2.6. Subsidenza	19
2.3. ASSETTO IDROGEOLOGICO	22
2.4. ASSETTO IDROLOGICO	24
2.4.1. Reticolo idrografico superficiale.....	25
2.4.2. Sistema di bonifica.....	28
2.5. ECOSISTEMA PINETA	29
 3. TOPOGRAFIA DEL TERRITORIO	33
3.1. METODOLOGIA USATA PER L'AGGIORNAMENTO DELLA TOPOGRAFIA	33
3.2. DEM (DIGITAL ELEVATION MODEL) E OSSERVAZIONI	35
 4. BILANCIO IDROLOGICO	39
4.1. INTRODUZIONE.....	39
4.2. METODOLOGIA E DATI UTILIZZATI.....	39
4.2.1. Precipitazione.....	40

4.2.2. Evapotraspirazione.....	42
4.2.3. Ruscellamento superficiale	48
4.2.4. Drenaggio.....	49
4.3. EVAPORAZIONE DAI CHIARID'ACQUA	50
4.4. RISULTATI.....	53
5. MONITORAGGIO.....	57
5.1. DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA DI MONITORAGGIO	57
5.2. METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE.....	58
5.2.1. Rilievo piezometrico ed idrometrico	58
5.2.2. Rilievo conducibilità e temperatura	59
5.3. ELABORAZIONE DATI	59
5.3.1. Ricostruzione delle mappe delle isofreatiche	60
5.3.2. Ricostruzione delle mappe di isosalinità	69
5.4. RILIEVO DEL FIUME LAMONE.....	79
5.5. RISULTATI.....	83
6. CARATTERIZZAZIONE DELL'ACQUIFERO COSTIERO	85
6.1. RICOSTRUZIONE LITO-STRATIGRAFICA.....	85
6.1.1. Sezioni litostratigrafiche	85
6.1.2. Distribuzione di sabbia e argilla	90
6.1.3. Ricostruzione del basamento	92
6.2. DETERMINAZIONE DELLA CONDUTTIVITÀ IDRAULICA	94
6.2.1. Calcolo analitico della conduttività idraulica	94
6.2.2. Slug Test	96
6.3. CAMPAGNE GEOELETTRICHE.....	99
6.3.1. Tomografie di resistività elettrica	99
6.3.2. Mappe di resistività apparente	105
PARTE II	
7. MODELLISTICA ANALITICA.....	109
7.1. PROCESSI FISICI RELATIVI ALL'INTRUSIONE SALINA	109
7.1.1. Interfaccia acqua dolce-acqua salata.....	109

7.1.2. Teoria di Ghyben-Herzberg.....	112
7.1.3. Ghyben-Herzberg-Dupuit	113
7.1.4. Soluzione analitica di Glover	115
7.1.5. Soluzione di Fetter per un'isola oceanica	115
7.2. MODELLO ANALITICO	116
8. MODELLISTICA NUMERICA	125
8.1. INTRODUZIONE.....	125
8.2. MOCDENS3D	126
8.2.1. Caratteristiche di MOCDENS3D.....	127
8.2.2. Adattamento del modulo MODFLOW per flussi a diversa densità.....	129
8.2.3. <i>Time step</i> Δt	135
8.2.4. Il trasporto del soluto: Modulo MOC	136
8.3. MODELLIZZAZIONE NUMERICA DELL'AREA DI STUDIO	138
8.3.1. Parametri dell'acquifero.....	138
8.3.2. Geometria del sistema	139
8.3.3. Risultati forniti.....	145
8.3.4. Calibrazione	145
8.4. SIMULAZIONI NUMERICHE	146
8.4.1. Periodo 1700-1920: sviluppo naturale dell'area	147
8.4.2. Periodo 1920-1996: subsidenza antropica	149
8.4.3. Periodo 1996-2006: chiusura del Chiaro del Pontazzo	151
8.4.4. Periodo 2006-2106: futuro innalzamento del livello del mare	153
8.5. OSSERVAZIONI	157
9. OPERE DI MITIGAZIONE.....	159
10. CONCLUSIONI.....	165
BIBLIOGRAFIA	169
ALLEGATO – DATI DEL MONITORAGGIO.....	I
MAPPA DEI PUNTI DI MONITORAGGIO	I
TABELLE DATI DI MONITORAGGIO - PIEZOMETRI	II

(A) Livelli – dati mensili (m l.m.m.)	II
(B) Salinità superficiale – dati mensili (g/l).....	III
(C) Salinità profonda – dati mensili (g/l)	IV
(D) Profili verticali di salinità nei piezometri.....	V
TABELLE DATI DI MONITORAGGIO – CANALI E BACINI D’ACQUA	X
(A) Livelli – dati mensili (m l.m.m.)	X
(B) Salinità superficiale – dati mensili (g/l).....	XIII
(C) Salinità profonda – dati mensili (g/l)	XV
RILIEVO FIUME LAMONE (18 LUGLIO 2005)	XVIII

1. INTRODUZIONE

Le pinete ravennate rappresentano il limite residuo di alcune tra le principali aree boschive naturali della Pianura Padana e assumono, oltre ad un gran valore ambientale, anche una valenza paesaggistica e storico-turistica molto importante. Attualmente, nelle zone costiere questi ambienti sono minacciati principalmente dall'intrusione del cuneo salino e dalla salinizzazione dell'acquifero e sono estremamente sensibili ai cambiamenti indotti sia dalla naturale evoluzione della fascia costiera sia dalle modificazioni del territorio e del suo utilizzo indotte dall'azione umana.

L'assetto idrologico e idrogeologico della Pineta di San Vitale si inserisce nel contesto più ampio di tutta la fascia costiera ravennate dove l'acqua ha sempre avuto un carattere duale e antagonista nei suoi rapporti con le attività umane: da una parte è essenziale per l'agricoltura e le attività civili ed industriali, dall'altra, data la presenza di numerosi corsi d'acqua sfocianti a mare e la bassa topografia del territorio, ha sempre costituito un elemento di rischio per gli abitanti della zona. L'assetto idrografico è oggi completamente controllato dall'uomo; quasi tutti i corsi d'acqua della provincia sono stati rettificati per dare spazio all'agricoltura e controllare le piene, mentre le zone topograficamente più basse sono state bonificate mediante drenaggio meccanico.

Inoltre il territorio ravennate, in passato e soprattutto durante gli anni '70-'80, è stato interessato da una forte subsidenza naturale ed antropica i cui effetti si fanno sentire tuttora sulle zone naturali abbassando la superficie freatica dell'acquifero e alterando il sistema di distribuzione idrica e il deflusso naturale delle acque. Gli enti di bonifica sono stati così costretti a drenaggi sempre più spinti per consentire il deflusso a mare, il mantenimento del territorio agricolo sopra il livello della falda freatica e per garantire un buon franco di coltivazione.

Nel corso degli ultimi decenni, la subsidenza, unita all'ingressione marina, ha portato a seri problemi d'asfissia per le pinete ed in particolare per quella di San Vitale caratterizzata dalla presenza del pino domestico (*Pinus pinea*), adatto a suoli asciutti e ben drenati che presentino una falda freatica relativamente profonda dove l'apparato radicale a fittone possa trovare suolo aerato e stabile. Le comunità monastiche (XV sec.), ad un tempo in cui il territorio era ancora in uno stato privo di forti influenze antropiche, stabilirono la pineta nella zona più appropriata per la coltivazione di un tale

albero e cioè sui cordoni di paleodune interne. Tali zone, topograficamente più rilevate rispetto alle zone circostanti, oltre a garantire un buon franco di coltivazione, permettevano l'esistenza di una falda freatica sopra il livello del mare in grado di contrastare l'ingressione di acqua marina secondo il principio di Ghiben-Herzberg (Bear et al., 1999) che stabilisce la profondità dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata proporzionalmente alla quota freatica della tavola d'acqua. In tal modo, e a quel tempo, l'acqua nel freatico costiero era dolce e abbastanza lontana dalla radice dei pini. Oggi, purtroppo, la situazione è cambiata drasticamente: la subsidenza ha abbassato notevolmente il territorio; la falda freatica è quasi ovunque sotto il livello del mare e non è in grado di contrastare l'intrusione marina; la ricarica dell'acquifero è stata ridotta al minimo data la necessità di drenare in maniera meccanica il territorio e corpi di acqua salata sono presenti nell'entroterra come per esempio la Piallassa Biaona. Inoltre, canali aperti al mare portano l'acqua salata all'interno per chilometri dato che, a causa della regimazione fluviale, la portata in uscita dei fiumi è per la maggior parte dell'anno molto bassa e non è in grado di contrastare la risalita di acqua marina lungo il loro corso durante i periodi di alta marea. Oltre a tutto questo, le dune costiere, che sono una protezione naturale contro l'erosione e le mareggiate nonché un ottimo serbatoio per l'acqua dolce contenuta nell'acquifero, sono state distrutte durante lo sviluppo turistico per fare posto agli stabilimenti balneari.

L'oggetto di studio è, quindi, l'acquifero costiero e l'assetto idrogeologico della pineta San Vitale e zone limitrofe con l'intento di capire e quantificare quali sono stati gli elementi critici che hanno portato alla situazione attuale e che richiedono più attenzione nell'ottica di una gestione integrata dell'area.

Gli obiettivi sono stati quelli di analizzare le singole fonti di scompensamento ambientale e ricostruire lo stato della falda freatica e le caratteristiche qualitative delle acque superficiali e sotterranee, soprattutto in rapporto alla salinità (PARTE I).

Nello studio si sono affrontati i problemi dal punto di vista fisico, analitico e numerico e si è passati alla modellizzazione dell'evoluzione dello stato dell'acquifero da uno stato originale indisturbato alle attuali condizioni (PARTE II).

La caratterizzazione idrogeologica dell'acquifero costiero e l'individuazione dei fattori che incidono, o hanno inciso, su di esso hanno permesso di individuare alcune possibili strategie d'intervento, risanamento ambientale e mitigazione del fenomeno di inquinamento da acqua salata per le zone più critiche. Infatti, la presente

frammentazione delle autorità preposte alla gestione dell'acqua, l'alto livello di conflittualità, la mancanza di comunicazione tra le diverse istituzioni e gli *stakeholders* costituiscono un serio ostacolo alla gestione integrata di questa complessa area ambientale. Una corretta ed efficace gestione integrata della zona costiera e delle sue risorse idriche diventa sempre più difficile e sempre meno compatibile con la politica di sviluppo di tale area ed il risultato di tutto ciò è che vi è una tendenza a prendere decisioni e misure contingenti spesso conflittuali e che causano fenomeni di retroazione negativa su tutto il sistema.

PARTE I

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

2.1. AREA DI STUDIO

La Pineta di San Vitale (Fig. 2.1) si colloca ai margini della Pianura Padana romagnola, a circa 8-10 km a nord del Comune di Ravenna (Provincia di Ravenna); la sua superficie, un tempo ben maggiore, è ora ridotta a circa 1133 ettari che si sviluppano lungo la fascia costiera per una lunghezza di circa 11 km.

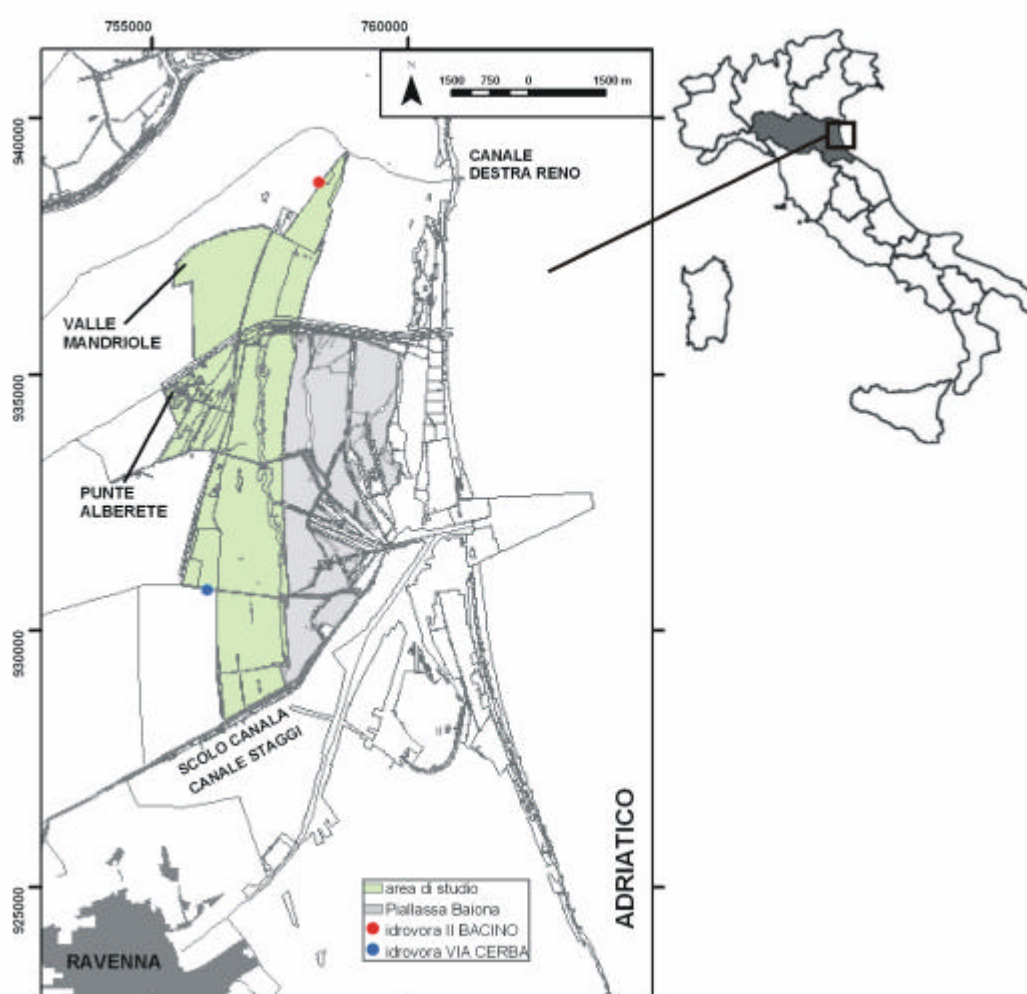


Fig. 2.1 - Inquadramento dell'area di studio.

La Pineta si estende fra il Canale Destra Reno a nord, lo scolo Canala ed il Canale degli Staggi presso lo Stabilimento Enichem a sud e la Piattassa Baiona ad est. Ad ovest il confine è costituito dai vari canali di bonifica afferenti, per la zona a sud del Lamone,

all'Idrovora di Via Cerba e per la zona a nord, all'Idrovora del II Bacino. Tutto il territorio della Pineta San Vitale è inserito all'interno del Parco del Delta del Po ed è classificato come Zona "Pre-Parco", ad eccezione di alcune aree limitrofe alla SS 309 (Zona C); inoltre è sottoposto a vincolo idrogeologico forestale R.D. 3267/23 ed è area SIC=ZPS (IT4070003 – “Pineta di San Vitale e Bassa del Pirottolo”) ai sensi della DIR 79/409 CEE e della DIR 92/43/CEE.

Lo studio si è necessariamente esteso anche all'area limitrofa di Punte Alberete e Valle Mandriole che costituiscono gli ultimi residui della cassa di espansione del fiume Lamone. La zona di Punte Alberete rientra anch'essa nella perimetrazione del Parco del Delta come Zona A; inoltre è una zona umida e come tale è inclusa, assieme a Valle Mandriole, nella Zona Ramsar, denominata "Punte Alberete e Valle Mandriole, istituita con D.M. 09/05/1977 (pubblicato sulla GU n. 211 del 03/08/1977). Il complesso è anche area SIC=ZPS (IT4070001 – “Punte Alberete, Valle Mandriole”) individuata ai sensi della DIR 92/43/CEE e della Dir. 79/409 CEE.

2.2. ASSETTO GEOGRAFICO ED INQUADRAMENTO TERRITORIALE

2.2.1. Geologia e geomorfologia

Dal punto di vista geologico-strutturale la pianura costiera romagnola nella quale si inserisce la Pineta di San Vitale rappresenta la parte sud-est della più estesa pianura del fiume Po. La dinamica sedimentaria nella fascia costiera è stata prevalentemente controllata da fluttuazioni climatiche ed eustatiche.

In corrispondenza delle ultime grandi glaciazioni avvenuta nel periodo Würmiano (75 – 15 ka), si verificò una regressione che portò, in più stadi, il livello marino ad un centinaio di metri al di sotto del livello attuale. A seguito dell'abbassamento del livello marino, l'alto Adriatico si era trasformato in una vasta pianura alluvionale mentre la zona compresa tra le attuali isobate di m 60 e m 100 da Ancona e Pescara era caratterizzata da ambienti lagunari e marino-costieri.

Nel sottosuolo ravennate, lo spessore dei sedimenti continentali depositati durante la regressione Würmiana si aggira sui 50 m e si tratta in prevalenza di limi argillosi e sabbiosi con intercalazioni di sabbie e argille e piccoli banchi di torba (Veggiani, 1974)

(Fig. 2.2)

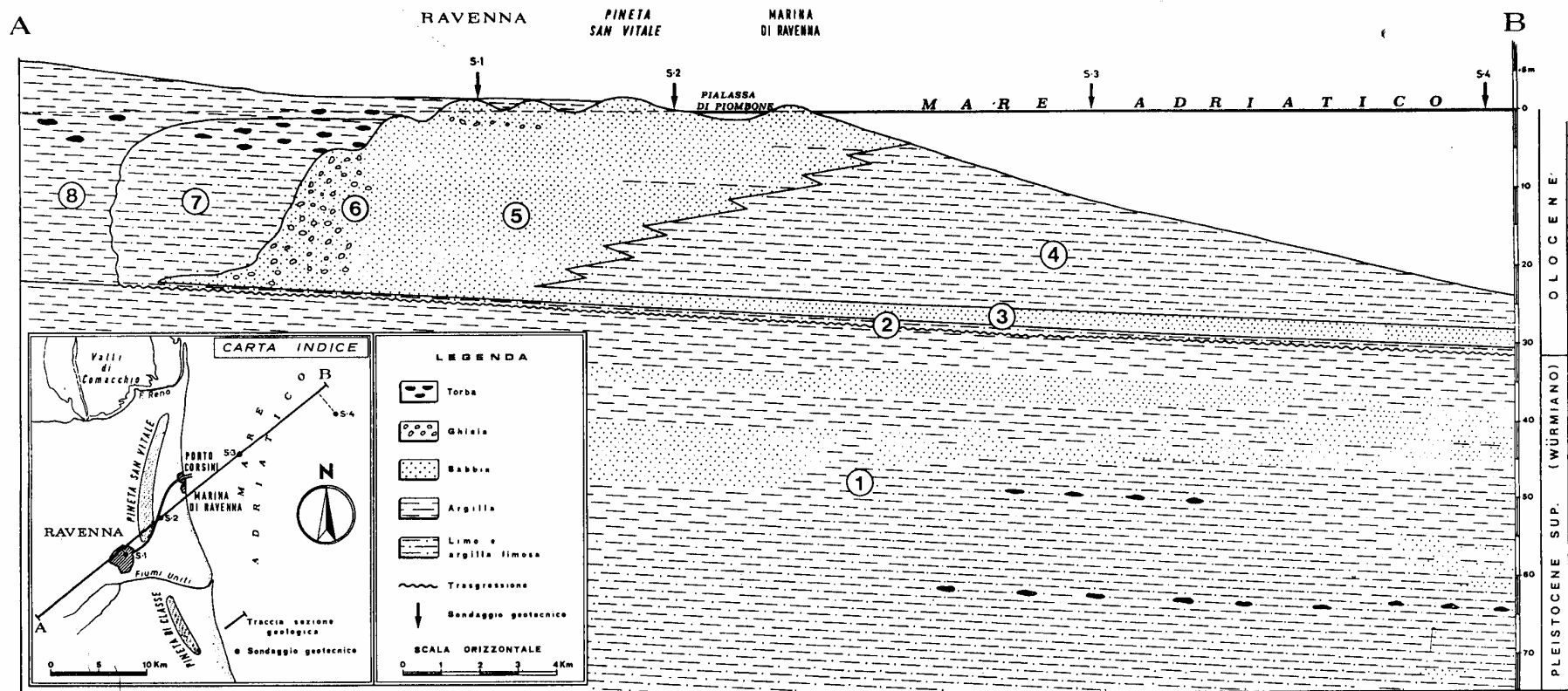


Fig. 2.2 - Sezione geologica attraverso i sedimenti recenti del Ravennate (da Veggiani, 1974).

La trasgressione post-glaciale, denominata flandriana (18-5.5 ka), e la successiva fase di regressione deposizionale che seguirono, hanno prodotto un'ampia interdigitazione fra sedimenti marini e continentali (Amorosi et al., 2002).

I primi sedimenti che documentano l'avvicinarsi dell'ambiente marino nel Ravennate si trovano alla profondità media di circa 25 m dal piano campagna e si tratta di argille e limi nerastri torbosi ai quali si sovrappongono sedimenti marini-costieri depositati durante la trasgressione e che sono costituiti prevalentemente da depositi costieri e di prodelta, nonché da cordoni litorali (Fig. 2.2). Questi due complessi si seguono nel sottosuolo in senso trasversale alla costa attuale per almeno una trentina di km e documentano una certa regolarità nell'aumento del livello del mare.

La fase di alto stazionamento fu caratterizzata dal rapido arretramento della linea di costa che, durante l'Optimum Climatico Postglaciale (circa 5.5 ka), si spinse fino a circa 20 km oltre l'attuale posizione (Bondesan *et al.*, 1995).

Negli ultimi 2000 anni a causa delle oscillazioni sia negative che positive del mare e di fenomeni di subsidenza si sono verificati fenomeni di avanzamento e di arretramento della linea di costa a cui corrispondono fenomeni di emersione (durante i quali si sono creati cordoni sabbiosi per opera del moto ondoso e del trasporto litoraneo) e di sommersione in cui l'ambiente si è trasformato in palustre ad acqua dolce prima e, successivamente lagunare ad acqua salmastra con deposizione di argilla. Complessivamente la tendenza progradazionale ha portato alla formazione di una serie di cordoni litoranei sabbiosi che rappresentano la traccia sedimentaria e paleomorfologica delle numerose linee di costa formatesi in tale periodo di avanzamento e sono intercalati da ambienti vallivi e lagunari con deposizione di argille e limi torbosi (Bondesan *et al.*, 1978).

L'assetto morfologico del territorio in esame rispecchia, quindi, queste vicende geologiche. La pineta di San Vitale si insedia, quindi, su paleodune con sviluppo sub-parallelo a costa formatesi in seguito all'avanzamento della linea di costa dovuta agli apporti sedimentari dei corsi d'acqua Po di Primaro (Reno), Lamone, Ronco e Montone. L'alternanza di dossi, cosiddetti "staggi", e di depressioni interdunali, denominate "basse o bassure" ove l'acqua ristagna più o meno perennemente, è ancora oggi ben identificabile nella morfologia della pineta e ne influenza la distribuzione della vegetazione. (Fig. 2.3)

Nella zona ad ovest della pineta, gli apparati dunosi sono stati smantellati per consentire l'attività agricola

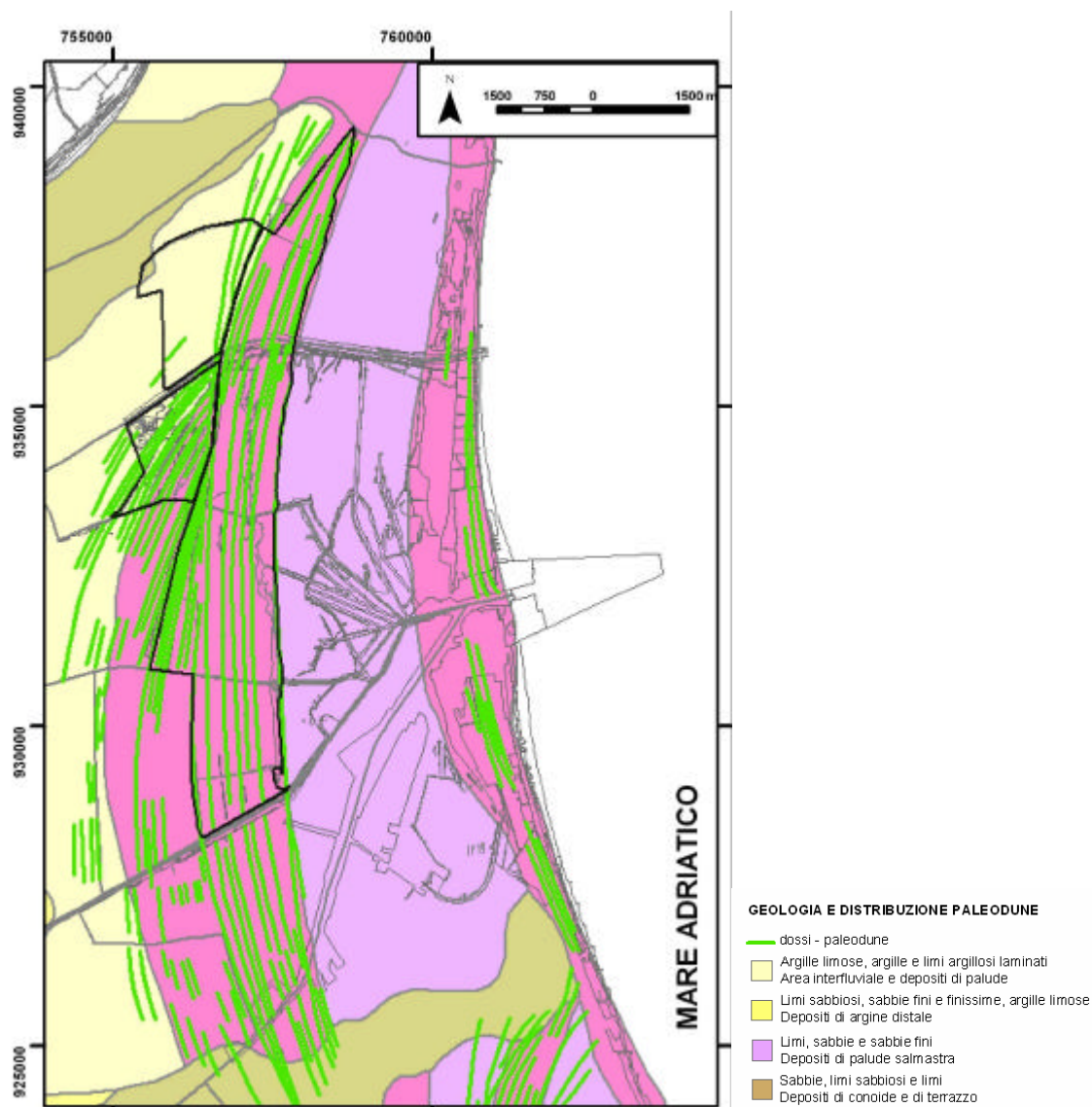


Fig. 2.3 – Mappa della geologia (Regione Emilia-Romagna, 1999) e della distribuzione delle paleodune.

2.2.2. Stratigrafia superficiale

Considerando le vicende geologiche appena descritte e prendendo in esame i lavori di Aquater (1988) e ITER (1989) emerge che, al di sotto di uno strato di alterazione di spessore 0.5-1 m, la stratigrafia dell'area è caratterizzata da un'alternanza di termini sabbiosi-limosi con prevalenza dei termini sabbiosi fino a 10-15 m di profondità. A partire da questa profondità i dati relativi ai sondaggi più profondi eseguiti nell'area,

evidenziano un incremento dei termini argilloso-limosi a discapito di quelli sabbiosi. Nello specifico abbiamo la seguente successione (Fig. 2.4):

- Dal piano campagna fino a circa 10 m di profondità troviamo uno strato di sabbie fini con rari e sottili livelli limosi. Questi depositi appartengono alla fase regressiva. Nelle zone agricole a ridosso della pineta le sabbie sono ricoperte da un piccolo strato di argille limose dovute alla recente bonifica;
- Dai 10 ai 22 m di profondità dal piano campagna troviamo una alternanza di limi argillosi e limi sabbiosi.
- Dai 21 m di profondità dal piano campagna i limi sfumano gradualmente in sabbie fini con intercalazioni di limo sabbioso. Questi depositi testimoniano l'avvenuta trasgressione olocenica e dai -21 ai -26 m formano la parte più permeabile dell'acquifero confinato.
- Infine, dai 25 fino ai 30 m di profondità seguono i terreni continentali precedenti alla trasgressione Olocenica e costituiti prevalentemente da argille limose e limi argillosi con subordinate sabbie in assetto lenticolare (Fiorentini C., 1992) che costituiscono il basamento impermeabile dell'acquifero freatico.

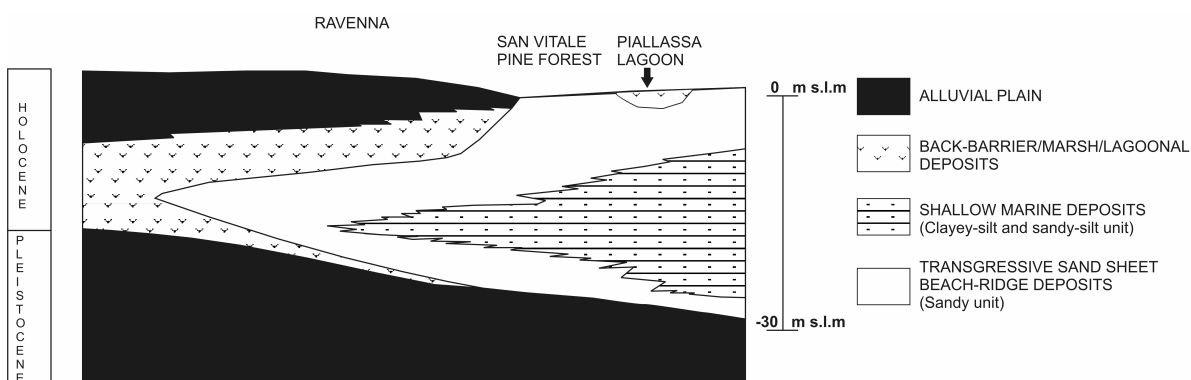


Fig. 2.4 – Ricostruzione litostratigrafica dell'area di studio (Amorosi *et al.*, 1999; Marchesini *et al.*, 2000 modif.)

2.2.3. Evoluzione storica recente dell'area

I primi riferimenti scritti circa la presenza di Pinete nell'area ravennate si hanno fin dal VI secolo d.C., ma, considerando le vicende geologiche sopra descritte e la distribuzione dei dossi (Fig. 2.3), le attuali pinete costiere sono molto più recenti. In

particolare quella di San Vitale è situata su dune depositatisi tra il X secolo ed il XV sec. d.C.; il suo margine interno è stato riferito al X sec. (Veggiani, 1974) mentre quello esterno è rappresentato dal cordone dunoso che segnava la linea di costa attorno al 1600 (Ciabatti, 1968) (Fig. 2.5).

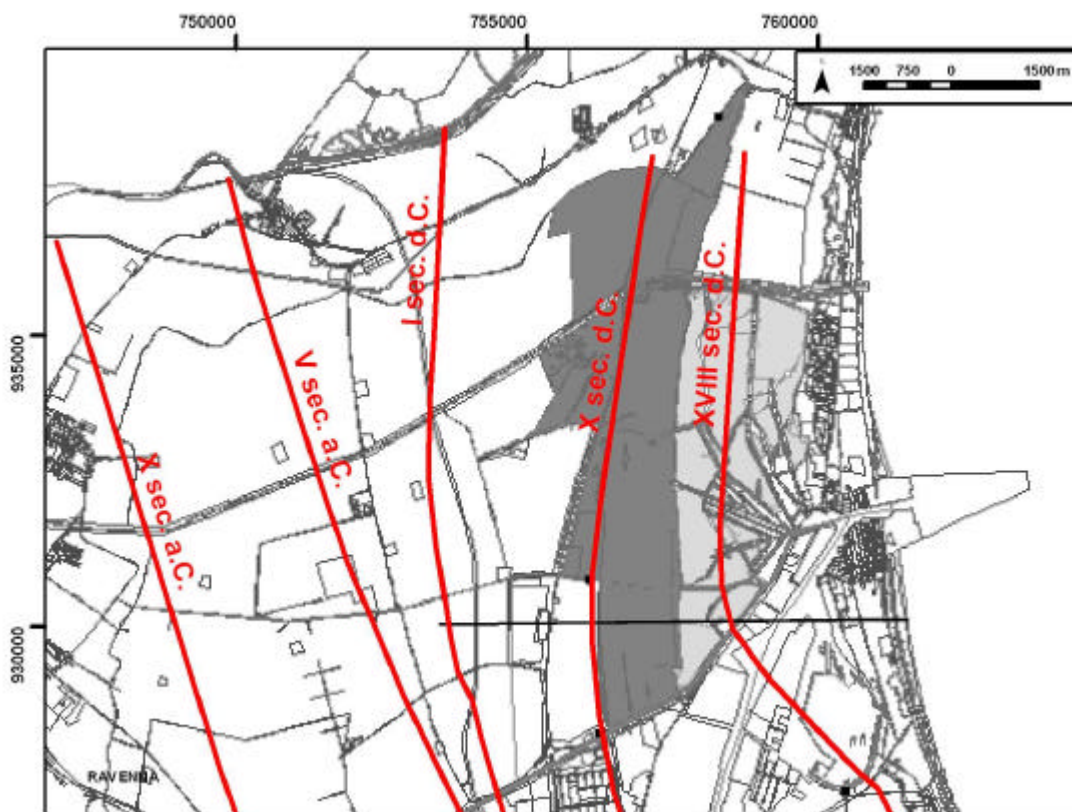


Fig. 2.5 – Schematica successione delle linee di costa succedutesi in zona all'incirca tra il X a.C ed il XVIII sec (così come ricostruibili in base a sondaggi, testimonianze storico-archeologiche e cartografia storica).

L'impianto delle pinete ravennati risale al XV secolo ad opera di comunità monastiche (Scossiroli, 1974) e già nel XVI secolo il litorale era caratterizzato dalla presenza di ampie zone boschive di proprietà degli arcivescovi di Ravenna che nel 1520 venivano concesse in enfiteusi alle quattro abbazie della città: S.Vitale, Classe, S.Giovanni e S.Maria in Porto. Ebbe inizio così un lungo e prospero dominio monastico delle Pinete ed un processo di potenziamento di tutto il patrimonio boschivo; i monaci vi esercitavano dominio assoluto, consentendo alle popolazioni soltanto il diritto di pascolo e di legnatico, oltre alla caccia ed alla pesca (Fabbri & Missiroli, 1998).

Le pinete storiche raggiunsero la loro massima estensione verso la fine del Settecento quando risultava l'esistenza di un unico bosco costiero pinetato di circa 6000-7000 ettari che con continuità si estendeva dal fiume Lamone fino a Cervia (Gambetti, 1994).

Nel 1796 con l'invasione francese e la successiva soppressione delle corporazioni religiose da parte dei Francesi, le abbazie persero definitivamente il controllo sulle pinete e la loro gestione passò alla Repubblica Cisalpina che, vendendole, rese possibile lo sfruttamento e la distruzione del grande bosco ravennate. Le pinete ravennate cominciarono a subire duri colpi; i beni di proprietà monastica vennero ceduti a privati che rapidamente misero a coltura agraria larghe aree boscate, interrompendo quella che era fino ad allora una continua fascia pinetata. Il processo di disboscamento continuerà per oltre un secolo fino a quando le pinete divennero di proprietà del Demanio dello Stato.

Nel 1905 il Ministro Rava riuscì a creare le premesse legislative per l'acquisto e il rimboschimento dei terreni lungo il litorale ravennate e nel 1933 venne impiantata la nuova pineta litoranea (Malfitano, 2002; Fabbri & Missiroli, 1998). Degli iniziali 6/7000 ettari di bosco pinetato, ne rimane attualmente un terzo, ripartito fra le Pinete di San Vitale, Classe e Cervia.

L'oasi umida di Punta Alberete, a ovest della pineta, invece, è ciò che rimane dell'antica palude prima dell'importante opera di bonifica della Cassa di Colmata del Lamone. Nel 1839, a seguito della straordinaria alluvione del fiume Lamone, venne presa la decisione di non chiudere la rotta ma di convogliare, attraverso un allacciamento, le acque del Lamone all'interno di una vasta superficie debitamente arginata e nel 1846 si decise di organizzare il bacino in cassa di colmata (Luppis, 1940). All'inizio la superficie della cassa di colmata del Lamone era di circa 7000 ha ed in seguito variò molte volte, da un lato per lo stralcio progressivo delle porzioni già colmate, dall'altro per ripetute aggiunte di terreni a bassa giacitura. Soltanto negli anni '60 si decise di condurre il Lamone direttamente al mare ed iniziò l'attività per mantenere allo stato "naturale" Punta Alberete e Valle Mandriole che ormai rimanevano gli ultimi relitti della grande cassa di colmata iniziale (Calastri *et al.*, 1976). Negli anni '70 Valle Mandriole cominciò ad essere usata come riserva d'acqua (con prelievi dal Reno) per usi civili ed industriali, mentre Punta Alberete continuò ad essere alimentata con acqua del Lamone. Si succedettero altri interventi di gestione idraulica (1989-1996) che hanno portato alla situazione attuale (cfr. paragrafi successivi).

Per quanto riguarda la Piallassa Baiona, la sua formazione risale a poco più di tre - quattro secoli fa e la sua origine si deve alla costituzione di nuovi cordoni dunosi costieri che hanno progressivamente isolato un braccio di mare (RoncuZZi, 1994). In età Rinascimentale, infatti, al loro posto esisteva un'ampia insenatura marina compresa tra il Porto del Primaro, a Nord, e l'antica foce dei Fiumi Uniti (Montone e Ronco), situata presso l'attuale abitato di Punta Marina, a Sud. La laguna costiera si formò grazie ad alcuni fondamentali interventi di regimazione dei corsi d'acqua principali (e.g. la deviazione verso sud del fiume Lamone e la diversione del corso del Ronco e Montone nel 1736) e altri numerosi interventi volti, da una parte a scongiurare le disastrose alluvioni, e dall'altra a realizzare e poi ampliare il porto Candiano.(Bondesan 1990). Oggi la laguna è aperta al mare ed una serie di argini artificiali la dividono in chiari di acqua salmastra o dolce connessi tra di loro da un sistema di canali a spina di pesce che convergono tutti nel canale Candiano, direttamente collegato con il mare.

2.2.4. Pedologia

In base alla Carta di *Soil Regions of Europe*, elaborata dallo European Soil Bureau (Scala 1: 5000000), l'area di studio ricade dell'unità cartografica "18.8 – Pianura del Po e colline moreniche di Piemonte e Lombardia". In tale unità sono contemplati suoli sabbiosi debolmente sviluppati tipici degli ambienti litoranei come quelli indagati (ESB, 1999).

Nell'ambito della Carta dei Suoli della Regione Emilia-Romagna in scala 1:250000 (RER, 1994), la Pineta di San Vitale ricade nell'unità cartografica "1Dd" dove, specificatamente per tali aree, vengono indicati suoli pianeggianti con pendenza variabile da 0,05 a 0,1%, molto profondi, a tessitura grossolana, calcarei, moderatamente alcalini, salini e, localmente, a scarsa o buona disponibilità di ossigeno.

L'inquadramento pedologico di maggior dettaglio utile per l'area della pineta è fornito dalla Carta dei Suoli di Pianura della Regione Emilia-Romagna in scala 1:50000, restituita su C.T.R. 1:25000 (consultabile sul sito della regione www.gias.net) e dal recente lavoro di Buscaroli & Zannoni (2006) relativo ai suoli delle pinete ravennate e che ha portato all'elaborazione della Carta Pedologica della Pineta di San Vitale (Fig. 2.6). Nel dettaglio, quindi, la Pineta di San Vitale ricade interamente nella delineazione n. 118, situata in ambiente di piana di sabbia costituito da depositi di duna e da depositi di cordone all'interno della quale sono presenti i seguenti tre tipi di suoli:

-
- *Pirottolo*: si rinvengono nelle zone di bassura; presentano generalmente un franco di coltivazione ridotto con presenza in alcuni periodi dell'anno di falda affiorante o semi-affiorante. Il pH presenta caratteri di sub alcalinità in superficie per divenire più alcalino con l'aumentare della profondità. Il contenuto di materia organica risulta notevole in superficie e tende gradualmente a diminuire passando agli orizzonti profondi.
 - *Cerba*: sono generalmente presenti nelle zone morfologicamente intermedie tra bassure e sommità dei cordoni dunosi. Sono prevalentemente a tessitura sabbiosa e risentono in diversa misura dell'influsso di falda specialmente nei mesi a maggiori precipitazioni. Il pH si presenta neutro in superficie e tende a divenire alcalino con la profondità. La sostanza organica è presente limitatamente agli orizzonti superficiali.
 - *San Vitale*: si rinvengono nelle parti più rilevate, corrispondenti alla parte sommitale dei cordoni dunosi. Sono prevalentemente a tessitura sabbiosa e sono suoli ben drenati. Il pH si presenta sub acido in superficie e passa da neutro a sub alcalino con la profondità. La sostanza organica è presente in aliquote abbastanza elevate.

Carta delle Unità di Paesaggio della Pineta di San Vitale

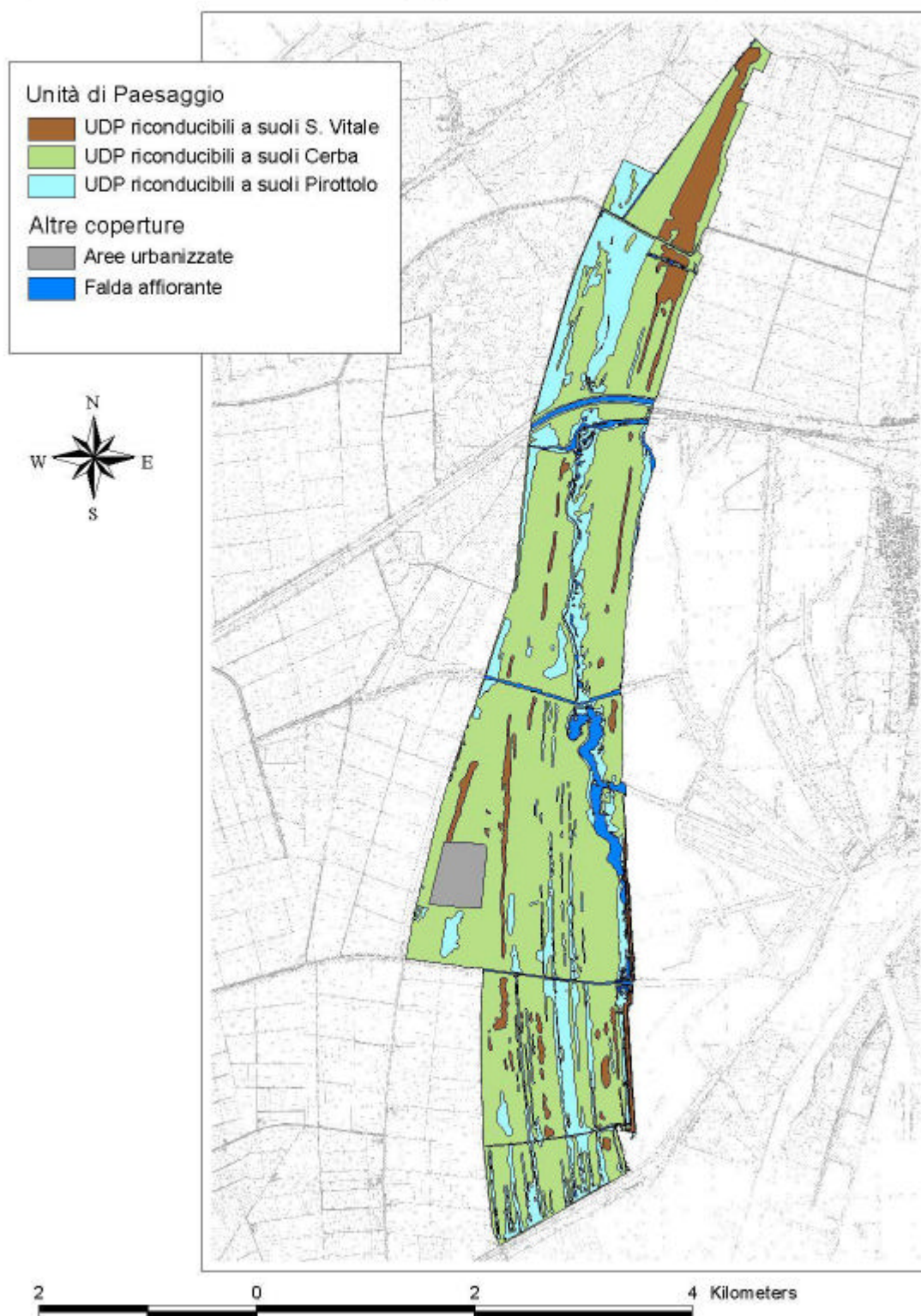


Fig. 2.6 – Carta Pedologica della Pineta di San Vitale (Buscaroli & Zannoni, 2006)

2.2.5. Uso del suolo

La carta dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna (Fig. 2.7) evidenzia come il territorio in esame si presenti per lo più come zona agricola adibita prevalentemente a seminativo. Il resto del territorio è occupato da aree ambientali: la pineta di San Vitale e le pinete costiere, classificate come “formazione di conifere adulte”, le “zone umide” di Punta Alberete e Valle Mandriole e le “Valli salmastre” della Piallassa Baiona e Piomboni che coprono circa la metà della superficie totale presa in considerazione.

Sono poi presenti zone di verde urbano e/o impianti sportivi in cui la superficie a verde è superiore al 50% e perciò non classificate come zone urbane. Spostandosi verso costa, il territorio indagato si presenta per lo più come zona urbanizzata con i centri abitati di Marina di Ravenna, Porto Corsini e Marina Romea.

A sud della pineta si trova, invece, l'ampia zona industriale della città di Ravenna.

Infine, lungo la Statale S.S. Romea 309, sono presenti anche le due zone di discarica corrispondenti alla vecchia e all'attuale discarica comunale.

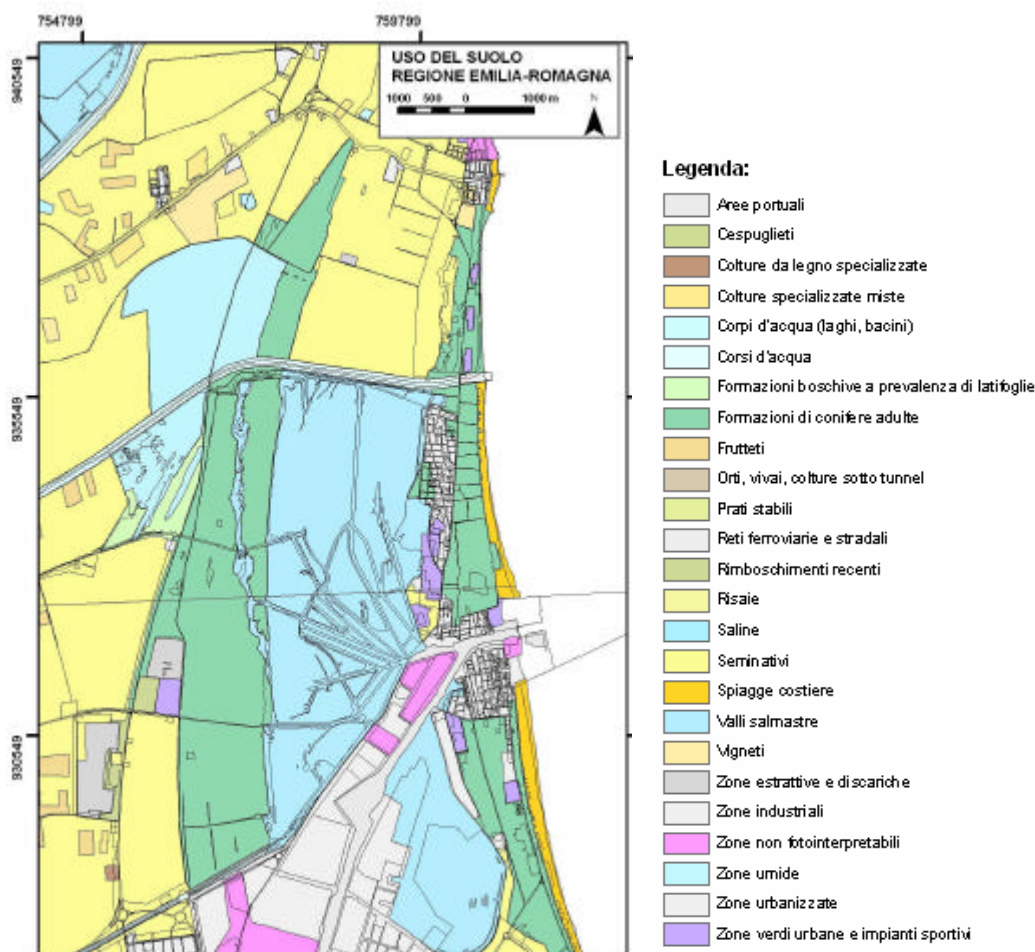


Fig. 2.7 – Carta dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna.

2.2.6. Subsidenza

Nell'ultimo trentennio il territorio ravennate è stato interessato da vistosi e preoccupanti fenomeni di subsidenza, ossia di abbassamento del suolo, con gravi conseguenze per l'equilibrio ambientale. Il fenomeno della subsidenza è imputabile sia a cause naturali che antropiche e raggiunse la sua fase più critica negli anni '70 e '80 con l'avanzare dei processi d'industrializzazione ed urbanizzazione ed è tuttora in atto anche se con un'evoluzione più attenuata.

Quindi, ad una subsidenza naturale dovuta alla compattazione differenziata dei sedimenti di circa 2-3 mm/anno (Gambolati & Teatini, 1998) si è sovrapposto un abbassamento del suolo dovuto ai fattori antropici quali l'estrazione di gas metano e di acque dal sottosuolo destinate ad alimentare il comparto industriale a nord-est di Ravenna. Anche la progressiva arginatura dei corsi d'acqua ha contribuito ad incrementare la subsidenza, non più compensata da nuovi apporti di sedimenti, per cui ampie superfici si sono trovate al di sotto del livello del mare, praticamente costituite da "catini" fra i cordoni di dune recenti e gli argini fluviali. Questo processo raggiunge la sua fase più critica in corrispondenza della rapida industrializzazione fino a raggiungere, nel periodo 1972-1977 valori medi di 40 mm/anno in tutta l'area comunale e di 50-60 mm/anno nell'area della pineta, adiacente al polo industriale (Fig. 2.8). I valori massimi di abbassamento, pari anche a 110 mm/anno, vennero invece registrati nell'area industriale tra il 1972 ed il 1973 (Teatini *et al.*, 2005).

A partire dagli anni '80 la subsidenza cominciò a diminuire fino a tassi minori del 5 mm/anno per circa il 35 % di tutto il territorio comunale. Questo processo andò avanti e attualmente il fenomeno risulta essere in riduzione (con tassi minori dei 3 mm/anno) anche se per alcune aree costiere, per esempio in corrispondenza dei pozzi di estrazione "Dosso degli Angeli" e "Angela-Angelina", si registrano ancora valori prossimi ai 10 mm/anno e, quindi, molto elevati se paragonati alla soglia naturale. Il generale miglioramento della situazione è correlabile sicuramente con la chiusura di molti pozzi d'estrazione e con la sostituzione dell'approvvigionamento idrico mediante acque sotterranee con l'adduzione d'acque di superficie dal Reno e dalla diga di Ridracoli mediante l'acquedotto di Romagna (Preti, 2000).

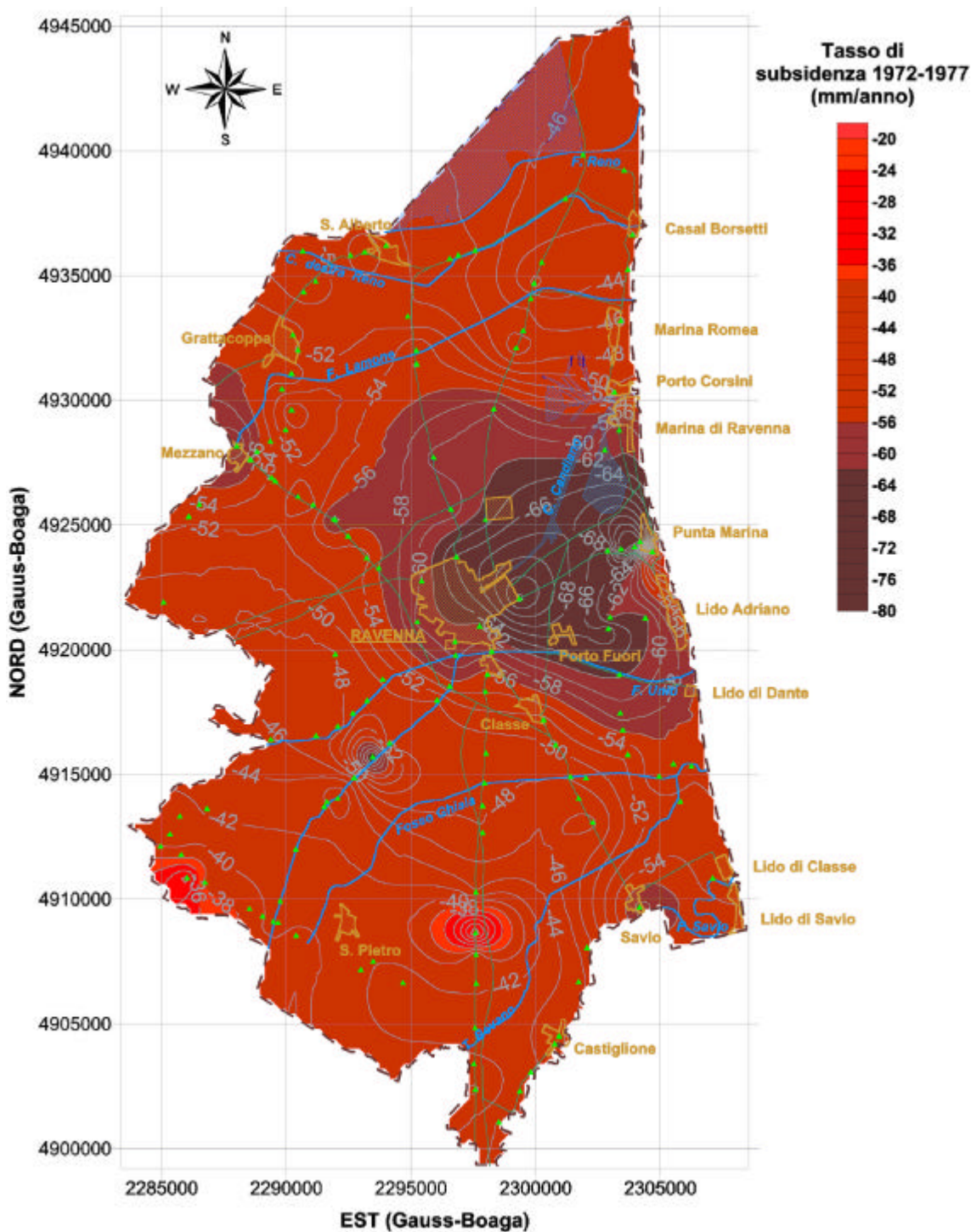


Fig. 2.8 – Tassi di subsidenza nel periodo 1972-1977 nel comune di Ravenna (Fonte Servizio Geologico – Comune di Ravenna, 2006)

Alla coltivazione dei giacimenti di gas, però, non è imputabile la subsidenza estesa a tutto il territorio ravennate, anche se va tenuto presente che gli effetti, per quanto localizzati, possono essere gravi se i giacimenti sono ubicati in prossimità della linea di costa. Esiste invece una stretta correlazione, già chiaramente dimostrata (Carbognin *et*

al., 1984), tra la depressurizzazione degli acquiferi e l'entità della subsidenza causata dallo sfruttamento delle acque sotterranee. La subsidenza, quindi, ha raggiunto i valori maggiori nelle zone di maggior abbattimento piezometrico come nell'area industriale ed in altri poli di emungimento concentrato. Infatti, il prelievo di acqua da uno strato più o meno superficiale del terreno provoca un abbassamento della pressione interstiziale che provoca a sua volta un aumento del carico sopportato dai grani del terreno; a ciò corrisponde una deformazione elastica del terreno seguita eventualmente da una compattazione degli strati che corrisponde ad una deformazione permanente.

In figura 2.8 (Fig. 2.9) vengono riportate le variazioni della piezometria dell'acquifero profondo multistrato nella zona di Ravenna (Teatini *et al.*, 2005). Il profilo mostra il continuo e rapido abbassamento della piezometria a partire dal 1950 fino alla prima metà degli anni '70. Dopo questa data, appunto in concomitanza all'attivazione dell'acquedotto pubblico di Ridracoli e alla costruzione del nuovo acquedotto industriale (fine anni '70), le quote piezometriche hanno iniziato un lento recupero e i tassi di abbassamento si sono risolti drasticamente.

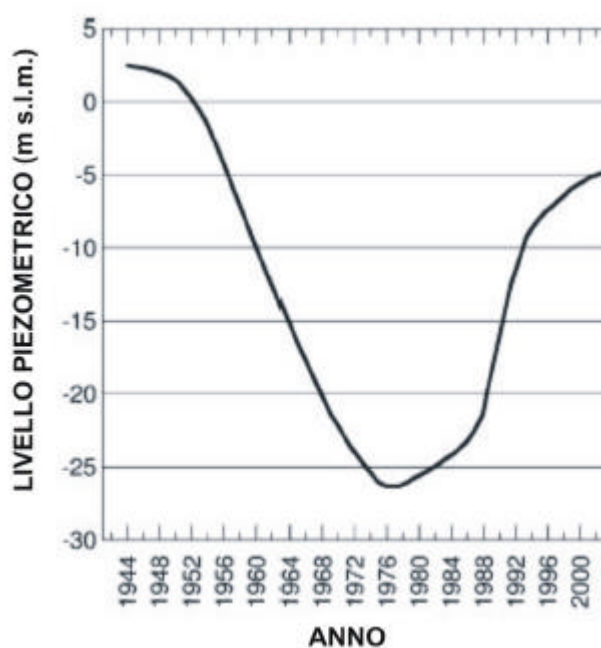


Fig. 2.9 – Variazioni del livello piezometrico nell'acquifero profondo di Ravenna (da Teatini *et al.*, 2005 modificata)

Inoltre, la forte depressurizzazione che coinvolge sia la falda freatica che quelle artesiane più profonde, richiama lateralmente e verticalmente l'acqua salina che è

insediata nelle stesse falde. Un fenomeno che spesso si accompagna ai pompaggi intensivi è anche il richiamo delle acque saline fossili che spesso si trovano immediatamente al di sotto del sistema acquifero sfruttato.

2.3. ASSETTO IDROGEOLOGICO

La struttura degli acquiferi della regione Emilia-Romagna è stata recentemente indagata nel Piano di Tutela delle Acque (RER, 2003). Da questo lavoro risulta che si possono generalmente individuare tre grandi gruppi di acquiferi (denominati dall'alto al basso A, B e C) separati fra loro tramite l'interposizione di importanti acquitardi. Ciascun gruppo acquifero è, a sua volta, costituito da svariati complessi acquiferi minori secondo un modello di suddivisione gerarchico per ranghi via via più piccoli sulla base della dimensione e dell'estensione areale dei corpi idrogeologici che li compongono. Si può quindi considerare che nel sottosuolo ravennate esistano numerosi acquiferi, differenziati per profondità, spessore e produttività idrica (PROVINCIA DI RAVENNA, 2000).

Il sottosuolo dell'area di studio è compreso nell'acquifero A (A0-A1) (Fig. 2.10) ed è caratterizzato da depositi di pianura costiera che si sviluppano nel settore orientale della pianura emiliano-romagnola, lungo la fascia allineata nord-sud che costeggia il Mare Adriatico. Tali depositi, che sovrastano i sottostanti acquiferi alluvionali, sono a tessitura prevalentemente sabbiosa a buona permeabilità primaria ridotta localmente da limi. Questi depositi nel loro complesso hanno uno spessore massimo di 25 – 30 metri, di cui la sola porzione sabbiosa può arrivare ad essere spessa una ventina di metri. La distribuzione di queste sabbie costiere è tabulare alla scala delle decine di chilometri (RER, 2003).

Le sabbie marine si trovano a diretto contatto con depositi saturi in acque salate; oppure esse stesse sono sature in acque salate. In condizioni di gradienti piezometrici molto bassi, come sono quelli che caratterizzano l'area di studio, la presenza di prelievi idrici significativi e/o un pesante sistema di drenaggio inducono lo spostamento verso terra dell'interfaccia tra acque dolci e acque salate. Tali fenomeni sono ben documentati dalle misure effettuate nella rete di monitoraggio delle acque sotterranee (Relazione sullo stato dell'Ambiente della Regione Emilia-Romagna, 2004) e negli studi di Aquater (1994; 1988).

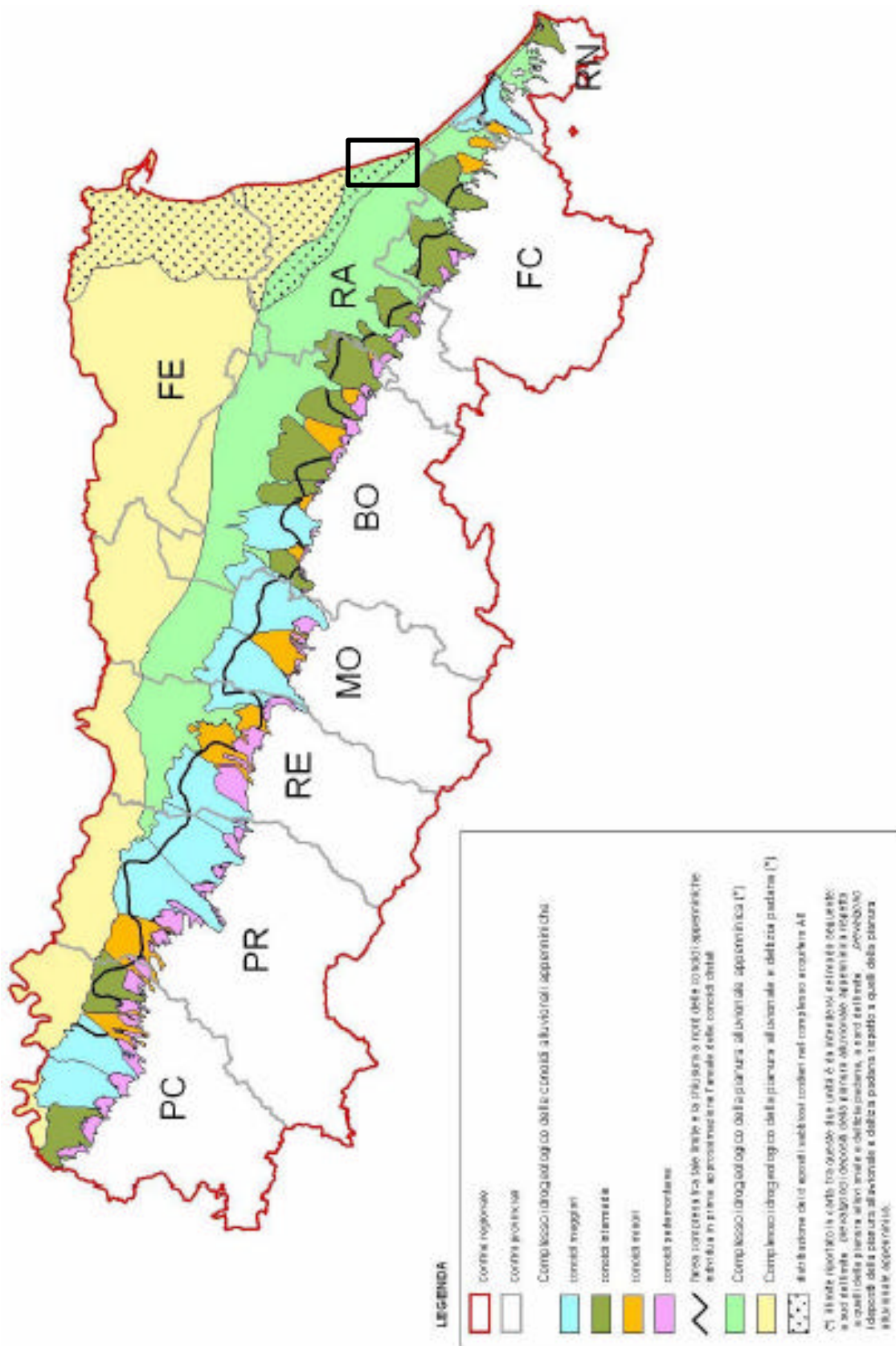


Fig. 2.10 – Distribuzione dei complessi idrogeologici all'interno del gruppo acquifero A. In riquadro color nero l'area di studio. (da RER, 2003).

In via generale, da questi studi emerge come l'andamento piezometrico risulti fortemente influenzato dai pompaggi delle idrovore presenti nell'area, in corrispondenza delle quali si hanno i minimi livelli piezometrici rilevati (Aquater, 1994). Le fluttuazioni del livello di falda risentono dell'alternanza stagionale, con livelli massimi nel periodo invernale e minimi a fine estate. Tali livelli, però, presentano valori inferiori a quelli marini per quasi la totalità dell'anno soprattutto all'interno della pineta, originando così un gradiente negativo dalla linea di costa verso l'interno concorrendo quindi a favorire l'intrusione salina. Ne risulta che il fenomeno della salinizzazione della falda sia un problema già riconosciuto da tempo per la pineta di San Vitale. L'analisi della distribuzione della salinità ha evidenziato che le zone a valori massimi sono quelle prossime alla Piallassa. I valori di salinità diminuiscono sensibilmente da est verso ovest e a monte delle idrovore le acque hanno caratteristiche decisamente migliori (Aquater, 1994) in rapporto alla salinità.

Nel capitolo 5 verranno riportati con maggior dettaglio i dati relativi alla freaticimetria e alla salinità della falda freatica.

Oggetto del presente studio è l'acquifero freatico le cui variazioni di livello piezometrico sono fondamentali ai fini della conservazione delle aree naturali.

Nel Piano di Tutela delle Acque (RER 2003) ed in "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna" (RER & ENI_AGIP, 1998; http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/acque/rel_scientif/riserve_idriche_sotterr_01.htm) si possono reperire ulteriori informazioni sull'inquadramento idrogeologico della pianura Emiliano-Romagnola e sulla geochimica e petrofisica dei serbatoi acquiferi.

2.4. ASSETTO IDROLOGICO

Il sistema idrologico dell'area di studio è molto articolato poiché costituito da numerosi corpi idrici naturali, come il fiume Lamone e la Piallassa Baiona e artificiali, come il Canale Destra Reno e tutto il sistema di canali di bonifica i cui livelli idrometrici sono dominati a nord dall'idrovora del "II Bacino-Casalborsetti" e a sud da quella di "Via Cerba". È un sistema molto articolato caratterizzato anche dalla presenza di numerose paratoie e sottopassi e corsi d'acqua rettificati per dare spazio all'agricoltura. È un assetto idrografico completamente controllato dall'uomo.

2.4.1. Reticolo idrografico superficiale

L'acqua dolce che alimenta le zone naturali ravennati deriva dai bacini idrografici dei fiumi Reno e Lamone e dalla rete scolante del comprensorio di bonifica; a queste fonti si è recentemente aggiunta la possibilità di utilizzare acqua derivante dal bacino idrografico del Po attraverso il Canale Emiliano Romagnolo (CER).

Considerando il piano di gestione del sito "San Vitale" (Comune di Ravenna, 1998) è stato definito l'attuale modello di circolazione delle acque superficiali (Fig. 2.11); è un sistema abbastanza complesso che comprende diversi corpi d'acqua naturali e artificiali, bacini d'acqua dolce (es. Valle Mandriole) e salmastra (es. Chiari della Piallassa Baiona) e numerosi manufatti di regimazione idrica (paratoie, sottopassi, ect.). Vengono di seguito descritte le principali aree e il loro reticolo idrografico superficiale.

Valle Mandriole: è una valle pressoché interamente pianeggiante e perennemente inondata ed è il lembo settentrionale della cassa di colmata del fiume Lamone. Può ricevere acqua dal Fiume Reno tramite la canaletta Enichem e dal fiume Lamone attraverso un sifone che, passando sotto il fiume stesso, connette la Valle con Ponte Alberete. Le acque possono defluire nello Scolo Rivalone (poi nel Canale Destra Reno per arrivare in Adriatico a Casalborgorsetti) e anche nel Bardello, all'interno della pineta di San Vitale. Questa valle può essere utilizzata come riserva idrica per l'acquedotto del Comune.

Ponte Alberete: le acque che l'alimentano provengono dal fiume Lamone tramite il Canale Nuovo (costruito nel 1991), che corre parallelo al fiume stesso fino ad incontrare un partitore che paralizza il flusso in direzione dello scolo Fossatone e verso il Taglio della Baiona. Le acque che si dirigono verso il Fossatone possono entrare nelle Punte dall'angolo S-W oppure essere immesse nel canale da dove possono alimentare la palude entrando attraverso un'altra chiavica situata nell'angolo S-E. All'interno delle Punte l'acqua assume percorsi preferenziali in direzione N-E, convergendo verso un'uscita che si trova all'estremo nord-orientale; da qui defluisce attraverso il Taglio della Baiona fino alla Piallassa.

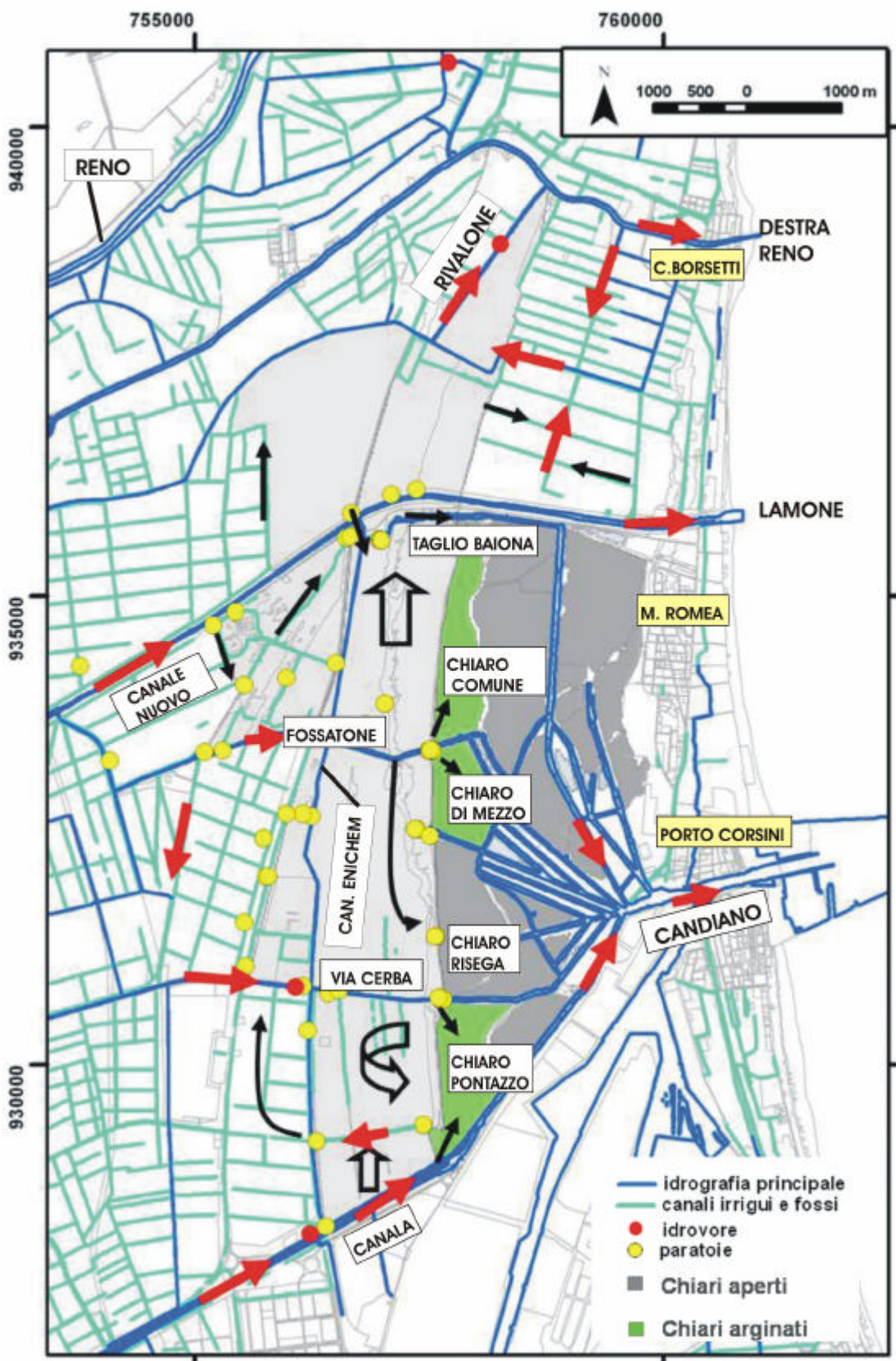


Fig. 2.11 – Circolazione superficiale dell'area di studio (le frecce indicano la direzione principale dell'acqua).

La Pialassa Baiona: è una laguna salmastra per gran parte in collegamento col mare e quindi sottoposta al naturale ciclo di marea; è caratterizzata da una fitta rete di canali che collegano aree semisommerse aventi una profondità quasi sempre inferiore al metro. La profondità dei canali varia fra 2 e 3 metri rispetto al livello medio marino con punte massime di 5 metri e minime di 50 cm in condizioni di bassa marea. Non tutti i chiari sono aperti al mare; i chiari di Mezzo (o Cavedone), del Comune e del Pontazzo sono stati arginati. Il Canale Baiona svolge un'importante funzione idrodinamica poiché nella fase di bassa marea raccoglie le acque di scolo dei canali interni alla Pialassa convogliandole al mare tramite il Canale Candiano, viceversa nella fase di alta marea creando così un periodico flusso e riflusso delle acque. Le acque immesse nella Pialassa provengono dal bacino idrografico direttamente afferente e dal fiume Lamone come citato sopra.

Pineta di San Vitale: è attraversata da numerosi corsi d'acqua e scoli. Spostandosi da Nord a Sud si trova il Canale Taglio della Baiona, che si sviluppa dalla zona umida di Punta Alberete e la cui portata varia da 18 a 170 l/sec (Angelini & Strumia, 1994). Nel 1994 si è cercato di impedire la risalita dell'acqua marina lungo il corso del canale con la costruzione di una chiavica che, in condizioni d'alta marea, impedisce la risalita del cuneo salino.

Procedendo verso sud, la pineta è attraversata dal Canale Fossatone che alimenta, oltre alle Punte ed alla Pialassa, l'impianto di potabilizzazione della città e lo stabilimento industriale Enichem tramite l'omonima canaletta che attraversa la pineta per gran parte della sua lunghezza. La portata del Canale Fossatone è varia ed in funzione del fabbisogno dei due utenti principali che gestiscono la canaletta e della piovosità nei bacini idrografici a monte.

Procedendo verso sud troviamo il Canale Via Cerba, che tramite idrovora immette le acque di un bacino sostanzialmente agricolo di circa 7700 ha; a monte dell'idrovora riceve lo scarico diretto dell'impianto di depurazione della vecchia discarica di Ravenna e le acque meteoriche provenienti dal nuovo polo di smaltimento rifiuti. La portata massima è di 15 m³/sec (Angelini & Strumia, 1994).

A sud la pineta è delimitata dallo Scolo Canala, canale circondariale sud della cassa di colmata del Lamone che tramite idrovora convoglia le acque drenate dal bacino unificato Canala - Val Torto di circa 7000 ha. La portata massima è di 18 m³/sec (Angelici & Strumia, 1994).

Le idrovore che scaricano le acque nei canali afferenti, entrano in funzione solo quando il livello delle acque raggiunge un certo valore. A queste immissioni discontinue si aggiungono quelle industriali anch'esse irregolari essendo legate al grado di utilizzo degli impianti. È quindi difficile descrivere per il sistema in esame una situazione media di funzionamento.

2.4.2. Sistema di bonifica

Il territorio comprendente la pineta di San Vitale e le aree adiacenti ad essa si colloca nel bacino di pianura ed è sottoposto a bonifica meccanica per quasi la sua totalità.

L'area di studio è divisa in diversi sottobacini a drenaggio meccanico ed è governata da una serie di idrovore gestite dal Consorzio di Bonifica della Romagna Centrale (Fig. 2.12)

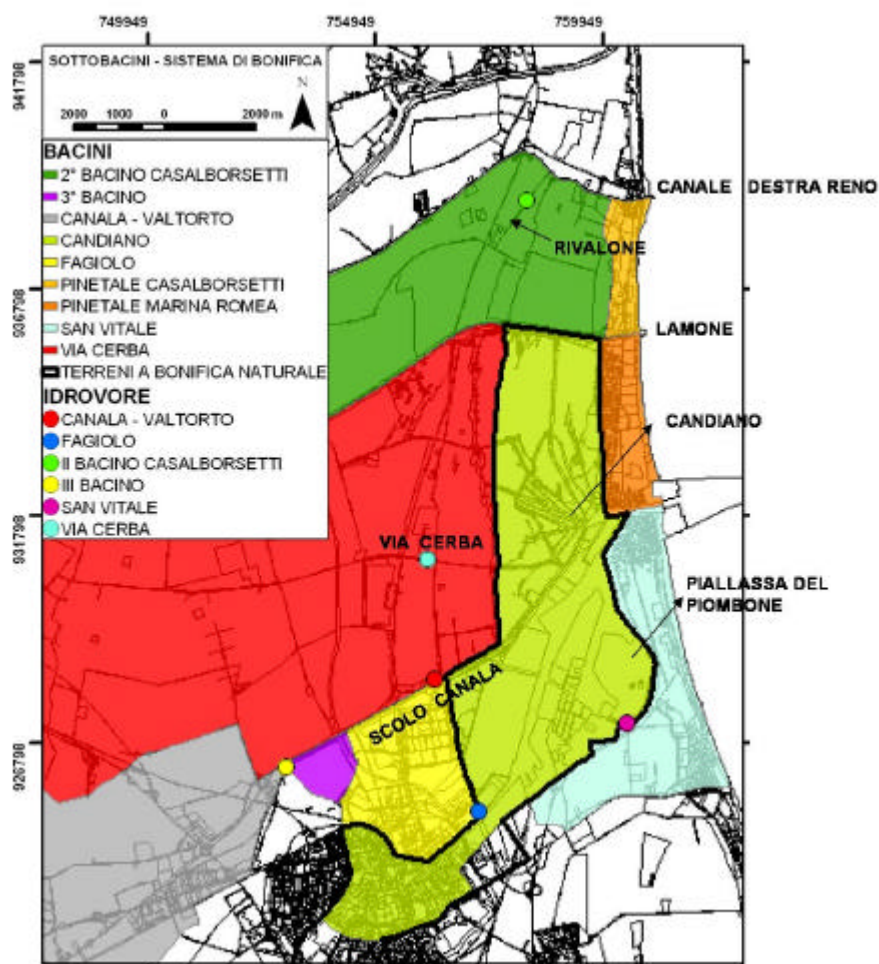


Fig. 2.12 - Suddivisione dell'area di studio in bacini secondo quanto riportato dal Consorzio di Bonifica della Romagna Centrale. In mappa sono riportate anche le idrovore ed i toponimi dei principali canali di scolo.

2.5. ECOSISTEMA PINETA

La pineta di San Vitale, anche se di dimensione ridotte rispetto al passato, assume tuttora, un importante valore ambientale, paesaggistico e storico-turistico.

La vegetazione della Pineta di San Vitale può essere distinta in due complessi, ben differenziati nelle loro composizioni estreme, ma collegati da diverse forme di transizione (Pirola, 1974). I due complessi sono rappresentati l'uno dalla vegetazione situata sui cordoni dunosi e quindi di tipo xerofilo, l'altro dalle formazioni proprie delle bassure, dovendosi distinguere in questo caso fra vegetazione meso-igrofila, idrofittica di acqua dolce e di acque più o meno salmastre. Spesso tutti questi tipi si sovrappongono o sfumano gli uni negli altri senza soluzione di continuità rendendone problematico l'inquadramento.

Il bosco xerofilo è caratterizzato dalla presenza di *Quercus robur*, *Q. pubescens* e *Pinus pinea* (o Pino domestico) nel quale però si introducono anche specie che sono caratteristiche di associazioni di latifoglie di tipo mesofilo e termofilo. Nelle zone più umide si trova un bosco igrofilo a *Populus alba* (o pioppo bianco) che si articola in facies diverse tendenti da un lato verso il bosco di tipo xerofilo, dall'altro verso un bosco di tipo igrofilo dipendente dalle locali condizioni di umidità ed innalzamento del livello di falda (Scossiroli, 1974).

La carta della vegetazione della pineta di San Vitale (Fig. 2.13) documenta un mosaico di habitat che corrisponde alla complessità dei fattori ambientali propria di un territorio di transizione tra acqua e terra (Diani, 2006). Il complesso di vegetazione predominante è quello dei boschi termofili di caducifoglie, rappresentato esclusivamente da querceti a roverella (Qp in Fig. 2.13). Di rilevante estensione è anche il complesso della vegetazione arbustiva che corrisponde ad arbusteti a *Prunus spinosa* (Ps in Fig. 2.13)

In questi diversi tipi di bosco il pino domestico, ovunque di impianto artificiale, permane principalmente nel bosco xerofilo e mesoigrofilo, prevalentemente nelle facies meno umide in quanto è adatto a suoli asciutti e ben drenati che presentino una falda freatica relativamente profonda dove l'apparato radicale a fittone possa trovare suolo aerato e stabile; più ampia, invece, la presenza di pino marittimo (*Pinus Pinaster*) che ha più larga adattabilità.

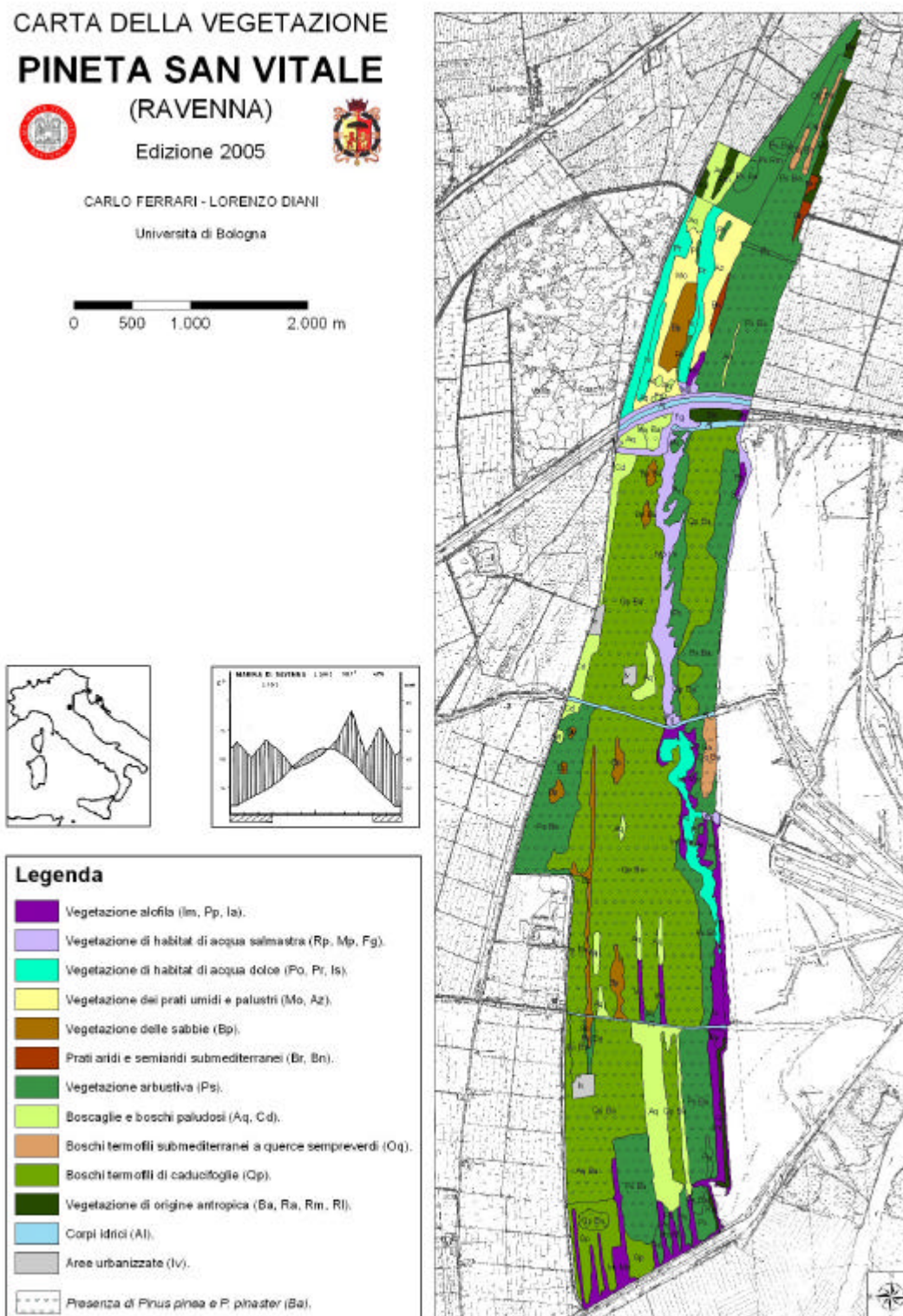


Fig. 2.13 – Carta della vegetazione della Pineta di San Vitale (aggiornata al 2005) (Diani, 2006). La presenza di pino domestico (*Pinus pinea*) e pino marittimo (*Pinus pinaster*) è indicata con la sigla Ba (“boschi di conifere adulte”)

Lo stato di precarietà in cui verte la pineta oggi va visto in un contesto di cause in parte naturali ed in parte legate a modifiche ambientali indotte dall'uomo. In primo luogo si deve tenere presente la particolare collocazione geografica della pineta di San Vitale che si può considerare ai margini dell'areale naturale di diffusione del pino domestico; le difficoltà climatiche sono certamente uno dei fattori più importanti del deperimento della pineta, la quale si è trovata a più riprese in condizioni assolutamente sfavorevoli sia nel passato che in tempi recenti.

L'attività dell'uomo (apertura di sentieri, decespugliamento nel fondo, ect.) e gli effetti dell'inquinamento atmosferico degli impianti industriali adiacenti alla pineta, hanno avuto un'influenza negativa sul mantenimento del pino domestico. Inoltre, la degradazione dello stato di salute della pineta è strettamente correlato alla presenza di una falda freatica superficiale ed inquinata da cloruri di sodio. In questo contesto è ovvio che il sopravvivere della pineta sarà legato alla costante opera dell'uomo che dovrà mantenere la presenza del pino in un ambiente dove questa non è ecologicamente giustificata.

3. TOPOGRAFIA DEL TERRITORIO

In seguito agli elevati tassi di subsidenza registrati nell'area ravennate negli ultimi 30 anni (Teatini *et al.*, 2005) (cfr. Cap.2, par. 2.2.6), si è reso necessario effettuare l'aggiornamento della topografia per poter disporre di una base di lavoro più appropriata.

Uno dei problemi principali che si è dovuto affrontare nello studio dell'assetto idrologico ed idrogeologico dell'area è stato appunto quello dell'aggiornamento della topografia. Infatti, se si analizza il problema dell'intrusione salina negli acquiferi costieri dal punto di vista teorico, per la legge di Ghijben-Herzbergh (Fetter, 2001), la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata è circa 40 volte l'altezza della freatica sopra il livello del mare (cfr. Cap. 7, par. 7.1.2. per una più dettagliata spiegazione del principio). Conseguentemente, una variazione di pochi cm del livello piezometrico causa un ampio spostamento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata. Di qui la necessità di avere una topografia aggiornata al periodo di studio (2004) sulla base della subsidenza locale registrata per il periodo 1978-2004.

3.1. METODOLOGIA USATA PER L'AGGIORNAMENTO DELLA TOPOGRAFIA

La topografia del territorio è stata ricreata sulla base dei punti quotati riportati nella Carta Tecnica Regionale Emilia-Romagna (CTR 1:5000) aggiornata al 1978. Quindi, a livello locale e solo per la zona di studio, questi punti quotati sono stati infittiti lungo gli argini ed i rilevati. In Fig. 3.1 vengono riportati tutti i punti quotati da cui si è partiti per l'aggiornamento della topografia.

La quota altimetrica di partenza, relativa alla topografia del 1978, è stata quindi ricalcolata sulla base delle diverse isocinetiche di subsidenza ricostruite per intervalli temporali corrispondenti alle livellazioni della rete di monitoraggio della subsidenza comunale (fornite dal Comune di Ravenna). Le isocinetiche di abbassamento considerate sono relative ai seguenti intervalli temporali:

- 1977 – 1982;
- 1982 – 1986;

- 1986 – 1992;
- 1992 – 1998;
- 1998 – 2002.



Fig. 3.1 – Punti quotati usati per l'aggiornamento della topografia dell'area di studio.

Non disponendo di una livellazione al 2004, l'abbassamento del suolo per il periodo 2002-2004 è stato calcolato sulla base del tasso di subsidenza registrato per il periodo 1998 – 2002, assumendolo costante fino al 2004.

Tale topografia al 2004 è stata successivamente integrata con le sezioni ed i profili topografici dei due canali principali dell'area (fiume Lamone e Canale Destra Reno) forniti dal Consorzio di Bonifica (Fig. 3.1)

Tale procedimento di calcolo delle quote non tiene ovviamente in considerazione tutti i cambiamenti locali subiti dal territorio per azione dell'uomo (nuovi fabbricati, rilevati, ect.) che potrebbero essere individuati solo con un rilievo topografico di maggior dettaglio, magari mediante strumentazioni GPS.

Il procedimento sopradescritto ha permesso di estrapolare le quote aggiornate al 2004 e, attraverso il modulo *Spatial Analyst* di ArcGis 8.2 (ESRI, 2000), di ottenere un TIN (*Triangulated Irregular Networks*) che si basa su una struttura di tipo vettoriale ed è composto da un dataset di faccette triangolari che derivano da punti di elevazione disseminati irregolarmente sul territorio. Da questo TIN è stato poi possibile, con la funzione ESRI *3D Analyst*, creare il DEM (*Digital Elevation Model*) della zona aggiornato al 2004 che permette la visualizzazione tridimensionale della superficie interpolata e costituisce la base del lavoro per questo studio (Fig. 3.2).

3.2. DEM (DIGITAL ELEVATION MODEL) E OSSERVAZIONI

In Fig. 3.2 viene riportato il DEM dell'area aggiornato al 2004. Per una questione grafica la scala di colore che si è scelta ha un intervallo di 0.5 m per rendere l'immagine più leggibile e poter apprezzare i modesti dislivelli presenti.

Per Valle Mandriole, Ponte Alberete e la Piallassa Baiona non sono disponibili molte quote poiché per la maggior parte sono occupate da acqua e quindi l'interpolazione risultava di qualità scarsa; vengono così riportate in colore azzurro ad indicare che sono prevalentemente occupate da acqua.

La topografia così ricostruita evidenzia come le quote topografiche siano comprese prevalentemente tra i 2 e i -0.5 m s.l.m. e ci sia una mancanza di cospicui gradienti idraulici verso mare.

Il territorio bonificato posto a occidente della Statale Romea è occupato per la maggior parte da campi seminativi in cui le quote altimetriche, tipiche di aree di bonifica, appaiono livellate sui 0.50 - 1 m; qui, i valori altimetrici più elevati risultano essere quelli delle carraie interpoderali.

La Statale Romea fa da spartiacque superficiale posto in direzione N-S poiché raggiunge quote mediamente di 1.5 - 2.5 m sul l.m.m. e quindi superiori rispetto al territorio circostante, creando così dislivelli dell'ordine di 1.5 - 1 m.

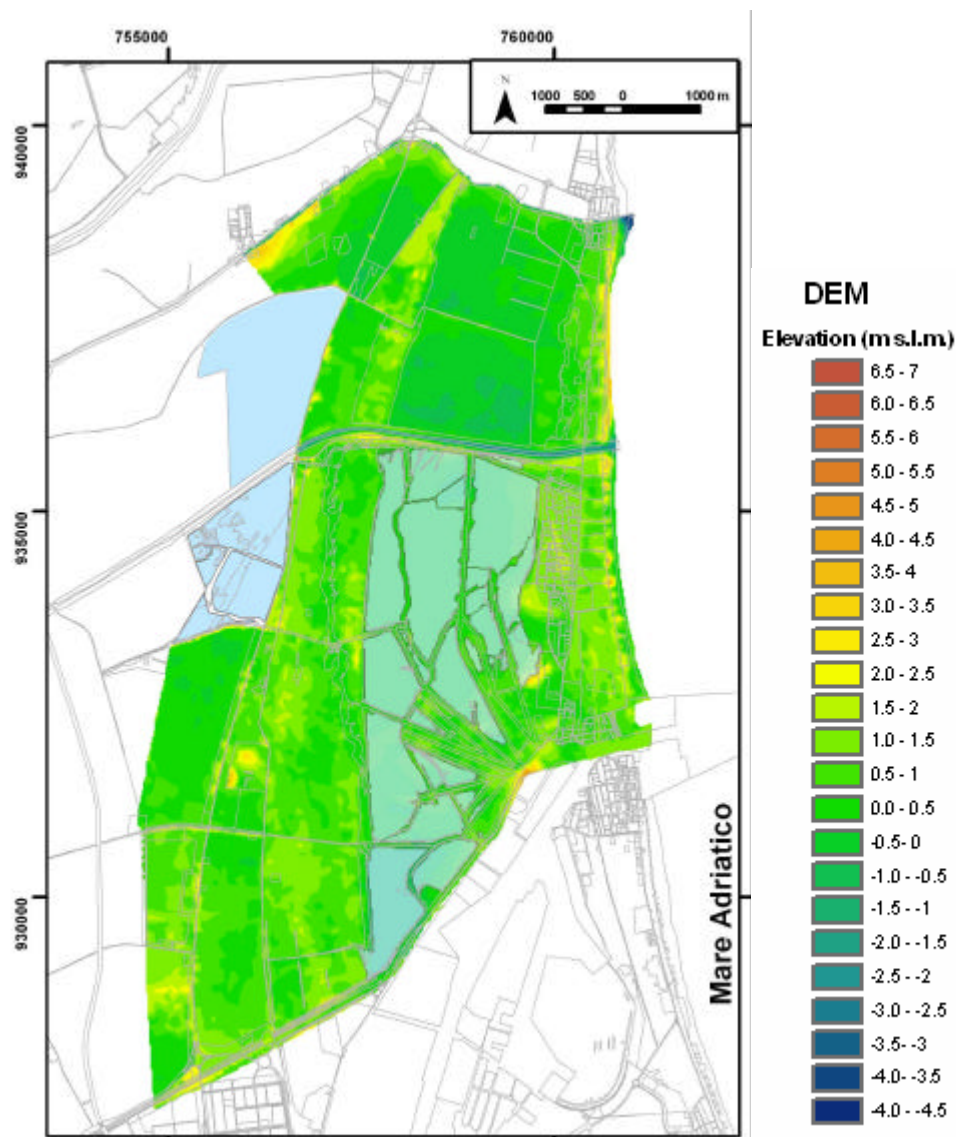


Fig. 3.2 – Topografia del territorio ricavata dai punti quotati della CTR (scala 1:5000) aggiornata al 2004.

In genere, l'area pinetata presenta la morfologia originaria, a meno dell'abbassamento dovuto alla subsidenza, e sono conservati i rilievi originari con la loro alternanza di dossi (1 - 1.5 m) e bassure. Solo per la porzione di pineta posta a nord del Lamone troviamo quote anche di 2m (2.5 m al massimo) in corrispondenza degli allineamenti dunosi. Fuori dall'area boscata gli apparati dunosi sono stati smantellati per consentire l'attività agricola.

Sempre tra il Canale Destra Reno e il fiume Lamone, a est dell'area pinetata, troviamo la zona agricola chiamata "Valle delle Vene". Quest'ultima ha una forma tipo catino e mediamente si sviluppa sotto il livello medio marino raggiungendo quote negative dell'ordine di -0.5 - -1 m e la falda tenderebbe ad affiorare se non ci fosse

l'azione drenante dell'idrovora "II Bacino – Casalborsetti" e dello Scolo Rivalone. Per un maggior dettaglio si è preso in considerazione un ritaglio dell'immagine LIDAR di quest'area settentrionale della zona di studio (Fig. 3.3). Un'immagine LIDAR non è altro che una laser-scansione da aereo ed è una vera rappresentazione della quota altimetrica in quanto restituisce dei file ASCII (matrici x,y,z). In questo caso si è impostata una leggenda per la quale a tutte le quote sotto il livello del mare è stato impostato un colore blu per poter meglio individuare le aree topograficamente depresse.

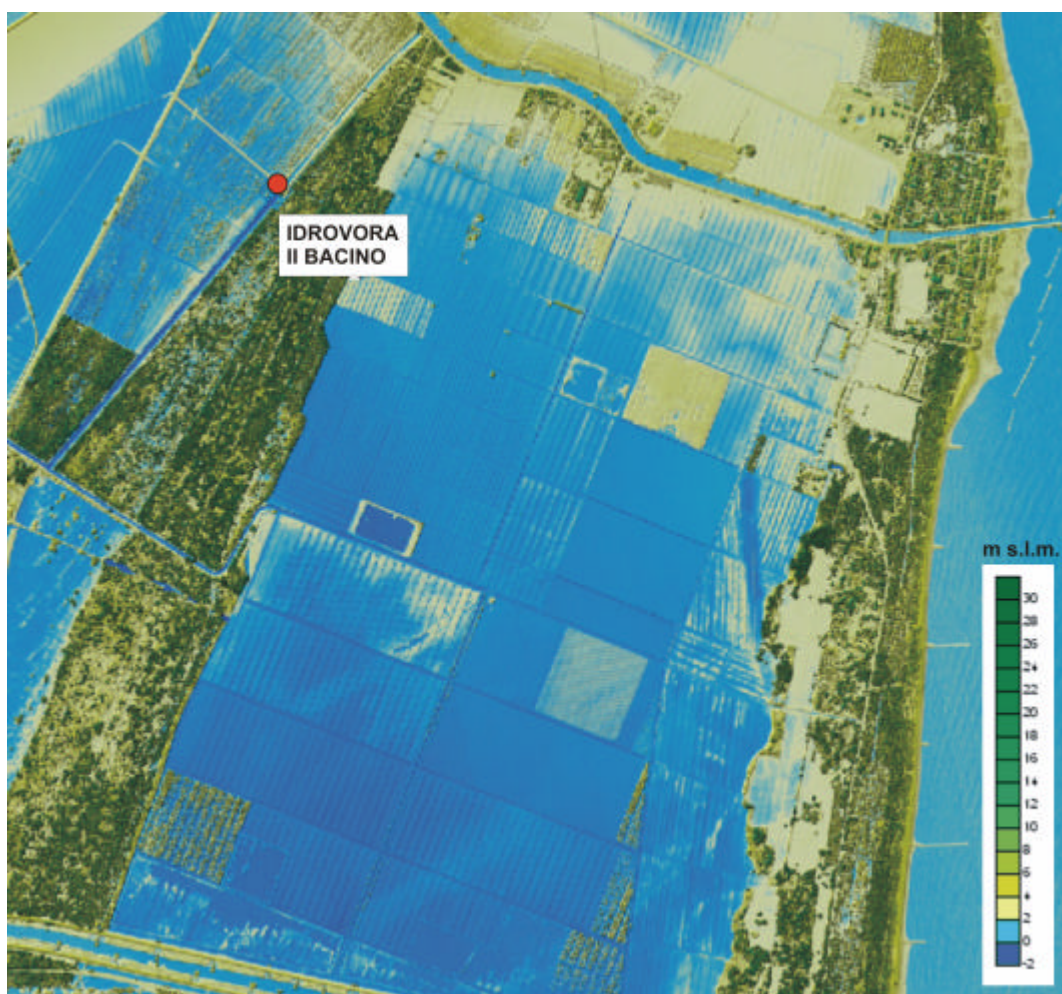


Fig. 3.3 – Immagine LIDAR della zona nord est dell'area di studio. Sulla sinistra dell'immagine la Pineta di San Vitale e sulla destra la zona agricola "Valle delle Vene" e la costa.

Dall'immagine in Fig. 3.3 si può quindi notare come nella zona nord est la topografia sia per la maggior parte sotto il livello del mare e la pineta resista su un cordone topograficamente più rilevato rispetto all'intorno. Si capisce quindi la necessità del drenaggio per consentire il deflusso a mare, il mantenimento del territorio agricolo

asciutto e per garantire un buon franco di coltivazione ed evitare problemi di asfissia in pineta.

Infine gli altri alti topografici li troviamo spostandoci verso costa, in corrispondenza delle pinete costiere e dei residui dei cordoni dunosi litoranei che, dove presenti, possono raggiungere quote anche superiori ai 2-2.5 m (colorazione giallo e marrone in Fig. 3.2)

L'abitato di Casalborsetti e Marina Romea hanno quote generalmente comprese tra i 1.5 ed i 2 m; la zona sud-occidentale di Marina Romea, invece, è più depressa con valori intorno ai 0.5 m.

In generale si può dire che l'altimetria dell'area, a causa delle condizioni naturali e delle trasformazioni avvenute, presenta una contenuta variabilità altimetrica compresa tra le quote di -1.0 e 2.5 - 3.0 m. In particolare, sono presenti zone che si sviluppano sotto il livello medio marino poste a ovest di Casalborsetti e lungo il margine orientale e meridionale della pineta di San Vitale. Le zone topograficamente più rilevate sono quelle in corrispondenza degli argini dei corsi d'acqua principali che fungono da spartiacque date i bassi gradienti topografici circostanti.

4. BILANCIO IDROLOGICO

4.1. INTRODUZIONE

Il bilancio idrologico di un bacino idrografico è la prima cosa da valutare per inquadrare le caratteristiche del ciclo idrologico in una determinata zona.

Nell'area di studio è molto importante quantificare la ricarica superficiale dell'acquifero freatico per precipitazione atmosferica e infiltrazione. Il bilancio idrologico è stato lo strumento basilare per poter calcolare la ricarica dell'acquifero nell'ampia area di studio. Idealmente sarebbe necessario conoscere tutti i parametri relativi alle entrate e uscite d'acqua nei bacini idrografici interessanti a pineta; questi oltre a precipitazioni, evapotraspirazione, ruscellamento superficiale e infiltrazione, sono anche comprensivi dei quantitativi di acque defluite dai consorzi di bonifica ed importate per irrigazione, nonché di tutti i dati di pompaggio di acque sotterranee. Purtroppo però, data la presenza di numerosi pozzi abusivi e un'incompleta documentazione dei flussi di acqua pompati dalle idrovore o utilizzati per l'irrigazione, questi ultimi dati possono essere solamente stimati.

Data questa situazione, il nostro approccio è stato quello di studiare il bilancio idrologico in maniera puntiforme prendendo in considerazione solamente le precipitazioni, l'evapotraspirazione, il ruscellamento e l'infiltrazione, nonché le caratteristiche pedologiche dei vari suoli. Per caratterizzare il bilancio idrologico si è utilizzato il modello "WATBAL" (Starr 1999). Il modello si basa su un bilancio energetico guidato dall'energia solare che viene usato soprattutto per l'evapotraspirazione dell'acqua e dipende da fattori meteorologici (radiazione solare, latitudine, temperatura e umidità dell'aria, velocità del vento), dalla composizione del suolo e dal tipo di vegetazione presente.

4.2. METODOLOGIA E DATI UTILIZZATI

Per il calcolo del bilancio idrologico si è presa in considerazione la seguente relazione considerando le entrate e le uscite d'acqua quantificabili per l'area di studio:

$$P = AET + Inf + Q_r + Q_{mare} + (Q_{idr}) \quad \text{Eqn. 1}$$

dove:

P = precipitazione media ($m^3/anno$);

AET = evapotraspirazione effettiva ($m^3/anno$)

Inf = infiltrazione nel sottosuolo ($m^3/anno$)

Q_r = ruscellamento superficiale ($m^3/anno$)

Q_{mare} = deflusso di acqua a mare ($m^3/anno$)

Q_{idr} = acqua asportata dagli impianti idrovori (non è esattamente quantificabile a causa della mancanza di dati relativi al funzionamento degli impianti).

Il valore del deflusso a mare (Q_{mare}) è stato ipotizzato uguale a zero perché i gradienti topografici della zona di studio sono troppo piccoli. Il deflusso naturale delle acque è compromesso in quanto molte aree risultano al livello medio mare se non al di sotto (cfr. topografia - Cap. 3).

Di seguito vengono analizzate le altre componenti del bilancio idrologico.

4.2.1. Precipitazione

Per i dati di precipitazione relativi all'area di studio si è assunta come stazione di riferimento la stazione meteorologica di Punta Marina (Ravenna, lat. 44.45, lon. 12.30, alt. 6 m) che dispone di una serie storica di dati termopluviometrici, umidità, intensità e direzione del vento per il periodo 1961-1990 ([EURO WEATHER, 2006](#)) (Tabella 4.1).

In Fig. 4.1 è riportato l'andamento delle precipitazioni medie mensili.

La distribuzione annuale delle precipitazioni è caratterizzata da massimi autunnali (novembre) con massimi secondari nel periodo estivo (agosto e settembre) e valori minimi in febbraio. Il contributo medio annuo è di 606 mm di pioggia (Tabella 4.1).

I valori mostrano un regime pluviometrico caratterizzato da un andamento crescente della piovosità da gennaio a marzo seguito da una diminuzione fino al periodo di giugno/luglio e da un successivo incremento fino ad agosto/settembre. Segue, poi, il periodo autunnale con valori più alti di precipitazione.

Tabella 4.1 – Dati della Stazione Meteorologica Punta Marina – Ravenna (periodo 1961-1990): precipitazioni medie mensili; temperature minime, massime e medie mensili; intensità e direzione del vento; umidità dell'aria.

Mese	Precipitazione (mm)	Temperatura minima (°C)	Temperatura massima (°C)	Temperatura media (°C)	Direzione e intensità vento (nodi)	Umidità (%)
Gen	44	0	5	2.5	WNW-5	88
Feb	37	2	8	5	NNE-5	83
Mar	53	5	12	8.5	E-5	80
Apr	48	9	16	12.5	ESE-5	78
Mag	45	13	21	17	ESE-5	76
Giu	46	16	25	20.5	ESE-5	75
Lug	45	19	28	23.5	ESE-5	76
Ago	61	19	27	23	E-5	76
Set	61	16	24	20	E-5	79
Ott	51	11	19	15	E-5	84
Nov	68	6	12	9	WNW-5	87
Dic	47	2	7	4.5	WNW-2	88

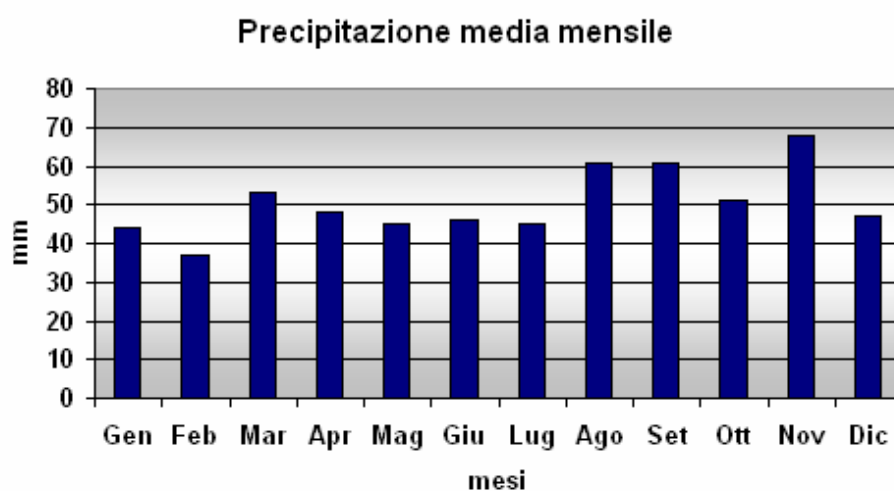


Fig. 4.1 – Andamento delle precipitazioni medie mensili (Stazione Meteorologica Punta Marina – Ravenna; periodo 1961-1990)

4.2.2. Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione rappresenta il quantitativo di acqua che si trasferisce dal bacino all'atmosfera sia per evaporazione degli specchi d'acqua sia per traspirazione delle piante. A parità di condizioni, al crescere della disponibilità dell'acqua nel suolo cresce il valore dell'evapotraspirazione fino ad un valore limite, detto evapotraspirazione potenziale, che non viene superato neanche per maggiori disponibilità di acqua. L'evapotraspirazione effettiva, però, è in genere inferiore a questo valore limite (Fetter, 2001).

Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale ed effettiva è stato utilizzato il modello WATBAL (Starr 1999) che si basa sui calcoli tradizionali del bilancio idrologico di Thornthwaite (1944) considerando la somma mensile delle precipitazioni, l'evapotraspirazione, il ruscellamento ed i cambiamenti nella capacità d'immagazzinamento del suolo secondo la seguente relazione:

$$P = ET + R + \Delta SM \quad \text{Eqn. 2}$$

dove:

P = precipitazioni (m)

ET = evapotraspirazione (m)

R = ruscellamento (m)

ΔSM = variazioni dell'umidità del suolo (m)

P e ET sono strettamente correlate; quando l'evapotraspirazione è maggiore delle precipitazioni, tutta l'acqua immagazzinata nel suolo viene utilizzata dalle piante per l'evapotraspirazione a discapito della ricarica dell'acquifero.

ET dipende dal tipo di vegetazione: una vegetazione costituita interamente da erba ha un valore d'evapotraspirazione potenziale (PET) minore rispetto a quello di una vegetazione costituita da piante ad alto fusto come per esempio una pineta. Ogni coltura ha un valore diverso di PET in base alla sua idro-esigenza. Nel modello WATBAL queste differenze sono espresse con un parametro *alpha*, molto simile al parametro Kc (*crop evapotranspiration coefficient*) usato in altri programmi per il calcolo dell'evapotraspirazione e in altre pubblicazioni (Allen *et al.*, 1998). Nella versione di WATBAL usata per questo studio, il parametro Kc è costante nel tempo e non è possibile simulare le variazioni stagionali nella copertura vegetazionale del suolo; si assume, quindi, che la vegetazione presa in considerazione sia sempre presente durante tutto l'anno. Inoltre l'evapotraspirazione potenziale è controllata dalla radiazione solare.

L'umidità del suolo (SM) è in relazione alla capacità di immagazzinamento dell'acqua nel suolo (AWC) e come quest'ultima dipende dalla composizione stessa del suolo (% di sabbia, argilla e limo) mentre la quantità dell'acqua disponibile dipende dallo spessore dello strato che contiene le radici (1 m nel nostro caso).

Si sono considerati due scenari, uno per la Pineta di San Vitale e l'altro per la zona umida di Punte Alberete in quanto differiscono per tipo di suolo e vegetazione. In Tabella 4.2 vengono riportati i parametri utilizzati nel modello per entrambi gli scenari.

Per i valori di precipitazione e temperatura è stata utilizzata la serie storica dei dati meteo della Stazione Meteorologica di Punta Marina - Ravenna riportati nel paragrafo precedente (par. 4.2.1).

I dati sulle caratteristiche del suolo sono stati estrapolati dalla carta della pedologia e della geologia della Regione Emilia Romagna (2001) e sul sito della regione www.gias.net (cfr. anche par. 2.2.4).

Tabella 4.2 – Parametri utilizzati nel modello WATBAL per la Pineta San Vitale e Punte Alberete.

	Dati meteo	Tipo suolo	Vegetazione	Spessore strato con radici
Pineta San Vitale	Dati meteo Stazione Meteorologica di Punta Marina – Ravenna (serie storica 1961-1990)	<i>Haplic Arenosol</i> (94% sabbia; 5% limo; 1% argilla)	Pino Kc (<i>alpha</i>) = 1.3	1 m
Punte Alberete		Combinazione di <i>Glevic, Calcaric e Vertical Cambisols</i> (10% sabbia; 48% limo; 42% argilla)	Canna di palude (<i>Swamp Reed</i>) Kc (<i>alpha</i>) = 1 – 1.2	

I valori di radiazione solare per le latitudini dell'area di studio sono stati ricavati dal sito <http://iamest.jrc.it/pvgis/solradframe.php> ed opportunamente convertiti nelle unità di misure richieste (MJ/m²/mese) (Tabella 4.3).

Gli altri parametri del suolo richiesti nel modello, quali il punto di appassimento permanente (*Permanent Wilting Point* – PWP, contenuto di acqua in corrispondenza del quale cessa l'assorbimento), la capacità idrica di campo (*Field Capacity* - FC, quantità massima di acqua che può trattenere un terreno) ed il peso specifico apparente, sono

stati calcolati con il programma Soil Water Characteristics (Saxton, 2003) sulla base delle percentuali di composizione del suolo (% di sabbia e di argilla).

Tabella 4.3 – Radiazione solare ad angolo ottimale (34°) usata nel modello WATBAL.

Mese	Global Radiation (MJ/m2/mese)
Gen	237.48
Feb	274.38
Mar	436.13
Apr	523.26
Mag	593.60
Giu	647.35
Lug	702.19
Ago	666.25
Set	549.83
Ott	399.42
Nov	253.91
Dic	187.26

Vengono di seguito riportati i risultati dei calcoli per i due scenari considerati. La prima tipologia di grafico (Fig. 4.2) mostra le curve di precipitazione (P), evapotraspirazione potenziale (PET) ed effettiva (AET), l'umidità del suolo (SM) ed il surplus d'acqua.

La seconda tipologia di grafico (Fig. 4.3) mostra le differenze tra l'evapotraspirazione effettiva e quella potenziale (AET-PET deficit), ovvero la differenza tra la quantità di acqua che potrebbe essere evapotraspirata dal suolo e dalle piante se ci fosse un'illimitata disponibilità d'acqua (PET) e la quantità di acqua che è effettivamente evapotraspirata (AET) alle condizioni attuali. La seconda curva in grafico mostra, invece, il deficit nell'umidità del suolo, ovvero la capacità di ritenere l'acqua. Il deficit viene calcolato come differenza tra la quantità d'acqua che potrebbe in teoria essere trattenuta nel suolo (AWC) e l'umidità effettiva del suolo (SM).

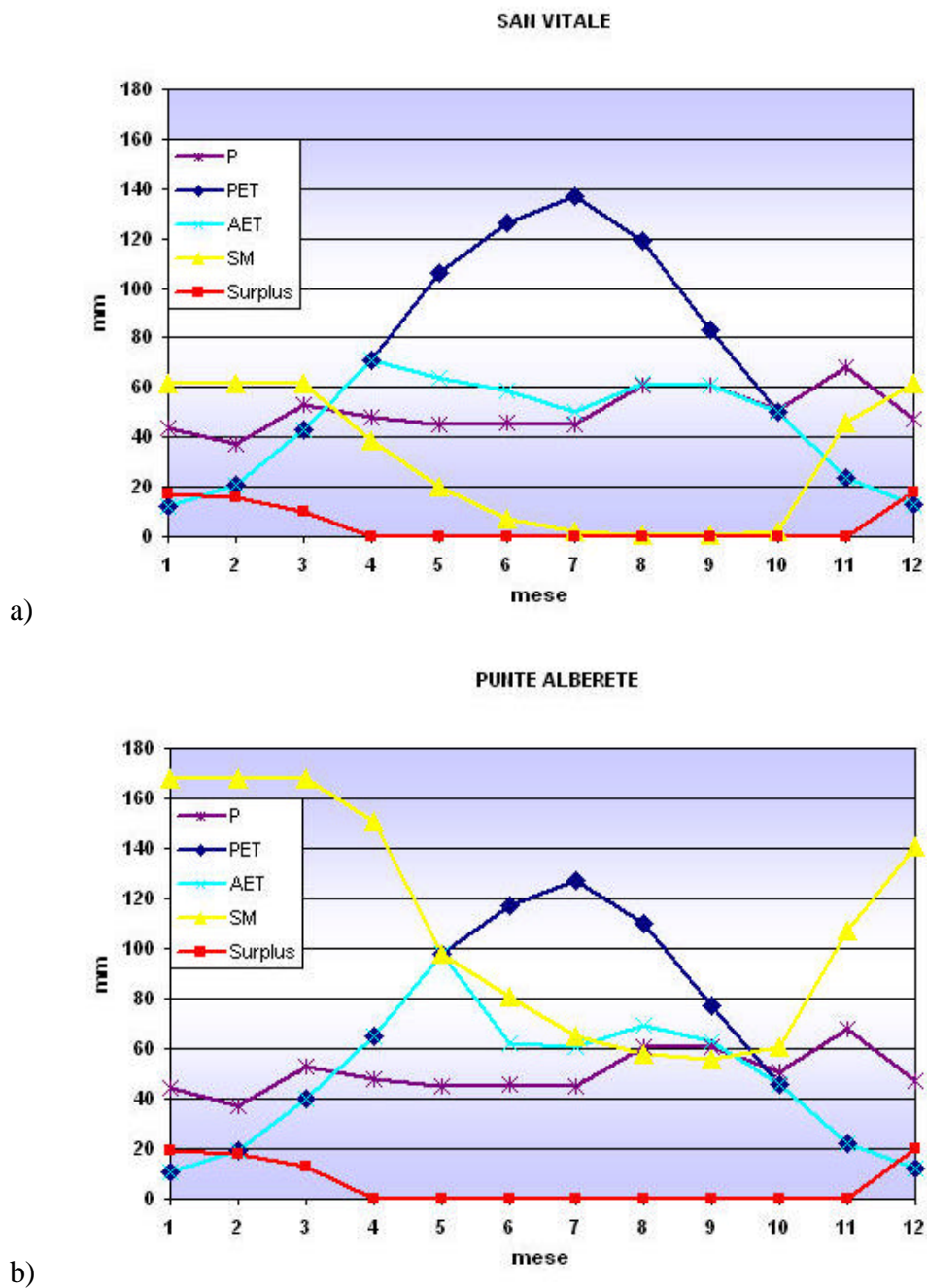
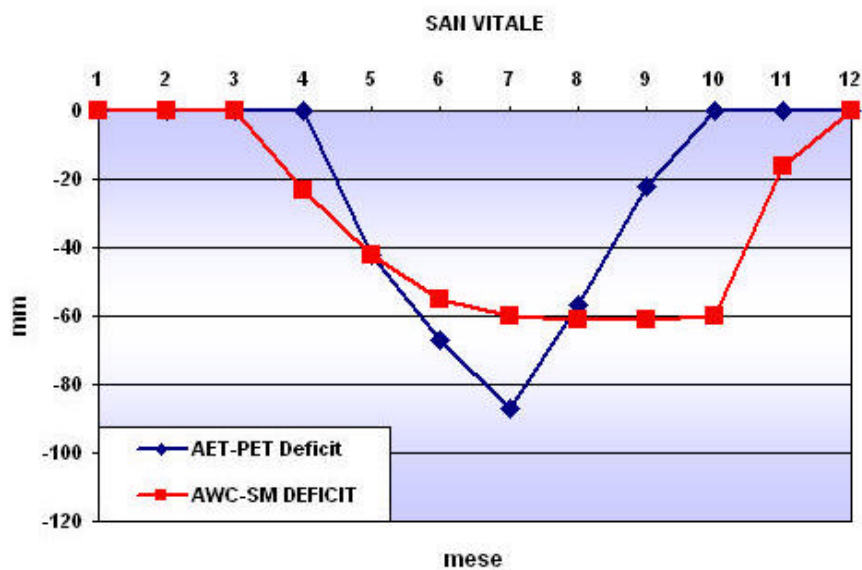
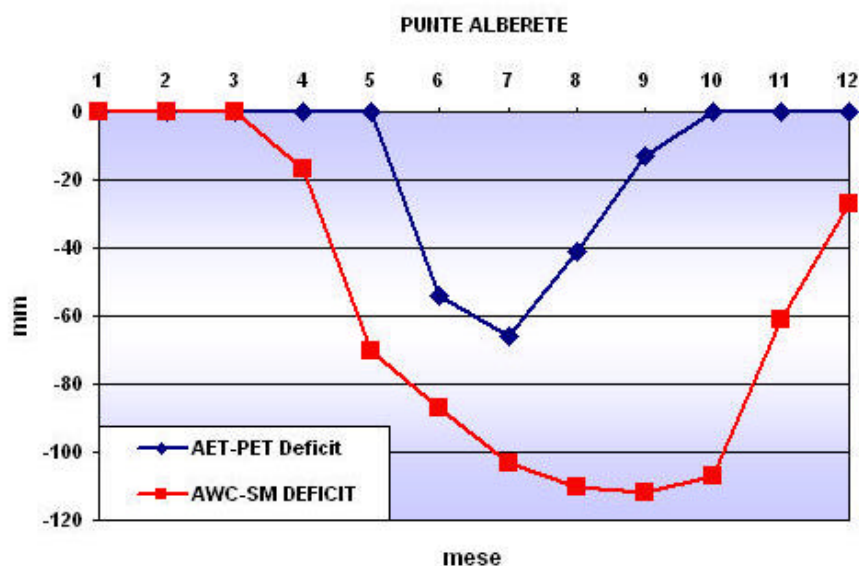


Fig. 4.2 – Andamento mensile di precipitazione (P), evapotraspirazione potenziale (PET) ed effettiva (AET), umidità del suolo (SM) e surplus d'acqua per la Pineta di San Vitale (a) e Punta Alberete (b).



a)



b)

Fig. 4.3 – Andamento mensile del deficit tra evapotraspirazione effettiva e potenziale (AET-PET Deficit) e del deficit tra la capacità di immagazzinamento del suolo e l'umidità del suolo (AWC-SM Deficit) per la Pineta si San Vitale (a) e Punta Alberete (b).

Osservando il bilancio idrologico della Pineta di San Vitale in Fig. 4.2 possiamo riconoscere 3 tipi di comportamento:

1. nei mesi da novembre a marzo esiste un surplus d'acqua per un totale di 61 mm distribuiti in questi 5 mesi. Questo vuol dire che c'è acqua sufficiente per l'evapotraspirazione della vegetazione e per la ricarica dell'acquifero. L'acqua, in

- questo periodo, proviene tutta dalle precipitazioni che hanno proprio il massimo in novembre e valori alti anche in marzo ;
2. nei mesi di aprile, maggio, giugno ed ottobre non c'è sufficiente precipitazione per soddisfare l'ET potenziale, ma c'è ancora abbastanza umidità trattenuta nel suolo che può essere ceduta alle radici delle piante.
 3. nei mesi di giugno, luglio, agosto e settembre, l'umidità trattenuta nel suolo è ridotta a zero e le poche precipitazioni sono subito usate dalle piante nell'evapotraspirazione; il bilancio è quindi negativo e il quantitativo di acqua evapotraspirata supera la quantità filtrante.

Punte Alberete ha generalmente lo stesso comportamento della pineta, salvo che per l'umidità trattenuta nel suolo per la quale si registrano valori molto maggiori rispetto al caso della pineta. Ciò è dovuto alla diversa composizione del suolo dell'area umida e soprattutto alla maggior percentuale di argilla (42% contro l'1% della pineta) che permette una maggiore capacità di trattenere l'acqua. Questo si esprime in valori più alti di PET e AET; la maggior quantità di acqua trattenuta nel suolo viene utilizzata prevalentemente dalle piante e non per la ricarica dell'acquifero. Questo è confermato anche dal fatto che i valori di surplus (70 mm totali) rimangono pressoché uguali, o comunque poco superiori, a quelli di San Vitale (61 mm). Altra conferma viene confrontando i grafici di deficit durante il periodo più caldo e secco in Fig. 4.3. Si nota, infatti, che la differenza fra la quantità d'acqua che potrebbe in teoria essere trattenuta nel suolo e l'umidità effettiva del suolo (AWC-SM Deficit) è maggiore a Punte Alberete dove il contenuto di argilla è circa 40 volte superiore a quello in pineta, mentre la differenza tra evapotraspirazione effettiva e potenziale (AET-PET Deficit) risulta minore appunto perché essendoci maggiore disponibilità d'acqua nel terreno i valori dell'evapotraspirazione reale (AET) sono più prossimi al valore limite (PET).

Naturalmente, in realtà, ci sono variazioni giornaliere che possono discostarsi da questo andamento generale e questo perché il modello usa valori medi mensili.

Alla luce di questi scenari, per il calcolo generale del bilancio idrologico (Eqn. 1) si considerano un valore di AET pari a 0.53 mm/anno per la pineta e di 0.57 mm/anno per Punte Alberete.

Si è utilizzato il modello WATBAL anche per stimare la quantità dell'infiltrazione nel sottosuolo, che nel nostro caso, equivale alla principale fonte di ricarica dell'acquifero

Per il valore di ricarica teorica è stato considerato il valore di surplus, ovvero la quantità d'acqua, proveniente principalmente dalle precipitazioni meteoriche, che non viene utilizzata dalle piante e può, quindi, infiltrare nel suolo.

Per ottenere il valore di ricarica effettiva si deve sottrarre, dal valore di ricarica teorica, il valore di ruscellamento superficiale e si ottiene così la quantità d'acqua che realmente ricarica la falda. Occorre però fare delle distinzioni sulla base dei diversi usi del suolo che si hanno anche nel resto dell'area in esame perché prendere solo le aree naturali come rappresentative di tutto il sistema non è corretto. Si sono calcolati, quindi, diversi bilanci con WATBAL per le varie zone (costiera, urbanizzata, agricola, industriale) e per le diverse coperture vegetazionali e si è preso in considerazione un valore medio che rappresentasse la ricarica media dell'acquifero.

Dai nostri calcoli risulta che il tasso di ricarica media annuale della falda, equiparabile all'infiltrazione nel sottosuolo, mediata su tutta l'area in esame, è molto piccolo, dell'ordine di 14.4 mm/anno. Per i valori di infiltrazione per le sole aree naturali di Punta Alberete e Pineta San Vitale si vedano i risultati al par. 4.4.

WATBAL è un modello molto utilizzato soprattutto in studi riguardanti gli effetti dei cambiamenti climatici sul bilancio idrologico ed è descritto dall'UNEP (1998) come un modello relativamente semplice da usare poiché richiede dati di facile reperimento. Per maggiori informazioni riguardo agli effetti dei futuri cambiamenti climatici sulla disponibilità di acqua nell'area di studio ed in generale nella pianura emiliano-romagnola si veda anche Mollema et al. (2003).

4.2.3. Ruscellamento superficiale

Il ruscellamento superficiale viene calcolato attraverso la formula:

$$Q_r = CIA \quad \text{Eqn. 3}$$

dove:

Q_r = ruscellamento superficiale (m^3 /anno)

I = pioggia media (m/anno)

A = area di drenaggio (m^2)

C = coefficiente di ruscellamento (adimensionale)

Per le precipitazioni si sono considerati i valori in Tabella 4.1. Per l'area di drenaggio, essendo il calcolo del bilancio idrologico fatto in modo puntiforme per l'area in esame, si è considerata un'area unitaria di $1 m^2$. Il coefficiente di ruscellamento C ,

invece, dipende dall'uso del suolo ed è stato tratto da Fetter (2001) che riporta la tabella dell'American Society of Civil Engineers relativa a tutti i diversi valori di C in relazione ai diversi usi del suolo (agricolo, parco, urbano, ecc.) e alle caratteristiche della superficie (cementata, erbosa, ecc.).

In Tabella 4.4 vengono riportati le categorie di utilizzo del suolo considerate, il relativo coefficiente di ruscellamento ed il calcolo della quantità di acqua che viene asportata dal sistema per ruscellamento superficiale.

Tabella 4.4 – Elenco delle categorie di utilizzo del suolo, relativo coefficiente di ruscellamento (C) e valore di ruscellamento superficiale (Qr).

Tipologia area	Coefficiente di ruscellamento (C)	Ruscellamento superficiale (Qr) m³/anno
Duna/arenile	0.05	0.03
Pineta	0.1	0.06
Coltivato	0.07	0.04
Urbanizzato/industriale	0.7	0.42

4.2.4. Drenaggio

La quantità di acqua drenata dagli impianti idrovori non è esattamente quantificabile perché varia di anno in anno in base alle precipitazioni. Si sono, però, analizzati i dati di pompaggio annuale, forniti dal Consorzio di Bonifica della Romagna Centrale, relativi alle 2 idrovore (“II Bacino Casalboretto” e “Via Cerba”) i cui bacini di drenaggio comprendono l'area pinetata (cfr. Cap. 2 par. 2.4.2.).

Si sono messi in relazione la quantità annuale d'acqua drenata, l'area dei rispettivi bacini di drenaggio, le precipitazioni cumulative dei singoli anni ed i valori di evapotraspirazione effettiva. Per le precipitazioni si sono utilizzati i calendari (1999-2004) dei dati meteorologici dell'Azienda Agraria Sperimentale “M. Marani” di Ravenna, mentre i singoli valori di evapotraspirazione effettiva (AET) sono stati calcolati per i singoli bacini di drenaggio con il modello WATBAL usando la stessa metodologia descritta al par. 4.2.2 e considerando le diverse tipologie di suolo dominanti.

La Tabella 4.5 dimostra che vi è un deficit generale per quasi tutti gli anni (celle in colore rosso). La quantità d'acqua drenata sommata a quella evapotraspirata è maggiore

delle precipitazioni e solo in alcuni casi piccole quantità di acqua (1-3 cm/anno) rimangono disponibili per l'infiltrazione e la ricarica dell'acquifero.

Tabella 4.5 – Dati dei pompaggi annuali delle idrovore “II Bacino Casalborsetti” e “Via Cerba” (dati relativi agli anni 1999-2004)

IDROVORA II BACINO CASALBORSETTI							
anno	Ore annuali di pompaggio	Q tot (m³/anno)	Area Bacino (m²)	Q tot (m/anno)	P tot (m/anno)	AET tot (m/anno)	P- (ET+Q) (m/anno)
1999	1512	11615742	5 10 ⁷	0.23	0.94	0.77	-0.06
2000	750	5999022		0.12	0.51	0.49	-0.10
2001	698	5756562		0.12	0.62	0.58	-0.08
2002	845	7175448		0.14	0.79	0.67	-0.02
2003	731	6195870		0.12	0.49	0.49	-0.12
2004	1042	6247800		0.12	0.69	0.57	0.00
IDROVORA “VIA CERBA”							
anno	Ore annuali di pompaggio	Q tot (m³/anno)	Area Bacino (m²)	Q tot (m/anno)	P tot (m/anno)	AET tot (m/anno)	P- (ET+Q) (m/anno)
1999	2151	19251000	7.6 10 ⁷	0.25	0.94	0.75	-0.07
2000	875	6755400		0.09	0.51	0.48	-0.06
2001	976	8559000		0.11	0.62	0.56	-0.05
2002	917	8769600		0.12	0.79	0.65	0.03
2003	624	4849200		0.06	0.49	0.48	-0.05
2004	811	9028530		0.12	0.69	0.56	0.01

4.3. EVAPORAZIONE DAI CHIARI D'ACQUA

Fra gli output di un bilancio idrologico occorre considerare anche l'acqua che non ritorna nel reticolo idrografico di superficie o nelle riserve sotterranee a causa dell'evaporazione. E' stata così calcolata l'evaporazione media mensile dei Chiari d'acqua chiusi adiacenti alla Piallassa: Chiaro del Comune, Chiaro di Mezzo e Chiaro del Pontazzo. Data la loro ridotta dimensione e le basse profondità possono essere considerati dei piccoli laghi e può essere utilizzato il nomogramma in Fig. 4.4 messo a

punto dal National Weather Service per il calcolo dell'evaporazione per laghi poco profondi esposti ai venti dominanti (Kohler *et al.*, 1955; Robert & Stall, 1967).

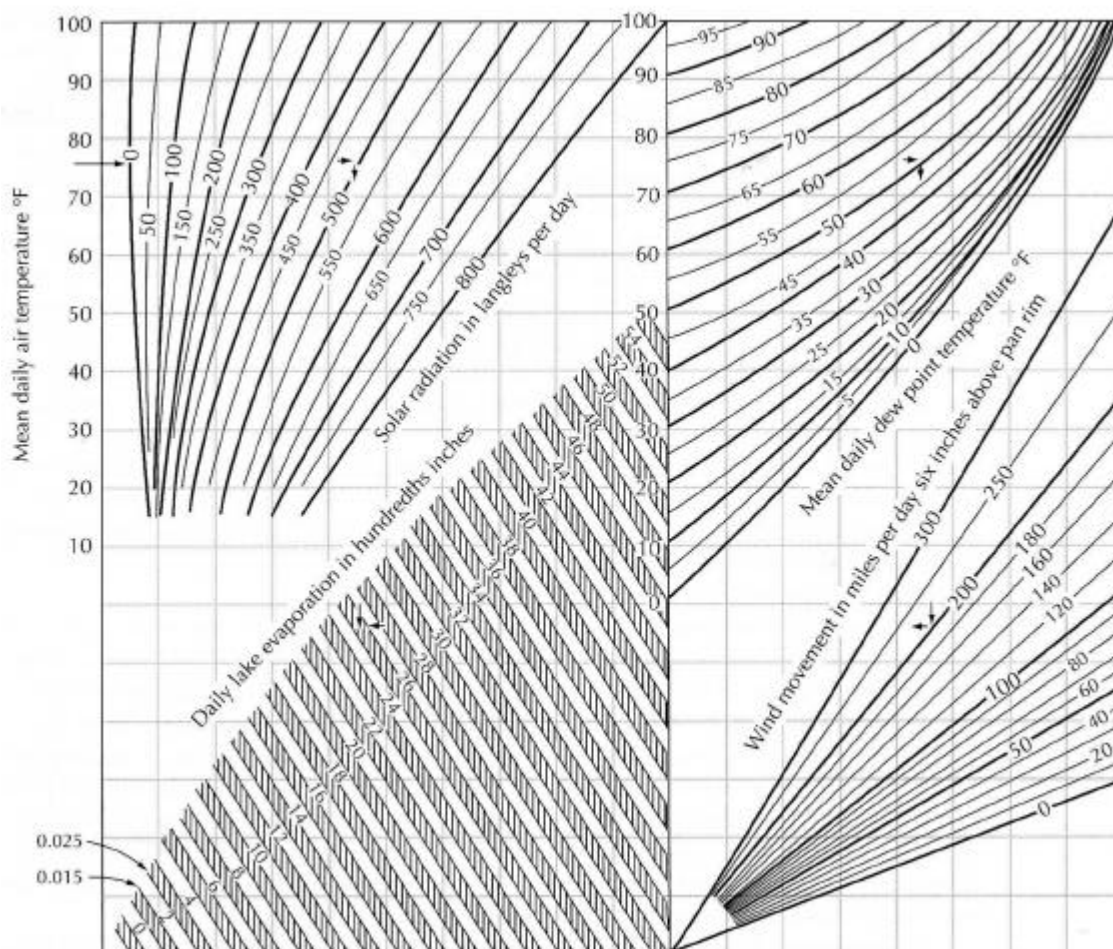


Fig. 4.4 – Nomogramma usato per determinare l'evaporazione di un lago poco profondo conoscendo la radiazione solare, le temperature medie, le temperature media del punto di rugiada ed i venti prevalenti (Robert & Stall, 1967)

I parametri utilizzati per muoversi all'interno del nomogramma sono riportati in Tabella 4.6; i venti prevalenti, le medie di temperatura e precipitazione sono quelle riportate in Tabella 4.1; i valori di radiazione solare per la nostra zona sono quelli in Tabella 4.3. La temperatura del punto di rugiada (*dew-point temperature*) è, invece, quella temperatura a cui una massa d'aria è satura, cioè tale da contenere la massima quantità di acqua sotto forma di vapore che essa può contenere a quella temperatura e a quella pressione; qualsiasi eccedenza a tale quantità deve perciò condensare, cioè passare allo stato liquido. È possibile calcolare la temperatura di rugiada dall'umidità

relativa e dalla temperatura seguendo le formule disponibili anche sul sito <http://www.dgv.unina.it/meteo/meteolab/formulario.htm>.

Tabella 4.6 – Parametri usati nel nomogramma per il calcolo dell'evaporazione dei Chiari d'acqua chiusi adiacenti alla pineta. I dati sono stati convertiti nel sistema di unità inglese per poter essere inseriti nel nomogramma. ($^{\circ}\text{F} = [(^{\circ}\text{C} * 9/5) + 32]$; 1 nodo = 1 mile/h = 24 miles/day; 1 Wh = 3.6 KJ; 1 Ly = 41.48 KJ/m²; 1 inch = 2.54 cm)

Mesi	T media ($^{\circ}\text{F}$)	T di rugiada ($^{\circ}\text{F}$)	Venti (miles/day)	Radiazione solare (Ly/day)	Evaporazione (inches/day)	Evaporazione (mm/mese)
Gen	36.5	33.8	120.0	183.1	0.02	15.7
Feb	41	35.6	120.0	234.2	0.035	24.9
Mar	47.3	41	120.0	336.3	0.055	43.3
Apr	54.5	48.2	120.0	416.9	0.085	64.8
Mag	62.6	55.4	120.0	457.7	0.155	122.0
Giu	68.9	60.8	120.0	515.7	0.155	118.1
Lug	74.3	66.2	120.0	541.4	0.18	141.7
Ago	73.4	64.4	120.0	513.7	0.15	118.1
Set	68	60.8	120.0	438.0	0.11	83.8
Ott	59	53.6	120.0	307.9	0.07	55.1
Nov	48.2	44.6	120.0	202.3	0.025	19.1
Dic	40.1	37.4	48.0	144.4	0.01	7.9

Si hanno, quindi, valori di evaporazione mensili molto alti che in alcuni casi (celle in colore rosso) eccedono i valori di precipitazione. I massimi valori mensili di evaporazione si verificano nei mesi di giugno, luglio e agosto.

Se consideriamo le aree dei Chiari (Tabella 4.7) è evidente il deficit tra le precipitazioni e l'evaporazione; la ricarica dei Chiari non avviene per precipitazione ma è completamente dipendente dagli scarichi dei canali e/o scoli. Da qui ne deriva che la ricarica dei chiari durante il periodo estivo, quando il lavoro delle idrovore è più ridotto, è praticamente nulla.

Tabella 4.7 – Valori di precipitazione ed evaporazione per i Chiari della Piallassa arginati (dove P = precipitazione totale annuale = 0.61 m/anno e E = evaporazione totale annuale = 0.81)

	Area (m ²)	A*P (m ³ /anno)	A*E (m ³ /anno)	Deficit (P – E) (m ³ /anno)
Chiaro del Comune	824584	499698	667913	-168215
Chiaro del Cavedone	592262	358911	479732	-120821
Chiaro del Pontazzo	864065	523623	699893	-176269

4.4. RISULTATI

Una prima stima del quantitativo di acqua che infiltra nel sottosuolo della Pineta San Vitale e di Punta Alberete deriva dal bilancio effettuato considerando come entrate le sole precipitazioni e come uscite il quantitativo che defluisce superficialmente e quello che evapotraspira. Il risultato viene mostrato in Tabella 4.8.

Tabella 4.8 – Valori stagionali di infiltrazione ottenuti dal bilancio idrologico considerando solamente le entrate per precipitazione e le uscite per deflusso superficiale e per evapotraspirazione (Pineta San Vitale = 1133 ha; Punta Alberete = 222 ha)

PINETA SAN VITALE				
Stagione	Precipitazioni (m ³)	Deflusso superficiale (m ³)	AET (m ³)	Infiltrazione (m ³)
Inverno	1518220	151822	861080	505318
Primavera	1574870	157487	2198020	-
Estate	1892110	189211	1960090	-
Autunno	1880780	188078	985710	706992
			Totale	1212310
PUNTE ALBERETE				
Stagione	Precipitazioni (m ³)	Deflusso superficiale (m ³)	AET (m ³)	Infiltrazione (m ³)
Inverno	297480	29748	155400	112332
Primavera	308580	30858	499500	#
Estate	370740	37074	428460	#
Autunno	368520	36852	177600	154068
			Totale	266400

Durante il periodo autunnale, l'acqua che mediamente infiltra nell'acquifero freatico ammonta a oltre $0.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ovvero a circa 21 mm/mese per la pineta e a $0.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (23 mm/mese) per Punta Alberete.

Nei mesi invernali l'acqua infiltrante diminuisce passando a 15 mm/mese per la pineta e 17 mm/mese per l'oasi umida.

Nelle stagioni estiva e primaverile il bilancio è invece negativo: ciò non significa che non si verifichi infiltrazione di acqua nell'acquifero, ma che il quantitativo di acqua evapotraspirata durante le stagioni più calde supera la quantità infiltrante.

Al quantitativo infiltrato andrebbe aggiunto il contributo derivante dall'acqua infiltrante dai canali che non è stata calcolata nello specifico; essa comunque varia stagionalmente ed in funzione del carico idraulico presente nei canali stessi.

Inoltre, dall'infiltrazione totale deve essere sottratta la quantità di acqua drenata e, come visto in Tabella 4.5, ne deriva che gran parte della totalità dell'acqua infiltrante nella pineta viene asportato dal sistema meccanico, specialmente durante il periodo di maggior lavoro delle idrovore (inverno e autunno).

È evidente che con questi valori di bilancio idrologico, non esiste una ricarica superficiale sufficiente a riequilibrare la falda freatica dal punto di vista idrodinamico. La ricarica superficiale è piccola ed è ulteriormente diminuita dal pesante sistema di drenaggio e dalla forte urbanizzazione e cementazione del litorale che diminuiscono la capacità infiltrante del terreno.

Date anche le scarse precipitazioni e le temperature relativamente elevate, la zona può essere classificata come semi-arida.

In particolare, se si calcola l'*aridity index* per la provincia di Ravenna, secondo la formula (Ranjan et al. 2006):

$$AI = \frac{P}{(T+10)} \quad \text{Eqn. 4}$$

dove

P = piovosità annua (mm) = 606 mm

T = temperatura media annua (°C) = 13.4 °C

si ottiene un valore di A.I. = -26. I valori sono tanto più elevati tanto più le regioni sono umide, e tanto più bassi tanto più le regioni sono aride. Il basso AI calcolato per la nostra area di studio non permette una ricarica efficiente dell'acquifero freatico. Inoltre

Ranjan et al. (2006) hanno mostrato, in maniera numerica, come la presenza di foreste lungo un litorale di una zona con un $AI < 60$ incida negativamente sulle caratteristiche di salinità dell'acqua nelle falde freatiche superficiali. Il pompaggio operato dalle radici degli alberi, infatti, favorisce l'intrusione di acqua salata dal fondo dell'acquifero e dal mare.

5. MONITORAGGIO

5.1. DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA DI MONITORAGGIO

Per comprendere lo stato attuale della falda e il dinamismo che governa l'acquifero è stato eseguito un monitoraggio della profondità della falda e dei parametri di conducibilità elettrica specifica e della temperatura su scala mensile e della durata complessiva di un anno (ottobre 2004 - ottobre 2005). Durante questo periodo sono stati monitorati tutti i Chiari d'acqua della Piallassa Baiona adiacenti alla pineta, i canali e gli scoli principali, tutti i piezometri e le aste idrometriche presenti nell'area, più altri punti scelti per infittire la rete, per un totale di 61 punti (cfr. mappa in Allegato).

Nel complesso i punti di monitoraggio sono così distribuiti:

- 20 piezometri esistenti di cui 20 in pineta e 2 a Punte Alberete. Tutti i piezometri hanno una profondità di 5-6 m con un raggio di 8 cm (Fig. 5.1 a) ad esclusione di 4 piezometri in pineta (PZ 4, 5, 6 e 7) profondi 3 m e con raggio di 5 cm. Nei primi mesi di monitoraggio vennero anche posizionati altri 2 piezometri (P5S5 e P6S6 lungo il Sentiero Sud) a Punte Alberete ma vennero distrutti dopo breve per cui si hanno i dati solo per il primo periodo (Fig. 5.1 b);
- 27 punti lungo fiumi, canali e scoli;
- 10 punti nei Chiari d'acqua della Piallassa (Chiari del Pontazzo, Risega, del Comune e del Cavedone)

I parametri monitorati sono stati:

- livelli idrici delle acque e livello piezometrico (m s.l.m);
- conducibilità elettrica superficiale e profonda (mS/cm);
- ph superficiale e profondo;
- temperatura (°C).

I dati completi di monitoraggio sono riportati in Allegato.

I risultati del monitoraggio sono stati elaborati in mappe delle isofreatiche (Fig. 5.3 - Fig. 5.7) e delle isoaline (Fig. 5.10 - Fig. 5.13).

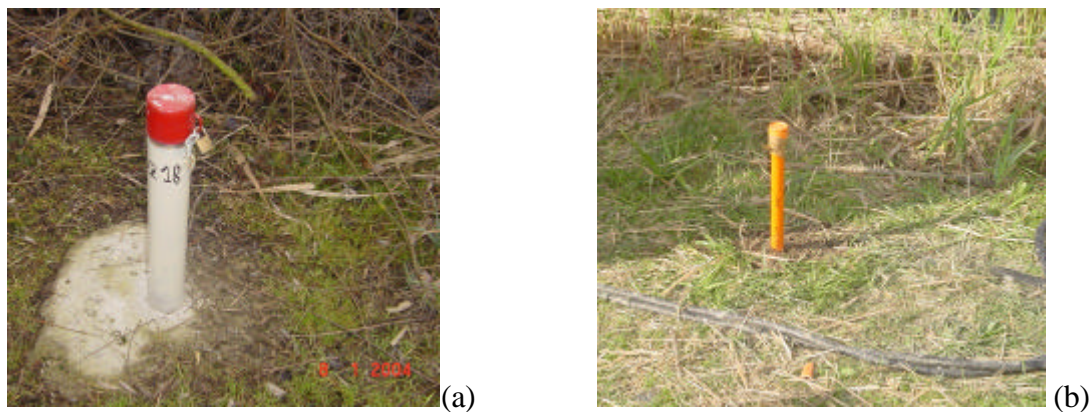


Fig. 5.1 – Tipologie di piezometri presenti in pineta (a) pineta e quelli installati a Ponte Alberete (b)

5.2. METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE

5.2.1. Rilievo piezometrico ed idrometrico

Il rilievo della profondità della falda è stato effettuato mediante freatimetro con cavo lungo 30 m a gradazione ogni cm, con segnalatore acustico e visivo di raggiungimento del livello (Fig. 5.2).



Fig. 5.2 – Strumentazione utilizzata per il monitoraggio: freatimetro (a) e sonda multiparametrica (b).

Per i piezometri e le aste idrometriche presenti nell'area esiste una quota topografica precisa perché sono stati livellati mediante livellazione geodetica eseguita dal Comune di Ravenna in collaborazione con Tech Studio (Ravenna) nell'aprile 2003.

Per gli altri punti lungo i canali o nei Chiari, per i quali non esisteva una quota topografica precisa, si sono utilizzati i valori topografici ricavati dal DEM (cfr. Cap. 3) e si sono verificati con un rilievo GPS di precisione.

5.2.2. Rilievo conducibilità e temperatura

Il monitoraggio dei parametri di conducibilità elettrica specifica e di temperatura è stato eseguito con sonda multiparametrica HYDROLAB H20G-BT Multiprobe della Corr-Tek Idrometria Srl (Fig. 5.2 b) con sensori per la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), la conducibilità (mS/cm), il pH e la profondità (0-100 m).

Per la misura della conducibilità la sonda è stata tarata con soluzione standard (HANNA Instruments) 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 gradi; l'errore sulla misura della conducibilità è di $\pm 0.5\%$ del valore misurato, quello sulla misura di temperatura è di ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$.

In corrispondenza dei piezometri sono stati misurati i parametri alla superficie e ad ogni metro al di sotto di questa fino alla base del piezometro. Questo ha permesso di ottenere profili verticali di temperatura e salinità e valutare, quindi, la distribuzione verticale di tale parametri. Purtroppo, per problemi con la strumentazione, i profili verticali per i singoli piezometri sono disponibili solo dal mese di marzo 2005 mentre per i mesi precedenti (ottobre 2004 – febbraio 2005) si dispone solo delle misurazioni di salinità in superficie e sul fondo dei piezometri; non si sono quindi potuti ricostruire degli andamenti verticali stagionali ma solo quelli mensili.

Dai dati di conducibilità elettrica specifica e di temperatura è stata calcolata la salinità utilizzando la formula di conversione elaborata da Lewis & Perkins (1981) e riportata nel rapporto n. 44 degli Unesco Technical Papers (UNESCO, 1983).

5.3. ELABORAZIONE DATI

Le mappe delle isofreatiche e delle isoaline sono state elaborate attraverso l'utilizzo del software Surfer 8 e poi successivamente importate in ambiente GIS (Software Arcgis 8.2).

Surfer 8 (Golden Software) è un programma di *countouring* e creazione di mappe e superfici tridimensionali. Esso permette l'interpolazione di un dataset ampio scegliendo tra diversi tipi di algoritmi. Nello specifico, dopo un'attenta analisi dei vari metodi, il metodo d'interpolazione scelto è stato il *Radial Basic Function* che rappresenta un

metodo molto flessibile e in termini d'abilità nel fit dei punti di misura e di capacità di riprodurre superfici *smooth* è paragonabile alla tecnica del *kriging*, soprattutto utilizzando le funzioni multiquadratiche (Chaplot *et al.*, 2006; Jin *et al.*, 2000). La particolarità delle funzioni multiquadratiche è che forniscono un sistema di equazioni piuttosto ben condizionato che è garantito essere non singolare e quindi fornire una soluzione.

È stato scelto la *Radial Basic Function* perché, in assenza di *smoothing factor* ($c=0$), è un metodo d'interpolazione esatto, ovvero onora esattamente i dati quando i nodi della griglia coincidono con i punti di misura ed è un metodo d'interpolazione adatto quando i punti di misura non superano alcune centinaia (Hardy, 1971; 1990)

Le mappe sono state elaborate stagionalmente e su tutta l'area d'indagine e sono state riprodotte con la stessa scala cromatica al fine di evidenziare meglio i cambiamenti subiti nel corso del monitoraggio. Le mappe sono state ritagliate strettamente all'area dove sono presenti i punti di monitoraggio perché al di fuori di questi l'interpolazione inserisce degli errori e non è esatta. Infine, sono state create le mappe delle isofreatiche e della distribuzione di salinità relative ai soli valori registrati nei piezometri.

5.3.1. Ricostruzione delle mappe delle isofreatiche

Per la creazione delle mappe delle isofreatiche, oltre ai livelli rilevati nei piezometri e nei canali è stata impostata anche la quota 0 m s.l.m.m. lungo la linea di costa e lungo la Piallassa, escludendo i Chiari chiusi e non in collegamento diretto con il mare, in considerazione del fatto che tali linee rappresentano il limite est dell'acquifero in corrispondenza delle quali la falda si trova in equilibrio dinamico con il mare.

Le carte delle isofreatiche (Fig. 5.3; Fig. 5.4; Fig. 5.5; Fig. 5.6) non presentano grandi variazioni stagionali e questo si spiega con il fatto che i livelli freaticometrici sono costantemente governati dalle idrovore che drenano gli adiacenti campi agricoli; le maggiori oscillazioni stagionali sono registrate nella zona centrale della pineta che risente della diversa ricarica per infiltrazione diretta del fiume Lamone e dei canali principali come il Canale Fossatone.

In Fig. 5.3; Fig. 5.4; Fig. 5.5; Fig. 5.6, di fianco alle mappe stagionali delle isofreatiche, vengono riportate anche le mappe delle isofreatiche con evidenziate le aree in cui la falda si trova al di sopra del livello del mare (colore giallo) e quelle poste al di sotto (colore blu).

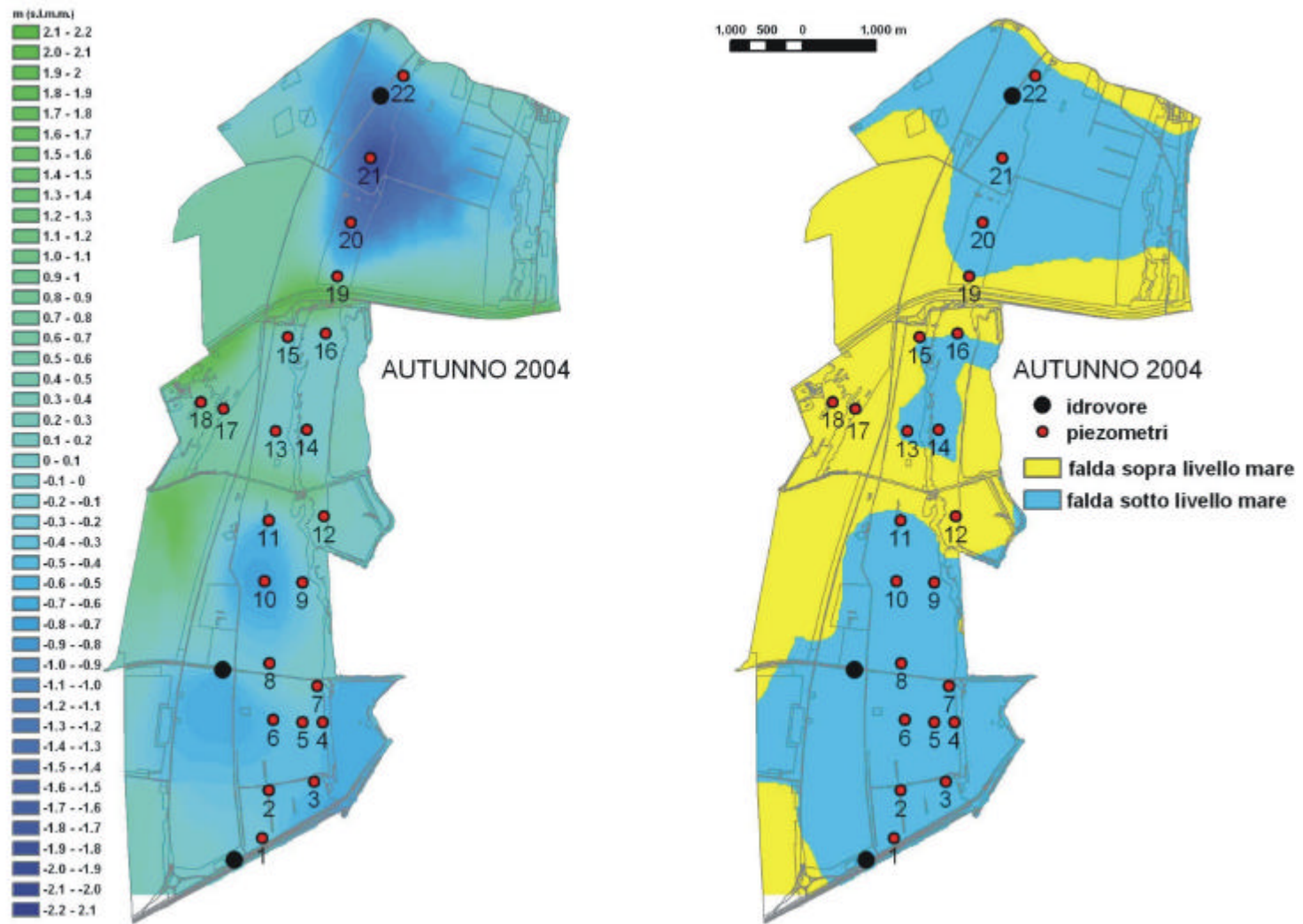


Fig. 5.3 – Mappe delle isofreatiche relative al periodo autunnale.

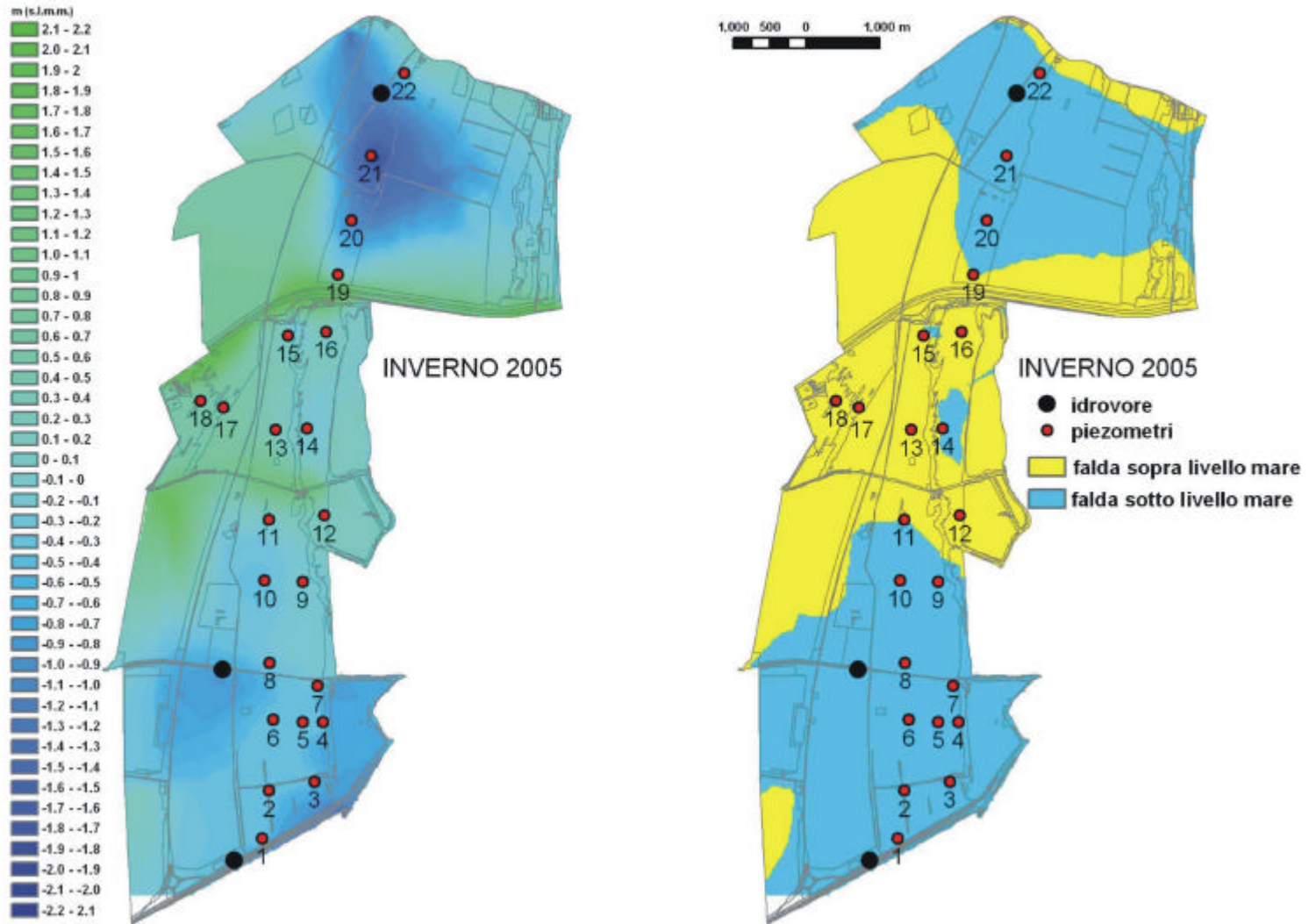


Fig. 5.4 - Mappe delle isofreatiche relative al periodo invernale.

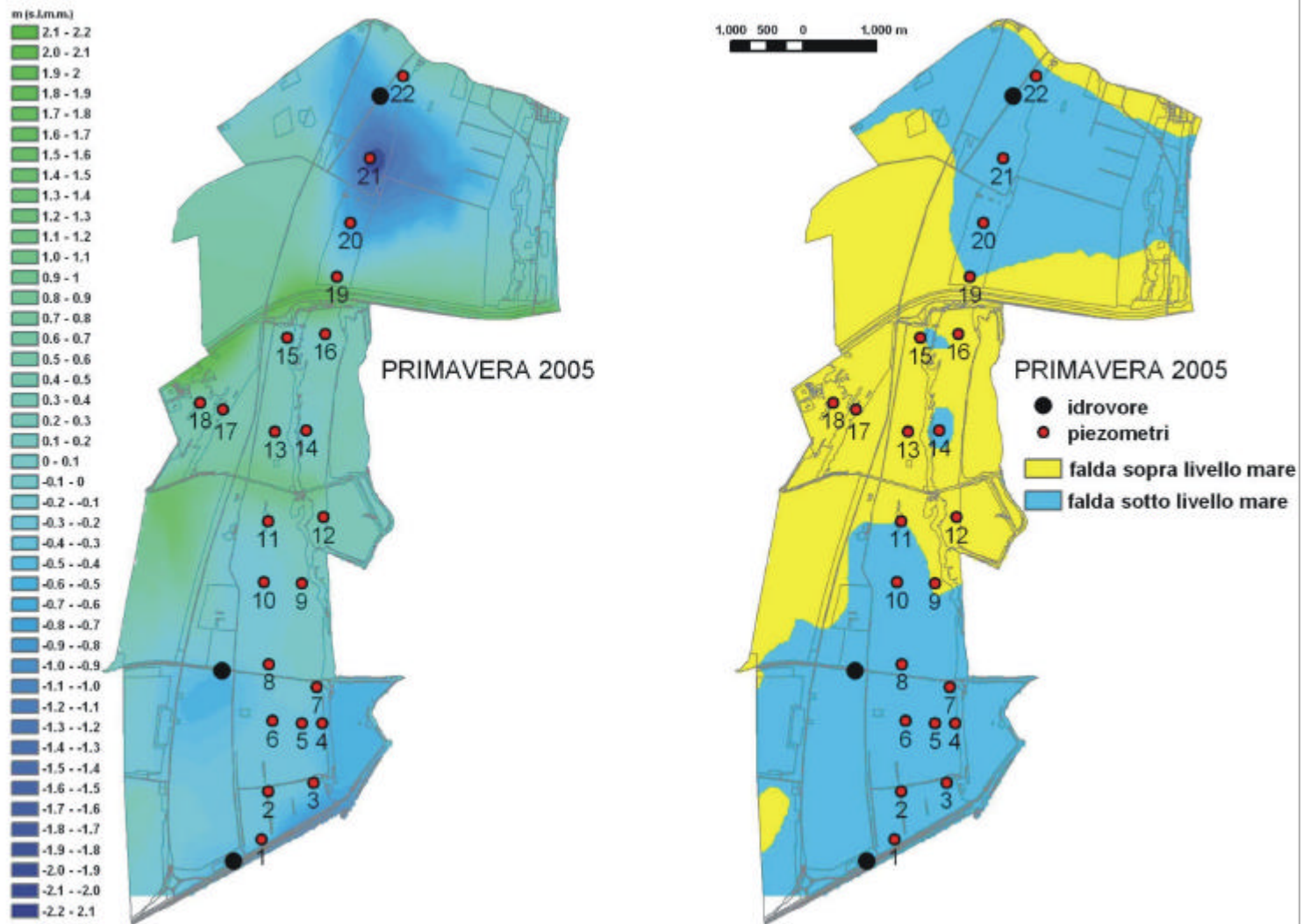


Fig. 5.5 - Mappe delle isofreatiche relative al periodo primaverile .

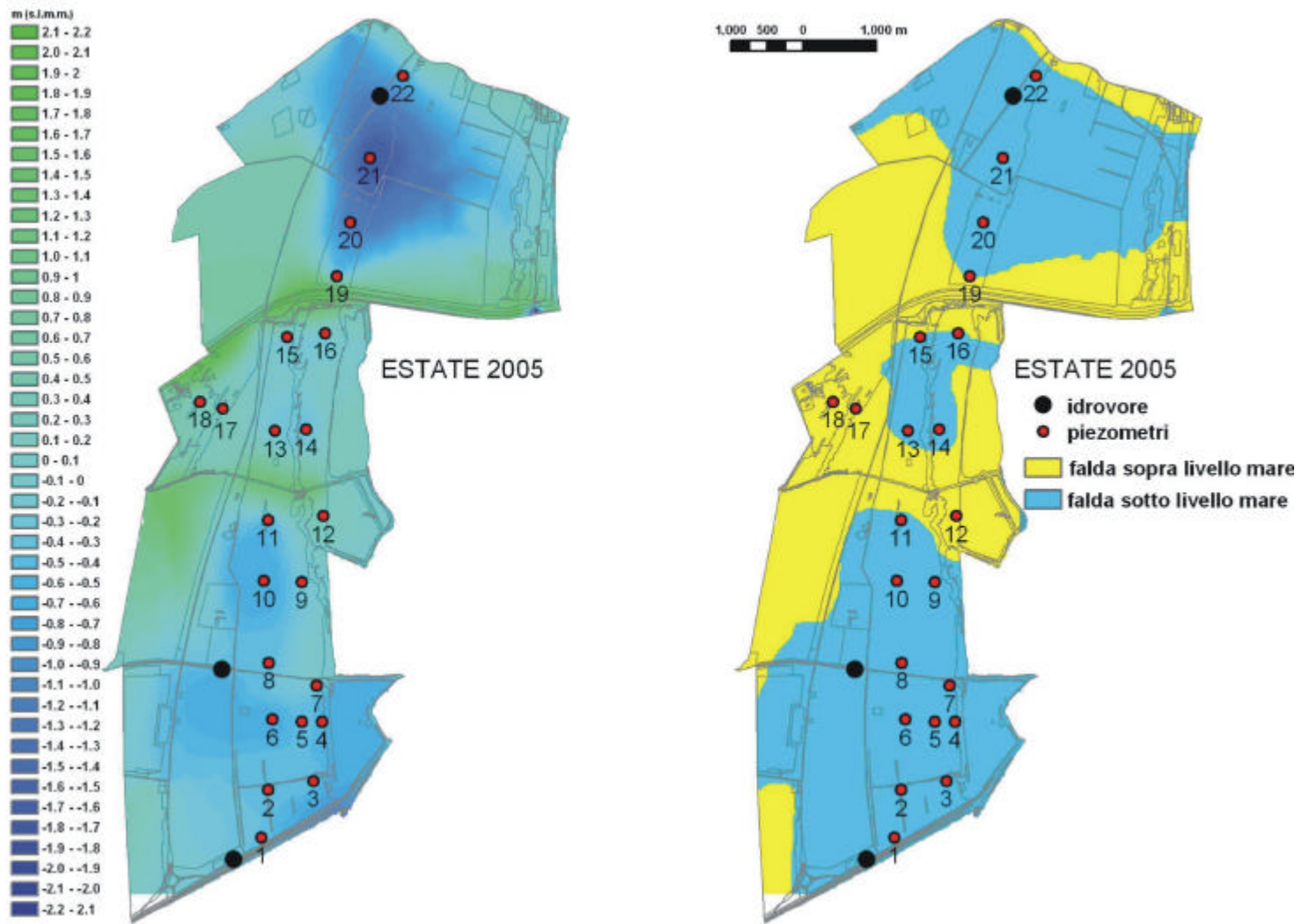


Fig. 5.6 - Mappe delle isofreatiche relative al periodo estivo.

È evidente che in alcune aree della pineta, la falda si trova costantemente al di sotto del livello del mare durante tutto l'anno; nella zona settentrionale e meridionale della pineta, il livello di falda è sempre più basso rispetto alle aree circostanti ed è presente un visibile gradiente verso terra delle isofreatiche. La zona settentrionale è quella topograficamente più elevata ma i livelli risentono del drenaggio operato dall'idrovora "II - Bacino Casalborsetti". La zona meridionale, invece, compresa fra lo Scolo Via Cerba e il Canale Canala, è sicuramente quella che appare più critica in quanto è quella che ha subito il maggiore abbassamento a causa della subsidenza.

Nel periodo invernale la superficie freatica presenta un generale, anche se lieve, innalzamento che porta ad una diminuzione delle aree in cui la falda si trova sotto il l.m.m. rispetto al periodo autunnale: considerando tutti i dati monitorati (piezometri e canali) si passa da un livello minimo di -2.09 m registrato in autunno ad un minimo di -2.01 in inverno, con un innalzamento medio del livello di 2 cm. I livelli massimi, invece, non subiscono grosse variazioni e questo potrebbe dipendere dal controllo operato dalle idrovore. La maggior freaticimetria è comunque da attribuire all'aumento della piovosità.

Nel periodo primaverile si evidenzia, sempre per l'area centrale della pineta, una quota della freatica leggermente maggiore rispetto al periodo precedente, con un valore minimo di -1.83 m ed un valore massimo di 1.14 m. Particolarmente evidente risulta l'alimentazione della falda da parte del Fiume Lamone e del Canale Fossatone che nel periodo primaverile raggiungono i massimi livelli idrometrici (1.14 m per il Fossatone).

Nel periodo estivo, complici la minor quota idrometrica dei canali e la maggior evapotraspirazione, la superficie freatica tende ad abbassarsi portando il livello minimo al -2.06 m. Durante il periodo estivo si registrano i livelli di falda più bassi rispetto a tutto il resto dell'anno, con un valore medio di -0.13 m.

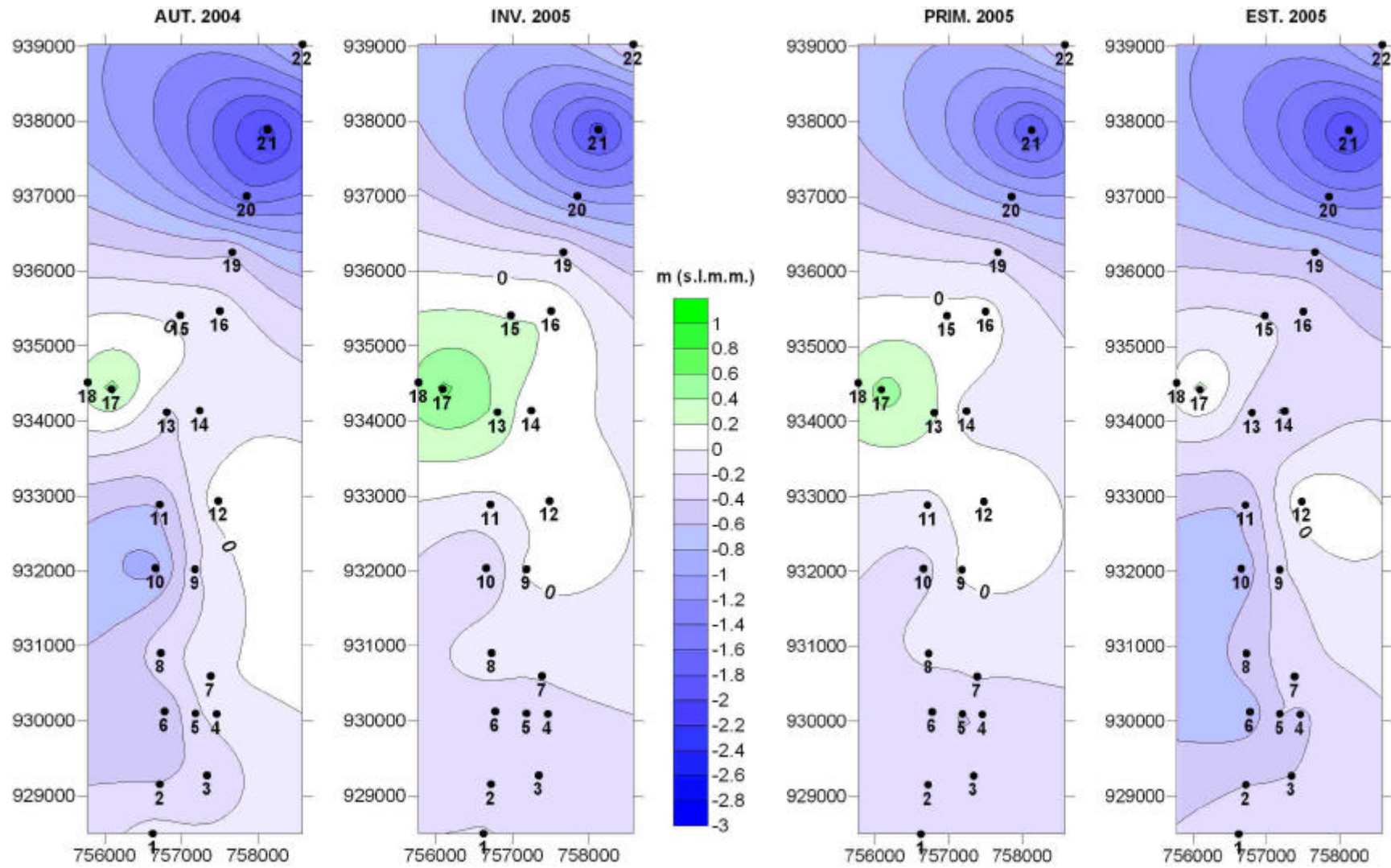


Fig. 5.7 – Mappe stagionali della piezometria

Considerando i soli dati piezometrici, elaborati nelle mappe in Fig. 5.7, la profondità media della falda in pineta è di -0.31 m s.l.m.m. con i massimi livelli generalmente nella stagione invernale e i minimi in estate.

In Tabella 5.1 si riportano i valori medi del livello piezometrico, i valori minimi e massimi e l'oscillazione media della freaticimetria relativi ai 22 piezometri in Pineta e Punta Alberete.

Tabella 5.1 – Valori medi del livello piezometrico relativi ai 22 piezometri presenti nell'area di studio

PZ	Media su anno (m)	MAX su 4 stagioni (m)	MIN su 4 stagioni (m)	Oscillazione MAX e MIN (m)
PZ1	-0.19	-0.12	-0.26	0.14
PZ2	-0.37	-0.33	-0.40	0.07
PZ3	-0.36	-0.33	-0.40	0.07
PZ4	-0.30	-0.12	-0.44	0.32
PZ5	-0.35	-0.25	-0.41	0.16
PZ6	-0.49	-0.30	-0.72	0.42
PZ7	-0.17	-0.04	-0.27	0.23
PZ8	-0.26	-0.10	-0.51	0.41
PZ9	-0.10	0.05	-0.24	0.29
PZ10	-0.59	-0.29	-0.89	0.60
PZ11	-0.33	-0.06	-0.59	0.53
PZ12	0.14	0.17	0.10	0.07
PZ13	0.02	0.36	-0.31	0.67
PZ14	-0.15	0.04	-0.43	0.47
PZ15	0.00	0.18	-0.20	0.39
PZ16	-0.03	0.18	-0.24	0.42
PZ17	0.47	0.65	0.27	0.38
PZ18	0.21	0.41	0.00	0.41
PZ19	-0.38	-0.23	-0.58	0.34
PZ20	-1.19	-0.89	-1.52	0.63
PZ21	-1.97	-1.83	-2.09	0.26
PZ22	-0.52	-0.35	-0.69	0.34

L'oscillazione media dei livelli minimi e massimi per i piezometri è di 35 cm; i valori di massima oscillazione (50-60 cm) tra il periodo estivo ed invernale sono registrati nella zona centrale, compresa tra il Taglio della Baiona e il canale Via Cerba (PZ n. 9-16).

L'andamento piezometrico riportato in Fig. 5.7 mostra l'effetto di ricarica in prossimità del Canale Fossatone e del Fiume Lamone e mostra l'effetto drenante della bonifica evidenziato dalla presenza di bassi piezometrici presenti in corrispondenza dei canali di bonifica di Via Cerba e Scolo Canala a sud (PZ 1-8), e Scolo Rivalone a nord (PZ 19-22). Si evidenzia, inoltre, l'effetto della Buca del Cavedone (area compresa tra PZ 9-16), che comporta uno spostamento della isopieza 0 più all'interno rispetto alla parte sud della pineta.

Anche dai dati piezometrici è confermato che la zona più critica è quella meridionale della pineta dove la falda ha mediamente una profondità di -0.32 m (s.l.m.) per tutto l'anno (Fig. 5.8) e si registrano i maggiori valori di salinità (cfr. par. seguente).

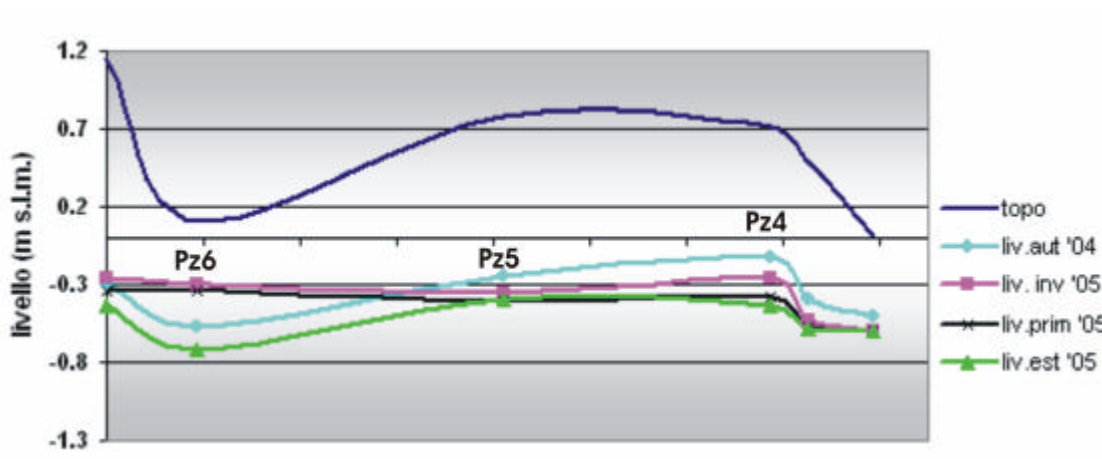


Fig. 5.8 – Andamento stagionale della freaticmetria per i piezometri n. 4, 5, 6 a confronto con la topografia.

La figura 5.9 (Fig. 5.8) mostra anche come la presenza della bonifica a ovest della pineta generi un gradiente negativo dalla Piallassa verso l'interno. Questa influenza del drenaggio sull'andamento della superficie piezometrica si riscontra anche in altre aree della pineta dove è evidente un gradiente verso l'interno, con livelli freaticmetrici maggiori per i piezometrici più vicini ai Chiari d'acqua della Piallassa rispetto a quelli più interni.

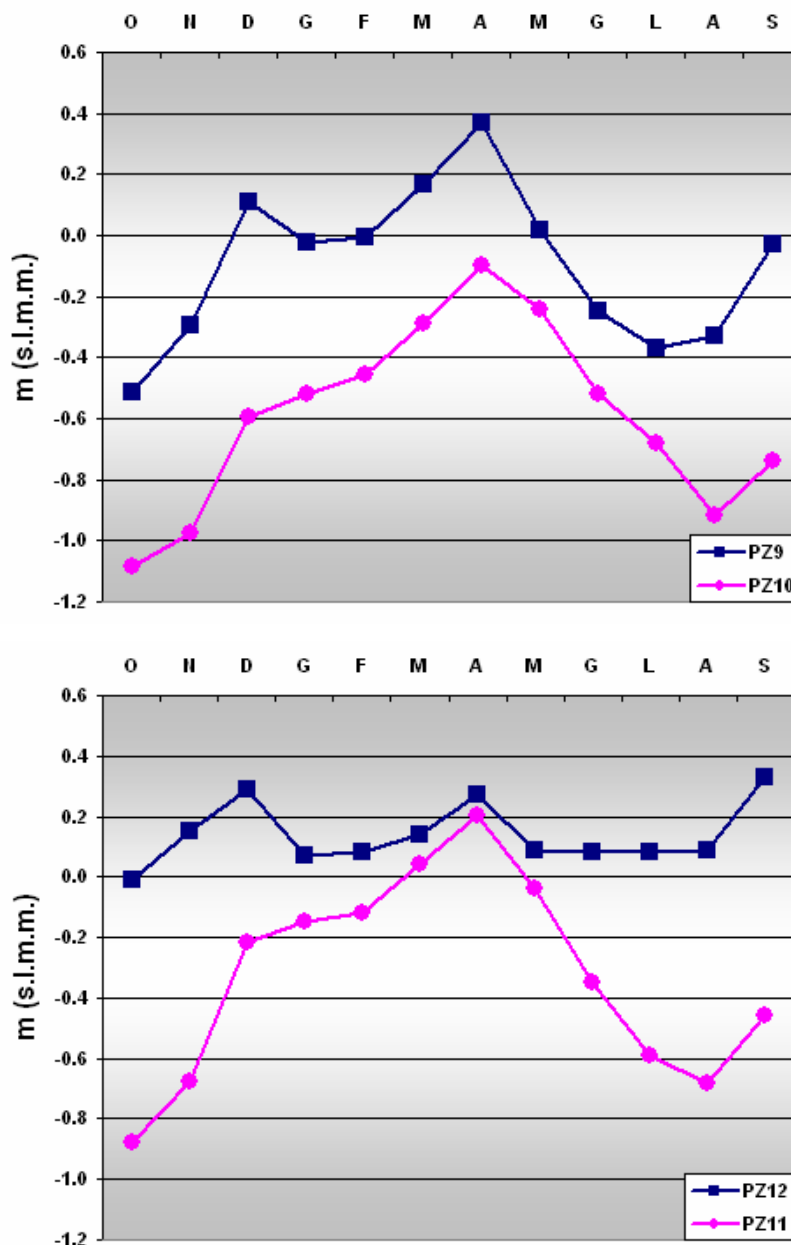


Fig. 5.9 – Confronto dell'andamento annuale dei livelli piezometrici per piezometri più vicini alla Piallassa (PZ 9 e 12) e piezometri più interni alla pineta (PZ 10 e PZ 11). Da notare il gradiente negativo che si instaura dalla Piallassa verso l'interno.

5.3.2. Ricostruzione delle mappe di isosalinità

Le mappe di salinità sono state create considerando la salinità superficiale registrata nei piezometri e quella rilevata nei canali, scoli e Chiari. Anche se l'evaporazione in alcuni condizioni può influire sulla salinità, lungo la linea di costa e la parte di Piallassa direttamente collegata con il mare si è imposta una salinità pari a quella del mare.

Per quanto riguarda i bacini d'acqua presenti nell'area (Valle Mandriole, Chiari, ect.) non si è considerato un dato puntiforme bensì un dato areale, omogeneo su tutto il bacino con un valore di salinità misurata nel punto monitorato.

L'analisi della distribuzione della salinità a diverse profondità è stata possibile solo per i dati piezometrici, e quindi su un'area ridotta, perchè i punti di monitoraggio profondi a disposizione sono minori rispetto a quelli superficiali e questo dovuto alla scarsa profondità dei canali e dei Chiari.

Dalle carte delle isoaline, emerge come il problema della salinizzazione dell'acquifero interessa parte della pineta (Fig. 5.10; Fig. 5.11). La salinità aumenta verso la Piallassa e in prossimità delle zone più depresse come la Buca del Cavedone.

Le aree più critiche risultano essere quella meridionale e l'area adiacente al Chiaro della Risega, unico Chiaro confinante con la pineta ancora aperto e collegato con il resto della laguna, dove si registrano valori di salinità elevati prossimi a quelli del mare. I canali e la Piallassa esercitano un'evidente alimentazione d'acqua ad elevata salinità. I canali di Via Cerba e lo Scolo Canala, entrambi presentano, a monte delle idrovore, una bassa salinità; la qualità ovviamente peggiora a valle di tali punti.

È importante notare che in tutte le mappe si registra una risalita di acqua salata lungo il fiume Lamone; la risalita di acqua marina è maggiore nel periodo estivo in seguito alla diminuzione della portata di acqua dolce alla foce. È ipotizzabile che anche i terreni a nord del Lamone, in corrispondenza della Valle delle Vene risentano del problema dell'intrusione di acqua salata per infiltrazione dagli argini del Lamone. Non disponendo però di punti di controllo in quest'area, non è stato possibile ampliare l'interpolazione.

Altri punti critici del sistema sono quelli presso il Taglio della Baiona dove, se le paratoie per impedire il riflusso di acque salate verso l'interno non funzionano correttamente, come è successo nel periodo autunnale, si ha la risalita di acqua marina fino a nord di Ponte Alberete.

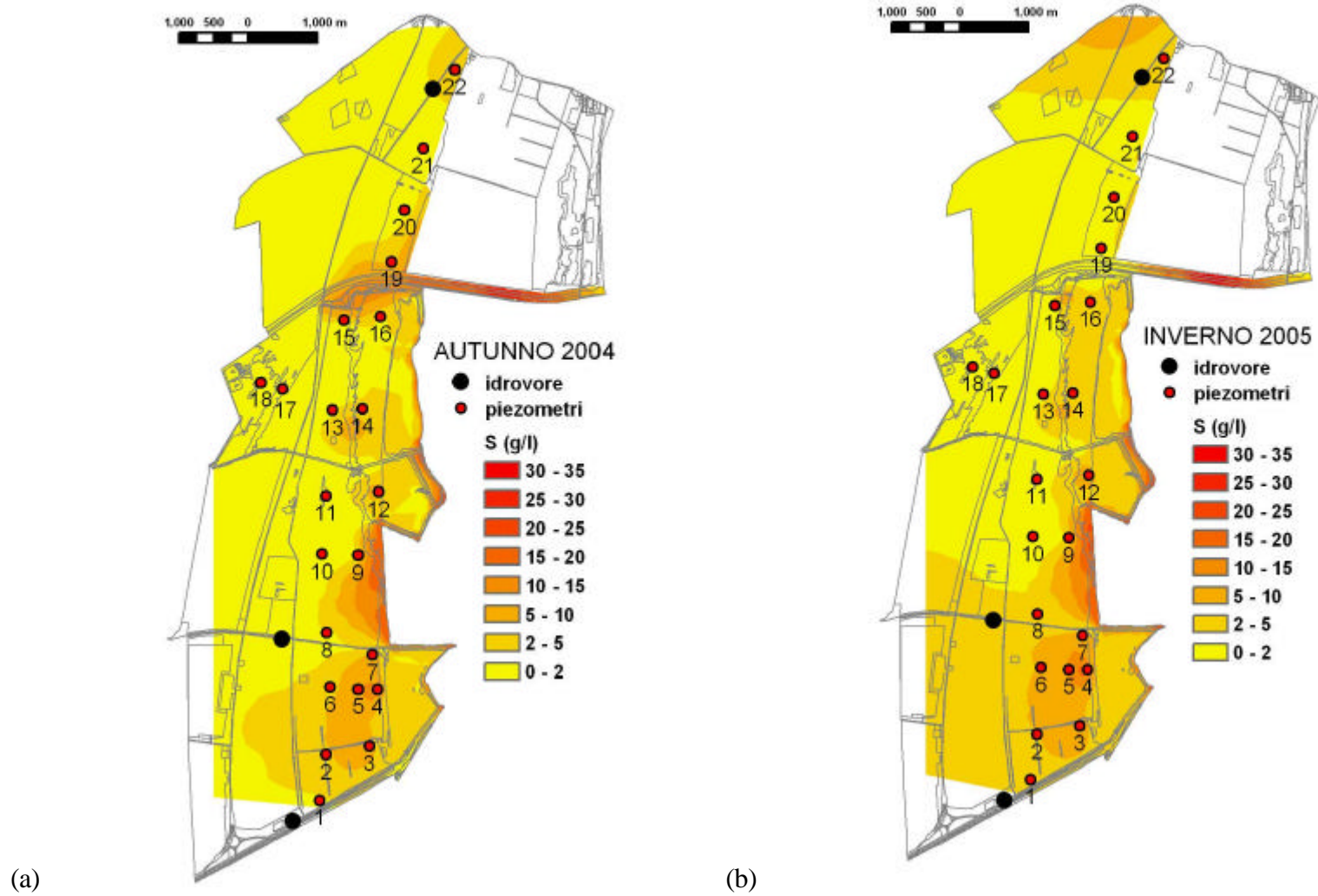


Fig. 5.10 – Mappa di distribuzione della salinità superficiale nel periodo autunnale (a) e nel periodo invernale (b).

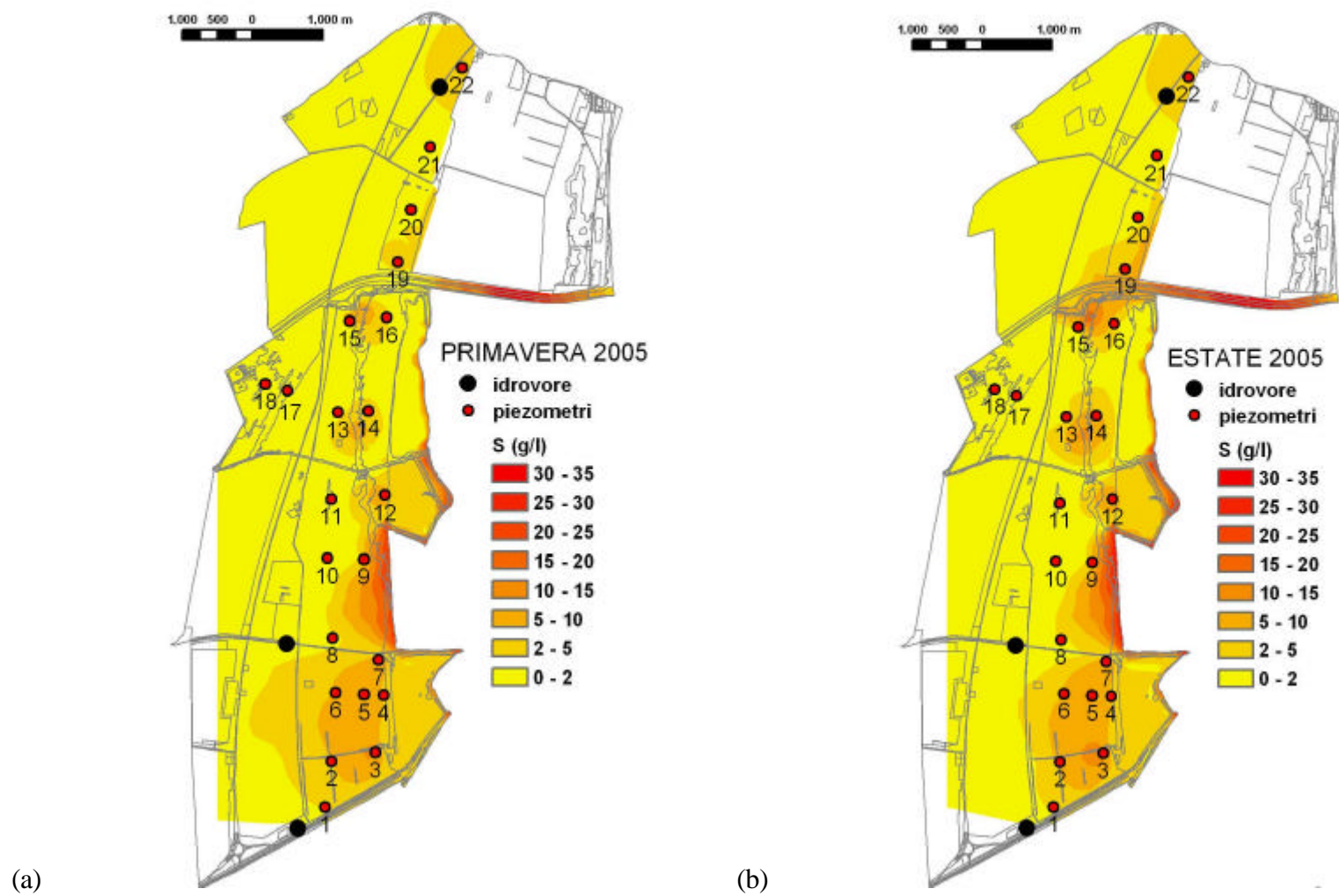


Fig. 5.11 - Mappa di distribuzione della salinità superficiale nel periodo primaverile (a) e nel periodo estivo (b).

Da un'analisi temporale delle mappe si evidenzia, passando dalla stagione invernale a quella estiva, una diminuzione della salinità soprattutto nella zona meridionale, attribuibile alle precipitazioni maggiori rispetto alle medie stagionali. Infatti l'inverno 2005 è stato più secco rispetto al normale (109 mm di pioggia contro i 134 mm medi) ma, soprattutto, la primavera e l'estate 2005 sono state particolarmente piovose e si sono registrati rispettivamente 112.3 e 312.4 mm di pioggia (Calendari meteorologici Azienda Sperimentale Mariani), valori decisamente superiori rispetto all'andamento medio (Tabella 4.1. pag. 41). Questo potrebbe spiegare l'anomalia nelle mappe della distribuzione di salinità superficiale.

I chiari d'acqua adiacenti alla pineta, che sono stati chiusi negli ultimi anni, ricevono acqua dolce proveniente dai canali di scarico delle idrovore, ma per opera del vento questa viene miscelata con l'acqua più profonda a salinità maggiore. Le variazioni stagionali non sono molto evidenti e i chiari presentano acqua da dolce a salmastra con valori medi di:

- 4.30 g/l in superficie e 4.69 g/l al fondo per il Chiaro del Cavedone;
- 2 g/l sia in superficie che al fondo per il Chiaro del Comune;
- 2.38 g/l in superficie e 3.39 g/l al fondo per il Chiaro del Pontazzo.

Il problema principale di questi Chiari è il basso carico idraulico, al massimo qualche cm sopra il livello medio mare, e quindi è insufficiente a contrastare l'intrusione salina dal fondo. La loro funzione di "cuscinetto" tra la Piallassa e la pineta viene a mancare ed, infatti, nei piezometri adiacenti alla Piallassa si registrano valori di salinità maggiori rispetto a quelli misurati nei chiari stessi.

Il Chiaro della Risega ha valori di salinità pari a quelli dell'acqua di mare, con valori medi di 20 g/l in superficie e 23-25 g/l al fondo lungo tutto il periodo di monitoraggio.

Vengono di seguito riportate le mappe stagionali della distribuzione della salinità superficiale e profonda considerando i soli dati piezometrici (Fig. 5.11; Fig. 5.12).

Con l'aumento della profondità, il valore della salinità aumenta e diminuiscono le "lenti" d'acqua dolce. La salinità profonda aumenta progressivamente nel periodo primaverile ed estivo, dove già alla profondità di 6 m (profondità dei piezometri) la falda presenta una salinità maggiore di 20 g/l per gran parte dei piezometri con valori massimi di 32.9 g/l (PZ12).

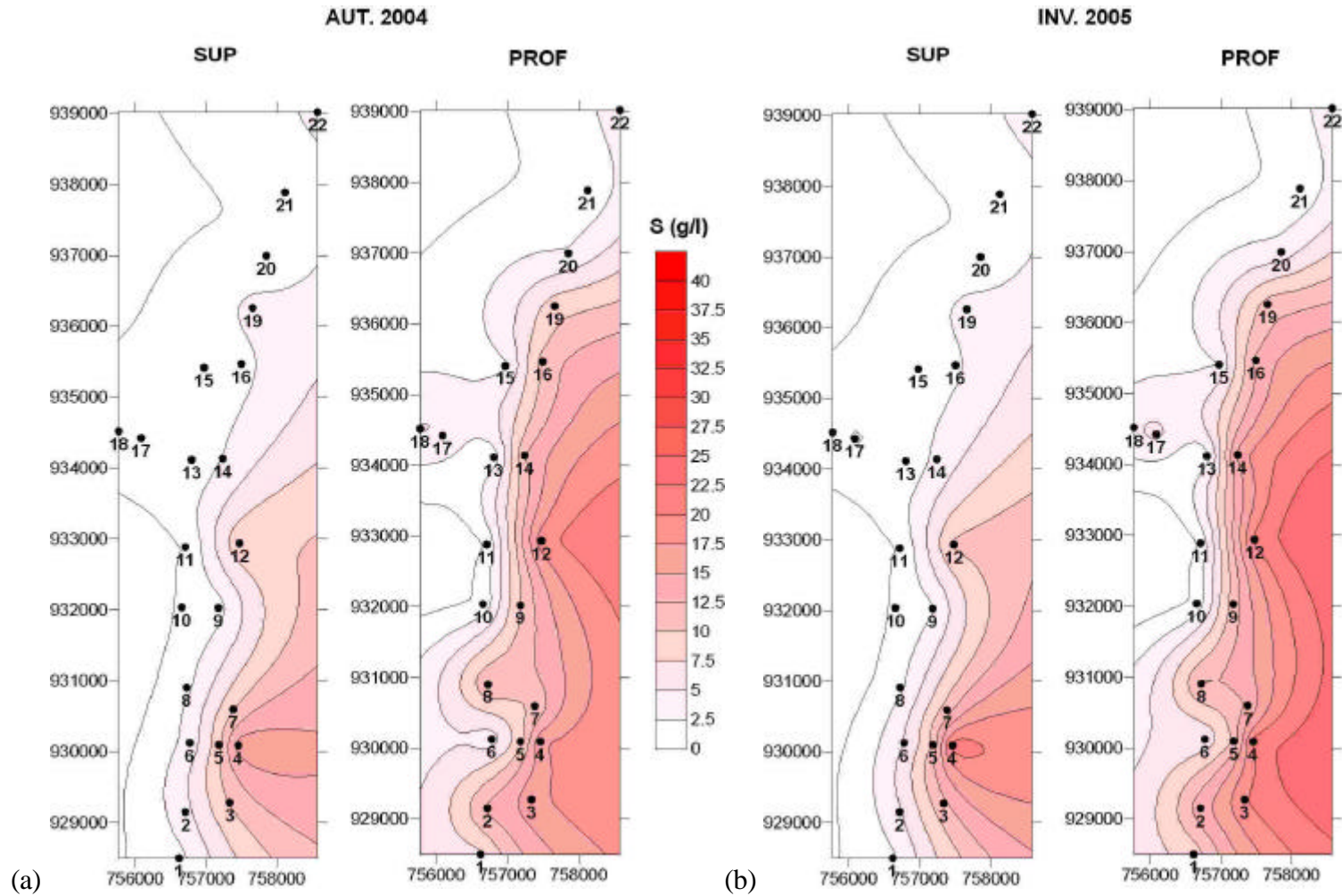


Fig. 5.12 - Mappe della distribuzione della salinità superficiale e profonda relative al periodo autunnale (a) ed invernale (b).

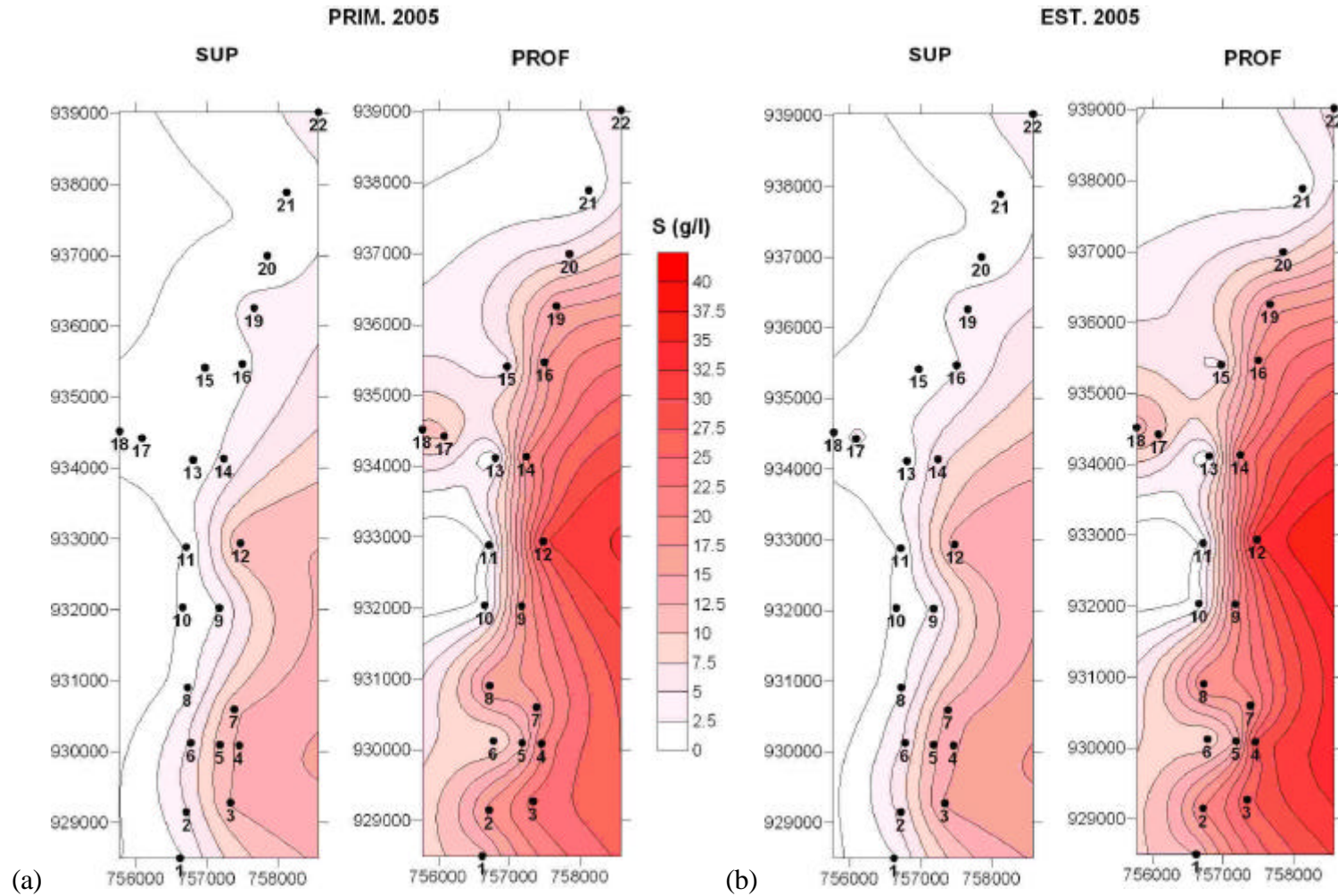


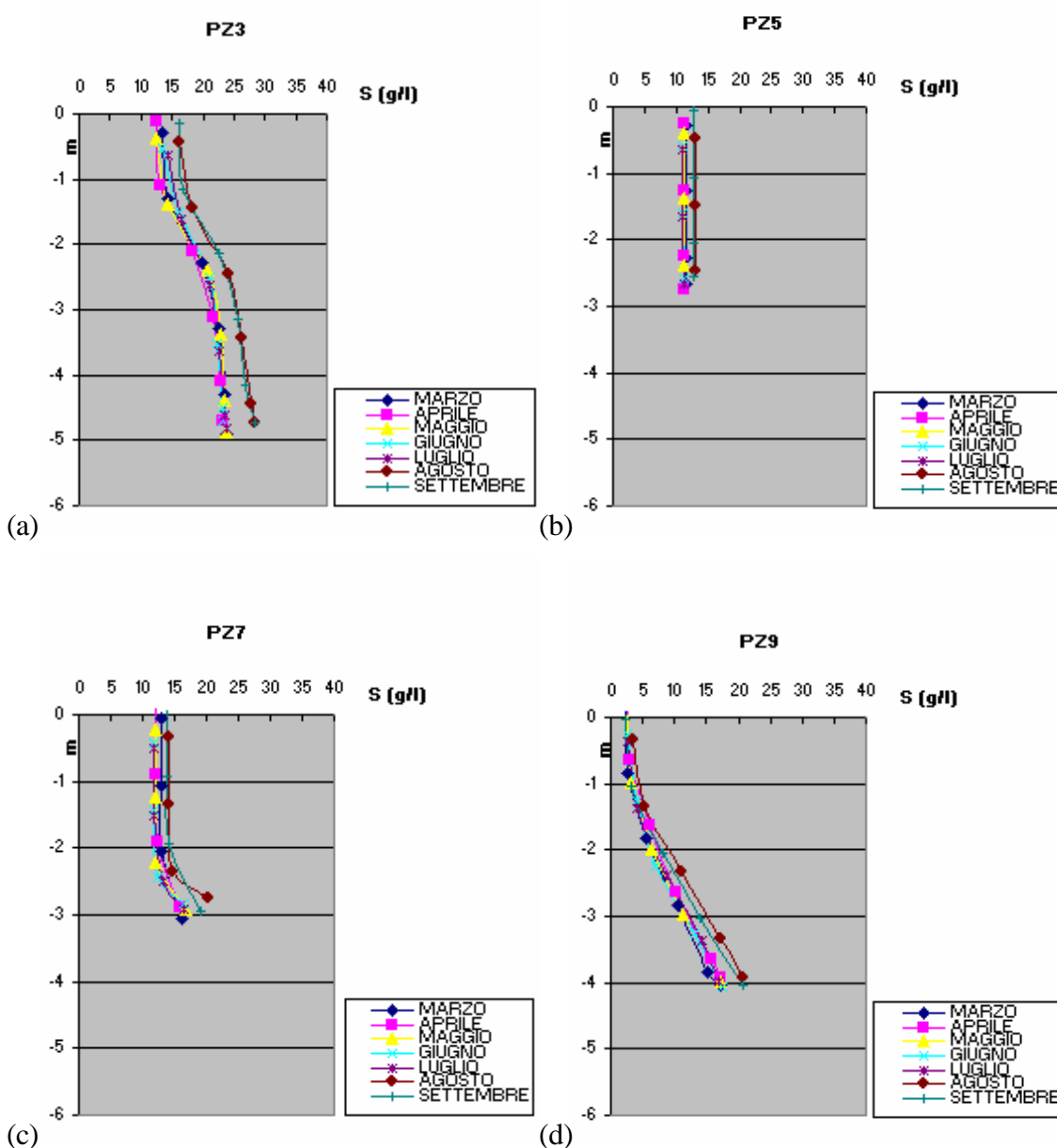
Fig. 5.13 – Mappe della distribuzione della salinità superficiale e profonda relative al periodo primaverile (a) ed estivo (b).

In Tabella 5.2 si riportano i valori medi della salinità ed i valori minimi e massimi della salinità superficiale e profonda relativa ai 22 piezometri in Pineta e Punta Alberete; non sono riportati i valori per il piezometro n.4 perché le misurazioni di salinità sono state influenzate da una prova di pozzo effettuata nell'aprile 2005 e che ha visto l'immissione di circa 40 litri di acqua nel piezometro. Ciò ha portato, per alcuni mesi, al perdurare di salinità molto basse rispetto all'andamento generale registrato nei precedenti mesi di monitoraggio e le medie non sono rappresentative.

Tabella 5.2 – Valori medi della salinità superficiale e profonda relativa ai 22 piezometri presenti nell'area di studio

PZ	Media S SUP. su anno (g/l)	MAX S SUP. su 4 stagioni (g/l)	MIN S SUP. su 4 stagioni (g/l)	Media S PROF. su anno (g/l)	MAX S PROF. su 4 stagioni (g/l)	MIN S PROF. su 4 stagioni (g/l)
PZ1	2.02	2.22	1.67	9.79	12.41	6.90
PZ2	4.86	5.68	4.33	16.37	20.14	12.99
PZ3	12.62	15.47	10.18	21.68	26.84	16.62
PZ4	#	#	#	#	#	#
PZ5	10.58	12.23	8.81	10.61	12.36	8.78
PZ6	4.78	5.34	3.51	6.30	7.99	3.75
PZ7	11.58	13.24	9.79	14.55	18.63	10.33
PZ8	1.80	1.99	1.39	15.74	20.31	12.46
PZ9	2.27	2.82	1.50	14.60	19.43	10.11
PZ10	0.39	0.47	0.33	0.64	0.79	0.52
PZ11	0.19	0.21	0.18	0.35	0.49	0.21
PZ12	11.70	14.16	9.59	25.66	32.88	19.32
PZ13	0.61	0.68	0.44	0.71	0.82	0.64
PZ14	3.90	6.72	2.59	17.80	22.31	12.64
PZ15	0.57	0.75	0.39	3.23	4.53	2.02
PZ16	1.99	2.24	1.75	15.31	19.28	11.19
PZ17	2.68	3.00	2.08	8.05	11.29	4.75
PZ18	1.29	1.55	1.09	8.56	13.73	4.54
PZ19	3.65	4.19	3.37	12.77	16.34	8.91
PZ20	0.32	0.36	0.29	4.82	6.76	2.75
PZ21	0.56	0.58	0.53	0.81	1.17	0.62
PZ22	3.72	4.33	3.13	4.51	6.09	3.61

L'acquifero presenta acque a salinità comprese tra 0.18 g/l e 21.46 g/l in superficie e tra 0.21 g/l e 32.88 g/l in profondità. Generalmente, nei piezometri più vicino alla Piallassa a volte non troviamo, come nel caso del PZ5 (Fig. 5.14 b) un gradiente di salinità con la profondità bensì una falda già salata fin dai primi metri, con valori pari a 10-15 g/l in superficie per tutto l'anno di monitoraggio. Quando troviamo un gradiente di profondità, quest'ultimo è generalmente molto superficiale, intorno ai 2-3 m di profondità e la salinità aumenta velocemente con la profondità. Si vedano alcuni profili di salinità dei piezometri (n.5, 7, 9, 12 e 16; rispettivamente Fig. 5.14 a, c, d, e, f) più vicini alla Piallassa.



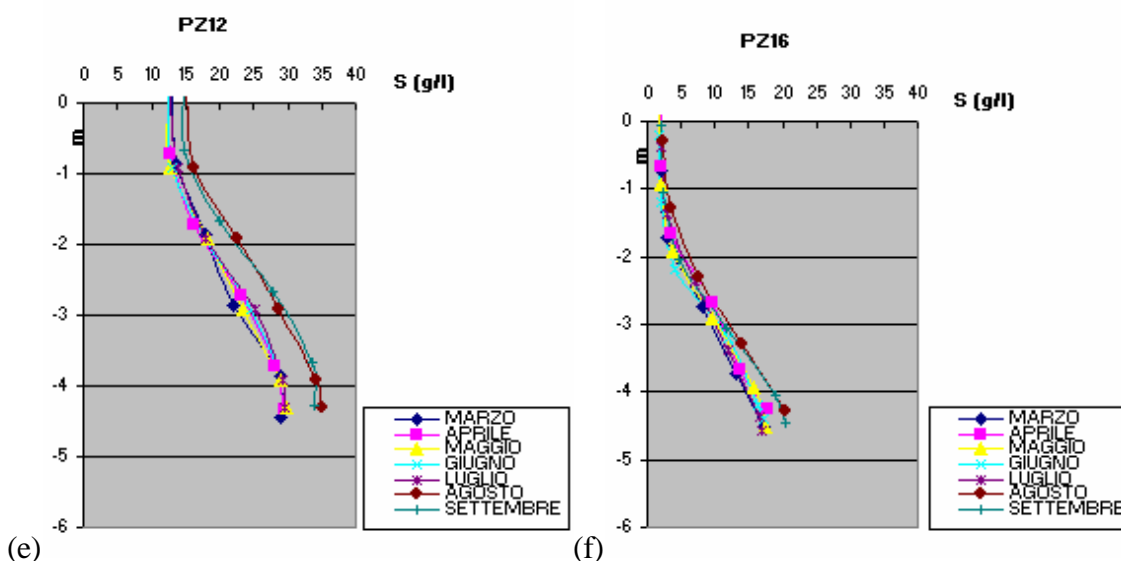


Fig. 5.14 – Profili verticali mensili di salinità per i piezometri più vicini alla Piallassa.

Solo in corrispondenza dei piezometri settentrionali (PZ 20-21-22), dove si registrano i livelli freaticometrici minori, troviamo un nucleo di acqua dolce che tende a permanere per tutto il periodo monitorato con una salinità media di 1.54 g/l e comunque minore di 7 g/l lungo tutta la colonna d’acqua (Fig. 5.15 a, b, c). Questi valori dipendono dalla topografia più elevata e dalla mancanza di una diretta influenza della Piallassa.

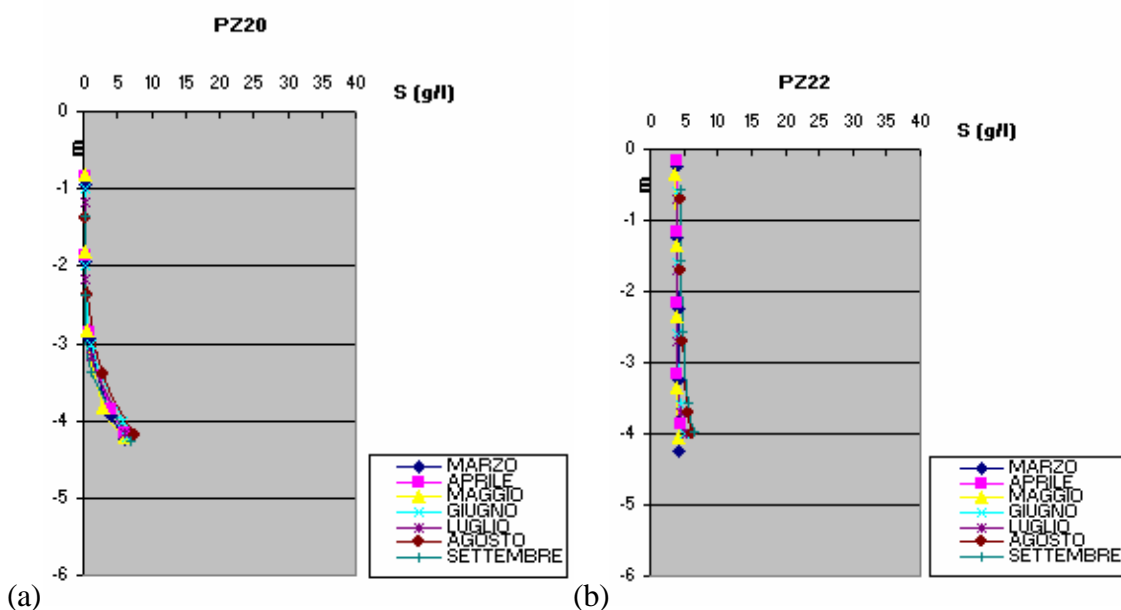


Fig. 5.15 - Profili verticali mensili di salinità per i piezometri a nord della Pineta.

5.4. RILIEVO DEL FIUME LAMONE

Dalle mappe di distribuzione della salinità emerge come, nella parte nord dell'area di studio, vi sia un problema di risalita di acqua salata lungo i canali che sfociano a mare, ed in particolare lungo il Fiume Lamone.

Nel luglio 2005 è stata eseguita una campagna d'indagine al fine di caratterizzare proprio la risalita dell'acqua salata lungo il Fiume Lamone. Procedendo dalla foce del fiume si è risaliti fino alla diga di sbarramento (circa 2 km a ovest di Punta Alberete) ricostruendo la batimetria centrale del canale e misurando i livelli di conducibilità elettrica in diversi punti e lungo tutta la colonna d'acqua utilizzando la sonda multiparametrica utilizzata anche per il monitoraggio in pineta.

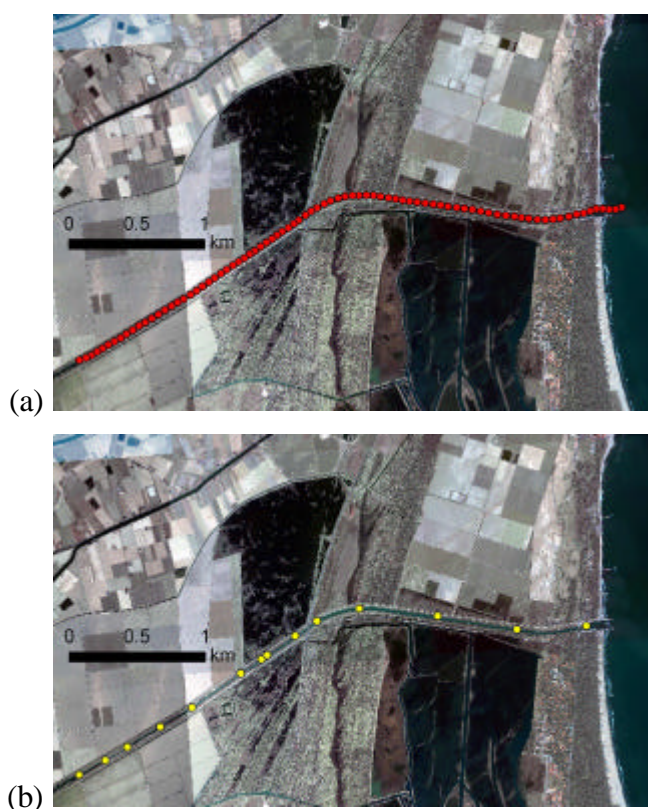


Fig. 5.16 – (a) Punti del rilievo batimetrico; (b) punti lungo i quali sono stati misurati la velocità della corrente ed i valori di conducibilità lungo tutta la colonna d'acqua.

I valori batimetrici sono stati corretti rispetto alle tavole di maree fornite dalla Capitaneria di Porto di Ravenna.

Inoltre, al fine di caratterizzare le correnti in uscita ed in entrata e quindi l'entità della risalita d'acqua salata durante il periodo d'alta marea, sono stati utilizzati un

correntometro (C31 OTT Universal Current Meter per misure in fiumi e canali aperti) ed un anemometro per misurare i valori di velocità e direzione della corrente e del vento.

Dal rilievo batimetrico emerge che il canale ha una profondità media lungo l'asse centrale di circa 2-3 m senza un gradiente di profondità verso mare; il fondale ha un andamento più o meno costante con la presenza di numerose buche (con profondità anche di 4 m) che permettono il ristagno dell'acqua salata. In prossimità della foce, all'estremità dei moli, è presente una barra di foce di piccole dimensioni perché costantemente dragata, elemento che potrebbe essere importante nel limitare la risalita del cuneo salino.

Dai dati della conducibilità elettrica viene confermato come il Lamone, una delle fonti di ricarica dell'acquifero, sia praticamente inquinato, ovvero presenti salinità elevate lungo tutta la colonna d'acqua a partire dalla foce fino ad arrivare alla diga (circa 8 km all'interno), con una salinità superficiale media di circa 10,6 g/l e una profonda di circa 26 g/l (Fig. 5.17). L'acqua presente a monte della diga, invece, è acqua dolce con valori di salinità pari a 0,21 g/l.

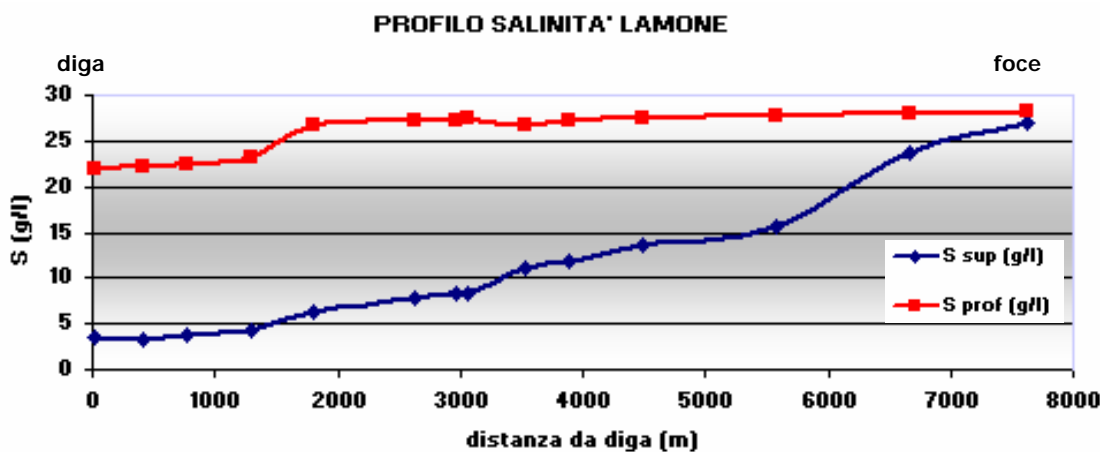


Fig. 5.17 – Profilo di salinità superficiale e profonda del Fiume Lamone (luglio 2005).

Con i dati di corrente si è calcolata la portata di acqua dolce alla diga e la portata alla foce.

La portata di acqua dolce alla diga/sbarramento è stata calcolata in base alle caratteristiche della diga rettangolare utilizzando la seguente formula (Fetter, 2001):

$$Q = 1.84 (L - 0.2H)H^{2/3} \quad \text{Eqn. 1}$$

dove

Q = portata (m³/s);

L = lunghezza diga (m);

H = altezza acqua sulla diga (m).

Nel nostro caso, avendo una diga lunga 7.8 m e con un'altezza dell'acqua sulla diga di 0.065 m, la portata d'acqua dolce è pari a 2.3 m³/s.

La portata alla foce è stata calcolata sulla base dell'equazione di Manning (Fetter, 2001) che permette di calcolare la velocità media in un canale aperto secondo la seguente formula:

$$V = 1/n R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Eqn. 2}$$

dove

V = velocità media (m/s);

R = raggio idraulico (m);

S = gradiente d'energia = inclinazione della superficie dell'acqua;

n = coefficiente di rugosità di Manning.

Il raggio idraulico R è calcolato come il rapporto tra la sezione d'area del canale ed il perimetro bagnato (Fig. 5.18).

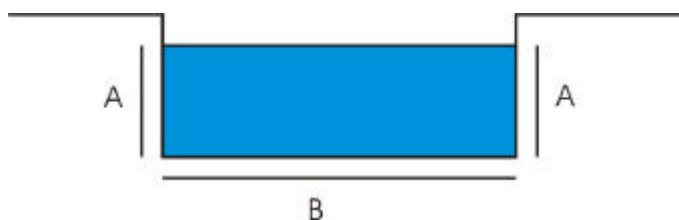


Fig. 5.18 – Determinazione dei fattori A e B in un canale aperto per il calcolo del raggio idraulico R.

La sezione d'area del canale è AB; il perimetro bagnato è A+B+A.

Per il calcolo di Manning in entrata al Lamone si sono utilizzati i dati delle sezioni fornite dall'Autorità dei Bacini Romagnoli e sono state fatte diverse assunzioni. Prima di tutto non si è considerata la sezione a foce perché si sarebbe avuta una sovrastima in quanto la larghezza della foce è maggiore rispetto a quella media del fiume. Quindi, è stata considerata la sezione a circa 300 m dalla foce (Fig. 5.19) ed in Tabella 5.3

vengono riportati i parametri A e B della sezione usati per il calcolo del raggio idraulico e dell'area della sezione.

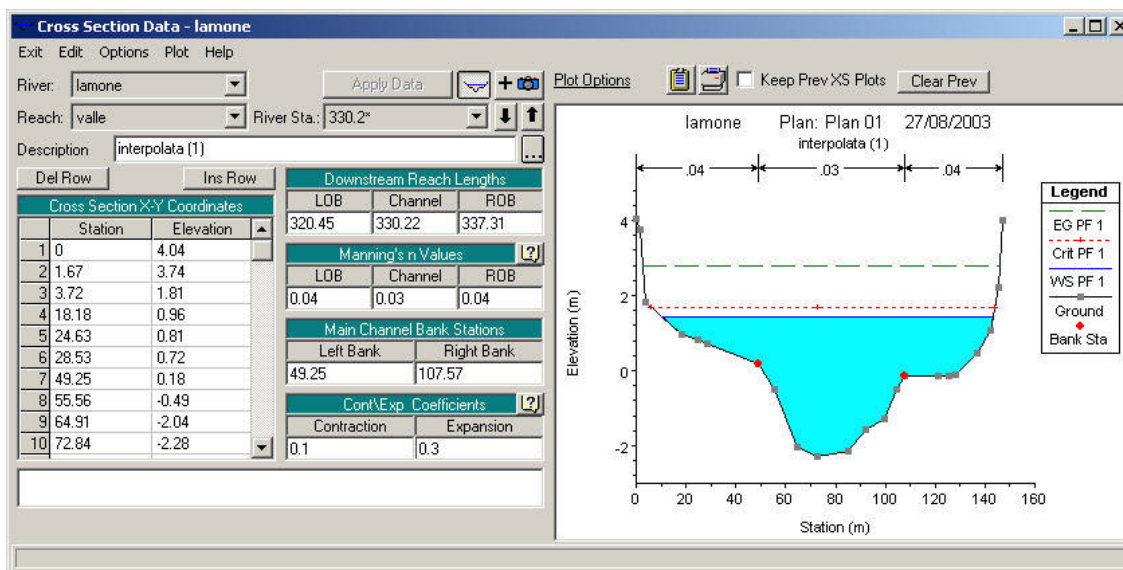


Fig. 5.19 – Sezione del Fiume Lamone considerata per il calcolo dell'acqua in entrata tramite l'equazione di Manning.

Tabella 5.3 – Parametri A e B della sezione in Fig. 5.19 usati nel calcolo del raggio idraulico R e dell'area di sezione A

	R (m)	A (m ²)
Asx = 20.6 m	$\frac{(A_{medio} \cdot B)}{(A_{sx} + B + A_{dx})}$ $= 7.06$	87.2
Adx = 26.4 m		
Amedio = 23.5 m		
B = 20.2 m		
H = 2.22 m		

Il coefficiente di rugosità n è stato imposto uguale a 0.038-0.040 ed è stato ricavato sempre dai dati dell'Autorità di Bacino come media di tutti i valori di n riportati per le sezioni effettuate dalla foce fino alla diga. Se non si disponesse di queste informazioni, l'USGS ha comunque pubblicato un elenco di tutti i valori di n associati alle diverse tipologie di corsi d'acqua (Barns, 1967).

Infine, dal rilievo batimetrico e dai dati relativi alle sezioni del canale, emerge un valore di S (slope) del canale molto piccolo (~ 0.0008). Quindi, ciò che influenza la risalita di acqua salata è la marea che ha un'escursione media di ± 40 cm. Si sono,

quindi, calcolati i valori di S come rapporto tra la marea e la lunghezza del tratto di canale dalla foce alla diga (~ 8000 m). Ne deriva che quando si ha la marea massima (+40 cm) S è uguale a $5 * 10^{-5}$ mentre se di discretezza la curva di marea e si considera un'escursione mareale media di 20 cm, S_{medio} è uguale a $2.5 * 10^{-5}$.

La velocità ottenuta è moltiplicata per l'area della sezione presa in considerazione (Fig. 5.19; Tabella 5.3) così da ottenere la portata di acqua alla foce, ovvero la quantità di acqua marina che risale lungo il fiume durante il periodo di alta marea. In Tabella 5.4 sono riportati i risultati dei calcoli per i diversi valori di S considerati.

Tabella 5.4 – Risultati dei calcoli di velocità e portata d'acqua alla foce per i due valori di S considerati (in entrambi i casi: $n = 0.004$; $R = 7.06$ m; $A = 87.20$ m²)

	V (m ² /s)	Q = VA (m ³ /s)
S = $2.5 * 10^{-5}$ (marea = 20 cm)	0.46	40.17
S = $5 * 10^{-5}$ (marea = 20 cm)	0.65	56.81

Confrontando quindi le portate alla diga e alla foce si capisce come durante le ore di alta marea risalga una gran quantità di acqua salata da mare che, più o meno si stratifica, ma contamina tutto il fiume fino allo sbarramento, aiutata anche dalla batimetria del fiume che non presenta un gradiente di profondità verso mare e dalla presenza di buche profonde nel fondale che permettono il ristagno di acqua salata. La quantità di acqua salata che entra dalla foce durante l'alta marea è circa 17 volte maggiore della portata di acqua dolce alla diga.

5.5. RISULTATI

I risultati delle osservazioni effettuate hanno evidenziato che i due sistemi, superficiale e sotterraneo, sono in stretta continuità idraulica. La piezometria nell'area pinetale, per lo più governata dal sistema di drenaggio, risulta essere sempre depressa con gradiente in direzione E-W concorrendo a favorire l'intrusione salina al fondo e sul lato della Piallassa.

Emerge che l'acquifero, per molte zone sotto il livello del mare, è per la maggior parte salato e instabile dal punto di vista statico e dinamico, con una minore resistenza

all'intrusione dell'acqua salata. La superficie freatica si colloca a pochi cm sopra il l.m.m. solo in corrispondenza dei canali e delle dune relitte, topograficamente più elevate, all'interno della pineta. Le piccole riserve di acqua dolce derivano dalla ricarica superficiale per infiltrazione.

Anche i corpi idrici superficiali, come i Chiari d'acqua confinanti con la pineta, risultano essere caratterizzati da acqua dolce-salmastra che galleggia su una falda quasi già completamente salata. Infatti nei piezometri a ridosso della Piallassa non troviamo un gradiente di salinità con la profondità bensì una falda già salata fin dai primi metri con salinità maggiori rispetto a quelle che si registrano nei Chiari chiusi confinanti con la pineta. Questo può far pensare ad una risalita di acqua salata dal fondo e non ad una alimentazione superficiale.

Vi è anche un problema di risalita d'acqua lungo i canali (Lamone e Taglio della Baiona) e sicuramente non è da sottovalutare l'effetto della cattiva manutenzione delle opere idrauliche tra la pineta e la Piallassa.

I canali che sfociano a mare o sono in diretto contatto con la Piallassa permettono l'ingresso di acqua salata all'interno della pineta determinando inquinamento da acqua salata per infiltrazione diretta non presentando alcun tipo di impermeabilizzazione del loro fondo. Il loro effetto viene in parte aggravato durante le stagioni calde grazie alla minor piovosità e alle maggiori temperature che causano un aumento dell'evaporazione e quindi una concentrazione dei sali nell'acqua.

Generalmente l'acquifero è caratterizzato da lenti di acqua dolce superficiali localizzate, di origine prevalentemente meteorica, che galleggiano su falda profonda più o meno salata, e possono variare stagionalmente di spessore e area.

6. CARATTERIZZAZIONE DELL'ACQUIFERO COSTIERO

6.1. RICOSTRUZIONE LITO-STRATIGRAFICA

La ricostruzione della lito-stratigrafia dell'acquifero freatico è stata svolta attraverso l'analisi e l'elaborazione dei sondaggi geognostici effettuati nell'area ravennate negli ultimi 20 anni che sono raccolti nella banca dati della Regione Emilia-Romagna.

L'elaborazione è stata eseguita con lo scopo di ricavare alcune sezioni dell'area, ricostruire la distribuzione percentuale di sabbia e argilla e definire la profondità e l'andamento del basamento argilloso dell'acquifero freatico.

La selezione dei sondaggi da utilizzare per le elaborazioni è stata basata:

- sulle profondità raggiunte dalla prova, scegliendo dati omogenei e preferendo sondaggi profondi che arrivassero possibilmente al basamento argilloso;
- sulla distribuzione dei punti, cercando di avere una distribuzione omogenea dei dati.

Le mappe riportate nel presente capitolo sono state ricostruite con le tecniche e il metodo di interpolazione usato anche per le mappe delle isofreatiche e della distribuzione di salinità descritto nel capitolo 5.

6.1.1. Sezioni litostratigrafiche

Dal momento che per i sondaggi disponibili l'interpretazione è stata effettuata utilizzando scale litologiche diverse, si è effettuata in prima analisi una omogeneizzazione delle prove raccolte. Partendo dai sondaggi geognostici è stata considerata la "descrizione principale" tralasciando tutte le informazioni di dettaglio e sono state introdotte alcune semplificazioni: la scala litologica inizialmente considera per omogeneizzare i sondaggi fa riferimento alla scala di Udden – Wentworth in cui le classi litologiche dipendono dalla dimensione dei grani del sedimento. Successivamente, data la difficoltà di tracciare correlazioni con un numero elevato di classi granulometriche, per elaborare alcune sezioni litostratigrafiche si è ulteriormente semplificata la classificazione in Tabella 6.1 creando una legenda grafica con un

minimo di 3 classi (sabbia, limo, argilla) in modo da rendere più semplice e chiara la rappresentazione della suddivisione dell'acquifero.

Tabella 6.1 – Scala granulometrica di Udden – Wentworth in relazione con la scala litologica usata per omogeneizzare i sondaggi e classificazione semplificata usata per le sezioni riportate in Fig. 6.2.

Scala granulometrica di Udden – Wentworth			Scala litologica usata per omogeneizzare i sondaggi		Semplificazione usata per le sezioni
mm	<i>f</i>	litologia	<i>f</i>	litologia	litologia
2-1	-1-0	sabbia molto grossolana	-1-0	sabbia molto grossolana	Sabbia
1-1/2	0-1	sabbia grossolana	0-1	sabbia grossolana	
1/2-1/4	1-2	sabbia media	1-2	sabbia media	
1/4-1/8	2-3	sabbia fine	2-3	sabbia fine	
1/8-1/16	3-4	sabbia finissima	3-4	sabbia limosa	
1/16-1/32	4-5	silt grossolano	4-5	limo sabbioso	limo
1/32-1/64	5-6	silt medio	5-6	limo	
1/64-1/128	6-7	silt fine	6-7	limo argilloso	
1/128-1/256	7-8	silt finissimo	7-8	argilla limosa	argilla
<1/256	>8	argilla	>8	argilla	

Sono state considerate 5 sezioni perpendicolari a costa e, dove possibile, si è cercato di fare alcune correlazioni (Fig. 6.1).

In Fig. 6.2 sono riportati i sondaggi nella loro interpretazione semplificata.

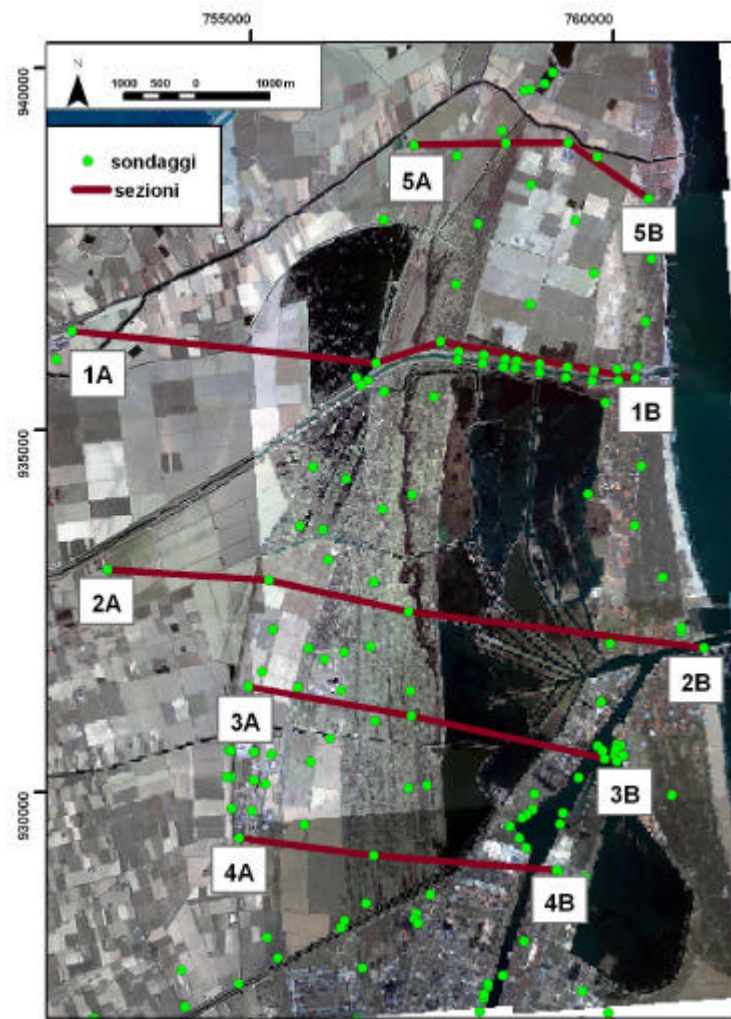
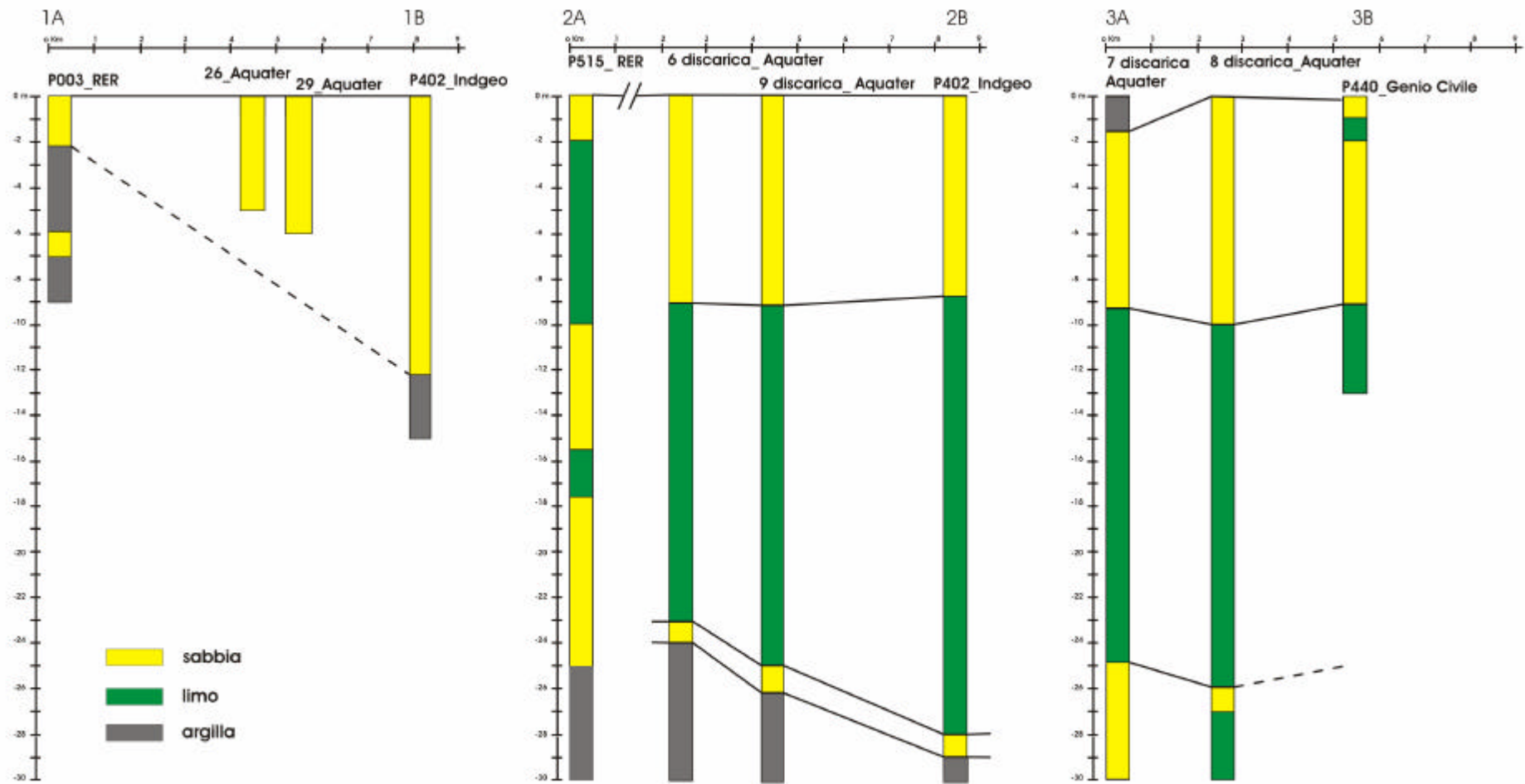


Fig. 6.1 – Posizione dei sondaggi geognostici e delle sezioni litostratigrafiche elaborate.



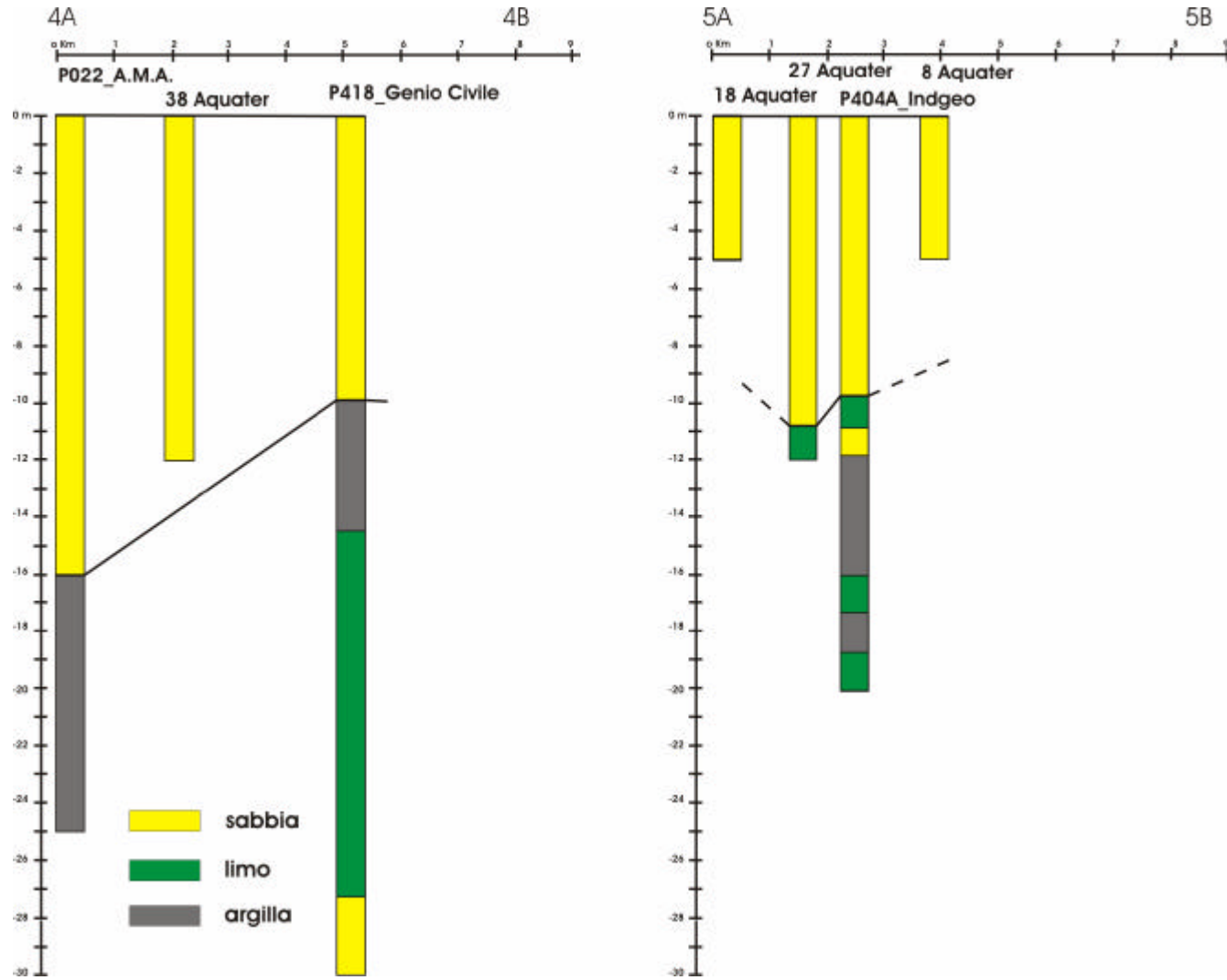


Fig. 6.2 - Colonne litostratigrafiche semplificate delle sezioni perpendicolari a costa (cfr. Fig. 6.1)

L'acquifero è costituito prevalentemente da sabbia medio-fine; la componente sabbiosa è presente soprattutto in superficie ed in alcuni casi tende a diminuire man mano che ci si sposta verso l'interno (sezione 1-3 Fig. 6.2). Si tratta comunque di sabbia medio-fine con rari e sottili livelli limosi. Nelle zone agricole a ovest della pineta le sabbie superficiali possono essere ricoperte da un piccolo strato di materiale più fine (limo, argilla limosa) dovuto alla recente bonifica (sezione 2 e 3 Fig. 6.2).

La componente limosa (sabbia limosa, limo sabbioso) tende ad aumentare dai 10 metri di profondità e generalmente dai -10 ai -22 - -25 m troviamo limi argillosi e sabbiosi. A volte i limi possono sfumare gradualmente in sabbia fine e/o limosa e quindi si viene a creare un altro strato sabbioso più sottile rispetto a quello superficiale (sezione 3-5 Fig. 6.2). In generale la componente fine è dominante in questa parte profonda fino ad arrivare al basamento impermeabile dell'acquifero (circa -25 - -30 m), costituito da uno strato più o meno consolidato di argilla e argilla limosa che nelle sezioni riportate è stato possibile ricostruire solo per la sezione 2.

In definitiva quindi, l'acquifero è caratterizzato da un'unità sedimentaria multistrato e si presenta come un mezzo eterogeneo, e cioè che varia le proprie caratteristiche nello spazio.

6.1.2. Distribuzione di sabbia e argilla

Si è applicata un'ulteriore selezione e semplificazione dei sondaggi geognostici presenti per l'area per arrivare a definire il rapporto sabbia/argilla in superficie (primi 5 m di profondità di sondaggio) ed in profondità (dai 15 ai 30 m per i sondaggi sufficientemente profondi). Questo ha permesso di caratterizzare in parte l'acquifero e la presenza e distribuzione dell'argilla di basamento.

Le mappe in Fig. 6.3 sono state ritagliate in maniera diversa perché le informazioni per ricostruire la distribuzione della sabbia profonda sono minori dato il minor numero di sondaggi profondi fino al basamento.

Si sono ricostruite le stratigrafie dei sondaggi sulla base della seguente classificazione in sabbia delle varie classi granulometriche:

- Sabbia > 75% comprendente: sabbia grossolana, media e fine;
- 50% < sabbia < 75% comprendente: sabbia limosa e limo sabbioso;
- 25% < sabbia < 50% comprendente: limo, limo argilloso;
- Sabbia < 25% comprendente: argilla limosa, argilla .

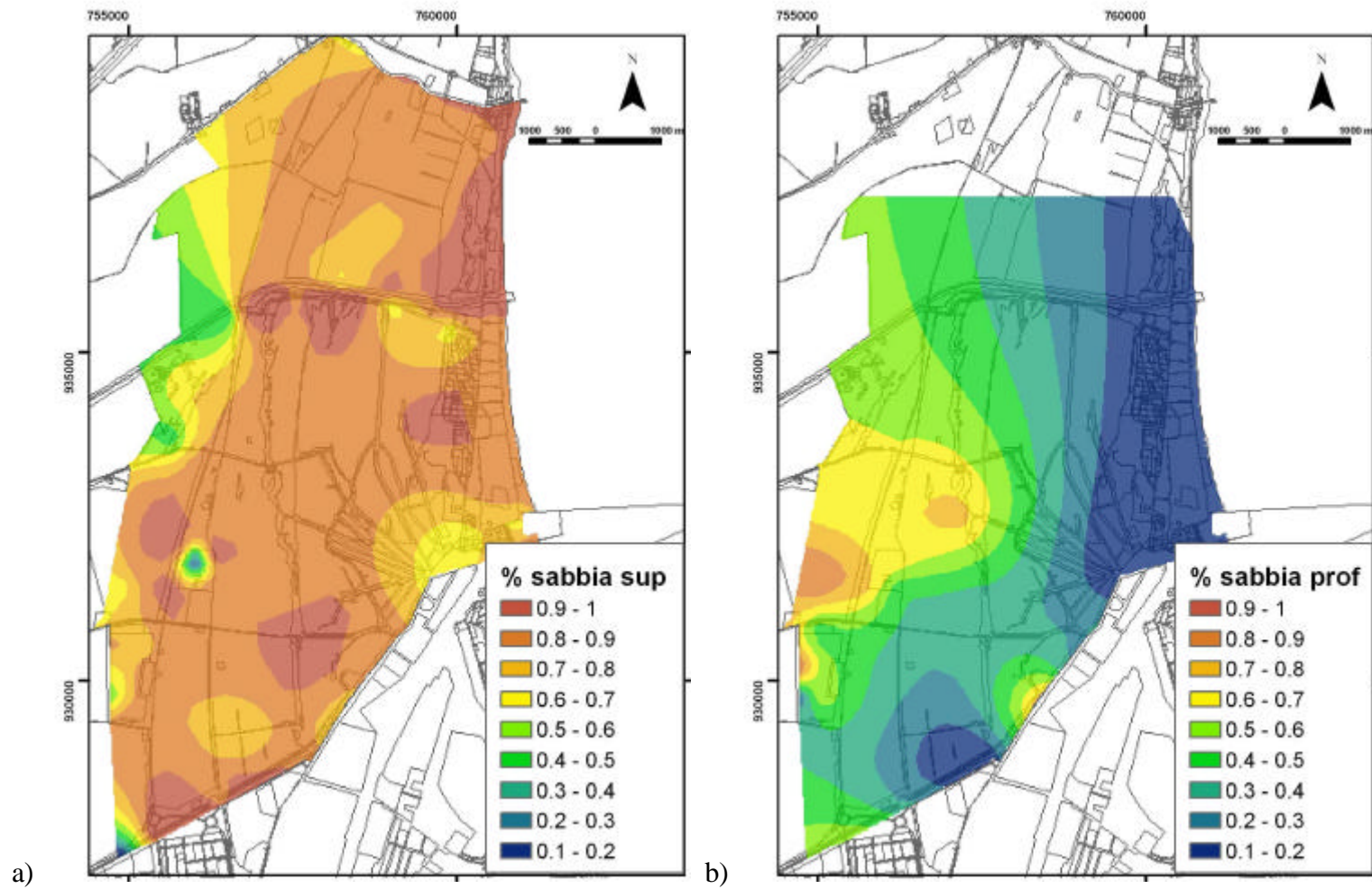


Fig. 6.3 – Distribuzione percentuale di sabbia/argilla in superficie (a) ed in profondità (b).

Come mostrano le mappe in Fig. 6.3, in superficie è dominante la percentuale di sabbia che diminuisce verso ovest, in corrispondenza dei terreni agricoli che costituiscono parte della fascia di colmata del Lamone, dove prevale la componente limoso- argillosa. È presumibile che la percentuale di sabbia superficiale in Piallassa sia minore di quella rappresentante dalla mappa (Fig. 6.3 a) in seguito alla sedimentazione di uno strato superficiale di materiale fine (limo e fango) apportato dalle acque della laguna.

6.1.3. Ricostruzione del basamento

La ricostruzione dell'andamento e della profondità del basamento dell'acquifero freatico (Fig. 6.4) è stata effettuata sulla base della profondità delle argille ricavata dai sondaggi (Fig. 6.1) e sulla base delle elaborazioni in Fig. 6.3.

In Fig. 6.4 vengono riportate la mappa dell'andamento della profondità del basamento argilloso con le rispettive isopache e la rappresentazione 3D.

Il basamento ha una profondità che va dai -30 m in prossimità della linea di costa e diminuisce fino ai -25 - -22 m spostandosi verso ovest; vi è, inoltre, una tendenza all'approfondimento in direzione nord.

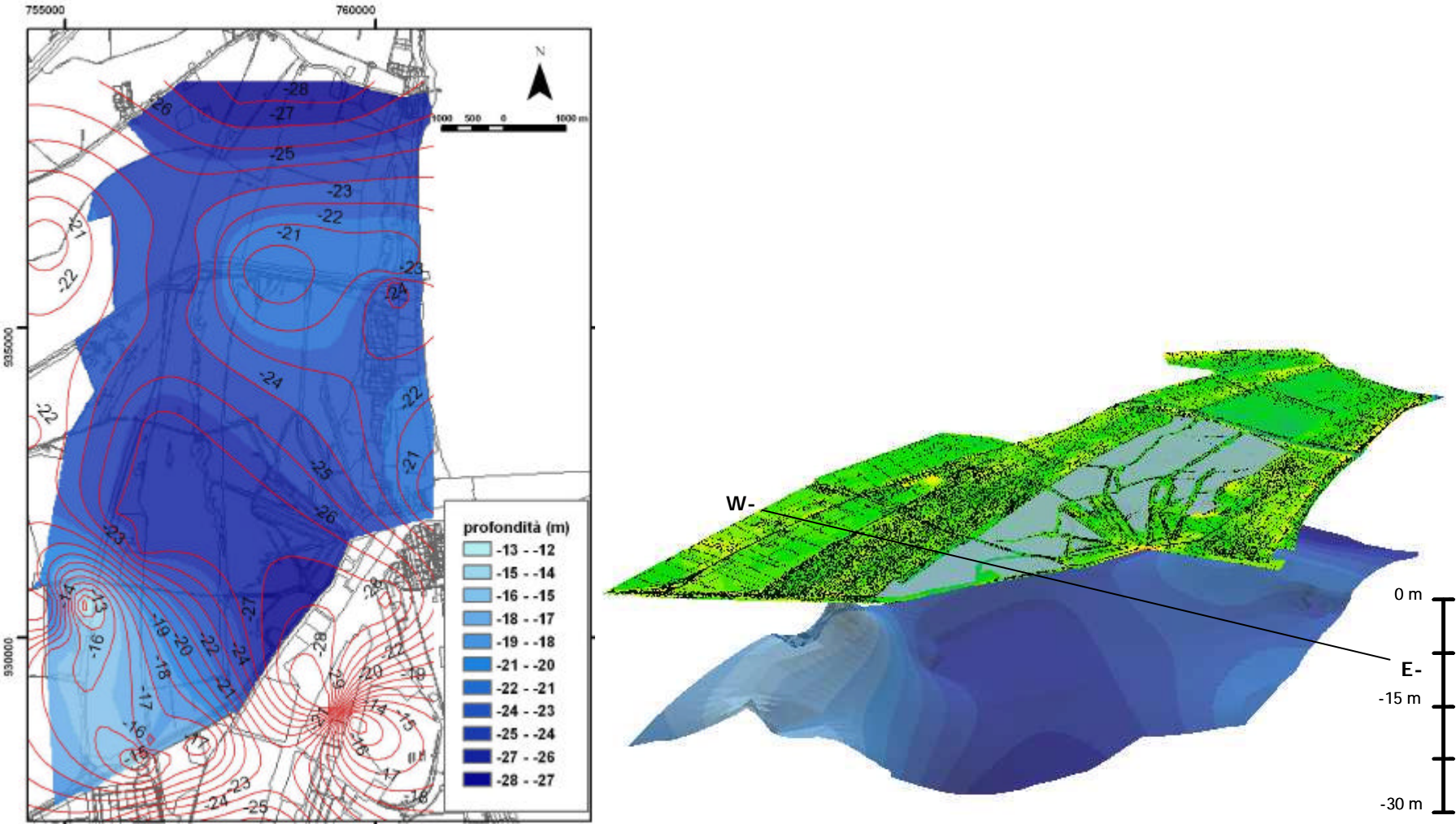


Fig. 6.4 – Andamento del basamento argilloso

6.2. DETERMINAZIONE DELLA CONDUTTIVITÀ IDRAULICA

Per definire i parametri idrodinamici dell'acquifero e spiegare la ragione degli alti valori di salinità registrati durante la campagna di monitoraggio si è determinata la conduttività idraulica dell'acquifero. Inizialmente si sono calcolati analiticamente i valori di conduttività idraulica partendo dai dati di monitoraggio relativi all'acquifero di Cervia (Ulazzi, 2003). In seguito, i valori ottenuti sono stati confrontati con i dati in letteratura per uguale tipologia di materiale e con dati diretti ottenuti con prove di pozzo, o *slug test*, effettuati in alcuni dei punti più rappresentativi dell'area di studio.

6.2.1. Calcolo analitico della conduttività idraulica

Gli acquiferi localizzati vicino a corpi soggetti a marea, come nel nostro caso la Piailassa Baiona, sono soggetti ad oscillazioni di breve termine del carico idraulico a fronte dell'oscillazione della marea. Tali oscillazioni sono maggiori più vicino a costa e diminuiscono andando verso l'interno dove si risente in maniera minore dell'effetto tidale.

Per un acquifero confinato, come in Fig. 6.5, ad una distanza x dalla costa, l'ampiezza H_x della fluttuazione tidale è data da:

$$H_x = H_0 \exp\left(-x\sqrt{\frac{pS}{t_o T}}\right) \quad \text{Eqn. 1}$$

dove:

H_0 = escursione tidale [L];

t_o = periodo di un'oscillazione [T];

S = storatività o coefficiente di immagazzinamento (adimensionale);

T = trasmissività [L^2T^{-1}].

La trasmissività T di un acquifero esprime il volume d'acqua che può essere trasmesso orizzontalmente per unità di spessore in un acquifero saturo con gradiente idraulico uguale a 1 ed è data da:

$$T = bK \quad \text{Eqn. 2}$$

dove:

K = conduttività idraulica [L^2T^{-1}];

b = spessore dell'acquifero [L].

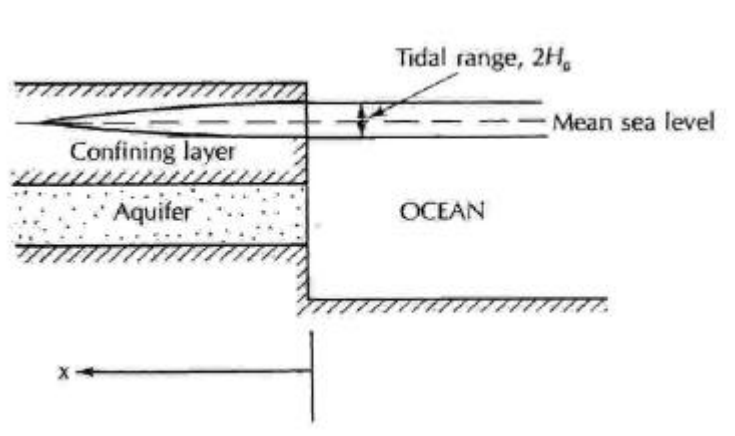


Fig. 6.5 – Effetto della marea sulla superficie piezometrica di un acquifero costiero (da Fetter, 2001)

Il *time lag* tra l'alta marea ed il picco del livello dell'acqua di falda è dato da:

$$t_t = x\sqrt{t_0 S / 4pKb} \quad \text{Eqn. 3}$$

Se l'oscillazione di marea è piccola rispetto allo spessore dell'acquifero saturo, le equazioni 1 e 3 possono essere applicate anche ad un acquifero non confinato. (Erskine, 1991).

Quindi, utilizzando i dati di monitoraggio del dottorato di E. Ulazzi (monitoraggio di 48 ore di 3 piezometri a costa, Cervia) è stato calcolato lo sfasamento temporale tra l'oscillazione tidale e l'andamento della falda freatica e si sono ottenuti i valori di conduttività idraulica in Tabella 6.2.

Tabella 6.2 – Parametri dell'acquifero di Cervia utilizzati nell'equazione 3 per il calcolo della conduttività idraulica.

t_t (h)	5	6	5
t_o (h)	16	13	15
S	0.2	0.18	0.18
x (m)	40	40	40
b (m)	18	18	18
K (m/giorno)	21.7	11	18.3

I valori di K calcolati possono essere validi se confrontati con quelli in letteratura (Tabella 6.2) per uguale tipologia di materiale (es. una sabbia ben cernita come quella presente in pineta) e con quelli ricavati con gli *slug test* (par. 6.2.2)

Tabella 6.3 – Range di valori di conduttività idraulica per tipologia di materiale (da Fetter, 2001). (In rosso la classe all'interno della quale ricadono sia i valori di conduttività calcolati analiticamente che quelli ottenuti direttamente con gli *slug test*.)

MATERIALE	K (cm/sec)
Argilla	$10^{-9} - 10^{-6}$
Limo, limo sabbioso, sabbia argillosa	$10^{-6} - 10^{-4}$
Sabbia limosa, sabbia fine	$10^{-5} - 10^{-3}$
Sabbia ben cernita	$10^{-3} - 10^{-1} \sim 1 - 86$ m/giorno

6.2.2. Slug Test

Gli *slug test* sono delle prove in pozzo che permettono di determinare il valore della conduttività idraulica, e cioè della velocità con cui un fluido si muove in un mezzo poroso.

Per gli *slug test* effettuati nell'area di studio è stato utilizzato il metodo di “Bouwer & Rice” (Fetter 2001) che consente di interpretare i dati derivati da una prova a carico variabile per immissione di acqua in foro, applicabile ad acquiferi costieri non confinati, con pozzi incompleti o completi. La geometria del pozzo per questo metodo è rappresentata in Fig. 6.6.

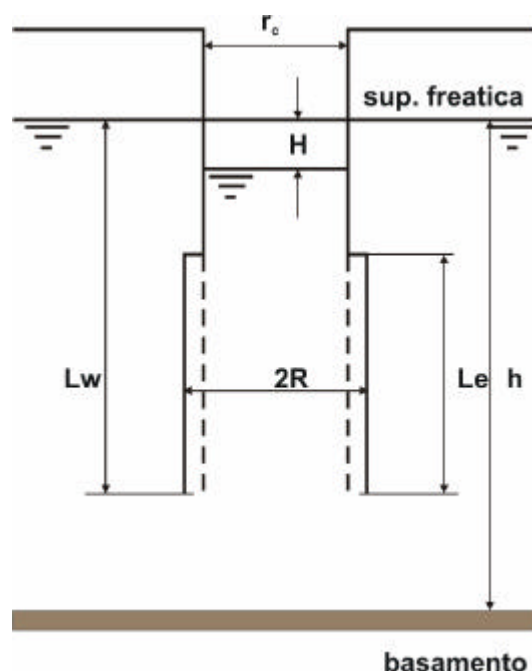


Fig. 6.6 – Geometria e parametri per uno *slug test* con il metodo di Bouwer & Rice (da Fetter, 2001; modif.).

L'equazione di Bouwer e Rice è:

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_e/R)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right) \quad \text{Eqn. 4}$$

dove:

r_c = raggio del pozzo [L];

R_e = distanza radiale efficace su cui il carico idraulico è dissipato [L];

R = raggio del pozzo con rivestimento [L];

L_e = lunghezza dei filtri [L];

H_0 = abbassamento della superficie freatica in corrispondenza del pozzo al $t = 0$ [L];

H_t = abbassamento della falda al tempo $t = t$ [L];

Tuttavia non c'è modo per stimare il valore R_e per un dato pozzo; Bouwer (Bouwer & Rice, 1976; Bouwer, 1989) propose quindi la seguente relazione per calcolare il rapporto $\ln(R_e/R)$:

$$\ln \frac{R_e}{R} = \left[\frac{1.1}{\ln(L_w/R)} + \frac{A + B \ln[(h - L_w)/R]}{L_e/R} \right]^{-1} \quad \text{Eqn. 5}$$

dove:

L_w = distanza dalla superficie freatica al fondo del pozzo [L];

A, B = coefficienti adimensionali (Fonte: tabella in Bouwer, 1989).

In Tabella 6.4 sono riportati i risultati degli *slug test* effettuati nella pineta di San Vitale per i piezometri n. 4, 8, 12, 13, 14, 17, 18 (cfr. mappa in Allegato).

Tabella 6.4 - Risultati degli *slug test* effettuati nella pineta di San Vitale (PZ = piezometro; h = distanza tra il basamento impermeabile e la tavola d'acqua. Notare: nel caso dei piezometri in esame, $r_c = R$ perché non c'è rivestimento)

PZ	h (m)	H_0 (m)	$R = r_c$ (m)	L_e (m)	L_w (m)	A	B	K (m/giorno)
4	28.7	1.3	0.05	1	2.7	2.3	0.5	2.9
8	28.8	1.2	0.08	1	4.8	2	0.4	30.6
12	29.0	1.0	0.08	1	5.0	2	0.4	30.5
13	28.7	1.3	0.08	1	4.7	2	0.4	48.1
14	28.6	1.4	0.08	1	4.6	2	0.4	36.4
17	28.7	1.3	0.08	1	4.7	2	0.4	33.8
18	29.2	0.8	0.08	1	5.2	2	0.4	66.8

I valori di conduttività idraulica ricavati sono molto alti (K medio = 40 m/giorno) e questo è spiegabile sulla base dei dati litostratigrafici che confermano come i sedimenti sotto la pineta siano a prevalente composizione sabbiosa. Valori di conduttività idraulica piccoli (es. PZ4) potrebbero dipendere da locali lenti argillose-limose.

Solo il piezometro 4 registra un valore di K significativamente minore rispetto agli altri; ciò è confermato anche dai dati di monitoraggio che vedono una variazione del profilo di salinità lungo il pozzo prima e dopo l'immissione dei 40 litri che sono stati necessari per eseguire l'esperimento. Dal grafico in Fig. 6.7 si può notare come il piezometro, che inizialmente (marzo e aprile) presentava una salinità alta e praticamente costante lungo tutta la colonna d'acqua, dopo l'immissione dei 40 litri d'acqua utilizzati per la prova di pozzo (in aprile), presenti un andamento diverso, con valori di salinità superficiali vicini allo 0 - 5 g/l. Successivamente l'acqua salata ricomincia a risalire dal fondo e con il passare dei mesi la salinità tende ad aumentare ed il profilo a ritornare uguale all'andamento iniziale.

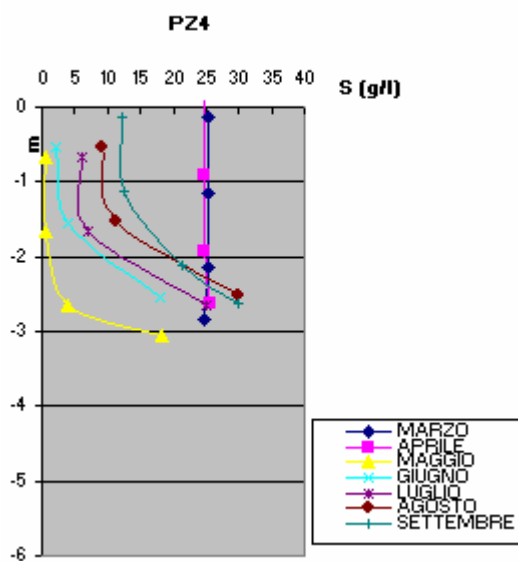


Fig. 6.7 - Profili verticali mensili di salinità per il piezometro 4. (Notare: nei mesi successivi alla prova di pozzo si sono registrati valori molto più bassi rispetto a quelli iniziali).

Naturalmente l'acquifero non si presenta omogeneo ma è caratterizzato da diverse unità sedimentarie sovrapposte e discontinue lateralmente (lenti di sabbia, lenti limo-argillose o sabbiose); ne deriva che la conduttività idraulica può variare verticalmente e orizzontalmente.

6.3. CAMPAGNE GEOELETTRICHE

In collaborazione con l'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA) del C.N.R. di Tito Scalo (PZ) e la Dott.ssa Marcella Sabia (Sabia *et al.*, 2005) è stata effettuata una campagna di indagine geofisica nella Pineta di San Vitale allo scopo di studiare l'idrogeologia dell'area e in particolare l'individuazione dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata. Sono state utilizzate delle tecniche geofisiche non invasive (metodo della tomografia elettrica e mappe di resistività) combinate con i dati diretti di monitoraggio.

6.3.1. Tomografie di resistività elettrica

La tomografia di resistività elettrica presenta un'elevata potenzialità nell'affrontare problematiche complesse, come quelle della definizione della geometria di strutture sepolte e dello studio dei fenomeni connessi col movimento dei fluidi. Essa rappresenta un modello della distribuzione areale delle caratteristiche elettriche del sottosuolo ottenuta in seguito all'immissione di corrente diretta nel terreno (Sharma, 1997).

La resistività del terreno è legata a diversi parametri come il tipo di terreno, il contenuto di minerali argillosi, la porosità, la temperatura, il grado di saturazione e la salinità dell'acqua. In presenza di fluidi nel sottosuolo la corrente elettrica fluisce principalmente per conduzione elettrolitica attraverso gli ioni presenti nei fluidi. La resistività dell'acqua sotterranea varia a seconda delle concentrazioni dei sali disciolti (Fig. 6.8). Ciò fa del metodo di resistività elettrica una tecnica ideale per l'individuazione dell'interfaccia tra acqua dolce e salata in aree costiere.

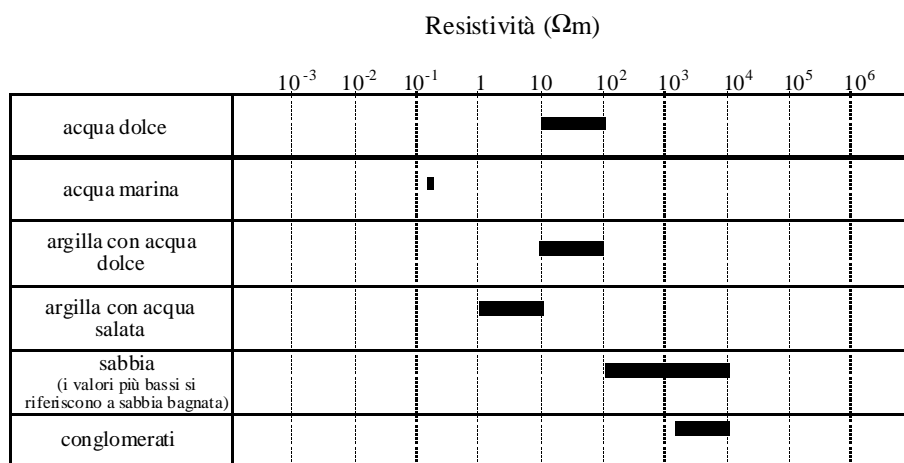


Fig. 6.8 – Valori di resistività caratteristici dell'acqua e di alcuni terreni

Realizzare una tomografia di resistività elettrica nella zona in esame significa ottenere un modello che ci permette di discriminare zone ad alta resistività (legate a terreni non interessati dalla falda o saturi di acqua dolce) da zone a bassa resistività (unità elettrostratigrafiche correlabili con depositi argillosi o depositi saturi di acqua salata).

Il dispositivo elettrodoico utilizzato è il Wenner-Schlumberger (Reynolds, 1997; Sabia *et al.*, 2005).

Le tomografie effettuate durante le campagne di indagine geofisica lungo il Canale Fossatone sono cinque e la rispettiva ubicazione è mostrata in Fig. 6.9. Ciascuna tomografia copre una distanza di 155 m ;la massima profondità di investigazione è di circa 20 m.

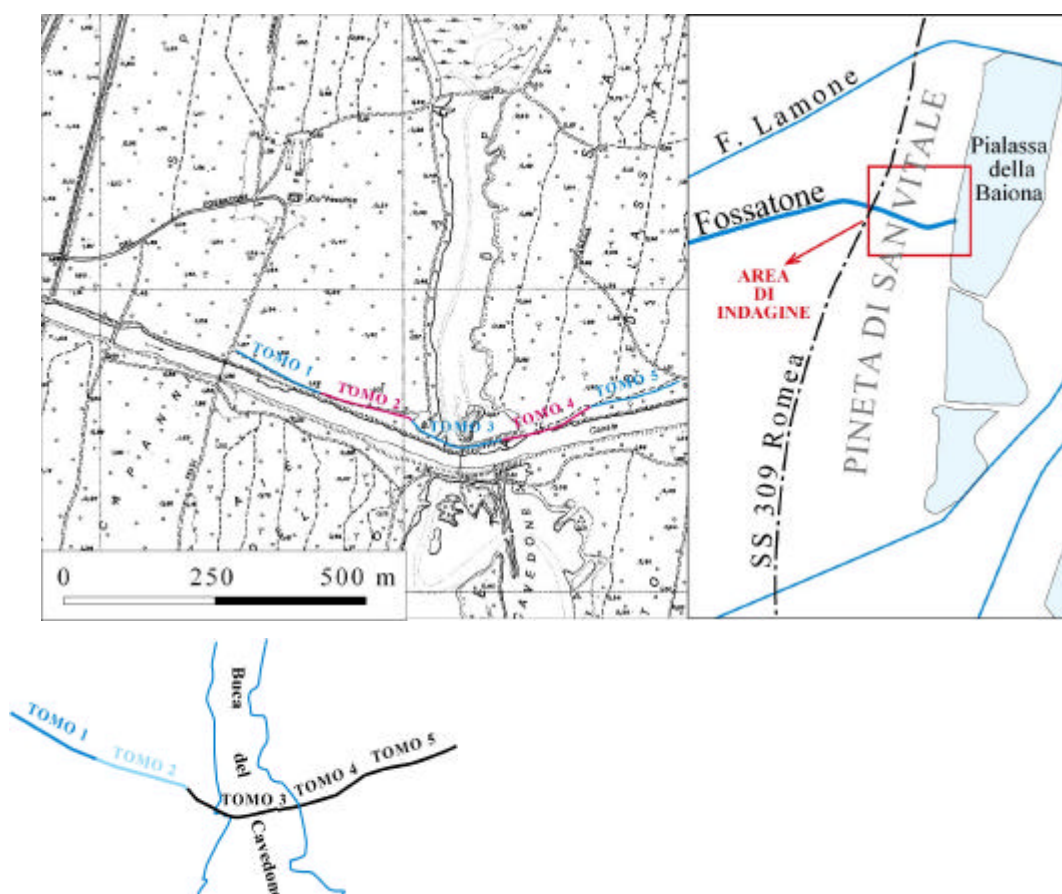


Fig. 6.9 – Ubicazione delle tomografie effettuate lungo il Canale Fossatone.

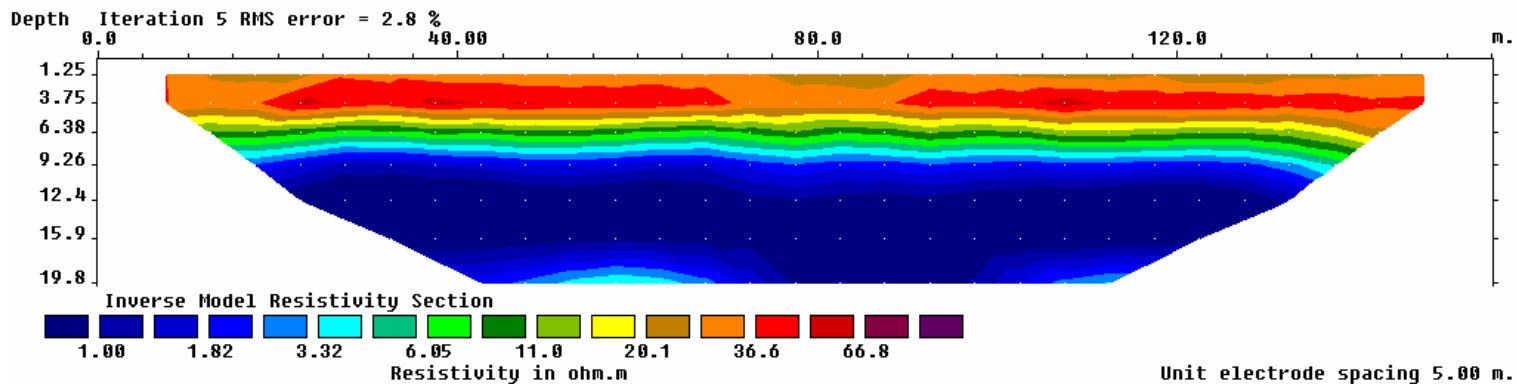
Dall'osservazione delle immagini elettriche ottenute si possono distinguere tre principali unità elettrostratigrafiche (Fig. 6.10):

- l'elettrostrato 1 è caratterizzato da valori di resistività maggiori di 20 Om ed è situato nelle porzioni superficiali a profondità minori di 5-6 m;
- l'elettrostrato 2 è caratterizzato da un range di valori di resistività da 20 a 3 Om e raggiunge in genere una profondità di circa 8,5 m. In esso si nota una diminuzione della resistività piuttosto repentina;
- l'elettrostrato 3 è caratterizzato da valori di resistività minori di 3 Om ed è presente nelle porzioni inferiori delle tomografie (in genere a partire da 9 m di profondità).

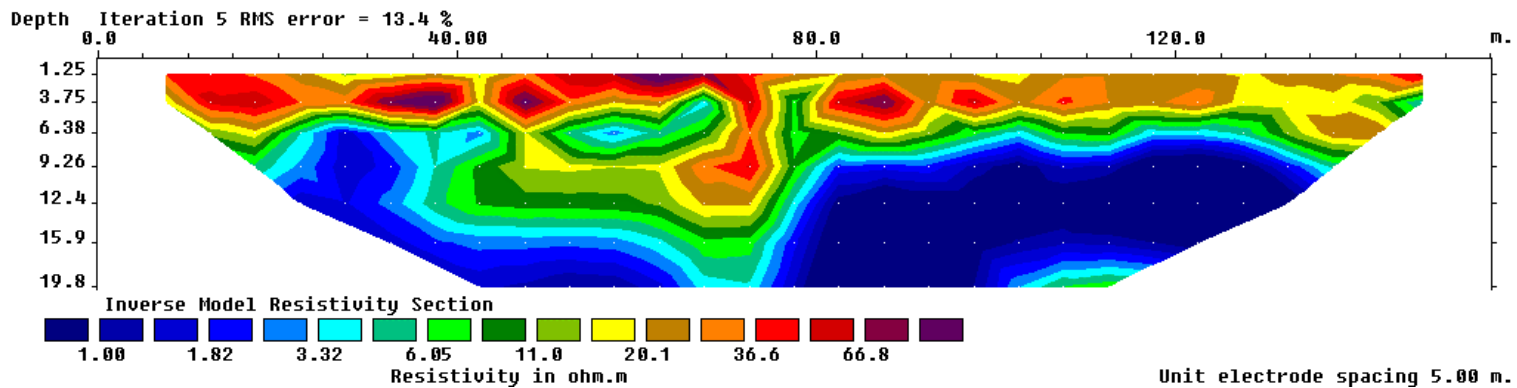
Sulla base dei dati geologici raccolti la prima unità può essere riferita alla presenza di depositi sabbiosi saturi d'acqua dolce. La brusca diminuzione della resistività evidenziata dalla seconda unità elettrostratigrafica può essere ricondotta ad un aumento di conducibilità dell'elettrolita, dovuta ad un aumento della salinità dei fluidi, dato che i dati geologici non evidenziano un cambiamento litologico. Pertanto l'interfaccia acqua dolce - acqua salata viene individuata all'interno di questa unità elettrostratigrafica e in particolare laddove viene registrato un maggiore gradiente di variazione della resistività. La terza unità elettrostratigrafica è presente sempre nelle porzioni inferiori delle tomografie ed è riconducibile alla presenza di depositi saturi d'acqua salata.

In generale si evidenzia un innalzamento dell'interfaccia acqua dolce – acqua salata procedendo da ovest verso est, man mano che ci si avvicina alla Pialassa (da una profondità di 6 m a circa 4 m). In corrispondenza della Buca del Cavedone sono stati registrati valori più bassi di resistività (Fig. 6.10, tomografia n.3) riconducibili ad un innalzamento del limite acqua dolce – acqua salata. Ciò può essere ricondotto alla diminuzione dello spessore dell'acquifero di acqua dolce nelle zone depresse.

TOMOGRAFIA 1

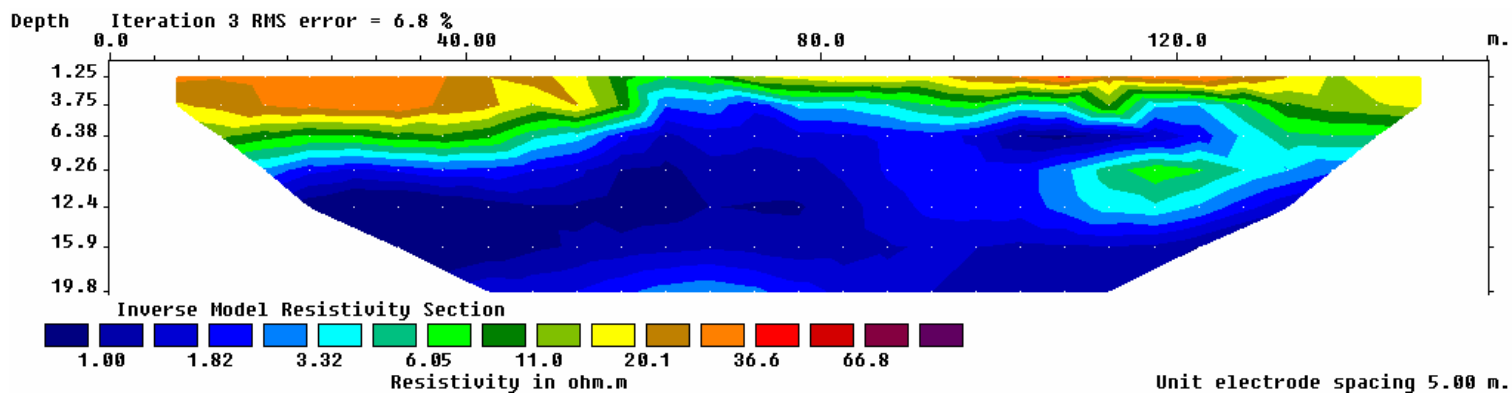


TOMOGRAFIA 2

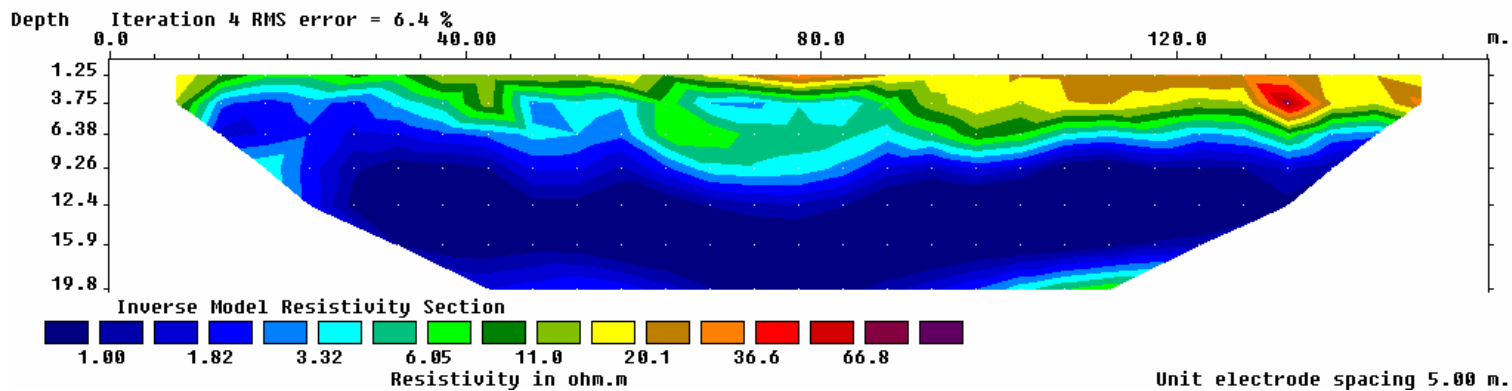


TOMOGRAFIA 3

Buca del Cavedone



TOMOGRAFIA 4



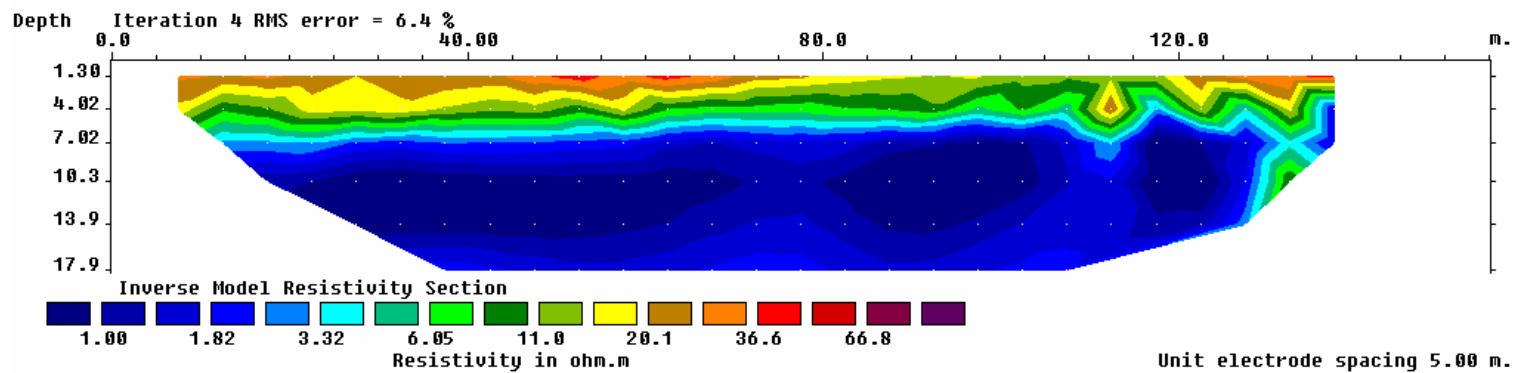
TOMOGRAFIA 5

Fig. 6.10 – Tomografie lungo il Canale Fossatone; nella tomografia n. 3 si nota una diminuzione dei valori di resistività elettrica in corrispondenza della Buca del Cavedone (da Sabia *et al.*, 2005)

6.3.2. Mappe di resistività apparente

Inoltre sono state ottenute delle mappe di resistività apparente in un'area compresa all'incirca tra il Canale Fossatone e il Canale di Via Cerba (Fig. 6.11). Le misure effettuate sono relative a tre diverse profondità di investigazione: 3 m, 6 m e 12 m dal piano campagna. Il metodo della mappa di resistività apparente è un efficiente strumento per studiare le variazioni laterali di resistività.

Dall'osservazione delle immagini elettriche si nota che in generale i valori di resistività apparente diminuiscono da ovest verso est (dalle zone più distali a quelle più prossime alla zona della Pialassa) e con la profondità. Nella mappa relativa a -3 m sono ben evidenti due fasce con valori di resistività relativamente alti, orientate E-W, in corrispondenza del canale Fossatone e dello Scolo di Via Cerba. Nella mappa a -6 m l'effetto dei canali è ancora visibile.

Da ciò si può dedurre che la salinità aumenta in prossimità della Pialassa salmastra e con la profondità (come atteso) e che in corrispondenza dei canali Fossatone e di Via Cerba ci sia un locale abbassamento del livello di salinità dovuto all'apporto d'acqua dolce dai canali all'acquifero.

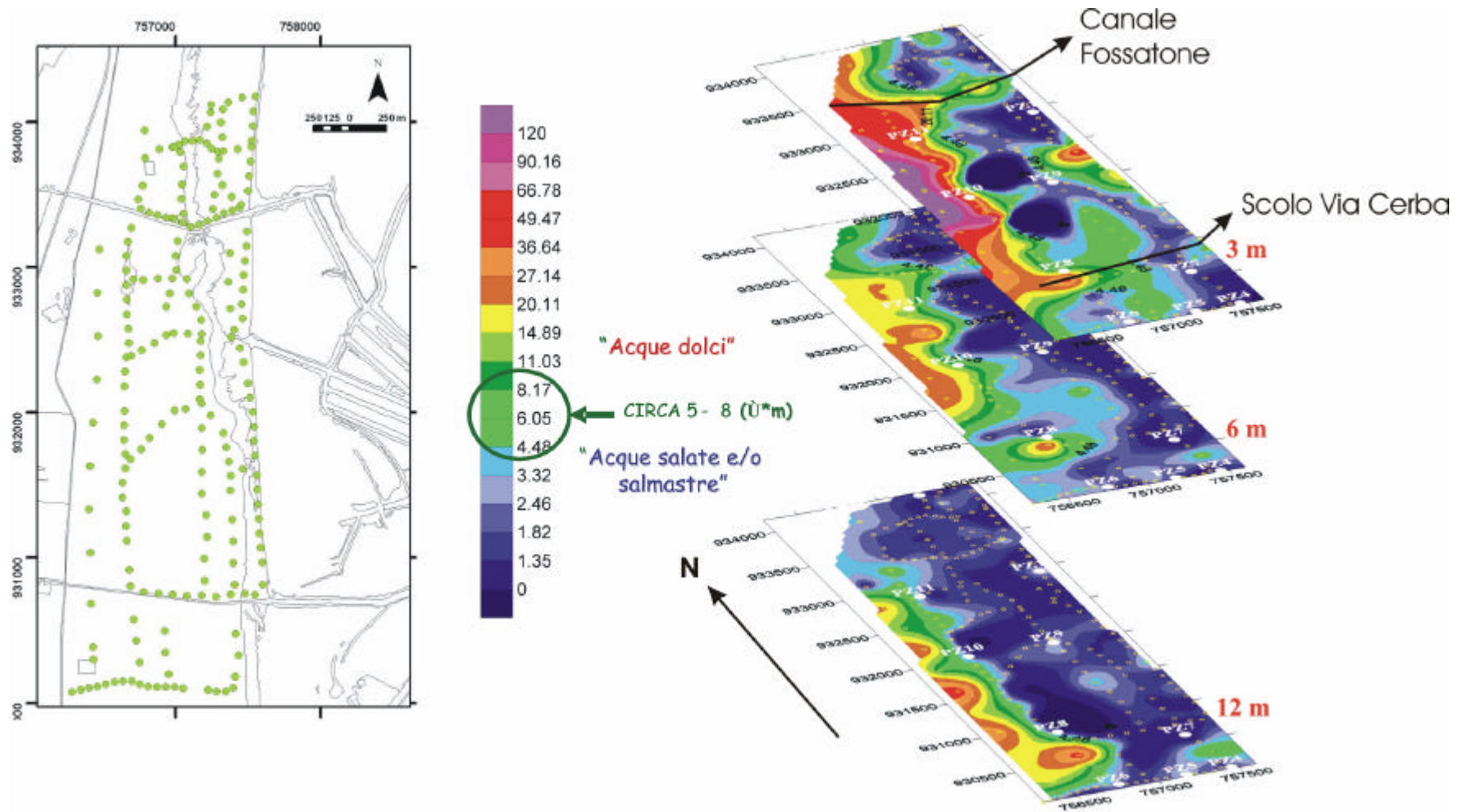


Fig. 6.11 – Ubicazione dei punti di misura tra il Canale Fossatone e lo Scolo Via Cerba (a sinistra) e le mappe di resistività apparente relative a tre profondità di investigazione: 3 m, 6 m e 12 m dal piano campagna (a destra) (da Sabia et al., 2005 modif.)

PARTE II

7. MODELLISTICA ANALITICA

La raccolta dei dati e delle informazioni descritte nei capitoli precedenti ha permesso di affrontare il problema dal punto di vista analitico per definire la geometria dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata e quantificarne la profondità.

Al fine di una migliore comprensione della modellizzazione analitica della pineta che verrà presentata in questo capitolo, si riportano di seguito le equazioni fondamentali che governano il processo dell'intrusione salina.

7.1. PROCESSI FISICI RELATIVI ALL'INTRUSIONE SALINA

7.1.1. Interfaccia acqua dolce-acqua salata

L'intrusione dell'acqua salata è un fenomeno che avviene spontaneamente negli acquiferi costieri. A causa della presenza d'acqua salata, all'interno dell'acquifero si viene a creare una zona di contatto tra l'acqua dolce più leggera che scorre verso mare e l'acqua salata più pesante che si incunea dal mare.

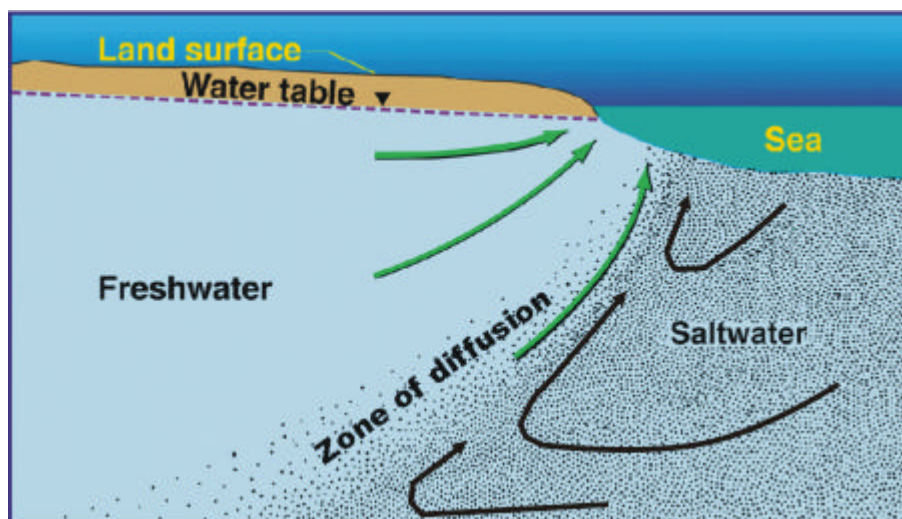


Fig. 7.1 – Circolazione dell'acqua dolce e acqua salata nella zona di diffusione di un acquifero costiero non confinato (da Fetter, 2001, modif.).

L'acqua dolce e l'acqua salata sono fluidi parzialmente miscibili e pertanto la zona di contatto tra i due assume la forma di una zona di transizione o di diffusione generata dalla dispersione idrodinamica (Fig. 7.1). In tale zona la densità dell'acqua passa da

quella dell'acqua dolce a quella dell'acqua salata. Tuttavia, in certe condizioni, l'ampiezza della zona di transizione è piccola rispetto allo spessore dell'acquifero e la zona di passaggio graduale dall'acqua dolce a quella salata può essere approssimata con un fronte netto di interfaccia. Negli acquiferi costieri non confinati si instaura una condizione di equilibrio caratterizzata da un flusso sia nella zona di acqua dolce che nella zona di acqua salata (Cooper, 1959): le acque dolci fluiscono verso mare e si crea un flusso ciclico nelle acque salate vicine all'interfaccia (Fig. 7.1).

La forma e la posizione dell'interfaccia nel corpo sabbioso costiero è funzione del gradiente idraulico e quindi del suo livello freaticometrico. Un qualsiasi cambiamento della superficie freatica determina un cambiamento della forma e posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata. Minime fluttuazioni della posizione di tale superficie di separazione sono determinate da escursioni mareali e da variazioni stagionali della superficie freatica: ne deriva quindi che l'interfaccia acqua dolce-acqua salata è in uno stato di quasi-equilibrio (Fig. 7.2 a). Alcune attività umane, agendo sul volume di acqua sotterranea possono rompere questo equilibrio e determinare uno spostamento dell'interfaccia verso terra.

Il fenomeno dell'invasione dell'acquifero da parte delle acque marine viene detto intrusione del cuneo salino e può essere di tipo passivo o attivo (Fetter, 2001).

L'intrusione passiva si verifica quando, pur avendo una riduzione del volume di acqua dolce, viene mantenuto un livello freatico al di sopra del livello del mare e con un gradiente idraulico verso mare: in questo caso l'interfaccia mantiene indicativamente la stessa forma, spostandosi verso terra fino a quando non si ristabiliscono le nuove condizioni di equilibrio (Fig. 7.2 b).

L'intrusione attiva invece si verifica quando l'utilizzo della risorsa idrica determina un'inversione del gradiente idraulico (falda al di sotto del l.m.m.): questo si verifica nel caso di prelievi puntuali (es. pozzi di estrazione o sistema di drenaggio) che creano coni di depressione (Fig. 7.2 c). L'interfaccia intrude molto più rapidamente rispetto al caso passivo non permettendo l'instaurazione di un nuovo stato di equilibrio e si innalza fino ad incontrare il punto più basso del gradiente idraulico, rappresentato dal centro del pozzo di pompaggio.

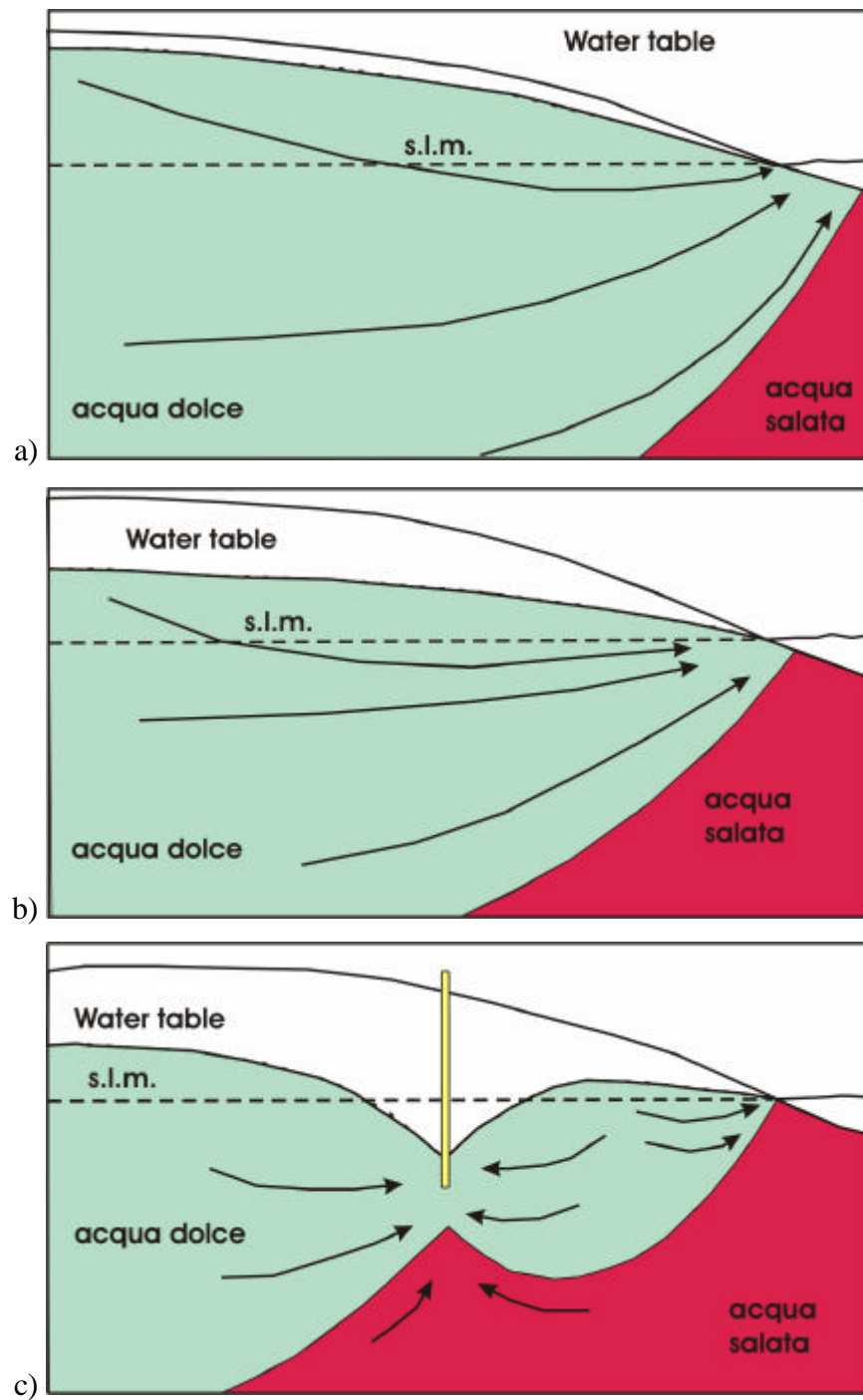


Fig. 7.2 – a) Posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata in un acquifero freatico costiero in condizioni di equilibrio; b) intrusione salina passiva dovuta ad un generale abbassamento del livello della falda; c) intrusione salina attiva con creazione di un cono di depressione dovuto ad un pozzo di estrazione dell'acqua.

7.1.2. Teoria di Ghyben-Herzberg

Il principio di Badon Ghyben -Herzberg (Fetter, 2001; Bear *et al.*, 1999) descrive la posizione dell'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata per un acquifero costiero (Fig. 7.3).

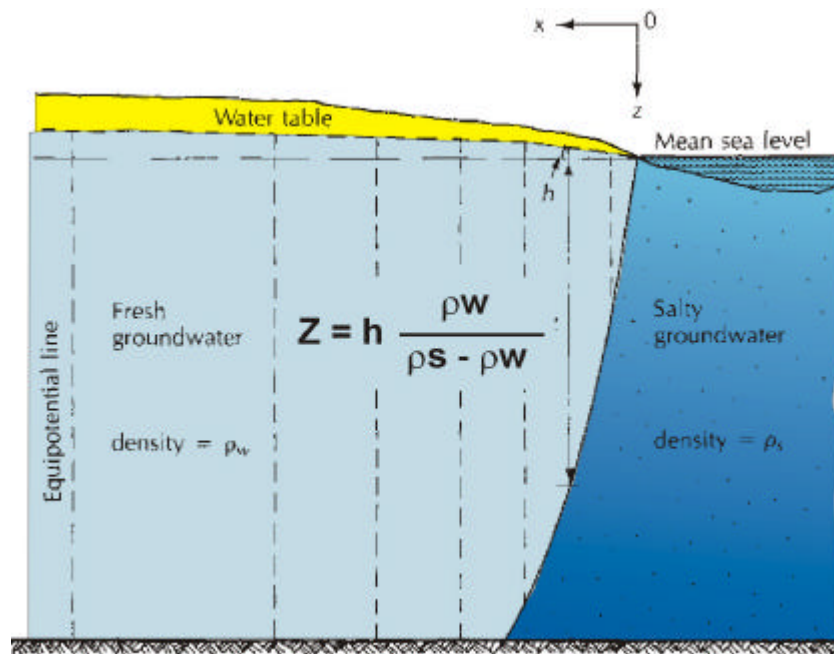


Fig. 7.3 – Relazione di Ghyben-Herzberg per un acquifero freatico costiero (da Fetter, 2001; modif.).

Secondo tale principio negli acquiferi freatici costieri l'interfaccia acqua dolce-acqua salata si trova ad una profondità, rispetto al livello del mare, pari a circa 40 volte l'altezza del livello piezometrico. Quindi, un abbassamento di 1 cm del livello piezometrico causa la risalita di circa 40 cm di un cono d'acqua salata. Il principio di Ghyben-Herzberg è così formulato:

$$Z_{(x,y)} = \frac{\mathbf{r}_w}{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_w} h_{(x,y)} \quad \text{Eqn. 1}$$

dove:

$Z_{(x,y)}$ = profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata [L];

$h_{(x,y)}$ = la quota della falda sopra il livello del mare [L];

\mathbf{r}_w = densità dell'acqua dolce [ML^{-3}];

\mathbf{r}_s = densità dell'acqua salata [ML^{-3}].

Per $r_s = 1025 \text{ [ML}^{-3}\text{]}$ e $r_w = 1000 \text{ [ML}^{-3}\text{]}$, il rapporto $G = \frac{r_w}{r_s - r_w} = 40$

L'applicazione del principio di Ghyben-Herzberg è limitata a condizioni di equilibrio statico con distribuzione idrostatica della pressione per l'acqua dolce e acqua salata stazionaria.

7.1.3. Ghyben-Herzberg-Dupuit

Dupuit (1863) determinò l'equazione per calcolare il flusso in un acquifero non confinato, in cui la superficie freatica rappresenta anche il limite superiore della regione di flusso. Le assunzioni che fece furono che:

- il gradiente idraulico è uguale alla pendenza della superficie freatica;
- per piccoli gradienti idraulici le linee di flusso sono orizzontali, così che le linee equipotenziali sono verticali.

Il flusso stazionario in un acquifero costiero non confinato con basamento orizzontale (Fig. 7.4) è così descritto dall'equazione di Dupuit:

$$q' = \frac{1}{2} K \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{L} \right) \quad \text{Eqn. 2}$$

dove:

q' = flusso per unità di lunghezza $[\text{L}^2\text{T}^{-1}]$;

K = conduttività idraulica $[\text{LT}^{-1}]$;

h_1 = carico idraulico nell'origine, ovvero per $x = 0$ $[\text{L}]$;

h_2 = carico idraulico alla distanza L , ovvero per $x = L$ $[\text{L}]$;

L = distanza lineare del flusso, ovvero la distanza lineare tra il punto 1 e 2 (in Fig. 7.4) $[\text{L}]$.

In condizioni di equilibrio idrodinamico è possibile definire la forma e l'interfaccia acqua dolce-acqua salata in condizioni di flusso stazionario in un acquifero non confinato grazie alla soluzione analitica di Strack per la relazione di Ghyben-Herzberg-Dupuit (Bear et al., 1999).

Nella formulazione della soluzione di Strack (Strack, 1976) viene applicata la relazione di Dupuit (eqn. 2) al flusso d'acqua nell'acquifero non confinato e la relazione di Ghyben-Herzberg (eqn. 1) per definire la profondità dell'interfaccia.

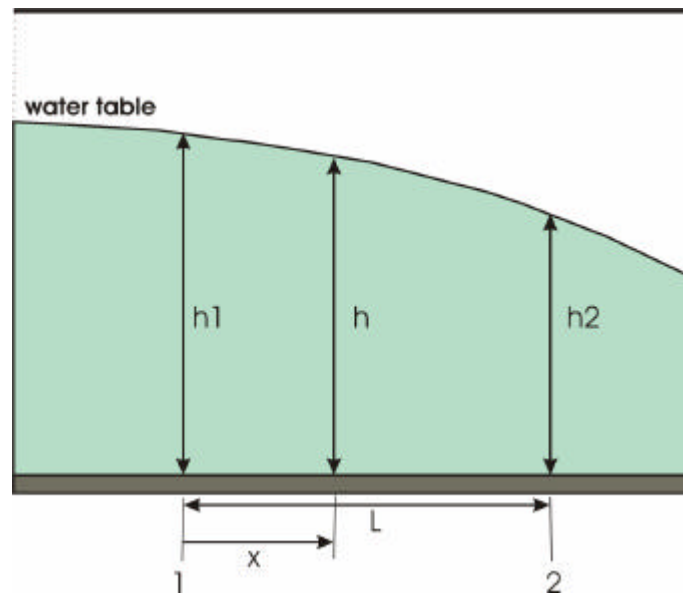


Fig. 7.4 – Flusso stazionario in un acquifero non confinato con basamento orizzontale.

Per la relazione di Ghyben-Herzberg-Dupuit (Fig. 7.5) la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata (Z) in condizioni di flusso stazionario risulta essere:

$$Z(x) = \sqrt{\frac{2q'xG}{K}} \quad \text{Eqn. 3}$$

dove:

q' = flusso per unità di lunghezza ~ ricarica naturale dell'acquifero W * unità di lunghezza L (in Fig. 7.5), $[L^2T^{-1}]$;

x = distanza da costa $[L]$.

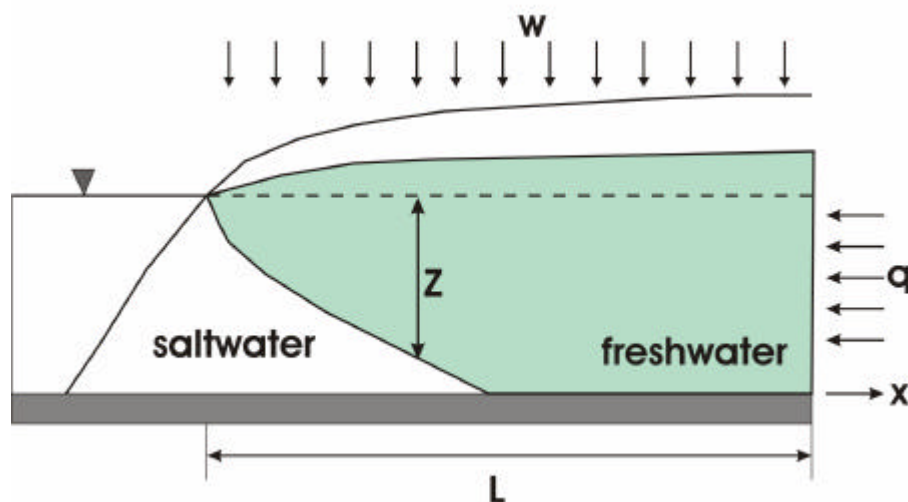


Fig. 7.5 – Interfaccia acqua dolce-acqua salata per un acquifero non confinato secondo la relazione di Ghyben-Herzberg-Dupuit.

7.1.4. Soluzione analitica di Glover

L'assunzione di Dupuit non è più valida quando l'interfaccia tra acqua dolce-salata intercetta la linea di costa. In questa zona, infatti, le linee di flusso verticali non sono più trascurabili in quanto il flusso d'acqua dolce non termina sull'interfaccia ma risale in modo verticale in superficie. Per cui la profondità dell'interfaccia è data dalla seguente relazione (Bear *et al.*, 1999):

$$Z(x) = \sqrt{\frac{q'^2 G^2}{K^2} + \frac{2q'xG}{K}} \quad \text{Eqn. 4}$$

L'ampiezza del fronte di deflusso verticale risulta: x_0

$$x_0 = -\frac{Gq}{2K} \quad \text{Eqn. 5}$$

e l'altezza della freatica ad una distanza x dalla costa è data dall'equazione:

$$h = \sqrt{\frac{2qx}{KG}} \quad \text{Eqn. 6}$$

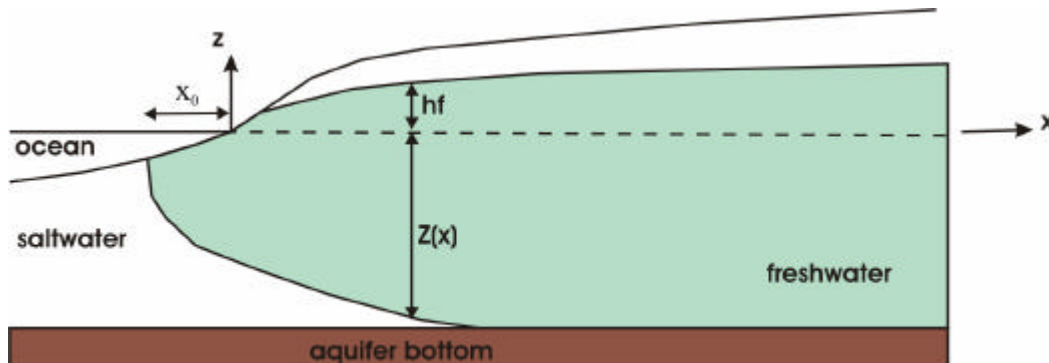


Fig. 7.6 – Posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata per la soluzione analitica di Glover.

7.1.5. Soluzione di Fetter per un'isola oceanica

Fetter (1972) determinò l'equazione che descrive la forma dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata nel caso di un'isola. L'equazione che descrive la profondità dell'interfaccia e l'altezza della freatica dell'acqua possono essere risolte sia che l'isola abbia una forma regolare, sia che sia circolare o che sia una "striscia" infinita.

Considerando un'isola circolare con una larghezza uguale a $2R$ e che riceve una costante ricarica superficiale w (Fig. 7.7), l'altezza del livello freatico ad ogni distanza radiale r dal centro dell'isola, può essere espressa come:

$$h_f^2 = \frac{w(R^2 - r^2)}{2K(1+G)} \quad \text{Eqn. 7}$$

Dal valore dell'altezza freatica h_f si calcola poi la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata $Z(x)$ con la relazione Ghyben-Herzberg-Dupuit.

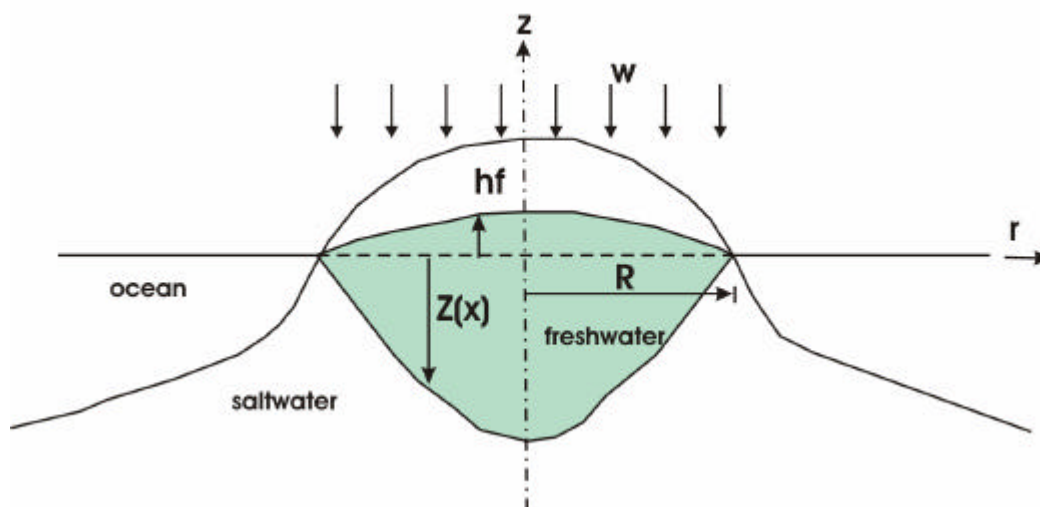


Fig. 7.7 – Isola circolare. Notare la formazione di una lente d'acqua dolce che galleggia sull'acqua salata.

7.2. MODELLO ANALITICO

Le relazioni descritte sopra sono state applicate all'acquifero freatico ravennate per creare un modello analitico dell'area in esame. Nella zona a nord di Ravenna, è stata quindi considerata una sezione trasversale a costa che attraversa spiaggia, duna, pineta litoranea, Marina Romea (coltivato e suburbano), Piassassa, Pineta di San Vitale e zona umida di Ponte Alberete ().

I parametri idrologici utilizzati nel modello analitico sono quelli presentati nei capitoli precedenti: topografia, monitoraggio della falda e calcolo del bilancio idrologico. In Fig. 7.9 (a, b) vengono riportati due parti della sezione considerata con i rispettivi parametri idrologici utilizzati nel calcolo analitico.

Partendo da mare, si è discretizzata la sezione est-ovest in celle di 50 m.



Fig. 7.8 – Sezione scelta per il calcolo analitico della profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

Per la parte più a est del profilo, coincidente con l'abitato di Marina Romea, si è ritenuto più opportuno calcolare l'interfaccia utilizzando le equazioni 6 e 7 descritte nel paragrafo precedente. Dal punto di vista idrogeologico, infatti, si è in una condizione di pressione idrostatica proveniente sia da mare che da monte (Piallassa Baiona); l'assunzione che viene fatta è quindi quella di considerare l'area di studio come un'isola oceanica di infinita lunghezza. Come si può osservare in Fig. 7.10, al di sotto di Marina Romea si viene a formare una lente di acqua dolce che galleggia sull'acqua salata del mare e della Piallassa Baiona. L'interfaccia acqua dolce-acqua salata è molto superficiale, tra i 2 e i 4 m di profondità. Il piccolo spessore di questa lente di acqua dolce è dovuto alla scarsa ricarica dell'acquifero associata ad alti valori di conduttività idraulica (40 m/giorno).

Per la zona della Pineta di San Vitale e Punte Alberete, si è applicata la relazione di Ghyben-Herzberg-Dupuit alla superficie freatica ricostruita dai dati di monitoraggio e dalle carte delle isofreatiche; è stata così ricavata la posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata per ogni zona nel caso di flusso q' , calcolato come prodotto della

ricarica effettiva (infiltrazione, pari a 0.0001 m/giorno) per L (lunghezza delle celle) (Fig. 7.11 a, b). Per la risoluzione delle formule sono stati considerati valori di conduttività idraulica pari a 40 m/giorno per la Pineta di San Vitale e 50 m/giorno per Punta Alberete, così come emerge dai dati in bibliografia e dagli slug test effettuati nell'area (cfr. Cap. 6, par. 6.6.2).

In Fig. 7.11 (b) si osserva una buona correlazione tra la profondità dell'interfaccia calcolata in maniera analitica e la profondità della stessa come emerge dalle campagne di indagini geofisiche effettuate nell'area (Te.Am. Geofisica, 2004; Sabia *et al.*, 2005). E' evidente come l'interfaccia acqua dolce – acqua salmastra si trovi ad una profondità compresa tra i 5 - 6 m e i 10 m dove si hanno le aree di ricarica della falda, come ad esempio i cordoni litoranei su cui scorre la Romea o le dune relitte all'interno della pineta che permettono l'abbattimento locale dell'interfaccia. In generale all'interno della pineta, si evidenzia un innalzamento dell'interfaccia procedendo da ovest verso est, man mano che ci si avvicina alla Pialassa (Fig. 7.11 a).

b) Transetto schematico est-ovest – Zona Pineta San Vitale e Punta Alberete

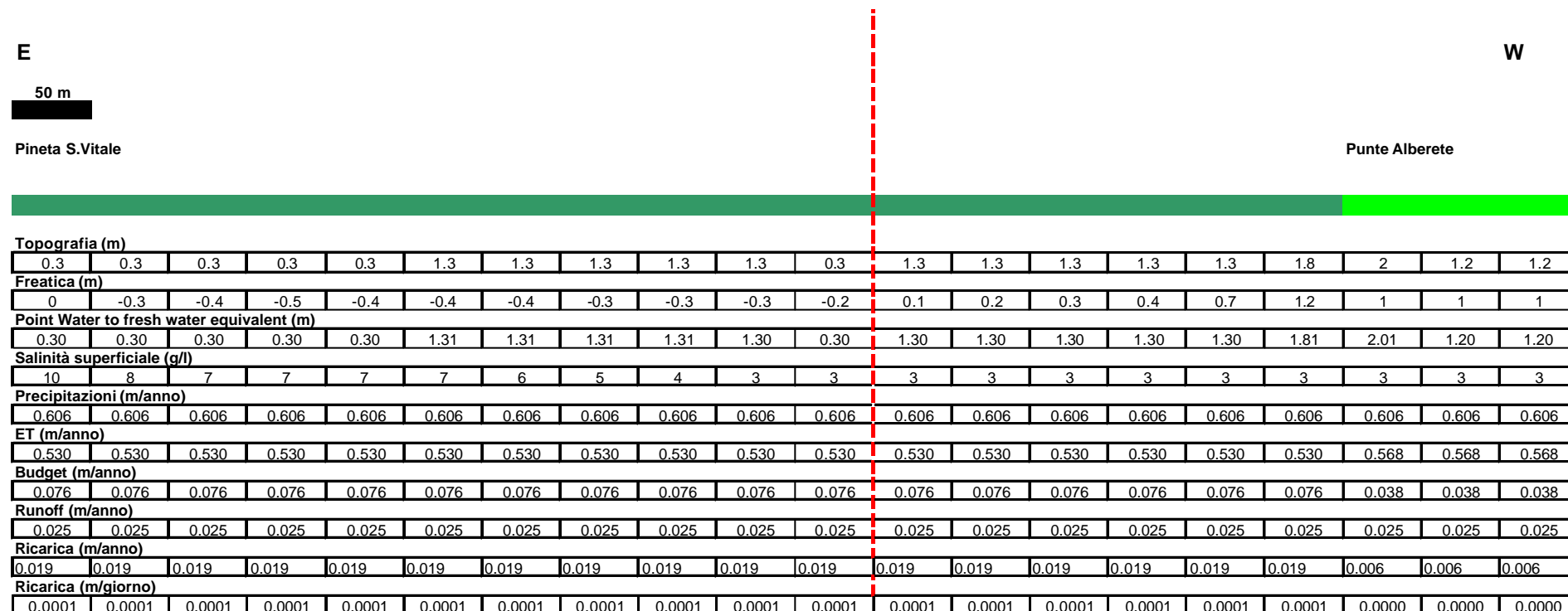


Fig. 7.9 – Parametri idrologici della sezione per la zona costiera di Marina Romea (a) e per la zona della Pineta di San Vitale e Punta Alberete (b) (Notare: in figura b) la linea tratteggiata rossa indica un'interruzione; per una questione grafica sono state nascoste alcune colonne per poter rappresentare tutta la sezione fino a Punta Alberete).

a) Transetto schematico est-ovest – Zona costiera di Marina Romea

Soluzione per un'isola oceanica + soluzione di Glover

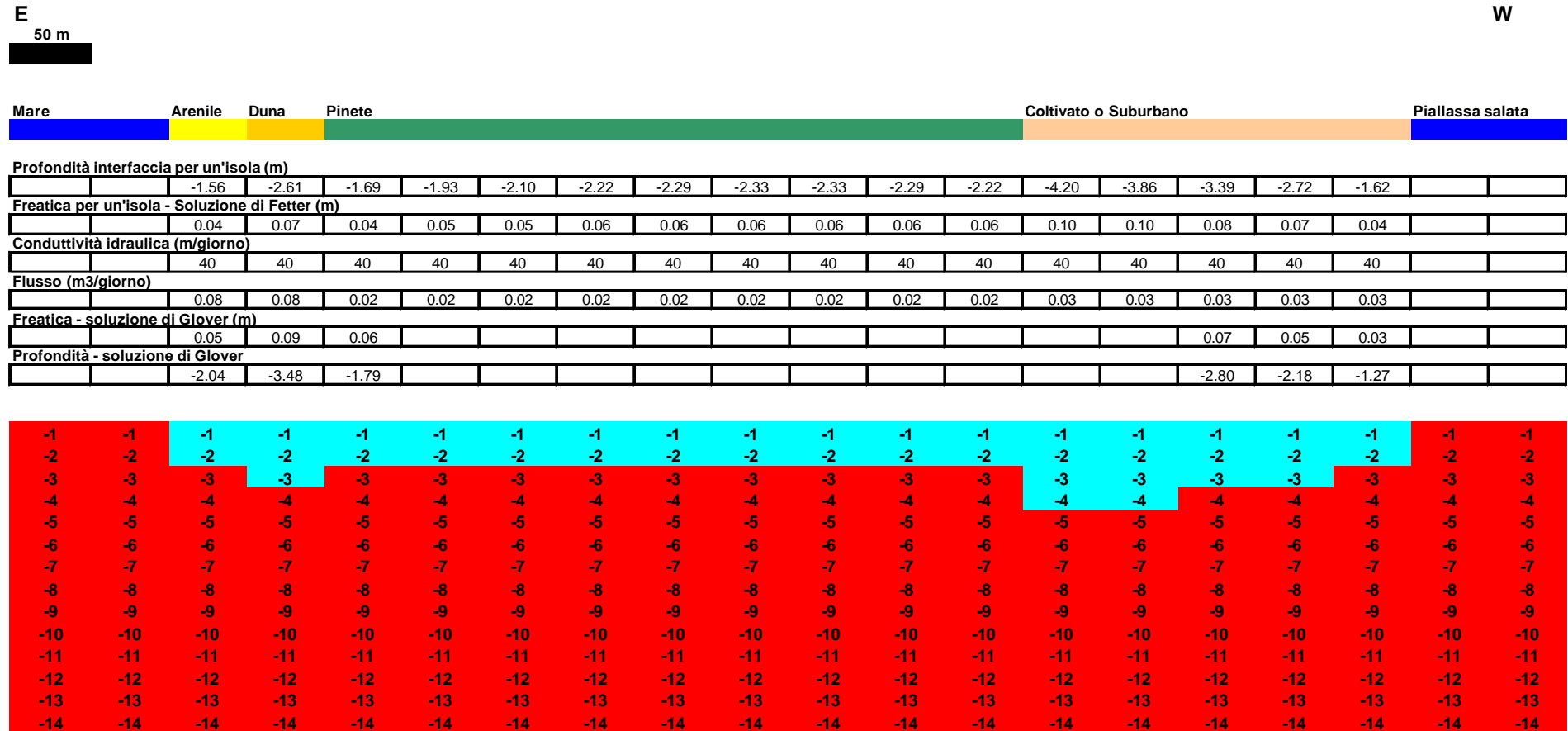


Fig. 7.10 – Profondità dell’interfaccia acqua dolce-acqua salata calcolata in maniera analitica per la sezione a costa. (Notare: la zona costiera di Marina Romea è stata trattata come un’isola oceanica perché è circondata da acqua salata sia ad est che ad ovest)

b) Transetto schematico est-ovest – Zona Pineta San Vitale e Punta Alberete

Equazione di Ghyben-Herzberg-Dupuit

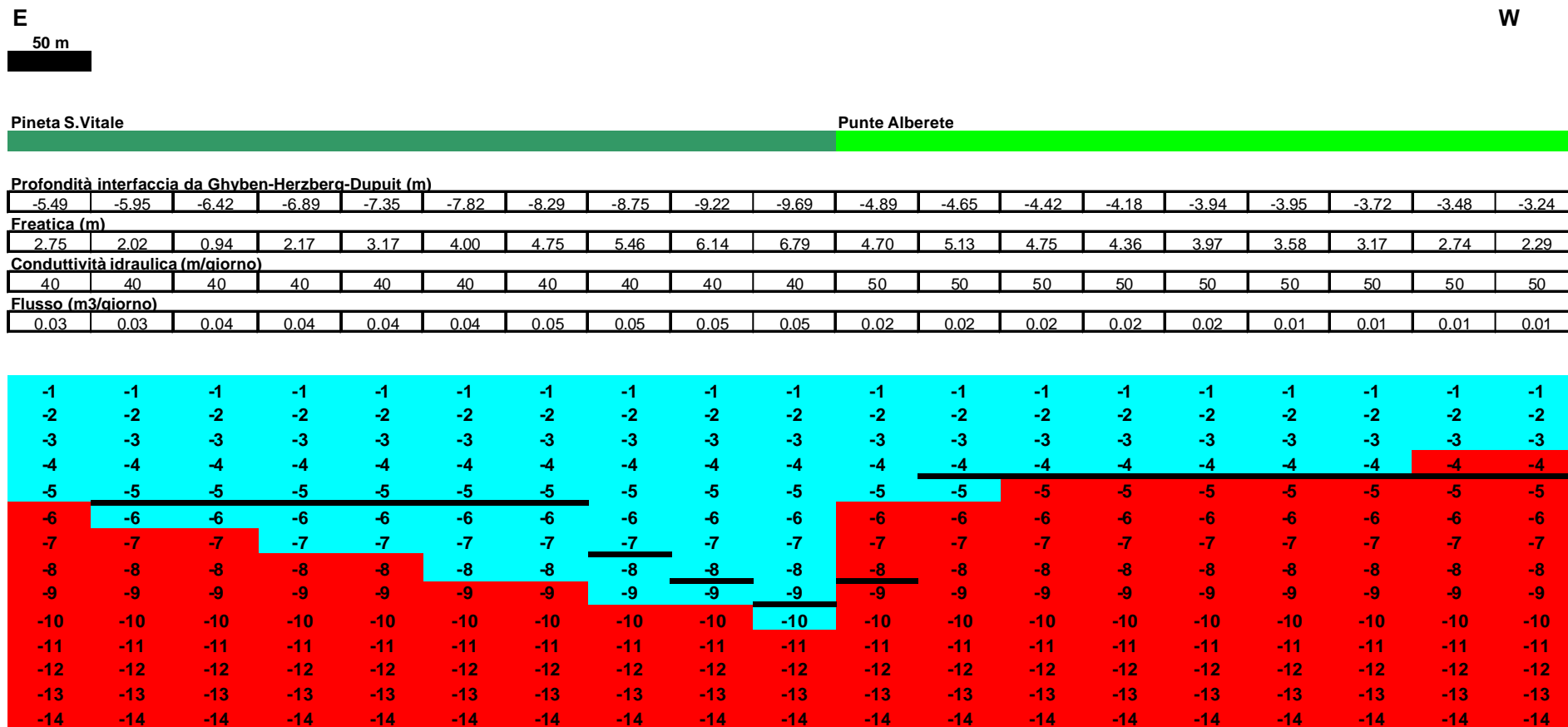


Fig. 7.11 - Profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata calcolata in maniera analitica a partire dalla Piallassa Baiona ad est (a) fino ad arrivare all'area di Punta Alberete (b) attraversando la Pineta di San Vitale.

8. MODELLISTICA NUMERICA

8.1. INTRODUZIONE

L'analisi dell'acquifero freatico costiero di Ravenna ha messo in evidenza un forte degrado della risorsa idrica sotterranea. L'acquifero si presenta salato in molte zone e in disequilibrio idrodinamico, trovandosi per la maggior parte al di sotto del livello medio mare.

Per far fronte al numero elevato di parametri che caratterizzano lo studio, per risolvere le equazioni differenziali che governano il sistema e per gestire la complessità dei processi, si è deciso di ricorrere all'uso della modellistica. L'uso di un modello matematico permette così di integrare tutti gli aspetti tenendo conto dei processi naturali di rilievo e di testare scenari multipli aumentando la conoscenza delle condizioni del sistema idrogeologico dell'area di studio.

Sulla base dei dati e delle considerazioni fatte fino a questo capitolo si è passati alla modellizzazione numerica del caso studio. Tutte le informazioni ed i dati raccolti sull'area di studio sono stati implementati nel modello numerico MOCDENS3D (Oude Essink, 1998; 1999; 2001a). MOCDENS3D è un modello di flusso molto affermato nel campo dell'idrogeologia perchè permette la simulazione 3D di flussi a densità variabile associati al trasporto di soluti negli acquiferi costieri e lo specifico campo d'applicazione è proprio lo studio dell'intrusione salina negli acquiferi costieri. Grazie a questo modello è possibile simulare l'effetto sull'intrusione salina dei processi naturali (abbassamento del livello della falda freatica per effetto della subsidenza, ecc.) e delle attività umane (drenaggio, urbanizzazione, distruzione dei cordoni dunosi costieri, ecc.). L'attenzione è stata focalizzata su varie simulazioni per capire come le presenti e passate attività dell'uomo abbiano influenzato e tuttora influenzino il processo di intrusione salina nell'acquifero costiero di Ravenna e come il previsto innalzamento del livello del mare accelererà il processo di salinizzazione durante i prossimi decenni.

In una situazione come quella ravennate, così fortemente modificata dall'azione umana nel corso degli anni, è complesso stabilire e quantificare il contributo di ogni singolo fattore al raggiungimento della condizione attuale per poi ipotizzare e proporre azioni di mitigazione o recupero della risorsa acqua. Occorre quindi ricordare che, come tale, un modello è pur sempre una semplificazione della realtà ma può essere utile per

capire i processi che governano un sistema idrologico complesso. L'applicazione di MOCDEN3D al caso studio ravennate è stata indispensabile per valutare lo stato ma, soprattutto, il trend evolutivo della falda freatica anche in previsione dei futuri cambiamenti climatici. Infatti, in condizioni ambientali di specifico interesse, quali quelle connesse alla gestione di aree naturali protette, diventa di primaria importanza applicare e disporre di tecniche e metodologie operativo-gestionali in grado di soddisfare le esigenze anche in termini modellistico-previsionali di medio termine.

Lo sviluppo di questa parte di dottorato è stata possibile grazie al progetto formativo "Marco Polo" che si è svolto presso l'istituto TNO - NITG (Netherlands Institute of Applied Geosciences; Groundwater and Soil Department, Utrecht, Olanda) per un periodo complessivo di 4 mesi (gennaio – maggio 2006). Questo istituto pubblico di ricerca si occupa dell'applicazione delle geoscienze per una gestione ed un uso sostenibile del territorio e delle sue risorse. In particolare il Groundwater and Soil Department, che ha offerto la sua ospitalità, esegue ricerche e consulenze focalizzate sul monitoraggio della falda freatica, sulla gestione e uso sostenibile delle acque sotterranee. I referenti locali con cui si è collaborato durante questi 4 mesi sono stati: il Dr. G.H.P. Oude Essink, esperto nel campo dell'intrusione salina negli acquiferi costieri e creatore del modello numerico utilizzato ed il Dr. R.J. Stuurman, esperto nel campo dell'idrogeologia applicata allo studio degli ecosistemi animali e vegetali. Il progetto di ricerca è stato concluso con la creazione di un articolo dal titolo: "Saltwater intrusion and in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model" (Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman R.J.) sottomesso alla rivista internazionale "Journal of Hydrogeology" e attualmente in fase di revisione.

8.2. MOCDENS3D

I modelli numerici per le acque sotterranee vengono applicati per 4 tipi generali di problemi: il flusso, il trasporto di soluti, il trasporto di energia e le deformazioni dell'acquifero (Bear & Verruijt A., 1998; Mercer & Faust, 1981; Wang & Anderson, 1982; Trescott *et al.*, 1976; McDonald & Harbaugh, 1988; Konikow & Bredehoeft, 1979; Prickett & Lonquist, 1971, 1981).

Nell'ampio panorama dei modelli numerici utilizzati nel campo dell'idrogeologia applicata allo studio dell'intrusione salina (SUTRA (Voss, 1984; Voss & Provost,

2003); SWICHA (Huyakorn *et al.*, 1987); HST3D (Kipp, 1987); FEFLOW (Diersch, 1998); SALTFLOW (Molson & Frind, 1994); METROPOL (Sauter, 1993); ecc.) si è preso in considerazione il MOCDENS3D.

Gli impieghi di MOCDENS3C in campo ambientale possono essere svariati: l'analisi del trasporto di specie chimiche (comprendente i processi di adsorbimento, produzione e decadimento); l'analisi di sistemi di protezione dell'acquifero (confinamento rifiuti, barriere idrauliche, ricariche superficiali, ecc.). La caratteristica principale è sicuramente il fatto che questo codice numerico permette la simulazione 3D di flussi a densità variabile associati al trasporto di soluti ed uno specifico campo d'applicazione può essere proprio lo studio dell'intrusione salina negli acquiferi costieri. MOCDENS3D può essere applicato ad ampie aree di studio ed è capace di simulare geometrie complesse. Grazie ad un'architettura modulare, permette di costruire l'ambiente di simulazione più appropriato assemblando un certo numero di sotto-unità di programma ("packages") (Fig. 8.1), per ciascuna delle quali occorre redigere un file di dati che contiene tutte le informazioni necessarie al funzionamento della procedura. In questo modo, la complessità dell'ambiente di simulazione cresce in maniera molto graduale con il grado di dettaglio del modello che si vuole studiare. Questo consente di realizzare in maniera rapida modelli semplici, integrando un numero molto contenuto di moduli di base, e di migliorarne progressivamente l'aderenza alla realtà, aggiungendo i moduli opportuni. È possibile, ad esempio, simulare la presenza nel dominio di calcolo, di fiumi, pozzi e sistemi di drenaggio. Ancora, è possibile includere nella simulazione la presenza di ricariche della falda (e, in particolare, di pioggia), o gli effetti dell'evapotraspirazione. È possibile così simulare gli effetti sull'acquifero costiero di processi naturali (innalzamento del livello del mare, subsidenza, ecc.) e di attività umane (drenaggio, estrazione di acqua dal sottosuolo, ecc.).

Con MOCDENS3D si è voluto simulare l'intrusione del cuneo salino nell'area di studio per confrontare i risultati con quelli reali di monitoraggio e per acquisire una conoscenza dettagliata di come avviene il processo fisico e quali siano i fattori principali che lo governano.

8.2.1. Caratteristiche di MOCDENS3D

MOCDENS3D consiste di due codici numerici integrati (Fig. 8.1):

- MOC3D (Konikow *et al.*, 1996) permette di simulare il trasporto in 3D di soluti ed è il successore 3D dell'originario MOC (Konikow & Bredehoeft, 1979). Usando il metodo delle caratteristiche (*Method Of Characteristics*) questo codice risolve l'equazione del trasporto sulla base dei gradienti idraulici calcolati dal secondo codice (MODFLOW) per ogni *time step*. Il trasporto di soluto è simulato suddividendo l'equazione advezione-dispersione in due componenti: (a) la componente advettiva che viene risolta con la tecnica del *particle tracking* (*o Method of Characteristics*), e (b) la componente dispersiva che viene risolta con il metodo alle differenze finite.
- MODFLOW risolve, invece, l'equazione di flusso in 3D usando il metodo alle differenze finite. La novità consiste nel fatto che il codice MODFLOW è stato riadattato affinché il calcolo del carico idraulico avvenga tenendo conto della differenza di densità del fluido cosicché, dopo ogni *time step* il flusso viene ricalcolato in base alla nuova distribuzione di acqua dolce e salata.. Questo è possibile inserendo il cosiddetto termine di *buoyancy* (Eqn.7) nelle equazioni basi del calcolo del carico idraulico del codice MODFLOW – 96 (McDonald & Harbaugh, 1988; Harbaugh & McDonald, 1996).

Con questi due moduli accoppiati MOCDENS3D permette di risolvere contemporaneamente le equazioni di flusso e di trasporto del soluto.

Di seguito sono riportate le caratteristiche salienti del codice MOCDENS3D. Per maggiori dettagli si rimanda alla bibliografia di riferimento (Oude Essink, 1999; 2000; 2001a - b).

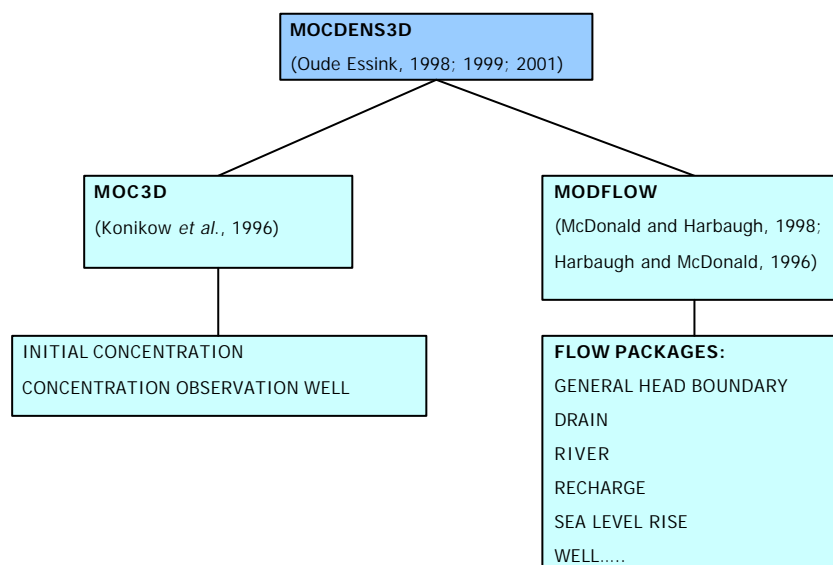


Fig. 8.1 – Schema dei moduli che compongono il codice di calcolo MOCDENS3D.

8.2.2. Adattamento del modulo MODFLOW per flussi a diversa densità

MODFLOW è un modello che permette la simulazione in regime di flusso stazionario (ovvero il carico idraulico non varia nel tempo) o in regime di flusso transiente e che calcola il deflusso di falda, a partire dalle caratteristiche dell'acquifero, tramite una procedura di soluzione delle equazioni di flusso approssimata alle differenze finite.

L'approccio numerico consiste nel discretizzare il dominio del modello, ovvero nel creare una griglia (*grid*) con elementi di dimensioni finite (*elements* o *blocks* or *grid cells*), ovvero nello sviluppare una configurazione spaziale che riproduca nel miglior dei modi possibili le condizioni geometriche proprie dell'acquifero da sottoporre a simulazione (Cerbini & Gorla, 2004) (Fig. 8.2). La griglia è costituita da un insieme di nodi interconnessi per ciascuno dei quali viene calcolato il carico idraulico; matematicamente definisce le basi di una matrice di equazioni che devono essere risolte. Tale griglia dipende dal modello concettuale del sistema fisico e dalla quantità di dati raccolti che caratterizzano l'area. La creazione della griglia risulta essere uno degli elementi di maggiore criticità nell'ambito di una modellizzazione, soprattutto in rapporto all'accuratezza dei risultati di calcolo.

In MODFLOW la griglia è a blocchi centrati, dove cioè i limiti al contorno sono posizionati sul bordo della cella e le altezze piezometriche si trovano invece al nodo (Fig. 8.2).

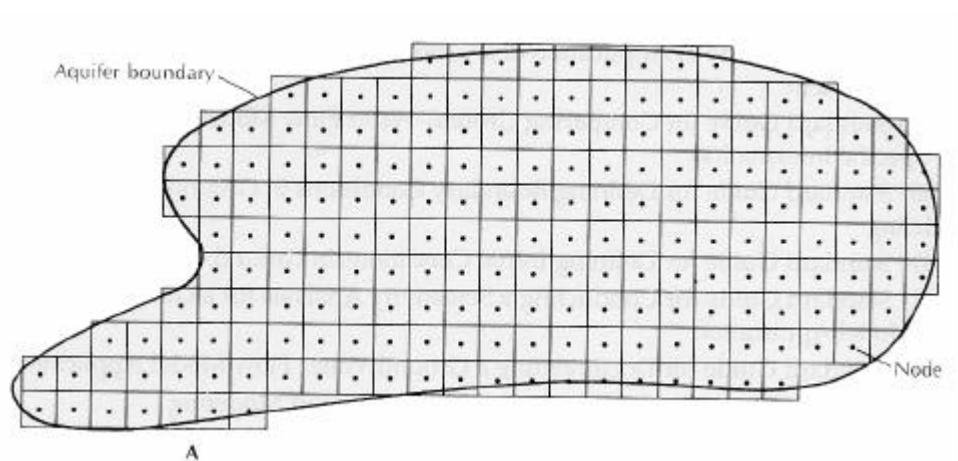


Fig. 8.2 – Schematizzazione dell'acquifero con una griglia (grid) a blocchi centrati con il metodo alle differenze finite (Fetter, 2001)

Il metodo alle differenze finite (FDM) consiste nel sostituire, alle derivate contenute nelle equazioni, delle funzioni discrete nelle stesse variabili. Il principio generale è che il carico piezometrico è calcolato per iterazioni successive in ogni nodo della griglia. A seconda del modo con cui vengono discretizzati, gli schemi alle differenze finite si possono suddividere in (Cerbini & Gorla., 2004):

- schemi impliciti, in cui le variabili al passo temporale t sono funzione sia dei valori delle stesse grandezze ricavati al passo temporale $t-1$, sia dei valori assunti al passo t nei punti adiacenti. Di conseguenza ad ogni passo temporale occorre risolvere $2N$ equazioni in cui N è il numero dei punti in cui viene discretizzato lo spazio. Tali schemi sono incondizionatamente stabili e la lunghezza del passo di discretizzazione temporale può essere scelto in base all'effettiva dinamica del sistema;
- schemi espliciti, in cui le variabili a tempo t sono espresse sulla base dei valori delle stesse grandezze ricavati all'istante temporale $t-1$. Tali schemi permettono la soluzione di un punto alla volta e quindi due equazioni contro le $2N$ equazioni dei metodi impliciti. Nei metodi espliciti la stabilità della soluzione dipende dalla lunghezza del passo temporale di discretizzazione che deve rispettare determinati criteri.

Nella sua versione normale MODFLOW permette di calcolare il carico piezometrico ma non modella flussi che dipendono dalla densità. Nel codice MOCDENS3D è stato quindi riadattato per poter tener conto delle differenze di densità nel calcolo del carico idraulico e permettere di risolvere problemi con flussi a densità variabile come il problema dell'intrusione salina.

Nel modulo MODFLOW l'equazione di continuità che esprime il bilancio del flusso per un elemento i è la seguente:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta f}{\Delta t} \Delta V \quad \text{Eqn. 1}$$

dove:

Q_i = flusso complessivo nell'elemento i (considerando tutte le uscite e le entrate d'acqua) [L^3T^{-1}],

S_s = coefficiente d'immagazzinamento specifico del mezzo = volume d'acqua che può essere immagazzinata per variazione unitaria di carico idraulico [L^{-1}],

ΔV = volume dell'elemento [L^3],

Δf = variazione del livello piezometrico nell'intervallo di tempo Δt [L].

L'equazione di flusso discretizzata per un grid uniforme è (McDonald & Harbaugh, 1988; Oude Essink, 1999; 2000; 2001a):

$$\begin{aligned} & CV_{i,j,k-1/2} f_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k} f_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k} f_{i,j-1,k}^m + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} \\ & - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) f_{i,j,k}^m + CR_{i,j+1/2,k} f_{i,j+1,k}^m + CC_{i+1/2,j,k} f_{i+1,j,k}^m \\ & + CV_{i,j,k+1/2} f_{i,j,k+1}^m \\ & = RHS_{i,j,k} \end{aligned} \quad \text{Eqn. 2}$$

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - SC1_{i,j,k} / (t_m - t_{m-1})$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SC1_{i,j,k} f_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1})$$

$$SC1_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

dove:

CV, CC e CR = conduttanza idraulica (McDonald & Harbaugh, 1988) in direzione rispettivamente di strati, colonne e righe [$L^2 T^{-1}$] (Fig. 8.3).

$f_{i,j,k}^m$ = carico piezometrico nell'elemento [i,j,k] al tempo m [L],

$P_{i,j,k}$, $Q_{i,j,k}$, = fattore per spiegare i flussi combinati di tutte le sorgenti esterne e le tensioni nell'elemento [i,j,k] [$L^2 T^{-1}$],

$SS_{i,j,k}$, = immagazzinamento specifico per l'elemento [i,j,k] [L^{-1}],

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ = volume ΔV dell'elemento [i,j,k] [L^3].

L'attenzione è poi focalizzata lungo il flusso verticale nell'elemento [i,j,k] (Fig. 8.3). Si consideri poi l'equazione del moto (Legge di Darcy; Fetter, 2001) per la sola componente verticale:

$$q_z = -\frac{k_z}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \mathbf{r}g \right) \quad \text{Eqn. 3}$$

dove

q_z = flusso di Darcy nella direzione verticale z [LT^{-1}],

k_z = permeabilità intrinseca [L^2],

μ = viscosità dinamica [$ML^{-1}T^{-1}$],

p = pressione [$ML^{-1}T^{-2}$],

\mathbf{r} = densità dell'acqua [ML^{-3}],

g = accelerazione di gravità [LT^{-2}].

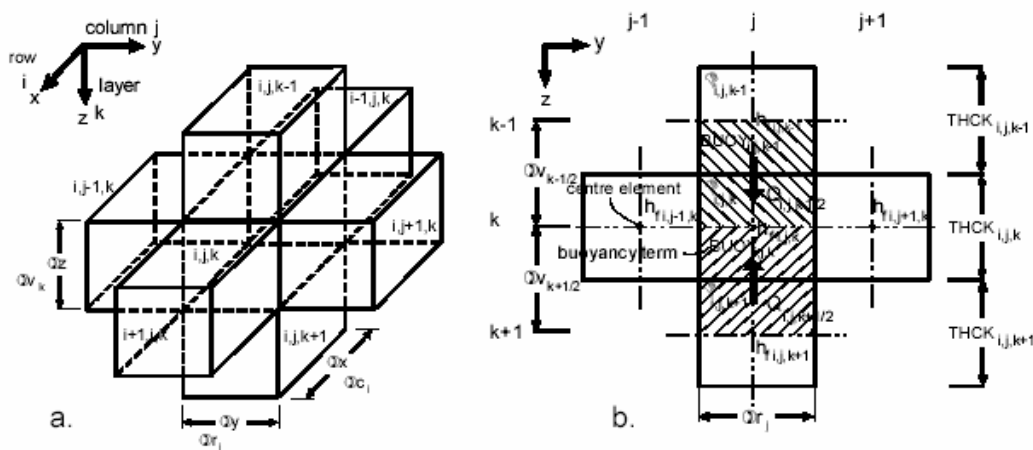


Fig. 8.3 – Elementi di MODFLOW con i corrispondenti termini.

In condizioni normali MODFLOW permette di calcolare il carico piezometrico ma non modella flussi che dipendono dalla densità. Quindi, è stato inserito il cosiddetto carico equivalente di acqua dolce che tiene conto delle differenze di densità nel calcolo del carico idraulico. Per carico equivalente d'acqua dolce, o freshwater head (F_f), si intende il carico piezometrico che si registrerebbe in un piezometro se questo contenesse solo acqua dolce e non acqua a salinità variabile (salmastra e/o salata) ed è espresso dalla formula:

$$\mathbf{f}_f = \frac{p}{\mathbf{r}_f g} + z \quad \text{Eqn. 4}$$

dove

\mathbf{f}_f = carico di acqua dolce [L],

p = pressione [$ML^{-1}T^{-2}$],

\mathbf{r}_f = densità di riferimento che generalmente è la densità dell'acqua dolce [ML^{-3}],

z = componente del carico idraulico rispetto al livello del mare [L].

Inserendo l'equazione (4) nell'equazione (3) ottengo:

$$q_z = -\frac{k_z \mathbf{r}_f g}{m} \left(\frac{\partial \mathbf{f}_f}{\partial z} + \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_f}{\mathbf{r}_f} \right) \quad \text{Eqn. 5}$$

Nella maggior parte dei casi le differenze di viscosità posso essere trascurate se si considerano le piccole differenze di densità di un normale sistema idrogeologico (Verrujt, 1980; Bear & Verruijt, 1987). Così l'equazione (5) può essere riscritta come:

$$q_z = -K_z \left(\frac{\partial \mathbf{f}_f}{\partial z} + \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_f}{\mathbf{r}_f} \right) \quad \text{Eqn. 6}$$

dove:

$K_z = k_z \mathbf{r}_f g / \mathbf{m}$ = conduttività idraulica dell'acqua dolce [LT^{-1}],

$(\mathbf{r} - \mathbf{r}_f) / \mathbf{r}_f$ = termine di *bouyancy* (-).

La discretizzazione del termine di *galleggiamento bouyancy* così come è richiesta dal modulo MODFLOW, restituisce la seguente relazione:

$$BUOY_{i,j,k+1/2} = \left(\frac{(\mathbf{r}_{i,j,k} + \mathbf{r}_{i,j,k+1})/2 - \mathbf{r}_f}{\mathbf{r}_f} \right) \quad \text{Eqn. 7}$$

dove:

$BUOY_{i,j,k+1/2}$ = termine di *galleggiamento bouyancy* tra gli elementi [i,j,k] e [i,j,k+1]

Riscrivendo l'equazione (6) nei termini del modulo MODFLOW e combinandola con l'equazione (7) si ottiene il flusso al top dell'elemento [i,j,k]:

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \left(\frac{(\mathbf{f}_{f,i,j,k-1} - \mathbf{f}_{f,i,j,k})}{\Delta v_{k-1/2}} + BUOY_{i,j,k-1/2} \right) \quad \text{Eqn. 8}$$

ed il flusso alla base dell'elemento [i,j,k] (il segno negativo indica che il flusso è in direzione dell'elemento):

$$q_{i,j,k+1/2} = -KV_{i,j,k+1/2} \left(\frac{(\mathbf{f}_{f,i,j,k} - \mathbf{f}_{f,i,j,k+1})}{\Delta v_{k+1/2}} + BUOY_{i,j,k+1/2} \right) \quad \text{Eqn. 9}$$

dove:

$KV_{i,j,k-1/2}$ e $KV_{i,j,k+1/2}$ = conduttività idraulica verticale rispettivamente tra gli elementi [i,j,k-1] e [i,j,k] e tra gli elementi [i,j,k] e [i,j,k+1] [LT^{-1}],

$\Delta v_{k-1/2}$ e $\Delta v_{k+1/2}$ = distanza tra gli elementi [i,j,k-1] e [i,j,k] e tra gli elementi [i,j,k] e [i,j,k+1] nella direzione dello strato (z) [L].

La velocità di flusso q è moltiplicata per l'area $\Delta r_j \Delta c_i$ per ottenere il flusso in volume Q . Usando il valore di conduttanza nella direzione verticale, $CV_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta r_j \Delta c_i / \Delta v_{k-1/2}$ (McDonald & Harbaugh, 1988), è possibile riscrivere l'equazione (8) come:

$$Q_{i,j,k-1/2} = +CV_{i,j,k-1/2} (\mathbf{f}_{f,i,j,k-1} - \mathbf{f}_{f,i,j,k} + BUOY_{i,j,k-1/2} \Delta v_{k-1/2}) \quad \text{Eqn. 10}$$

Analogamente per l'equazione (9):

$$Q_{i,j,k+1/2} = +CV_{i,j,k+1/2} (\mathbf{f}_{f,i,j,k+1} - \mathbf{f}_{f,i,j,k} - BUOY_{i,j,k+1/2} \Delta v_{k+1/2}) \quad \text{Eqn. 11}$$

Nel modulo MOC gli spessori $THCK_{i,j,k}$ di tutti gli elementi [i,j,k] che compongono il grid sono noti, di conseguenza $\Delta v_{k-1/2}$ e $\Delta v_{k+1/2}$ possono essere riscritti rispettivamente come $(THCK_{i,j,k-1} + THCK_{i,j,k})/2$ e $(THCK_{i,j,k} + THCK_{i,j,k+1})/2$.

Riassumendo, le velocità, adattate per le differenze di densità introducendo il termine di *galleggiamento bouyancy*, sono derivate dalla distribuzione del carico d'acqua dolce. Successivamente il campo di velocità è usato nel modulo MOC per il calcolo del trasporto del soluto per simulare i cambiamenti nella distribuzione della concentrazione e, così, la distribuzione di densità. In questo modo nel codice di calcolo MOC3D il flusso ed il trasporto del soluto sono accoppiati. Tutto questo avviene grazie a tre riadattamenti necessari per rendere MOC3D appropriato al flusso a densità dipendente:

- 1) addizione dei due termini di *galleggiamento bouyancy* delle equazioni (10) e (11) all'equazione di flusso (2) di MODFLOW:

$$RHS_{i,j,k}^{new} \Rightarrow RHS_{i,j,k}^{old} - CV_{i,j,k-1/2} BUOY_{i,j,k-1/2} (THCK_{i,j,k-1} + THCK_{i,j,k})/2 + CV_{i,j,k+1/2} BUOY_{i,j,k+1/2} (THCK_{i,j,k} + THCK_{i,j,k+1})/2 \quad \text{Eqn. 12}$$

- 2) inserimento dei due termini di *galleggiamento bouyancy* delle equazioni (10) e (11) nel calcolo del flusso $Q_{i,j,k-1/2}$ e $Q_{i,j,k+1/2}$. Questi flussi vengono usati nel modulo MOC per simulare il trasporto di soluto per mezzo del metodo del *particle tracking*:

$$Q_{i,j,k-1/2}^{new} \Rightarrow Q_{i,j,k-1/2}^{old} + CV_{i,j,k-1/2} BUOY_{i,j,k-1/2} (THCK_{i,j,k-1} + THCK_{i,j,k})/2 \quad \text{Eqn. 13}$$

$$Q_{i,j,k+1/2}^{new} \Rightarrow Q_{i,j,k+1/2}^{old} - CV_{i,j,k+1/2} BUOY_{i,j,k+1/2} (THCK_{i,j,k} + THCK_{i,j,k+1})/2 \quad \text{Eqn. 14}$$

- 3) trasformazione dei carichi piezometrici h in carichi idraulici equivalenti di acqua dolce \mathbf{f}_f :

$$h_{i,j,k} \Rightarrow \mathbf{f}_{f,i,j,k}$$

I livelli piezometrici dell'acqua dolce, salmastra o salata misurati ad esempio durante una campagna di monitoraggio devono essere convertiti negli equivalenti carichi d'acqua dolce \mathbf{f}_f secondo la seguente relazione (Fig. 8.4):

$$\mathbf{f}_f = (h - z_{obs}) \frac{r_{obs}}{r_f} + z_{obs} \quad \text{Eqn. 15}$$

dove:

f_f = carico equivalente d'acqua dolce nel piezometro di osservazione rispetto ad un livello di riferimento (generalmente il l.m.m.) [L],

h = livello piezometrico osservato, riferito al livello di riferimento [L];

z_{obs} = altezza del punto di osservazione, riferito al livello di riferimento [L],

r_{obs} = densità della colonna d'acqua nel piezometro [ML^{-3}].

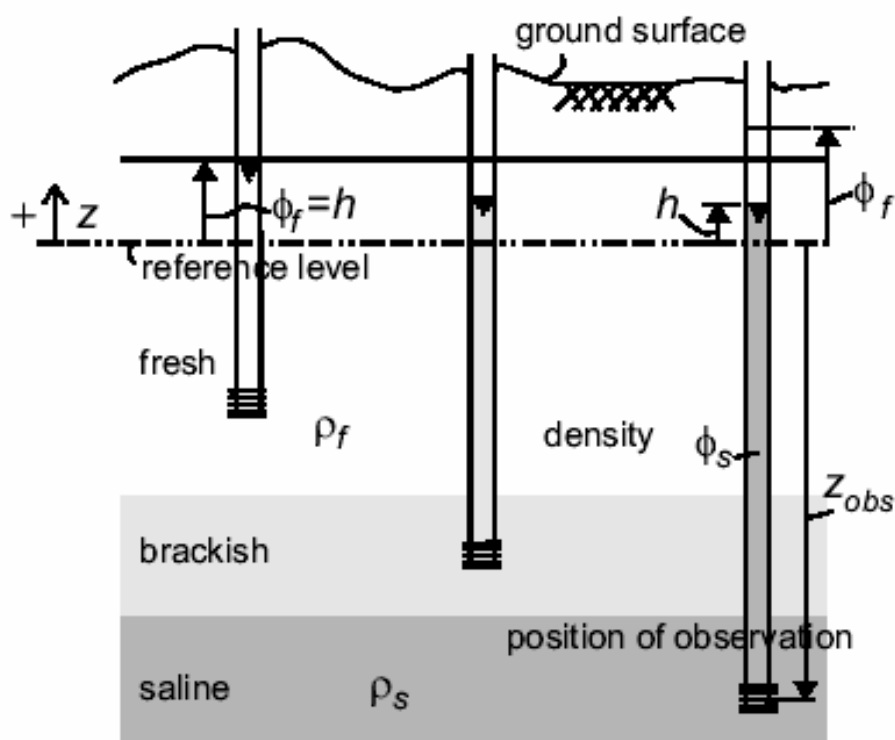


Fig. 8.4 – Conversione del livello piezometrico monitorato in carico equivalente di acqua dolce (da Oude Essink, 2001b)

8.2.3. Time step Δt

Nel caso di flussi a densità variabile, il campo di velocità dipende dalla distribuzione di densità e quando l'acqua dolce, salmastra e salina si spostano la distribuzione di densità cambia di conseguenza. Ad ogni intervallo di tempo (*time step*), la distribuzione del carico equivalente di acqua dolce ed il campo di velocità devono essere calcolati di nuovo. Perciò, la scelta degli intervalli discreti *time step* (Δt) è importante perché determina ogni quanto tempo il sistema di equazioni viene riformulato. Δt dipende

dalla velocità del processo del soluto considerato in quanto un grande intervallo di tempo potrebbe causare una soluzione non realistica. Per esempio, il *time step* Δt nei sistemi idrogeologici su grande scala nelle aree di dune costiere può essere dell'ordine di anni (Lebbe, 1983; Oude Essink, 1996); mentre vicino ad aree di estrazione di acqua profonda o di intrusione salata, dove la distribuzione di densità può variare molto velocemente è necessario un Δt più piccolo (dell'ordine dei mesi). Il giusto intervallo di tempo per le simulazioni è determinato in base all'esperienza e/o attraverso la calibrazione per tentativi con il metodo del *trial-and-error* che consiste in diversi test di calcolo per verificare la stabilità: se la distribuzione di densità cambia velocemente, sono necessari piccoli intervalli di tempo Δt .

8.2.4. Il trasporto del soluto: Modulo MOC

Per il trasporto del soluto, il modulo MOC usa il “metodo delle caratteristiche” per risolvere l'equazione di advezione-dispersione (Konikow & Bredehoeft, 1979; Konikow *et al.*, 1996). Il trasporto advettivo di soluto è calcolato con il metodo del *particle tracking* e il trasporto dispersivo con il metodo delle differenze finite.

La tecnica *particle tracking* consiste nel concentrare la massa di soluto disciolto in un certo numero di particelle discrete per ciascuna cella di calcolo e di simularne il moto all'interno della cella o il passaggio da una cella ad un'altra (o al limite l'uscita dal dominio di calcolo). Il calcolo del campo di velocità all'interno della singola cella si basa su opportune tecniche d'interpolazione, e la concentrazione viene valutata ad ogni passo di calcolo come rapporto tra il numero di particelle e il volume della cella.

Il vantaggio di questa applicazione è quello che le restrizioni sulla discretizzazione spaziale non sono rigide (Oude Essink, 2001a). Questo è diverso da quanto avviene negli altri codici di calcolo che risolvono l'equazione advezione-dispersione con il metodo standard delle differenze finite e degli elementi finiti (Jensen & Finlayson, 1978; Frind & Pinder, 1983; Daus *et al.*, 1985; Oude Essink & Boekelman, 1996). Di conseguenza, lo spostamento d'acqua a densità diversa, in un sistema idrogeologico a grande scala, può essere modellizzato facilmente senza problemi numerici quali ad esempio un eccesso di dispersione numerica, grandi oscillazioni numeriche o la non convergenza dell'equazione del trasporto di soluto.

L'equazione per il trasporto in 3 dimensioni del soluto in un mezzo poroso omogeneo isotropico è descritta dalle equazioni di advezione e dispersione secondo la seguente formula:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{i,j} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C V_i) + \frac{(C - C')W}{n_e} - R_d I C \quad \text{Eqn. 16}$$

dove:

R_d = fattore di ritardo che governa l'adsorbimento (-) e dipende dal soluto e dal mezzo poroso,

C = concentrazione dei solidi dissolti [ML^{-3}],

C' = concentrazione dei solidi dissolti nei flussi in ingresso ed in uscita [ML^{-3}],

$D_{i,j}$ = coefficiente di dispersione idrodinamica [L^2T^{-1}],

$V_i = q_i / n_e$ = velocità efficace nella direzione di x_i [LT^{-1}],

n_e = porosità effettiva del mezzo (-),

$W(x,y,z,t)$ = termine generale per indicare gli apporti e le perdite di soluto dal sistema [T^{-1}],

I = costante relativa alle reazioni dipendenti dalla specie (idrolisi, decadimento) [T^{-1}].

Il primo termine della parte destra dell'equazione (16) rappresenta la variazione di concentrazione del soluto dovuta alla dispersione idrodinamica; il secondo termine la componente advettiva, il terzo termine il contributo o la rimozione di soluti dovuti a ingressi e/o uscite.

MOCDENS3 tiene così in considerazione la dispersione idrodinamica (diffusione molecolare e dispersione meccanica), espressa con la seguente equazione:

$$D_{ij} = (D_m + \mathbf{a}_T |\mathbf{V}|) \mathbf{d}_{ij} + (\mathbf{a}_L - \mathbf{a}_T) \frac{V_i V_j}{|\mathbf{V}|} \quad \text{Eqn. 17}$$

dove:

D_{ij} = coefficiente di dispersione idrodinamica [L^2T^{-1}],

D_m = coefficiente di diffusione molecolare [L^2T^{-1}],

\mathbf{a}_L = dispersività longitudinale dell'acquifero [L],

\mathbf{a}_T = dispersività trasversale dell'acquifero [L],

V_i e V_j = componenti della velocità efficace rispettivamente nelle direzioni i e j [LT^{-1}],

$|V|$ = valore assoluto della velocità efficace [LT^{-1}],

$d_{ij} = 1$ se $i = j$ e $d_{ij} = 0$ se $i \neq j$

Nel modulo MOC l'equazione di flusso è abbinata al trasporto di soluto e la densità $r_{i,j,k}$ viene messa in relazione con la concentrazione del soluto $C_{i,j,k}$ in acqua per ciascun elemento $[i,j,k]$ grazie all'equazione lineare di stato:

$$r_{i,j,k} = r_f \left(1 + \frac{r_s - r_f}{r_f} \frac{C_{i,j,k}}{C_s} \right) \quad \text{Eqn. 18}$$

dove:

$r_{i,j,k}$ = densità dell'acqua nell'elemento $[i,j,k]$ [ML^{-3}],

r_s = densità dell'acqua salata [ML^{-3}],

$C_{i,j,k}$ = concentrazione del soluto in acqua nell'elemento $[i,j,k]$ in mg TDS/l [ML^{-3}],

C_s = concentrazione di riferimento del soluto nell'acqua salata (per esempio 35000 mg TDS/l) [ML^{-3}].

Durante le simulazioni numeriche, le variazioni di concentrazione dei soluti, trasportati da avvezione, dispersione e diffusione molecolare, influenzano la densità e di conseguenza il flusso. Quest'ultimo viene poi regolarmente ricalcolato per tener conto di queste variazioni di densità.

8.3. MODELLIZZAZIONE NUMERICA DELL'AREA DI STUDIO

8.3.1. Parametri dell'acquifero

Per le simulazioni numeriche sono stati definiti i seguenti parametri idrogeologici:

- geometria del sistema;
- caratteristiche petrofisiche (conduttività idraulica, porosità e spessore degli strati, dispersività longitudinale e trasversale);
- posizione e caratteristiche dei fiumi e dei canali di drenaggio;
- ricarica naturale dell'acquifero;
- condizioni iniziali e al contorno;

- carico piezometrico corretto per le differenze di densità;
- distribuzione iniziale della concentrazione salina.

8.3.2. Geometria del sistema

Il modello che è stato costruito è un profilo 2D localizzato nella parte sud della pineta dove si sono registrati i maggiori tassi di subsidenza durante gli ultimi decenni ed i valori più alti di salinità durante la campagna di monitoraggio. Il profilo è una sezione verticale dell'area di studio ed è stato scelto perpendicolare a costa in modo da attraversare tutti i diversi ambienti da costa verso l'interno, come indicato in Fig. 8.5.

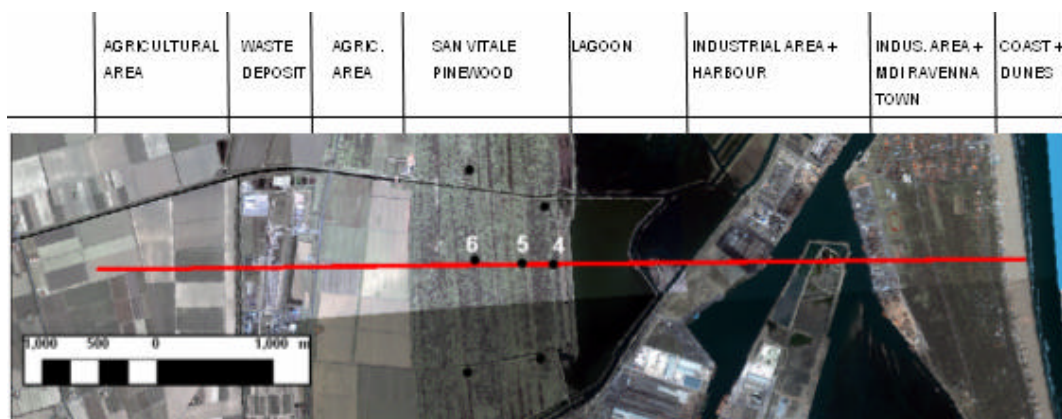


Fig. 8.5 – Profilo nell'area sud della pineta, tra lo Scolo Canala e lo Scolo di Via Cerba. (Notare che il profilo passa per i 3 piezometri n. 4, 5, 6)

Il dominio del modello è stato ottenuto creando un rettangolo di 8000 m di lunghezza e 60 m di profondità. Tale area è stata discretizzata con una griglia rettangolare a maglie regolari con elementi di 50 m di lunghezza e 0.5 m di profondità per un totale di 19200 elementi: $n_x = 160$, $n_z = 120$ dove n_i indica il numero degli elementi nella direzione i . Ogni elemento contiene 9 particelle per risolvere il termine di avvezione dell'equazione del trasporto di soluto con il metodo delle caratteristiche; inizialmente nel modello vengono usate un totale di 172800 particelle.

Per il calcolo dell'equazione di flusso è stato scelto un intervallo di tempo Δt di un mese. Il tempo di simulazione totale è differente per ogni scenario considerato.

Considerando i dati geologici, gli *slug test* e i rilievi di resistività elettrica descritti nei capitoli precedenti, si è caratterizzato l'acquifero e la sua geometria. La Fig. 8.6

mostra la suddivisione dell'acquifero freatico in 5 unità principali e riporta i rispettivi spessori ed i valori di conduttività idraulica.

L'anisotropia, ovvero il rapporto tra la conduttività idraulica orizzontale e verticale K_z/K_x , è 1/3 per tutti gli strati. Il valore medio di porosità effettiva n_e è 25% (RER & ENI-AGIP, 1998). La dispersività longitudinale a_L è uguale a 0.1 m, mentre il rapporto tra la dispersività trasversale e longitudinale a_T/a_L è 0.1.

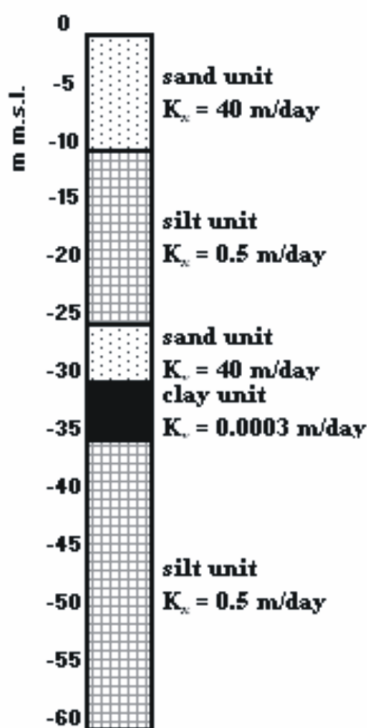


Fig. 8.6 – Suddivisione dell'acquifero permeabile nelle unità principali e relativi valori di conduttività idraulica (k_x) così come utilizzati nel modello numerico.

Il coefficiente di diffusione molecolare D_m in un mezzo poroso per un soluto conservativo come il cloruro è uguale a 10^{-9} m²/s.

Tutti i dati di input per definire la geometria del sistema sono stati convertiti nel formato MODFLOW. I pacchetti, o moduli, di MODFLOW, cosiddetti RIVER, DRAIN e RECHARGE (Fig. 8.1), sono stati implementati nel modello per rappresentare l'influenza dei corpi idrici superficiali e della ricarica sulle acque sotterranee.

Il modulo RIVER è usato per simulare l'interazione del flusso tra l'acqua superficiale e l'acquifero freatico usando la cosiddetta conduttanza. La conduttanza è un parametro che rappresenta la resistenza al flusso fra un corpo idrico a livello costante e

l'acqua sotterranea e si calcola con: lunghezza del ramo di fiume nell'elemento (L), ampiezza del fiume nell'elemento (W), spessore del letto dei sedimenti del fiume (M) e conduttività idraulica del materiale del letto del fiume (K) (Fig. 8.8)

Il contributo dei fiumi viene simulato in funzione del gradiente piezometrico esistente tra la superficie del fiume e le acque sotterranee (Fig. 8.7). MODFLOW simula i fiumi come corpi d'acqua separati dal sistema di acque sotterranee da strati di materiali a permeabilità costante, cella per cella. Per ogni cella del modello rappresentante il fiume o il canale è valida la seguente equazione:

$$Q_{riv} = C_{riv}(\mathbf{f}_{riv} - \mathbf{f}_{aquifer}) \quad \text{Eqn. 19}$$

dove:

Q_{riv} = perdita d'acqua lungo l'alveo fluviale [L^3T^{-1}],

C_{riv} = conduttanza del fondo del fiume; dipende dalla conduttività idraulica K e dalla sezione trasversale del flusso (Fig. 8.8)[L^2T^{-1}].

Nelle simulazioni del caso studio della pineta, questo modulo è utilizzato per simulare i canali nell'area agricola. Il livello dei canali è stato impostato a -0.5 m, con un fondo a -1.5 m e una conduttanza di 0.4 m²/giorno. I canali vengono implementati al top del sistema e vengono utilizzati o no a seconda dello scenario considerato, come si vedrà di seguito. Inoltre, nelle diverse simulazioni i livelli idrici vengono variati a seconda del tasso di subsidenza che si vuole implementare.

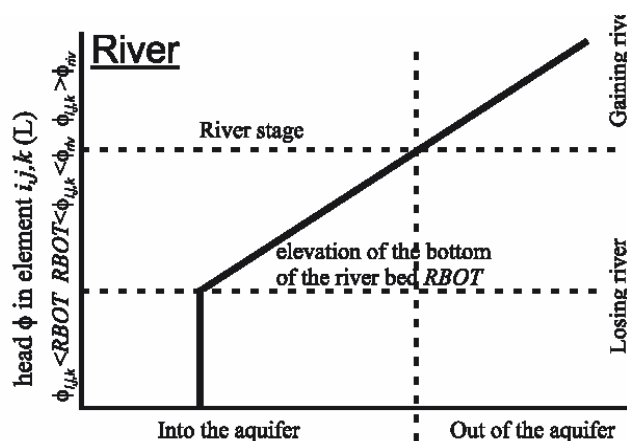


Fig. 8.7 – Comportamento del Modulo RIVER in relazione al carico idraulico f dell'acquifero: se il livello freatico dell'acquifero è superiore al livello del fiume, si ha un deflusso di acqua dall'acquifero in direzione del fiume; se il livello freatico è minore del livello fluviale, il fiume agirà da ricarica per l'acquifero.

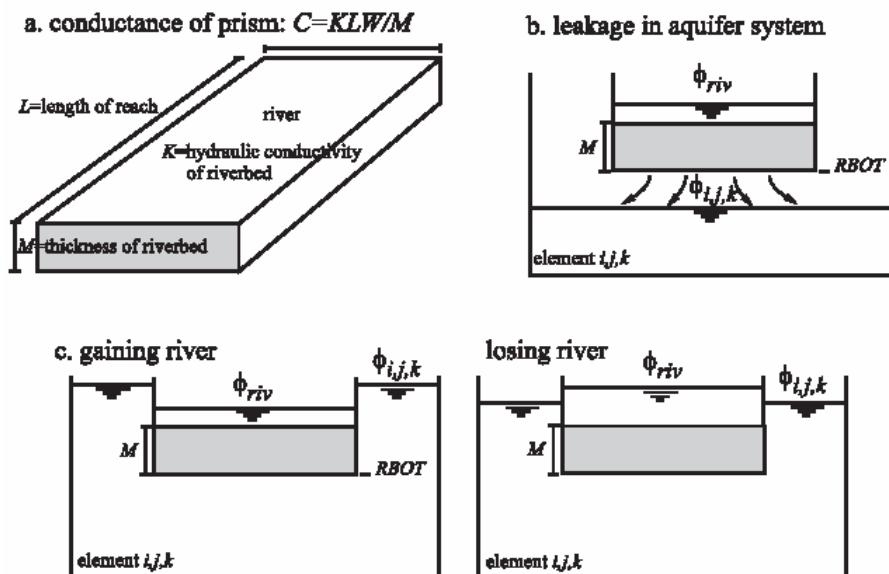


Fig. 8.8 – Modellizzazione di un fiume con il modulo RIVER di MODFLOW: a) il letto del fiume è schematizzato come un prisma di materiale poroso; b) la perdita d’acqua avviene attraverso l’alveo fluviale se il carico idraulico $f_{i,j,k}$ è inferiore al fondo del fiume; c) le due sezioni mostrano le interazioni tra il carico nell’acquifero e quello nel fiume: il fiume guadagna o perde acqua (da Oude Essink, 2000a).

Il modulo DRAIN serve per simulare il deflusso di acqua dall’acquifero per mezzo di canali di drenaggio. la funzione si basa sull’assunzione che il drenaggio non ha effetto quando il livello dell’acqua sotterranea scende sotto la quota del dreno.

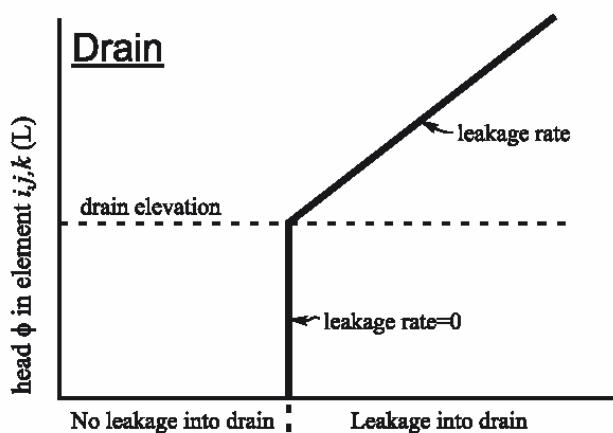


Fig. 8.9 – Comportamento del Modulo DRAIN in relazione al carico idraulico f dell’acquifero: se il livello freatico dell’acquifero è superiore alla quota del dreno (*drain elevation* in figura), allora si innesca il meccanismo di drenaggio e avviene una perdita d’acqua dall’acquifero verso il canale di drenaggio (*leakage into drain* in figura) (da oude Essink, 2000a).

La Fig. 8.9 mostra il modulo di drenaggio come una funzione del carico idraulico f dell'acquifero:

$$\text{se } f_{i,j,k} > d_{i,j,k} \quad \text{allora } Q_{dr} = C_{dr}(f_{i,j,k} - d_{i,j,k})$$

$$\text{se } \phi_{i,j,k} \leq d_{i,j,k} \quad \text{allora } Q_{dr} = 0$$

dove:

$$Q_{dr} = \text{efflusso di acqua dall'acquifero in direzione del canale di drenaggio [L}^3\text{T}^{-1}\text{]},$$

$$C_{dr} = \text{conduttanza del canale di drenaggio [L}^2\text{T}^{-1}\text{]},$$

$$d_{i,j,k} = \text{altezza del livello di acqua libera nel dreno [L].}$$

Quando questo modulo è usato, il livello scelto varia da 0 m, nella zona agricola, a 0.14 m negli scoli all'interno della pineta fino a -1.6 m della zona della discarica comunale (a ovest della pineta). La conduttanza varia da 0.75 a 1.44 m²/giorno.

Il modulo RECHARGE è invece costruito per simulare la ricarica naturale dell'acquifero e nel nostro caso è stato creato usando i dati del bilancio idrologico descritti nel capitolo 3 e considerando i diversi usi del suolo (Tabella 8.1). Così, al top del sistema, i valori di ricarica naturale sono differenti a seconda dell'uso del suolo e variano da un massimo di 0.046 m/mese nell'area costiera ed agricola nel mese di novembre ad un minimo di 0 m/mese.

La ricarica viene applicata allo strato 1 ed il raggiungimento della tavola d'acqua viene calcolato attraverso le proprietà idrauliche delle celle. Le oscillazioni stagionali e locali del valore di ricarica naturale dell'acquifero determinano le oscillazioni del carico idraulico.

Tabella 8.1 - Valori di ricarica naturale dell'acquifero implementati nel modulo RECHARGE di MODFLOW. I valori di precipitazione sono quelli di tabella 3.1 Cap.3; i coefficienti di ruscellamento usati per il calcolo di runoff sono quelli di tabella 3.4 Cap.3; i valori di evapotraspirazione effettiva sono stati calcolati con il modello WATBAL come descritto nel paragrafo 3.2.2 Cap.3, il simbolo # indica un deficit e quindi ricarica naturale = 0.

	DUNA/ARENILE				PINETA		
	P(m)	AET (m)	runoff (m)	ricarica (m)	AET (m)	runoff (m)	ricarica (m)
Gennaio	0.044	0.009	0.002	0.033	0.012	0.004	0.028
Febbraio	0.037	0.016	0.002	0.019	0.021	0.004	0.012
Marzo	0.053	0.033	0.003	0.017	0.043	0.005	0.005
Aprile	0.048	0.054	0.002	#	0.071	0.005	#
Maggio	0.045	0.082	0.002	#	0.064	0.005	#
Giugno	0.046	0.054	0.002	#	0.059	0.005	#
Luglio	0.045	0.050	0.002	#	0.050	0.005	#

Agosto	0.061	0.062	0.003	#	0.062	0.006	#
Settembre	0.061	0.061	0.003	#	0.061	0.006	#
Ottobre	0.051	0.038	0.003	0.010	0.050	0.005	#
Novembre	0.068	0.019	0.003	0.046	0.024	0.007	0.037
Dicembre	0.047	0.010	0.002	0.035	0.013	0.005	0.029
		ZONA URBANIZZATA/INDUSTRIA LE			ZONA AGRICOLA		
	P(m)	AET (m)	runoff (m)	ricarica (m)	AET (m)	runoff (m)	ricarica (m)
Gennaio	0.044	0.007	0.031	0.006	0.008	0.003	0.033
Febbraio	0.037	0.013	0.026	#	0.014	0.003	0.020
Marzo	0.053	0.028	0.037	#	0.030	0.004	0.019
Aprile	0.048	0.047	0.034	#	0.049	0.003	#
Maggio	0.045	0.071	0.032	#	0.074	0.003	#
Giugno	0.046	0.085	0.032	#	0.088	0.003	#
Luglio	0.045	0.067	0.032	#	0.061	0.003	#
Agosto	0.061	0.065	0.043	#	0.066	0.004	#
Settembre	0.061	0.054	0.043	#	0.057	0.004	0.000
Ottobre	0.051	0.032	0.036	#	0.034	0.004	0.013
Novembre	0.068	0.016	0.048	0.004	0.017	0.005	0.046
Dicembre	0.047	0.008	0.033	0.006	0.009	0.003	0.035

Le condizioni idrostatiche al contorno sono state implementate lungo i 4 confini del sistema con il modulo GENERAL HEAD BOUNDARY.

Lungo entrambi i confini verticali si è impostata, come condizione al contorno, uno stato specifico di carico idraulico dovuto all'acqua di mare per il confine destro e dovuto all'acqua dolce per il confine sinistro. Le pressioni aumentano in modo lineare con la profondità.

Inoltre, lungo il confine destro sono state implementate le variazioni stagionali della concentrazione dell'acqua di mare così come emerge dai dati di monitoraggio dello studio della Dott.ssa Ulazzi (Ulazzi, 2003). Nei primi strati (top del sistema, $k=2$) del confine destro e nei corpi d'acqua salata, come i canali portuali e la Piallassa Baiona che sono direttamente connessi con il mare, si sono impostati i seguenti valori stagionali di concentrazione dell'acqua di mare:

- 17.5 g/l per il periodo invernale;
- 33 g/l per il periodo autunnale;
- 29.6 per il periodo primaverile;
- 34 g/l per il periodo estivo.

Sempre lungo il confine destro, per gli strati più profondi ($k>2$) viene usato invece il valore medio di salinità pari a 25 g/l.

Il livello del mare è costante nel tempo per tutti gli scenari presentati ad eccezione dell'ultima simulazione, descritta nei paragrafi seguenti, dove viene implementato il futuro innalzamento del livello del mare.

Non c'è flusso lungo il confine inferiore (impermeabile) dell'acquifero, mentre sul confine superiore (top del sistema) viene implementata la ricarica di acqua dolce (Tabella 8.1).

Per tutti i valori di carico idraulico si è preso come livello di riferimento il l.m.m. Il livello della tavola d'acqua varia lungo il profilo da un massimo di 0.6 m nell'area della duna costiera o localmente sotto le dune fossili in pineta, ad un valore minimo di -1.5 - -1.6 m nella parte ovest del sistema, vicino alle idrovore e alla discarica comunale.

Naturalmente queste condizioni iniziali e al contorno variano man mano che si procede con le simulazioni in quanto ogni output che il modello restituisce costituisce anche la condizione iniziale (l'input) per la simulazione successiva.

L'evoluzione del sistema idrogeologico nel tempo è ottenuta variando man mano i file di input delle sottounità di programma (*packages*) ed i parametri (concentrazione, carichi idraulici, ecc.) per ogni simulazione. In questa maniera è stato possibile ricostruire la situazione presente (2006) partendo da una situazione iniziale (1700) molto differente.

8.3.3. Risultati forniti

Per quanto attiene all'output, i risultati del programma vengono forniti in formato ASCII, per cui si prestano ad essere facilmente rielaborati. Il programma produce in uscita:

- le altezze piezometriche (*headfile.out*) ed il campo di velocità (*convelo.tec*);
- concentrazioni del soluto (*concfi.out*)

Le stesse grandezze possono essere confrontate con i dati di monitoraggio e si può così valutare la rispondenza del modello alla realtà.

8.3.4. Calibrazione

La calibrazione del modello è stata focalizzata sul carico idraulico e la concentrazione salina nel sistema idrogeologico usando il metodo “*trial and error*” (Ne-Zheng Sun, 1994). Sfortunatamente, le misure di monitoraggio disponibili sono

insufficienti per ottenere una buona correlazione nella parte più profonda della falda acquifera perché si dispone di punti di osservazione (cfr. piezometri in pineta) poco profondi e si hanno poche informazioni sulla salinità dell'acquifero in profondità. Inoltre, si dispone di un dataset continuo ed affidabile solo per un periodo breve (monitoraggio di un anno) e relativo ad una piccola parte di tutta l'area di studio. Altri dati non sono facilmente reperibili per il resto del sistema. Per migliorare la correlazione tra i valori calcolati dal modello e quelli misurati in campo, si dovrebbe disporre di una rete più fitta e omogeneamente distribuita di punti di misura. Inoltre, la salinizzazione del sistema e il carico di sale (*salt load*) nell'area pinetata dovrebbero essere monitorati per un periodo di tempo più lungo in modo da disporre di una serie temporale significativa.

L'errore medio tra i valori di carico idraulico misurati e quelli computati dal codice di calcolo, corretti per la differenza di densità, è di 0.39 m. In alcuni casi la differenza è piuttosto grande, specialmente durante la primavera, nei mesi di aprile, maggio e giugno. Queste differenze sono dovute alla complessità del sistema, ad una distribuzione iniziale della densità non precisa e ad una insufficiente e non uniforme densità di dati per calibrare il modello.

Dal momento che il sistema attualmente (2006) non è ancora in uno stato di equilibrio, bensì è instabile dal punto di vista idrodinamico, non era possibile impostare la distribuzione di densità nell'acquifero simulando la situazione di stress attuale per un periodo di tempo lungo. Per ridurre gli errori si è deciso, quindi, che il modo più opportuno era quello di partire dall'acquifero nelle condizioni indisturbate del passato (1700) e aggiungere man mano le complessità in modo da simulare gli eventi che si sono succeduti nel tempo (processi naturali e attività antropiche).

8.4. SIMULAZIONI NUMERICHE

Sono stati scelti 4 scenari per descrivere l'evoluzione dell'area e per ciascuno sono stati implementati parametri diversi tenendo conto dei vari usi del suolo, delle diverse morfologie ed estensioni delle aree nel corso dei secoli e dei diversi tassi di subsidenza.

L'attenzione è stata focalizzata soprattutto sui primi strati (primi 3 metri di profondità) al di sotto della pineta perché sono quelli che più influiscono sulla crescita e sopravvivenza del pino.

(Notare che tutte le figure che verranno riportate relative alle simulazioni sono state tagliate -30 m, profondità del basamento argilloso dell'acquifero freatico, perché al di sotto di questa profondità le variazioni di concentrazione non sono significative.)

8.4.1. Periodo 1700-1920: sviluppo naturale dell'area

Il raggiungimento dello stato di partenza rappresenta, in tutti i modelli previsionali, l'operazione più difficile perché deriva da operazioni successive durante le quali le variabili vengono via via modificate fino al raggiungimento dello stato monitorato. Questa simulazione serve come caso di riferimento per capire l'effetto della subsidenza naturale sull'acquifero costiero e sulla geometria dell'interfaccia acqua dolce – acqua salata.

Le condizioni iniziali e al contorno sono schematizzate in Fig. 8.10.

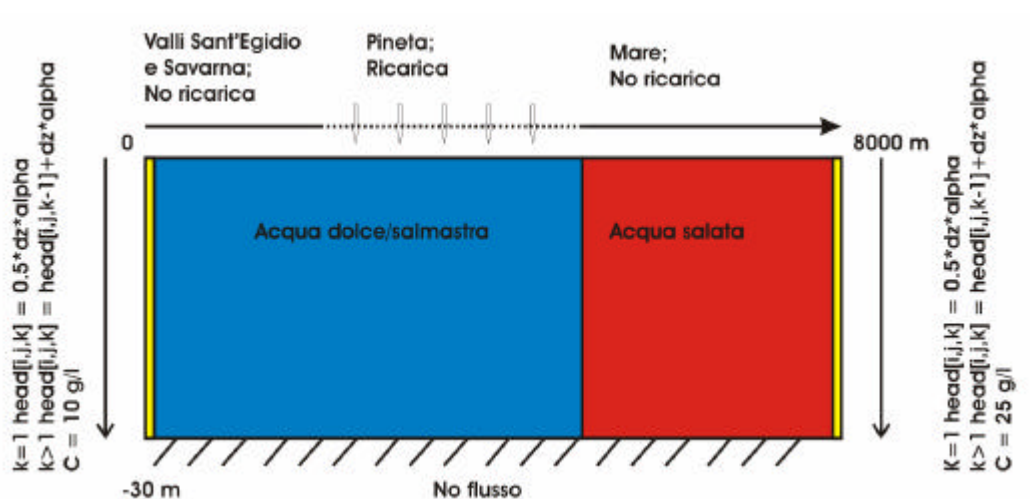


Fig. 8.10 – Schematizzazione dell'acquifero usata per la simulazione 1700-1920.

Si è partiti dalla geometria dell'area di studio nel 1700 (Fig. 8.11) quando si può pensare ad un acquifero in condizioni indisturbate. Partendo dall'analisi delle carte storiche e del diverso uso del suolo dell'epoca, si è adattata la geometria dell'acquifero alla morfologia di allora, molto diversa rispetto all'attuale in quanto:

- la pineta era più ampia, circa 3 km di larghezza contro gli 1-1.5 km attuali;
- la Piallassa Baiona mancava e la pineta confinava direttamente con il mare (cfr. Cap. 2, par. 2.2.3);

- a ovest della pineta, al posto dell'attuale zona agricola, c'erano le valli di acqua dolce/salmastra di Sant'Egidio e Savarna (Provincia di Ravenna, 2005).

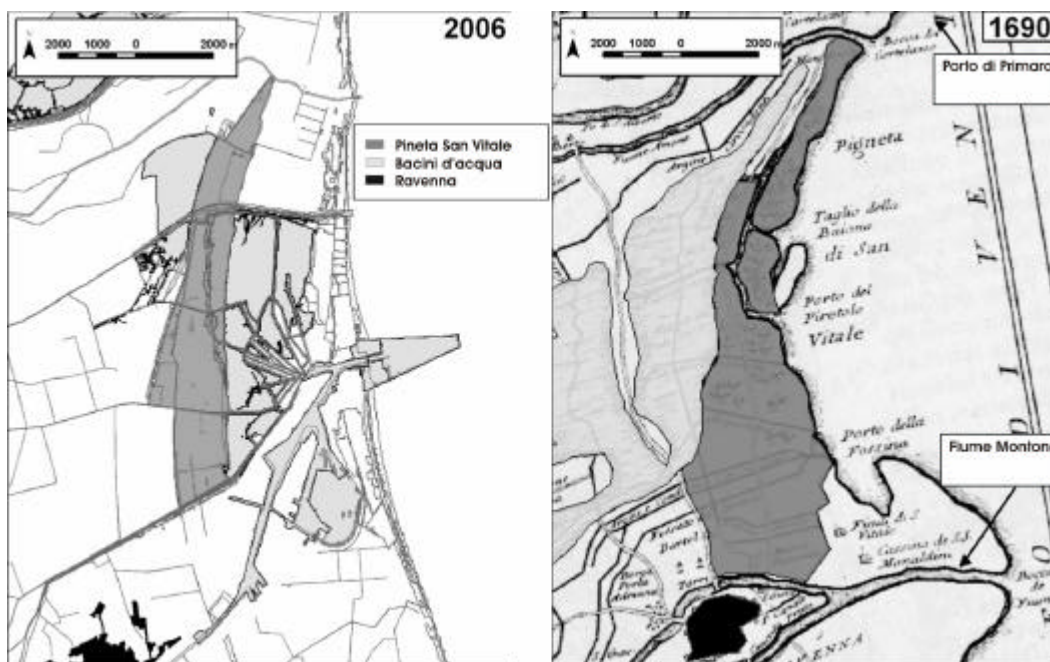


Fig. 8.11 – Attuale estensione dell'area di studio nel 2006 (a sinistra) e nel 1690. Notare i profondi cambiamenti che ha subito il sistema dal punto di vista morfologico. (carta storica georeferenziata, Coronelli 1690)

Data la morfologia dell'area, in questa simulazione i moduli RIVER e DRAIN non sono stati utilizzati ed è stato implementato un differente uso del suolo, rispetto a quello schematizzato in Tabella 8.1, che tenesse conto dell'assenza della zona industriale e urbanizzata costiera e della presenza delle valli al posto dell'attuale area agricola.

L'iniziale carico idraulico è stato ricalcolato sulla base della subsidenza totale della città di Ravenna, almeno da quando si hanno dati in bibliografia (Preti, 2000), ed è stato impostato uguale a 1.4 m s.l.m. al top del sistema sia per la pineta che per le valli. Ad ogni *time step* successivo il carico idraulico viene ricalcolato tenendo conto dei tassi di abbassamento naturale descritti precedentemente nel Cap. 2, par. 2.2.6.

La Fig. 8.12 mostra l'output del modello al 1920 ed evidenzia che, in "condizioni naturali" (in assenza di un sistema di drenaggio artificiale e senza l'influenza della subsidenza antropica) l'acquifero artificiale ha un carico idraulico in grado di contrastare l'intrusione salina. Dopo l'intervallo di tempo simulato (220 anni), l'interfaccia acqua dolce-acqua salata è ancora profonda e si spinge fino al basamento

argilloso dell'acquifero (30 m). La subsidenza naturale non ha quindi effetto sull'acquifero e sulla sua salinizzazione in quanto vi è un equilibrio dinamico.

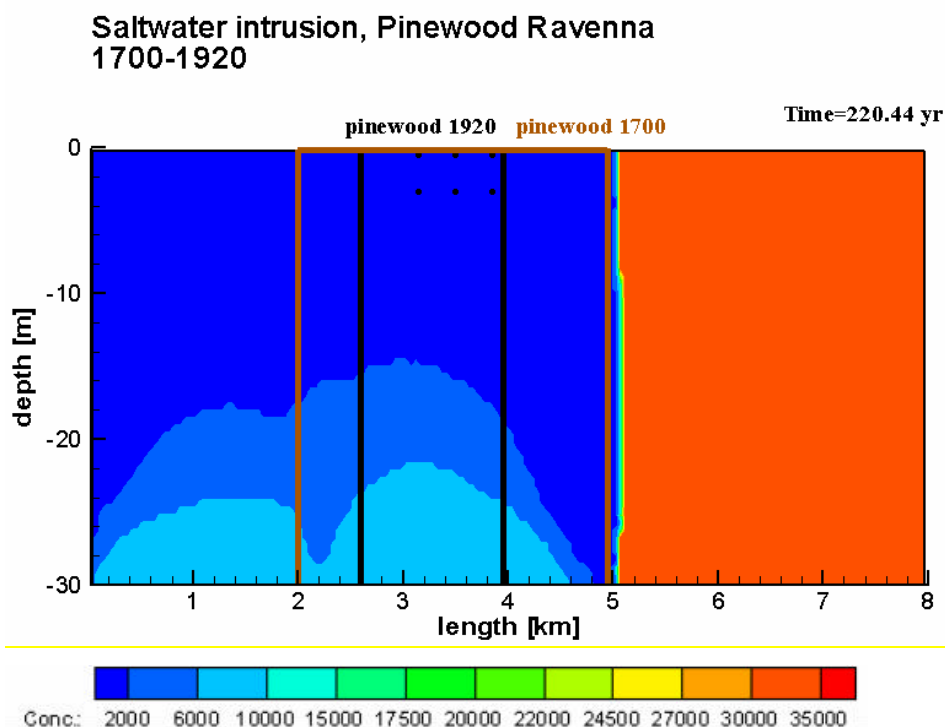


Fig. 8.12 – Distribuzione della concentrazione (g/l) nell'acquifero nel 1920, dopo una simulazione di 220 anni. (Notare la diversa estensione della pineta nel 1700 (rettangolo in colore marrone) e nel 1920 (rettangolo in colore nero); con i puntini neri sono invece indicati i "pozzi di osservazione" del modello che corrispondono ai piezometri n.4.5.6 della pineta.

Occorre precisare che per questa simulazione sono state introdotte molte semplificazioni della realtà perché in questo intervallo di tempo (1700-1920) la morfologia ha subito numerosi cambiamenti e ci sono poche informazioni riguardo alla salinità dell'acquifero. Questa simulazione è stata fatta soprattutto per ottenere un output più realistico ed un'iniziale distribuzione della densità e forma dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata da poter usare come punto di partenza per le successive simulazioni.

8.4.2. Periodo 1920-1996: subsidenza antropica

Questa simulazione serve come caso di riferimento per quantificare l'effetto delle passate attività umane (sviluppo industriale e bonifica dei terreni) e le loro conseguenze (subsidenza antropica, drenaggio, ecc.) sul fenomeno dell'intrusione salina.

Durante gli anni 1920-1996, la bonifica dei terreni ha modificato profondamente il territorio in esame creando un complesso sistema di drenaggio; in questo contesto, le aree umide adiacenti alla pineta sono state bonificate e convertite in zone agricole. Inoltre dal 1930 incominciò lo sviluppo urbano e turistico del litorale ravennate che culminò negli anni '60-'70 con la costruzione del porto di Ravenna e del polo industriale a sud-est della pineta. Durante l'intenso sviluppo industriale, l'estrazione di gas metano e d'acqua dal sottosuolo determinò alti valori di subsidenza artificiale portando ad una topografia con molte aree al di sotto del livello medio mare.

L'output della precedente simulazione (1700-1920) è stato usato come condizione iniziale anche se, in questo specifico scenario, sono stati implementati anche i moduli DRAIN e RIVER per simulare il drenaggio e la ricarica nell'area agricola ed in pineta. Anche in questa simulazione, il carico idraulico dei canali e degli scoli di drenaggio varia in accordo ai differenti tassi di subsidenza implementati e che sono stati così schematizzati (Preti, 2000):

- 4 mm/anno per l'intervallo 1920-1950;
- 25 mm/anno per l'intervallo 1950-1970;
- 35 mm/anno per l'intervallo 1970-1980;
- 5 mm/anno per l'intervallo 1980-1996.

Inoltre, è stato implementato il modulo RECHARGE come in Tabella 8.1 considerando i diversi usi del suolo.

La Fig. 8.13 mostra gli output della simulazione relativi agli anni 1950, 1970, 1980 e 1996.

I dati di output indicano che l'acqua salina intrude dalla Piailassa e dal fondo verso l'interno della pineta con una velocità media di circa 20-30 m/anno. La ridotta ricarica dell'acquifero ed il basso livello freatico nella zona industriale non permettono di contrastare l'intrusione salina dai canali del porto e dalla laguna e vi è una risalita di acqua salta dal fondo.

In pineta e nella zona agricola ad ovest, il carico idraulico ed i flussi sono governati, invece, dal sistema di drenaggio. I bassi valori di ricarica dell'acquifero e l'abbassamento del livello freatico dovuto al pompaggio delle idrovore causano un spostamento verso terra del cuneo salino che, al basamento dell'acquifero, avanza di circa 1 km in direzione della pineta rispetto alla condizione di partenza (Fig. 8.13 a, d).

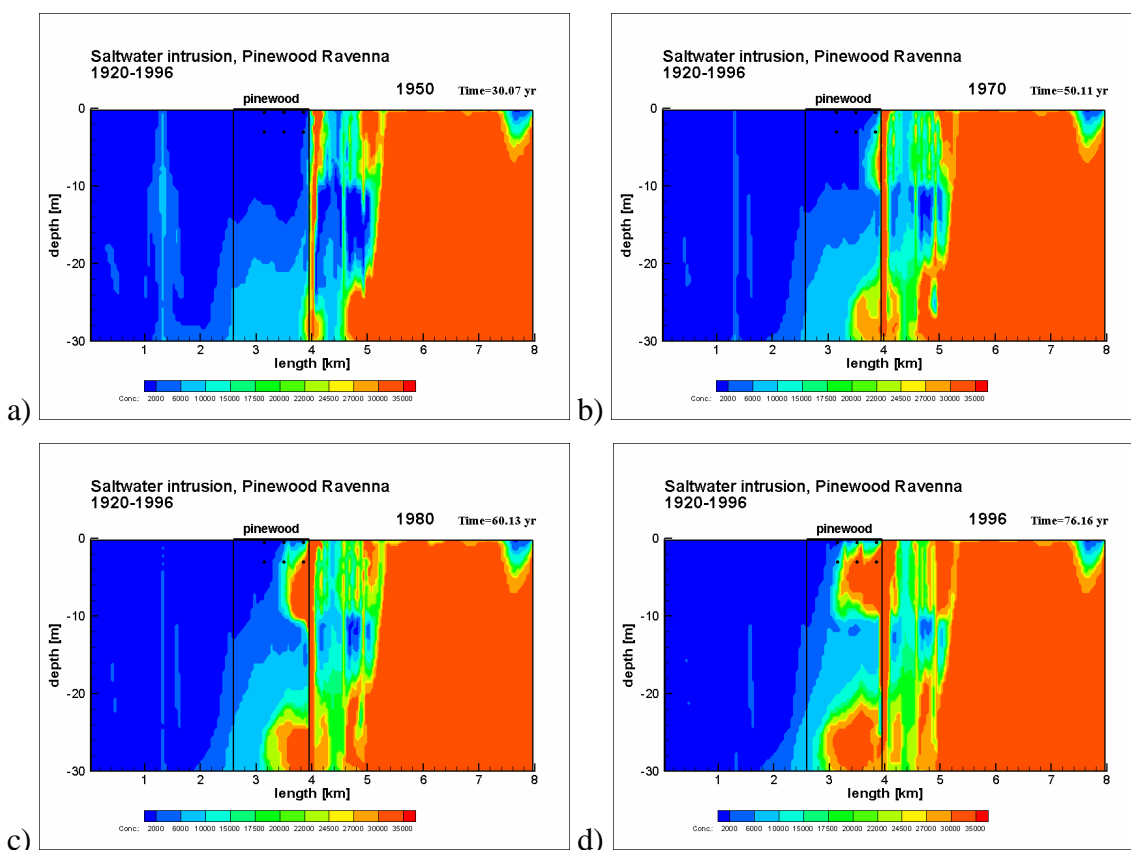


Fig. 8.13 – Distribuzione della concentrazione (g/l) nell’acquifero in 4 distinti momenti della simulazione: a) 1950; b) 1970; c) 1980; d) 1996. L’aumento di salinità maggiore è registrato in pineta durante il periodo di massima subsidenza (anni '70-'80).

L'intrusione salina aumenta notevolmente durante gli anni '70 (Fig. 8.13 b) e '80 (Fig. 8.13 c), periodo in cui si registrano i maggiori tassi di subsidenza.

Nello strato centrale limoso (-10 - -25 m) l'incremento della concentrazione salina è minore perché la conduttività idraulica è più bassa rispetto alle unità sabbiose superiori (0 - -10 m) ed inferiori (-25 - -30 m) (Fig. 8.6).

8.4.3. Periodo 1996-2006: chiusura del Chiaro del Pontazzo

Questa simulazione ha come obiettivo quello di quantificare gli effetti dell'intervento che nel 1996 portò all'arginatura e alla chiusura del Chiaro del Pontazzo. Negli anni 1996-97, per evitare l'ingressione di acque salate nella zona più meridionale della pineta, una parte della laguna venne isolata mediante il ripristino di un argine esistente con l'intento di creare un bacino di acqua dolce che si interponesse tra il resto della laguna salata e la pineta. Dentro questo bacino confluiscono acque dolci dei canali di

bonifica Via Cerba e Canala che da qui defluiscono verso la Piallassa attraverso un manufatto dotato di ventola per impedire il riflusso di acque salate nel bacino stesso. Pertanto la salinità è medio-bassa e varia 3.0 g/l in superficie a 8.0 g/l in profondità.

Il livello idraulico è mantenuto mediamente uguale al livello del mare (0 m. m.s.l) grazie alle paratorie.

Partendo dall'output della simulazione precedente (situazione al 1996), sono stati inseriti nuovi valori di concentrazione per l'acqua del Chiaro e il livello freatico iniziale è stato impostato uguale a 0 m e costante nel tempo per tutto il periodo simulato.

Il tasso di subsidenza implementato per i 10 anni simulati è 5 mm/anno.

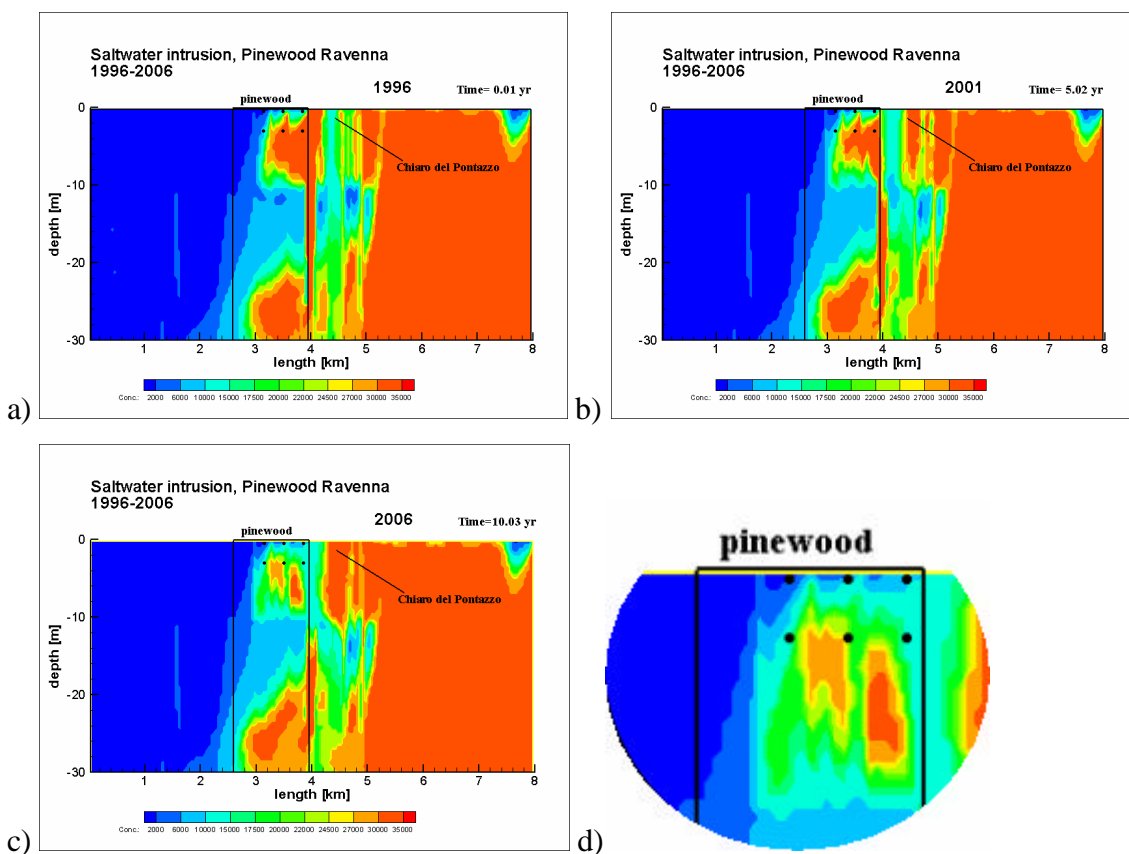


Fig. 8.14 – Distribuzione della concentrazione (g/l) nell'acquifero in 3 distinti momenti della simulazione: a) 1996; b) 2001; c) 2006; d) ingrandimento dell'output finale (2006) della parte superiore dell'acquifero (0 - -10 m), al di sotto della pineta.

La chiusura del bacino d'acqua e la diminuzione della salinità causano una riduzione della concentrazione di sale nella parte superiore dell'acquifero (0 - -10m), subito sotto la pineta (Fig. 8.14 c). Analizzando i file di output relativi alla concentrazione e al

carico idraulico è stato possibile quantificare il *seepage* (la filtrazione) ed il carico di sale. Per *seepage* si intende il prodotto della velocità efficace attraverso il mezzo poroso per la porosità effettiva, mentre il carico di sale è calcolato come il prodotto del *seepage* per la salinità.

Il Chiaro del Pontazzo genera una costante ricarica d'acqua da salmastra a dolce che porta ad una diminuzione del carico di sale del 13% ad un metro di profondità e del 6% a - 3m rispetto alla condizione di partenza. I maggiori effetti di questo intervento si hanno nei primi strati del modello; le variazioni di salinità non sono significative negli strati più profondi durante un intervallo di tempo così breve.

L'output che descrive la situazione attuale (2006) (Fig. 8.14 c) mostra un acquifero con una salinità ancora alta che aumenta con la profondità ed in direzione del mare. Alla base dell'acquifero, sotto l'area pinetale, il cuneo salino si è già spinto di 1.3 km verso l'interno. L'interfaccia acqua dolce – acqua salata (10 g/l) sotto la pineta è superficiale ed in accordo con quanto emerge dai dati di monitoraggio. Al top del sistema l'acqua dolce consiste in lenti d'acqua che galleggiano su un acquifero già in parte compromesso.

8.4.4. Periodo 2006-2106: futuro innalzamento del livello del mare

Queste ultime simulazioni hanno come obiettivo quello di quantificare l'effetto del futuro innalzamento del livello del mare sul processo d'intrusione salina. Secondo le stime dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001) e gli scenari previsti da altri recenti studi (Comune di Ravenna, 2005; Raper *et al.*, 1996), i futuri cambiamenti climatici causeranno una risalita del livello del mare di 0.47-0.48 m nei prossimi 100 anni, con un range di incertezza che va da 0.09 a 0.9 m.

Sono stati, quindi, considerati tre scenari diversi:

- Scenario n.1: no innalzamento livello del mare (Fig. 8.15 b)
- Scenario n.2: innalzamento livello mare = 0.475 m/100 anni (Fig. 8.15 c)
- Scenario n. 3: innalzamento livello mare = 0.9 m/100 anni (Fig. 8.15 d)

L'innalzamento del livello del mare è stato implementato al confine destro del modello in steps di 0.00475 m per lo scenario n.2 e di 0.009 m per lo scenario n.3.

I risultati di tutte e tre gli scenari sono stati comparati con la situazione attuale (Fig. 8.15a).

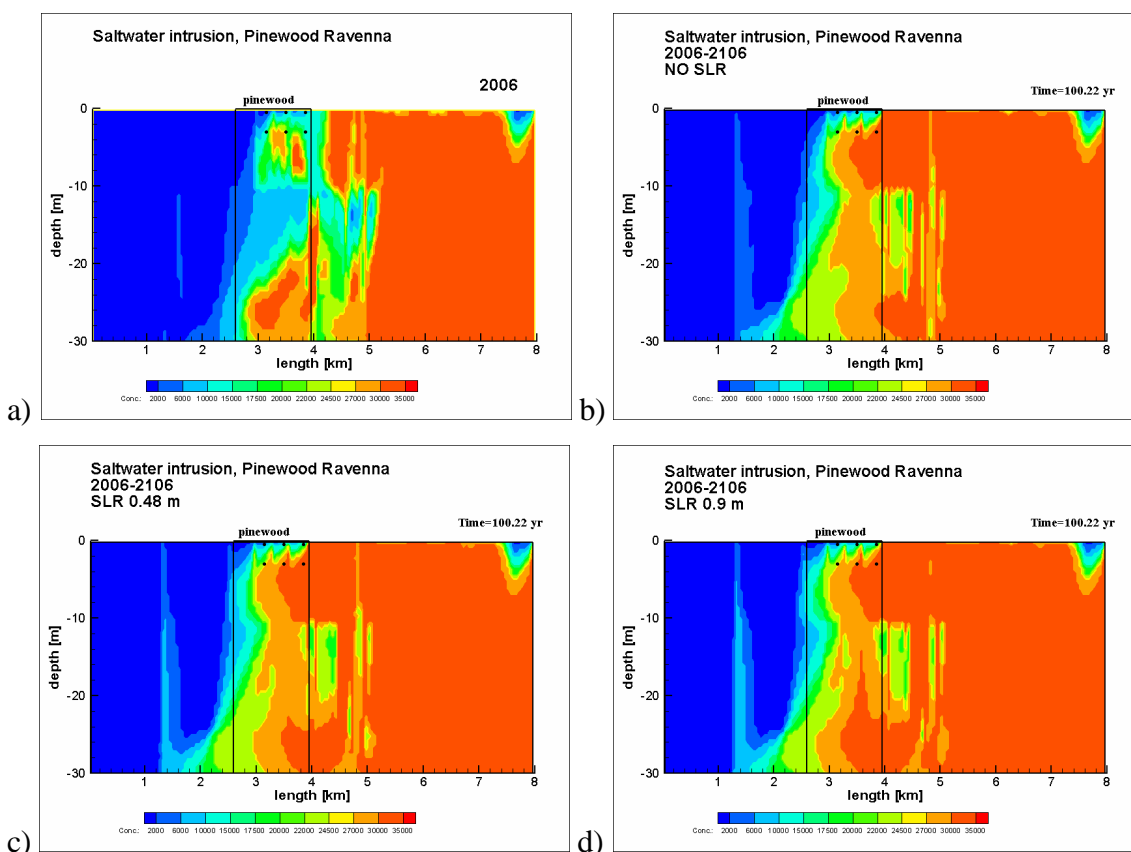


Fig. 8.15 – Distribuzione della concentrazione (g/l) nell’acquifero nel 2006 (a) e nel 2106 considerando i 3 diversi scenari d’innalzamento del livello del mare: b) innalzamento del livello del mare = 0; c) = 0.475 m/100 anni; d) = 0.9 m/100 anni.

La Fig. 8.15 mostra il confronto fra la situazione iniziale (2006) e la distribuzione di concentrazione calcolata per i 3 diversi scenari considerati. La salinità aumenta significativamente in tutti e tre gli scenari soprattutto nella parte est del sistema e al di sotto della pineta, nelle zone più prossime alla Piallassa. gli alti valori di filtrazione registrati negli strati superficiali della pineta sono dovuti alla risalita d’acqua salata dal fondo causata dal drenaggio; ciò determina anche una risalita dell’interfaccia acqua dolce-acqua salata. Poiché il livello freatico in pineta è circa -0.30 - -0.40 m rispetto al livello medio mare, l’acqua salata ha un naturale gradiente verso terra e l’intrusione non può essere contrastata.

Le differenze fra i tre scenari sembrano piccole perché il flusso dell’acqua freatica ed il trasporto del soluto sono processi lenti. Considerando i dati di concentrazione (Fig. 8.16) relativi ai punti di osservazione in pineta (piezometri n. 4, 5, 6), è evidente un aumento generale della salinità nei primi metri dell’acquifero. Qui il maggior incremento di salinità avviene per lo scenario n.3, con un aumento del 49% a 3 m di

profondità. Per lo scenario di 0.9 m d'innalzamento del livello del mare, nella parte superiore del sistema (-0.5 - -1 m) la salinità finale è tripla rispetto alla situazione iniziale (2006).

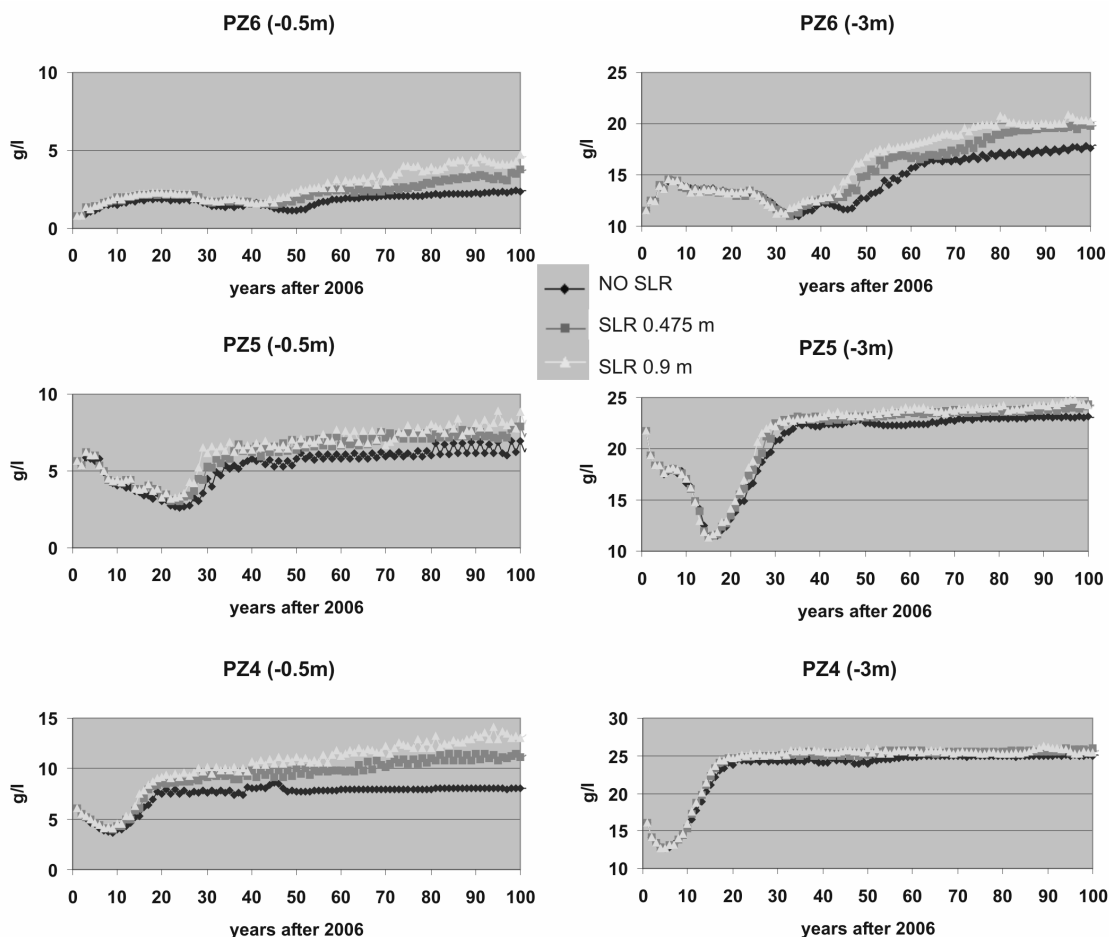


Fig. 8.16 – Concentrazione a -0.5 e a -3 m per i tre punti d'osservazione in pineta (piezometro n. 4, 5, 6) in funzione del tempo per ciascun scenario di innalzamento del livello marino considerato. L'iniziale caduta delle concentrazioni presente in tutte le curve è causata dallo spostamento dell'acqua dolce presente inizialmente al di sotto della pineta e che viene poi spinta dall'acqua salata in entrata dalla laguna.

Dopo i 100 anni simulati le iniziali lenti d'acqua dolce presenti nell'acquifero superficiale (Fig. 8.15 a) vengono sostituite da acqua salmastra (Fig. 8.15 b-d).

In queste simulazione, un aumento significativo della salinità interessa anche l'unità centrale limosa in seguito alla risalita di acqua salata dal fondo; a quella profondità, alla fine delle simulazioni, si ottengono valori di salinità pari a 28.0 g/l, circa 3 volte maggiori rispetto alla concentrazione iniziale. Negli strati più profondi (da -25 a -30 m.)

le variazioni di concentrazione non sono così significative perché il sistema aveva già valori di salinità alti all'inizio della simulazione.

Inoltre, è da sottolineare come in tutte le simulazioni sia evidente un piccolo effetto barriera della duna costiera che, anche se di dimensioni ridotte, è efficace nel creare una lente di acqua dolce e nell'abbattere localmente l'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

Prendendo in considerazione l'acquifero al di sotto della pineta ad una profondità di -3 m, la Fig. 8.17 mostra che nel caso in cui l'innalzamento del livello marino è nullo, i valori di filtrazione (Fig. 8.17 a) rimangono più o meno costanti durante tutti i 100 anni, mentre il carico di sale aumenta del 28% rispetto alla situazione iniziale (2006) (Fig. 8.17 b). Quindi, anche se si ipotizza l'assenza di una risalita del livello marino e quindi l'assenza di grandi variazioni nel carico idraulico, l'acqua salata già presente nella parte orientale dell'acquifero sarà spinta ugualmente in direzione dell'entroterra causando un avanzamento del cuneo salino al di sotto della pineta.

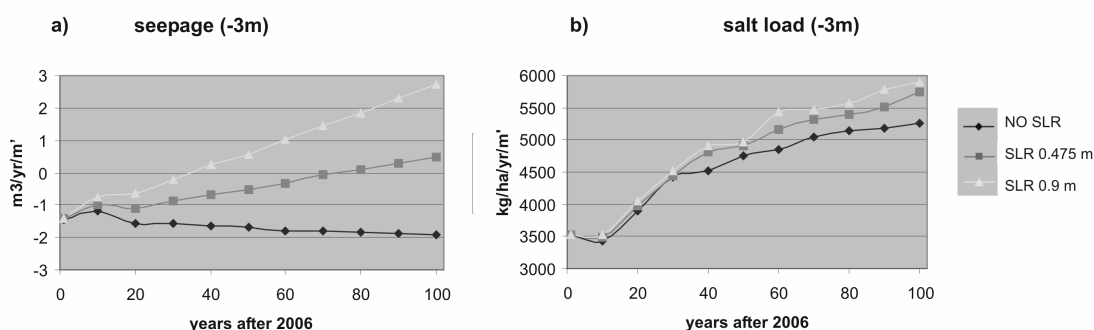


Fig. 8.17 – Filtrazione (*seepage*) (in $m^3/yr/m'$) (a) e carico di sale (in $kg/ha/yr/m'$) (b) calcolati per l'intera superficie della pineta, alla profondità di 3 m e per i tre scenari considerati. (Notare: nel grafico di sinistra, i valori negativi indicano una ricarica, quelli positivi il *seepage*).

Riassumendo, i previsti scenari d'innalzamento del livello del mare intensificheranno il processo di salinizzazione dell'acquifero costiero in esame. In

Tabella 8.2 vengono riportati gli aumenti totali di *seepage* e carico di sale per i tre scenari confrontati con la situazione di partenza (2006).

Tabella 8.2 - Aumenti totali di *seepage* e carico di sale per i tre scenari considerati.

	NO SLR	SLR 0.49 m/100 anni	SLR 0.9 m/100 anni
SEEPAGE	=	+ 133%	+290%
SALTLOAD	+ 28%	+41%	+44%

L'aumento del carico di sale è così alto perché l'acqua salata è già presente nelle zone più profonde dell'acquifero all'inizio delle simulazioni e da qui risale verso le zone più superficiali.

8.5. OSSERVAZIONI

Le simulazioni dimostrano che, durante l'ultimo secolo, la subsidenza artificiale e il drenaggio causarono un forte abbassamento del livello freatico e diedero così inizio al processo di salinizzazione dell'acquifero costiero ravennate. La Fig. 8.18 mostra il trend della salinità a -3 m di profondità nei piezometri così come emerge dalle simulazioni per il periodo 1920-2006. È evidente che la salinità aumenta molto velocemente dopo il 1960, in corrispondenza cioè dello sviluppo industriale e delle conseguenti estrazioni di acqua e metano dal sottosuolo che causarono un forte aumento della subsidenza.

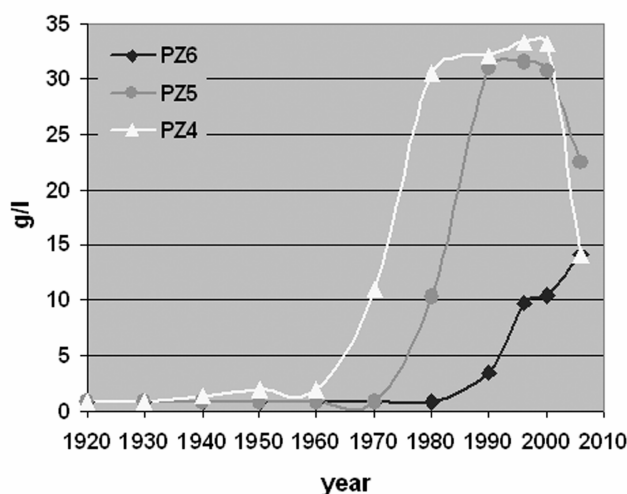


Fig. 8.18 – Trend della salinità a -3 m per i tre piezometri in funzione del periodo simulato 1996-2006. (Notare: la diminuzione della salinità nella parte finale delle curve dei piezometri 4 e 5 è dovuta all'effetto locale della chiusura del Chiaro del Pontazzo)

Il modello numerico supporta l'ipotesi che la situazione attuale (2006) non sia ancora in uno stato stazionario.

Le condizioni climatiche dell'area, caratterizzate da precipitazioni limitate per gran parte dell'anno, non permettono una ricarica efficiente dell'acquifero specialmente durante il periodo primaverile ed estivo. Questa situazione è aggravata dal fatto che la piccola ricarica superficiale è associata ad alti valori di conduttività idraulica ed è

ulteriormente diminuita dal pesante sistema di drenaggio e dalla forte urbanizzazione e cementazione del territorio.

Le simulazioni evidenziano che alcuni interventi, come quello della chiusura dei Chiari adiacenti alla pineta, possono servire per ridurre l'intrusione salina dalla Piassassa. È importante però, in questo caso, che la ricarica di questi chiari avvenga con acqua dolce e che il carico idraulico venga mantenuto costantemente al di sopra del livello medio mare; solo così si può garantire un flusso costante di acqua dolce in direzione della pineta e creare un "effetto cuscinetto" tra la laguna e la falda superficiale della pineta.

I futuri cambiamenti climatici ed il previsto innalzamento del livello del mare aggraveranno il problema della salinizzazione dell'acquifero costiero in esame causando un aumento del carico di sale e di risalita di acqua salata che interesserà gran parte dell'acquifero fino in superficie. La zona di mixing tra acqua dolce e acqua salata si sposterà verso l'interno di circa 800 metri; di conseguenza anche il terreno diventerà più salino causando seri problemi sia all'agricoltura che alla sopravvivenza della pineta stessa.

Infine, le simulazioni evidenziano gli effetti dovuti all'assenza di un sistema di dune costiere continue che agisca da barriera all'intrusione salina da mare. Infatti, la duna è l'elemento più importante nel contrastare l'intrusione del cuneo salino. Grazie al suo rilievo rispetto alle aree circostanti ed alla sua buona capacità infiltrante, la duna può garantire al suo interno un accumulo d'acqua piovana che porta la superficie freatica sopra il livello del mare. Un battente della freatica dolce sopra il livello del mare permette un controllo idrostatico dell'ingressione marina al fondo dell'acquifero e cioè permette un abbattimento dell'interfaccia fino ad esempio al basamento argilloso che contribuisce a tenere lontana l'acqua salata dalle zone più interne dell'acquifero freatico. In un sistema come quello ravennate, dove le dune sono state quasi completamente distrutte e dove sopravvivono sono di ridotte dimensioni, questo fenomeno di "barriera" viene a mancare o comunque, come nel caso delle simulazioni descritte sopra, è molto limitato. Lungo il profilo usato nel modello, la lente d'acqua dolce che si viene a creare al di sotto della duna costiera non è sufficiente a contrastare l'intrusione salina perché l'interfaccia acqua dolce-acqua salata non viene spinta fino al basamento impermeabile.

9 OPERE DI MITIGAZIONE

La salinizzazione dell'acquifero è certamente nociva anche per la salute delle pinete. Per le pinete, come per tutte le colture è importante il franco di coltivazione, cioè quello spessore di suolo non saturo di acqua che permette alle piante di svolgere la propria attività fisiologica. Il drenaggio, dal punto di vista contingente, sarebbe la misura migliore per aumentare il franco di coltivazione e garantire la salute delle pinete. Questo sicuramente può favorire un miglioramento delle condizioni di sviluppo dei pini, però innesca una retroazione fortemente negativa sull'acquifero che finirà poi per ripercuotersi anche sulle pinete stesse. L'abbassamento della freatica tramite drenaggio, infatti, viene a togliere quel carico idraulico necessario per contrastare l'intrusione d'acqua salata.

Nelle pinete di San Vitale si sono adottate alcune misure per contrastare l'intrusione d'acqua salata come la chiusura di alcuni Chiari della Piallassa confinanti con la pineta. Tali misure, nonostante in teoria corrette, non si sono dimostrate molto efficaci dato che i piezometri in pineta, a ridosso dei Chiari, presentano valori di salinità molto vicini a quelli dell'acqua di mare. Il fatto che i Chiari d'acqua dolce non si siano dimostrati efficaci può essere imputato a diversi fattori. Il primo è che il livello d'acqua dolce nei chiari deve essere mantenuto molto sopra il livello del mare per tutto il periodo dell'anno e non solo quando vi è un surplus d'acqua dolce. Un secondo fattore è che nelle condizioni climatiche del ravennate, l'evaporazione da specchi d'acqua libera è molto intensa, soprattutto nel periodo estivo, il che contribuisce a salinizzare acque che in principio erano dolci ma che a causa del processo di concentrazione diventano più saline sprofondando verso il fondo del bacino.

Sulla base dei risultati ottenuti, però, si possono ipotizzare altri interventi per cercare di salvaguardare il benessere delle pinete e al contempo impedire la completa salinizzazione dell'acquifero freatico. Le possibilità d'intervento sono diverse ma limitate dall'alta conduttività idraulica dell'acquifero e dalla scarsa disponibilità d'acqua dolce.

Sicuramente il principale provvedimento è quello di impedire all'acqua salata di penetrare nell'entroterra risalendo lungo fiumi e canali. Questo si può fare con opportune opere di controllo del flusso d'acqua da e verso mare in prossimità delle foci (chiusure e barre di foce artificiali). Ad esempio, nel caso del fiume Lamone, sarebbe

necessario spostare di circa 3.5-4 km più a valle l'attuale diga per evitare la risalita dell'acqua salata lungo il fiume fino all'altezza delle aree naturali di Punta Alberete e San Vitale. La nuova chiusa potrebbe avere le stesse caratteristiche di quella attuale, con un salto idraulico di 1.5-2 m. Se si ipotizza il mantenimento di 1 metro di carico idraulico sopra il l.m.m., il volume dell'invaso che si verrebbe a creare tra i due sbarramenti richiederebbe una quantità d'acqua dolce limitata che non andrebbe ad intaccare le riserve d'acqua per l'agricoltura di Ravenna e creerebbe anche un gradiente idraulico per contrastare la risalita di acqua salata dal fondo. Inoltre questo tipo di intervento potrebbe essere abbinato ad arginature impermeabili contenenti setti argillosi estesi fino, o quasi, al basamento dell'acquifero da realizzare lungo il tratto terminale del fiume, dal secondo sbarramento alla foce (Fig. 9.1).

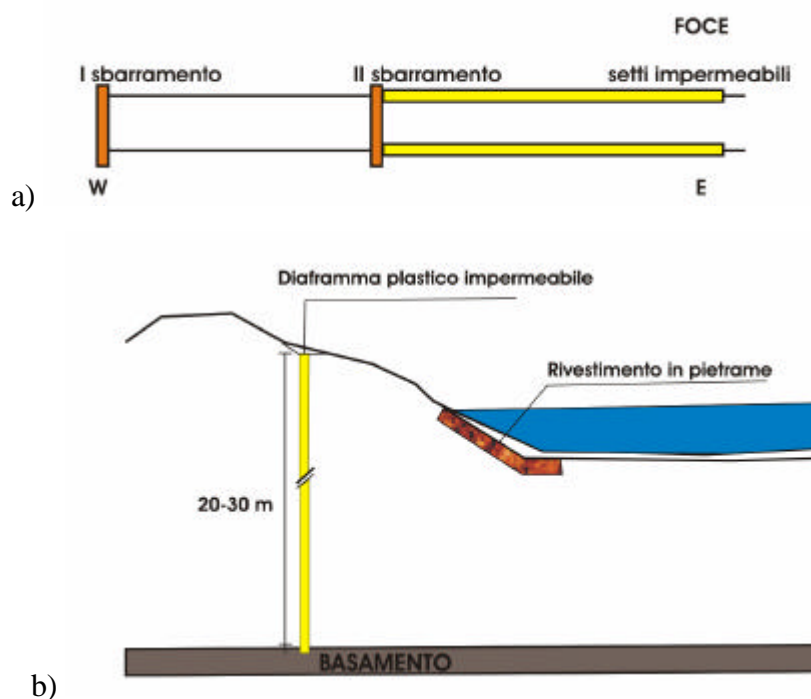


Fig. 9.1 – Possibile intervento lungo il fiume Lamone: a) sbarramento del corso del fiume più vicino alla foce rispetto alla situazione attuale; b) setti impermeabili lungo gli argini del tratto finale del fiume.

Attualmente lungo il tratto terminale del Lamone (lato sinistro) è stato fatto questo ultimo tipo di intervento con diaframmi plastici impermeabili costituiti da fanghi autoindurenti (acqua, bentonite, cemento in polvere) allo scopo di arginare il flusso di acqua salata dall'alveo del fiume verso i terreni (RER, 2006). In realtà questo intervento non ha completamente risolto il problema della salinizzazione perché i setti impermeabili non sono abbastanza profondi (8 m dal piano campagna).

Purtroppo questi tipi di interventi sono costosi perchè i setti impermeabili dovrebbero essere profondi, possibilmente fino al basamento dell'acquifero, per evitare l'intrusione o, almeno, allungare il più possibile il percorso di filtrazione tanto da produrre una sufficiente diminuzione della pressione idraulica.

Oltre a nuove opere di controllo è necessario mantenere la massima efficienza possibile per l'infrastruttura idraulica già presente preposta ad impedire la risalita d'acqua salata lungo i corsi d'acqua, per esempio quelli che collegano la pineta e la Piallassa e ciò non è sempre stato fatto fino ad oggi.

I chiari d'acqua dolce esistenti, una volta appurata la loro effettiva continuità idraulica con l'acquifero sottostante, dovrebbero essere continuamente riforniti con acqua dolce, proveniente dai canali di bonifica, in maniera da mantenere il carico idraulico costantemente sopra il l.m.m.. Una quota di 0.5 m s.l.m. potrebbe essere sufficiente a garantire un flusso di acqua dolce in direzione della pineta e creare un "effetto cuscinetto" tra la Piallassa e la falda superficiale della pineta.

I sistemi di ricarica artificiale in un acquifero molto permeabile come quello della pineta di San Vitale sarebbero molto costosi, perché richiederebbero enormi quantitativi d'acqua dolce che debbono essere pompate nell'acquifero per mantenere un modesto carico idraulico.

Per esempio, si è ipotizzato uno schema di ricarica artificiale, come in Fig. 9.2, lungo il bordo est della pineta parallelo alla Piallassa e si è applicato il metodo di Neuman (Neuman, 1975) per calcolare il pompaggio ottimale e la minima distanza tra i pozzi che si dovrebbero adottare per ottenere l'abbattimento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata fino al basamento dell'acquifero e creare, così, un'efficace barriera contro l'intrusione salina in pineta (Giambastiani *et al.*, 2006).

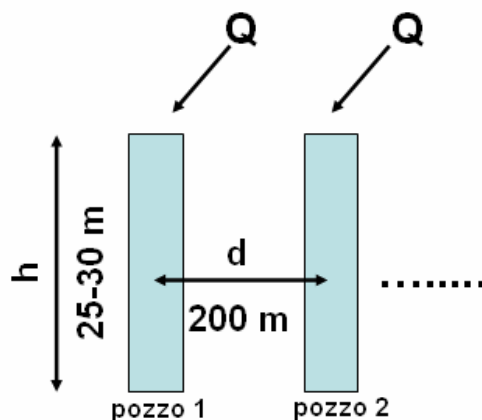


Fig. 9.2 – Schema di ricarica ipotizzata per la zona meridionale della Pineta di San Vitale.

Dai risultati dello studio è stato possibile concludere che un sistema di ricarica artificiale in pineta sarebbe possibile ma ad alti costi perchè i quantitativi di acqua pompata sono sensibili alla conduttività idraulica e alla distanza tra di loro dei pozzi di iniezione. Quindi, dove la conduttività idraulica è alta si necessita o di grandi quantità di acqua per avere un significativo incremento del carico idraulico (Fig. 9.3) o di un numero maggiore di pozzi più vicini tra loro. In questo caso, poi, si devono tenere in considerazione anche gli effetti della risalita della tavola d'acqua sulla vegetazione nelle aree di maggior influenza intorno ai pozzi di iniezione (circa 25 m) per evitare che il livello dell'acqua abbia effetti negativi sulla vegetazione.

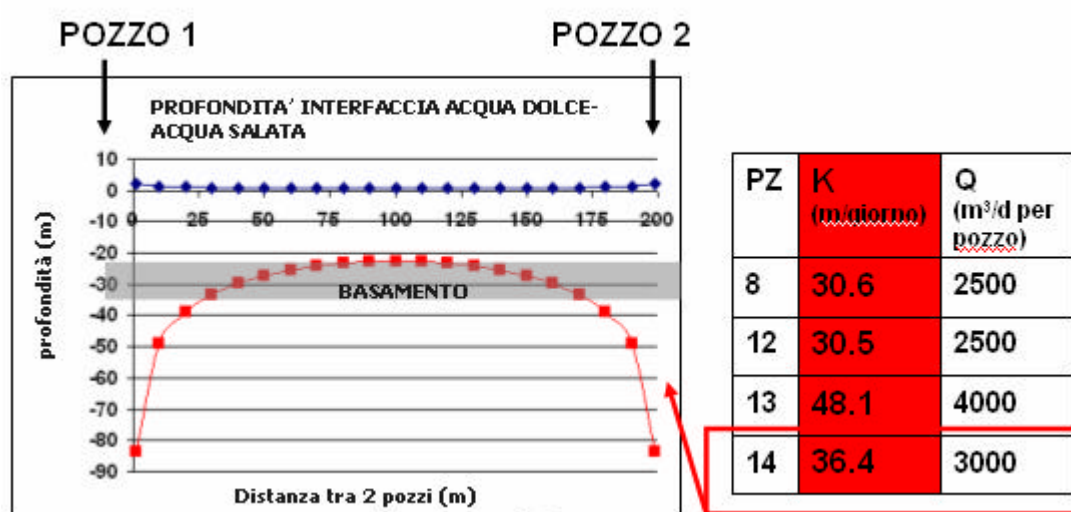


Fig. 9.3 – Risultati dei calcoli per il sistema di ricarica artificiale in pozzo considerando i valori di conduttività idraulica (K) nei piezometri (PZ) n. 8, 12, 13 e 14 in pineta (Giambastiani *et al.*, 2006). Da notare i grandi quantitativi d'acqua (Q) necessari, ad esempio nel caso del piezometro n.14, per ottenere l'abbattimento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata (in colore rosso nel grafico a sinistra) fino al basamento dell'acquifero. Sempre nel grafico a sinistra, in colore blu è rappresentato l'incremento del carico idraulico conseguente al pompaggio Q.

La soluzione ideale sarebbe la ricostituzione del cordone di dune costiere. Questa è una soluzione totale i cui costi sono certamente molto elevati. Rimane però indiscutibile l'importanza di preservare almeno i lembi di dune sopravvissuti.

Alla luce dei previsti cambiamenti climatici, dell'innalzamento del livello marino e della scarsità d'acqua dolce che si prospetta per i prossimi decenni, è opportuno rivalutare la potenzialità dell'ottimo acquifero costiero romagnolo. Fino ad oggi questa potenzialità è stata trascurata non considerandone il suo valore come risorsa e la sua

importanza per l'ecosistema costiero. Nel futuro, non potendo pensare di costruire altri invasi montani, la potenzialità del serbatoio costiero sarà un'ottima ragione per salvaguardare le acque dolci superficiali adottando opportune opere di protezione, cosa che sarà possibile solo con l'adattamento delle attività antropiche al contorno con i mutati scenari imposti dai cambiamenti climatici. Nonostante l'acquifero freatico costiero non sia una riserva strategica d'acqua potabile, esso è d'importanza vitale per le zone umide, l'ecosistema, l'agricoltura e la qualità dei suoli, nonché per le pinete.

10 CONCLUSIONI

Lo studio dell'assetto idrologico ed idrogeologico della pineta di San Vitale ha messo in risalto quelli che sono i fattori che controllano il problema dell'intrusione dell'acqua salata nell'acquifero ed il suo effetto sulle pinete.

Prima di tutto va detto che le pinete sono un elemento artificiale nell'ambiente costiero, esse sono state impiantate nel XV secolo ad opera di comunità monastiche. Recenti modellizzazioni numeriche (Ranjan et al. 2006) hanno mostrato che per condizioni climatiche come quelle del ravennate (Aridity Index < 60), la presenza di foreste lungo il litorale incide negativamente sulle caratteristiche di salinità dell'acqua nell'acquifero freatico. Il pompaggio operato dalle radici degli alberi, infatti, favorisce l'upconing d'acqua salata dal fondo dell'acquifero. La presenza delle pinete, perciò, ha un forte impatto sulle risorse idriche ma va accettato se si vogliono mantenere le pinete stesse. Questo è un problema puramente di scelte gestionali e politiche.

Lo studio ha permesso di caratterizzare in dettaglio l'acquifero sottostante la pineta di San Vitale, per la maggior parte salato ed instabile dal punto di vista dinamico. La salinizzazione non è confinata solamente alla fascia più vicina alla Piailassa. In effetti, si può ormai parlare di lenti d'acqua dolce galleggianti in un acquifero quasi completamente salinizzato. I nuclei più spessi di queste lenti sono localizzati nella parte centro settentrionale della pineta ed in corrispondenza dei principali corsi d'acqua (Lamone, Fossatone) e dei canali di scolo delle idrovore (Via Cerba e Canala) che sono le uniche zone di ricarica superficiale dell'acquifero nell'area della pineta.

I principali fattori che sono stati individuati come responsabili della salinizzazione dell'acquifero costiero in esame e dell'attuale situazione in cui verte la pineta sono:

- La subsidenza naturale e antropica. Gli alti tassi di subsidenza che hanno caratterizzato la zona del ravennate, soprattutto negli anni '70-'80 hanno portato ad un territorio che è in molte zone sotto il livello medio mare. La subsidenza ha aggravato il problema della mancanza di cospicui gradienti idraulici verso mare alterando il sistema di distribuzione idrica e il deflusso naturale delle acque. La topografia, se escludiamo i soli rilievi delle dune sopravvissute, è priva di quote elevate.
- Il sistema di drenaggio. I livelli della falda freatica sono per lo più governati dal sistema di drenaggio e l'abbassamento del livello freatico causa, per la legge di

Ghyben-Herzberg, la risalita dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata. L'acquifero è per molte zone sotto il l.m.m. e non ha un carico idraulico in grado di contrastare l'intrusione salina al fondo o sul lato della Piailassa. La superficie freatica si colloca mediamente a pochi centimetri sopra il l.m.m. solo in corrispondenza dei canali e delle dune relitte in pineta, topograficamente più elevate. In questo contesto, il lavoro meccanico delle idrovore diventa necessario per consentire il deflusso dell'acqua a mare, per mantenere la falda freatica più bassa ed evitare l'allagamento dei terreni agricoli nelle zone bonificate e la morte dei pini in pineta. Il lavoro delle idrovore va però a discapito della già scarsa ricarica dell'acquifero freatico e favorisce la risalita dell'interfaccia acqua dolce-acqua.

- La bassa ricarica dell'acquifero freatico dovuta a condizioni climatiche, diminuita ulteriormente dalla forte urbanizzazione e cementificazione del litorale. La scarsa ricarica superficiale associata ad alti valori di conduttività idraulica e ad un pesante sistema di drenaggio è insufficiente per riequilibrare la falda dal punto di vista idrodinamico. La ricarica superficiale e la variazione stagionale della superficie freatica non sono tali da determinare un processo di dolcificazione generale dell'acquifero che nelle zone più profonde e prossime alla Piailassa rivela la presenza costante di acque a salinità maggiore di 10 g/l.
- La risalita d'acqua salata lungo i fiumi che sono in collegamento con il mare o la Piailassa (es. Lamone e Taglio della Baiona) e che causano risalita d'acqua salata lungo il loro alveo e infiltrazione diretta di questa lungo gli argini.
- La cattiva gestione e manutenzione dei manufatti idraulici esistenti.
- L'eliminazione o abbassamento dei cordoni di dune costiere che contenevano una falda freatica il cui carico idraulico poteva efficacemente contrastare l'intrusione d'acqua salata dal mare determinando un abbattimento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata fino al basamento argilloso.
- La frammentazione e la scarsa coordinazione di tutti gli enti preposti alla gestione delle acque che spesso prendono decisioni e misure contingenti conflittuali e che causano fenomeni di retroazione negativa su tutto il sistema. Emerge, quindi, l'importanza di una corretta ed efficace gestione integrata della zona costiera e delle sue risorse idriche che diventa sempre più difficile e sempre meno compatibile con la politica di sviluppo di tale area. In questo contesto è ovvio che il sopravvivere

della pineta sarà legato alla costante opera dell'uomo che dovrà mantenere la presenza del pino in un ambiente dove questa non è più ecologicamente giustificata.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN R. G., PEREIRA L. S., RAES D., SMITH M.; 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper 56, Rome, 300 pp.

AMOROSI A., ASIOLI A., BONDESAN M., CIBIN U., COLALONGO M. L., CORREGGIARI A., PASINI G., PRETI D., ROVERI M., SARTI G., SEVERI P., STEFANI M., TRINCARDI F., VAIANI S. C., VINCENZI S., 2002. *Dalle conoidi pedemontane al mare aperto: architettura stratigrafica tardo-quadernaria dell'Adriatico settentrionale e della pianura costiera emiliano-romagnola*. Le pianure: conoscenza e salvaguardia. Il contributo delle Scienze della Terra, Ferrara.

Sito Internet: <http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/georer4.htm>

AMOROSI A., COLALONGO M. L., PASINI G., PRETI D., 1999. *Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy)*. Sedimentology 46, 99-121.

ANGELINI R., STRUMIA F., 1994. *Il bacino idrografico della Piallassa Baiona. Descrizione del territorio dal punto di vista delle fonti di carico inquinanti*. In: Soprani S. e Ricci C. (cur.), *Analisi dello stato ambientale e sanitario nelle valli ravennati*. La Piallassa Baiona, Azienda U.S.L. Ravenna, Ravenna, 157-200.

AQUATER, 1988. *Caratteristiche idrogeologiche, idrauliche ed idrodinamiche della falda freatica e rapporti falda freatica-subsidenza nelle pinete di S. Vitale e di Classe (RA)*. Comune di Ravenna.

AQUATER, 1994. *Studio di fattibilità per il riassetto idraulico ed idrogeologico del comparto Pineta di San Vitale – Piallassa Baiona*. Relazione, I fase – Piallassa del Pontazzo, Comune di Ravenna.

BARNS H.H., 1967. *Roughness characteristics of natural channels*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849.

BEAR J., CHENG A.H.-D., SOREK S., OUAZAR D., HERRERA I., 1999. *Theory and applications of transport in porous media – Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices*. Kluwer Academic Publishers, 625 pp.

BEAR J., VERRUIJT A., 1987. *Modeling groundwater flow and pollution*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 414 pp.

BEAR J., VERRUIJT A., 1998. *Theory and applications of transport in porous media – Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Kluwer Academic Publishers, 432 pp.

BONDESAN M., 1990. *Le zone umide salmastre dell'Emilia-Romagna: aspetti geografici e morfologici*. In: Corbetta F (ed) *Aspetti naturalistici delle zone umide salmastre dell'Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, Bologna, 21-69.

BONDESAN M., CALDERONI G., DAL CIN R., 1978. *Il litorale delle province di Ferrara e di Ravenna (alto Adriatico), evoluzione morfologica e distribuzione dei sedimenti*. Boll. Soc. Geol. It.: 247-287.

BONDESAN M., FAVERO V., VIÑALS M. J., 1995. *New evidence on the evolution of the Po delta coastal plain during the Holocene*. Quaternary International Vol 29/30, 105-110.

BOUWER H., 1989, The Bouwer and Rice slug test – an update. *Ground Water* 27, no. 3, 304-309.

BOUWER H., RICE R.C., 1976. *A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifer with completely or partially penetrating wells*. *Water Resources Research*, 12, 423-428.

BUSCAROLI A., ZANNONI D., 2006. *I suoli delle Pinete di Classe e San Vitale*.. In: CIRSA Eds. “Caratteristiche ambientali del sistema delle pinete storiche ravennati di San Vitale e Classe: aggiornamento al 2006.” (In stampa).

CALASTRI A., CERVI O., SPAGNESI M., STINCHI E., 1976. *Contributo alla conoscenza dell’Oasi faunistica di Punte Alberete (RA)*. In: Scritti in memoria di Augusto Toschi, suppl. Ric. Biol. Selvaggina, VII, 121-153.

CARBOGNIN L., GATTO P., MOZZI G., 1984. *Case history no. 9.15: Ravenna, Italy*. In: Poland JF (ed) *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. UNESCO, Paris, 291-305.

CASTANY G., 1987. *Idrologia: principi e metodi*. Palermo.

CERBINI G., GORLA M., 2004. *Idrogeologia Applicata - Principi, metodi e misure*. Edizioni Geo-Graph, Segrate.

CHAPLOT V., DARBOUX F., BOURENNANE H., LEGUÉDOIS S., SILVERA N., PHACHOMPHON K., 2006. *Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density*. *Geomorphology* 77, 126-141.

CIABATTI M., 1968, *Gli antichi delta del Po anteriori al 1600*. In: *Atti del Convegno internazionale di studi sulle antichità di Classe-Ravenna*, 14-17 ottobre 1967; Faenza, 23-33.

CIABATTI M., 1968, *Ricerche sull’evoluzione del Delta Padano*. *Giornale di Geologia*, v. 34, 381-410.

COMUNE DI RAVENNA, 1998. *Piano di gestione del sito “San Vitale” (Punte Alberete, Valle della Canna o Mandriole, Pineta San Vitale, Pialassa Baiona e aree limitrofe)*. Allegato I-II-III-IV-V, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna.

COMUNE DI RAVENNA, 2005. *Scenari previsionali per la futura evoluzione delle Pinete di S. Vitale e Classe*. Rapporto Tecnico n.1, CIRSA, Ravenna, 120 pp.

COMUNE DI RAVENNA, 2006. *Piano Territoriale del Parco Regionale del Delta del Po - Stazione: Pineta di San Vitale e Piallasse di Ravenna*. Comune di Ravenna, Servizio Ambiente ed Aree Verdi.

COOPER H. H. JR., 1959. *A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer*. *Journal of Geophysical Research* 64: 461-67.

DAUS A.D., FRIND E.O., SUDICKY E.A., 1985. *Comparative error analysis in finite element formulations of the advection-dispersion equation*. *Adv. Water Resour.* 8, 86-95.

DIANI L., FERRARI C., 2006. *La vegetazione della pineta di San Vitale e il pattern spaziale di Pinus pinea*. In: CIRSA Eds. "Caratteristiche ambientali del sistema delle pinete storiche ravennati di San Vitale e Classe: aggiornamento al 2006." (In stampa).

DIERSCH H.J., 1998. *FEFLOW - Interactive, Graphic-based Finite Element Simulation System for Modeling Groundwater Flo, Contaminant Mass and Heat Transport Processes*. Getting Started; Users Manual; Reference Manual, WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd, Berlin.

DUPOIT J., 1863. *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. 2d ed. Paris: Dunod.

ERSKINE A.D., 1991. *The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK*. Ground Water 29, no. 4: 556-562.

ESB, COMITATO SCIENTIFICO DELL'EUROPEAN SOIL BUREAU, 1999. *Database georeferenziato dei suoli europei. Manuale delle procedure*. Versione 1.1. Versione italiana a cura di E. A. C. Costantini. JRC (VA), 170 pp.

ESRI, 2000. *Using 3D Analyst, Using ArcMap; Editing in ArcMap; Using ArcCatalog*. Manuali tecnici.

FABBRI P., MISSIROLI A., 1998. *Le pinete ravennati – Storia di un bosco e di una città*. Longo Editore, Ravenna, 382 pp.

FETTER C.W., 1972. *Position of the saline water interface beneath oceanic islands*. Water Resour. Res., 8, 1307-1314.

FETTER C.W., 2001. *Applied Hydrogeology*. Ed. Prentice Hall, Fourth Edition; 691 pp.

FIORENTINI C., 1992. *Sistema idrologico dell'area della pineta di San Vitale (Ravenna)*. Tesi di Laurea inedita, Università di Ferrara, Corso di Laurea in Scienze Geologiche.

FRIND E.O., PINDER G.F., 1983. *The principle direction technique for solution of the advection-dispersion equation*. Proc. 10th IMACS World Congress on Systems Simulation and Scientific Computation, Concordia University, Montreal, Canada, Aug. 1982, 305-313.

GAMBETTI D., 1994. *Le pinete ravennati dal 1500 ad oggi: variazioni delle superfici e trasformazioni del paesaggio forestale*. Storia urbana, 66, 27-72.

GAMBOLATI G., Teatini P., 1998. *Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the Upper Adriatic Sea basin*. In: Gambolati G. (ed) CENAS, Coastal evolution of the upper Adriatic sea due to sea level rise and natural and anthropogenic land subsidence. Kluwer Academic Publishing, Water Science & Technology Library n. 28, 103-131.

GIAMBASTIANI B., ANTONELLINI M., GABBIANELLI G., 2006. *Evaluation of a well-injection recharge system to contrast saltwater intrusion in a coastal forest: the San Vitale Pinewood, Ravenna (Italy)*. In Proceeding: 5th European Congress on Regional Geosciences Cartography and Information System – Earth and Water, Vol. 1, Institut Cartogràfic de Catalunya and Institut Geològic de Catalunya (Editors); 29-31.

HARBAUGH A.W., MCDONALD M.G., 1996. *User's documentation for the U.S.G.S. modular finite-difference ground-water flow model*. U.S.G.S. Open-File Report 96-485, 56 pp.

HARDY R.L., 1971. *Multiquadratic equation of topography and other irregular surfaces*. J. Geophys. Res., 76 (8), 1905-1915.

HARDY R.L., 1990. *Theory and application of the multiquadratic-biharmonic method, 20 years of discovery 1968-1988*. Comput. Math. Appl., 19 (8/9), 163-208.

HUYAKORN P., ANDERSON P., MERCER J., WHITE Jr. H., 1987. *Saltwater intrusion in aquifers: development and testing of a three-dimensional finite element model*. Water Resour. Res., 23 (2), 293-312.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Sito Internet: <http://www.ipcc.ch/>.

ITER, 1989. *Progetto esecutivo per l'adeguamento della discarica provinciale ai sensi dell'art. 1 del D.L. 36/87 e alle disposizioni del D.P.R. 915/82*. Inedito.

JENSEN O.K., FINLAYSON B.A., 1978. *Solution of the convection-diffusion equation using a moving coordinate system*. Second Int. Conf. on Finite Elements in Water Resources, Imperial college, London, pp.4.21-4.32.

JIN R., CHEN W., SIMPSON T.W., 2000. *Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modelling criteria*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-2000-4801, 1-11.

KIPP K.L., 1987. *HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water flow system*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 86-4095, 517 pp.

KOHLER M.A., NORDENSON T.J., FOX W.E., 1955. *Evaporation from ponds and lakes*. U.S. Weather Bureau Research Paper 38.

KONIKOW L.F., BREDEHOEFT J.D., 1979. *Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*; USGS TWRI Book 7, Chapter A1, 586 pp.
Sito internet: <http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri6a1/>

KONIKOW L.F., GOODE D.J., HORNBERGER G.Z., 1996. *A three-dimensional method of characteristics solute-transport model (MOC3D)*; U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4267; Reston, Virginia.

LEBBE L.C., 1983. *Mathematical model of the evolution of the fresh-water lens under the dunes and beach with semi-diurnal tides*. In: Proc. of the 8th Salt Water Intrusion Meeting, Bari, Italy, May 1983, Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. XVIII, Parte II: 211-226.

LEWIS E.L., PERKIN R.G., 1981. *The Practical Salinity Scale 1978: conversion of existing data*. Deep-Sea Res., 28A, 307-328.

LUPPIS A., 1940. *Proposta di una nuova inalveazione del fiume Lamone con immissine nel Reno presso la Torre di Primaro*. Ann. Lavori Pubblici 78: 1005-1018.

MALFITANO A., 2002. *Alle origini della politica di tutela ambientale in Italia. Luigi Rava e la nuova Pineta "storica" di Ravenna*. Storia e Futuro, n.1 aprile 2002, Ed. Apogeo srl, Milano.
Sito internet: <http://www.storiaefuturo.com/arretrati/2002/01/01/002.html>

MARCHESINI L., AMOROSI A., CIBIN U., ZUFFA A., SPADAFORA E., PRETI D., 2000. *Sand composition and sedimentary evolution of a late Quaternary depositional sequence, Northwestern Adriatic Coast, Italy*. Journal of Sedimentary Research, 70, n. 4: 829-838.

McDONALD M.G., HARBAUGH A.W., 1988. *A modular tree-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*. USGS TWRI Book 6, Chapter A1, 586 pp.

Sito internet: <http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri6a1/>

MERCER J.W., FAUST C.R., 1981. *Ground-water modelling*. Dublin, Ohio: National Water Well Association.

MOLLEMA P., GIAMBASTIANI B., ULAZZI E., GABBIANELLI G., 2003. *The influence of climate change on the water budget in the Regional Park of the Po River Delta*. Special Issue

MEDCOAST 03 (G. Gabbianelli & F. Sangiorgi Ed.): "Climatic change and foreseeable impacts on deltas: a new challenge for the conservation of protected areas"; Proceeding of the Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environmental, Vol. 4: 69-79.

MOLSON J.W., FRIND E.O., 1994. *SALTFLOW – Density-dependent Flow and mass Transport Model in Three –Dimension*. User Guide, Waterloo Centre for Groundwater Research, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 68 pp.

NEUMAN S.P., 1975, *Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response*. Water Resources Research, 11, 329-342.

NE-ZHENG SUN, 1994. *Theory and applications of transport in porous media – Inverse problems in groundwater modelling*. Springer, pp. 30-32, 337 pp.

OUDE ESSINK G.H.P., 1996. *Impact of sea level rise on groundwater flow regimes. A sensitivity analysis for the Netherlands*. Ph.D. thesis Delft University of Technology, Delft Studies in integrated Water Management: n. 7. (ISBN 90-407-1330-8). 428 pp.

OUDE ESSINK G.H.P., 1998. *MOC3D adapted to simulate 3D density-dependent groundwater flow*. Proc. MODFLOW'98 Conf., Golden, Colorado, USA: 291-303.

OUDE ESSINK G.H.P., 1999. *Simulating density dependent groundwater flow: the adapted MOC3D*. Proc. 15th Salt Water Intrusion Meeting, Ghent, Belgium, May 1998: 69-79.

OUDE ESSINK G.H.P., 2000. *Groundwater Modelling I*. Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands.

Sito Internet: <ftp://ftp.geo.uu.nl/pub/people/goe/gwm1/gwm1.pdf>

OUDE ESSINK G.H.P., 2001a. *Salt Water Intrusion in a three-dimensional groundwater system in The Netherlands: a numerical study*. Transport in Porous Media, 43 (1): 137-158.

OUDE ESSINK G.H.P., 2001b. *Density dependent groundwater flow – salt water intrusion and heat transport*. KHTP/GWM II, L3041/L4019, Utrecht University, Interfaculty Centre of Hydrology Utrecht, Institute of Earth Sciences, Department of Geophysics.

OUDE ESSINK G.H.P., BOEKELMAN R.H., 1996. *Problems with large scale modelling of salt water intrusion in 3D*. Proc. 14th Salt Water Intrusion Meeting, Malmö, Sweden, 16-31.

PIROLA A., 1974. *La vegetazione della pineta di San Vitale*. In: *Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale*, a cura di Scossiroli R., Bologna.

PRETI M., 2000. *Eustatismo, subsidenza e linee di intervento per la difesa del territorio costiero in Emilia-Romagna*. Mare e cambiamenti globali, ICRAM, ARPA – Ingegneria Ambientale, Bologna, 167-179.

PRICKETT T.A., LONNQUIST C.G., 1971. *Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation*. Illinois State Geological Survey, Bulletin 55.

PRICKETT T.A., NAYMIK T.G., LONNQUIST C.G., 1981. *A random-walk solute transport model for selected groundwater quality evaluations*. Illinois State Geological Survey, Bulletin 65.

PROVINCIA DI RAVENNA, 2000, *1° Rapporto sullo stato dell'ambiente nella provincia di Ravenna 2000*. Assessorato Ambiente, Ravenna.

RANJAN S. P., KAZAMA S., SAWAMOTO M., 2006. *Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers*. Journal of Environmental Management, 80: 25-35.

RAPER S.C.B., WIGLEY T.M.L., WARRICK R.A., 1996. *Global sea-level rise: Past and Future*. In Sea-Level Rise and Coastal Subsidence, J.D. William and B.U. Hag (eds.), 11-45.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 1994. *I suoli dell'Emilia-Romagna*. Servizio Cartografico – Ufficio Pedologico.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP, 1998. *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. Relazione tecnica a cura di Di Dio G.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 1999. *Note illustrative Carta Geologica d'Italia – Scala 1:50000 – Ravenna*. A cura di A. Amorosi, pp. 144, Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato Ed., Roma.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003. *Piano di tutela delle acque*. Documento Preliminare (art. 25 L.R. . 20/2000), Relazione generale comprensiva del quadro conoscitivo, Arpa – Ingegneria Ambientale, Regione Emilia-Romagna.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2004. *Le acque sotterranee della pianura emiliano-romagnola*. Autore: De Nardo M.T.; Servizio Geologico sismico e dei suoli, Regione Emilia-Romagna.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2004. *Relazione sullo stato dell'Ambiente della Regione Emilia-Romagna*. ARPA, Regione Emilia-Romagna.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2006. *Opere di difesa della costa – Sistemazione della foce del fiume Lamone, mediante dragaggio, sistemazione del molo sinistro e ripascimento verso Marina Romea in comune di Ravenna*. Progetto esecutivo, Studio di incidenza ambientale; Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, Sede di Ravenna.

REYNOLDS J.M., 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics*. J. Wiley & Sons, Chichester, 796 pp.

ROBERTS W.J., STALL J.B., 1967. *Lake evaporation in Illinois*. Illinois State Water Survey Report of Investigation: 57.

RONCUZZI A., 1994. *Storia idrogeologica della piallassa Baiona*. In: Soprani S. and Ricci C. *Analisi dello stato ambientale e sanitario nelle valli ravennati*. La Piallassa Baiona. Azienda U.S.L. Dipartimento dei Servizi di Prevenzione, Ravenna: 15-51.

SABIA M., ANTONELLINI M., GABBIANELLI G., GIAMBASTIANI B.M.S., LAPENNA V., PERRONE A., RIZZO E., 2005. *Indagini geoelettriche per lo studio di strutture idrogeologiche nella pineta di San Vitale (RA)*. Atti del 24° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Roma, 15-17 novembre 2005: 357-360.

SAUTER F.J., LEIJNSE A., BEUSEN A.H.W., 1993. *METROPOL's - User's Guide*. Report number 725205.003. National Institute of Public Health and Environmental Protection. Bilthoven, The Netherlands.

SAXTON K. E., 2003. Soil water characteristics Version 6.1.51. A computer program for calculating soil properties. USDA Agricultural Research Service and Department of Biological Systems Engineering, Washington State University.
Sito Internet: www.bsyse.wsu.edu/saxton/

SCOSSIROLI R. E., 1974. *Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale – Studio sulla Pineta di San Vitale di Ravenna*. Centro di Studio sull'Ecologia e Genetica Quantitativa, Istituto di Genetica della Università di Bologna. Editrice Compositori, Bologna.

SHARMA P.V., 1997. *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press.

STARR, M., 1999. Watbal: A model for estimating monthly water balance components, including soil water fluxes. In: Kleemola, S. & Forsius, M. (eds.). 8th Annual Report. 1999. UN ECE ICP Integrated Monitoring. The Finnish Environment 325: 31-35.
Sito Internet: http://www.metla.fi/hanke/3098/ewat_bal.htm

STRACK O.D.L., 1976. *A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers*. Water Resour. Res., 12 (6), 1165-1174.

TE.AM GEOFISICA, 2004. *Indagine nell'area di Punta Alberete (RA)*. Te.Am. Geofisica s.r.l., Copparo, Ferrara.

TEATINI P., FERRONATO M., GAMBOLATI G., BERTONI W., GONELLA M., 2005. *A century of land subsidence in Ravenna, Italy*. Environ. Geol, 47, 831-846.

THORNTHWAITE C.W., 1944. *Report of the committee on transpiration and evaporation*. Transactions, American Geophysical Union, 25: 687 pp.

TRESCOTT P.C., PINDER G.F., LARSON S.P., 1976. *Finite-difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 7, Chap. C1.

UNEP, 1998. *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaption Strategies*. Version 2.0.

UNESCO, 1983. *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*. Unesco technical papers in marine science 44, Unesco/SCOR/ICES/IAPSO Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards and SCOR Working Group 51.

ULAZZI E., 2003. *Studio dell'intrusione di acqua salata nell'aquifero freatico costiero di Cervia*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali, XVI Ciclo, A/A 2002-2003, Università di Bologna.

VEGGIANI A., 1974. *Le ultime vicende geologiche del Ravennate*. In: *Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale. Studio sulla pineta di S. Vitale di Ravenna*. Ed. Compositori, Bologna, 48-58.

VERRUIJT A., 1980. *The rotation of a vertical interface in a porous medium*. *Water Resour. Res.*, 16 (1), 239-240.

VOSS C.I., 1984. *A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent round water flow with energy transport or chemically reactive single-species solute transport*. U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4369.

VOSS C.I., PROVOST A.M., 2003. *SUTRA – A Model for Saturated-Unsaturated, Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport*. Water-Resources Investigations Report 02-4231, U.S.Geological Survey (USGS), Reston, Virginia.

WANG H.F., ANDERSON M.P., 1982. *Introduction to groundwater modelling – finite difference and finite element methods*. San Francisco: W.H. Freeman.

ALTRI SITI INTERNET:

<http://www.arpa.emr.it/>

<http://www.eurometeo.com>

<http://www.gias.net>

<http://www.regione.emilia-romagna.it>

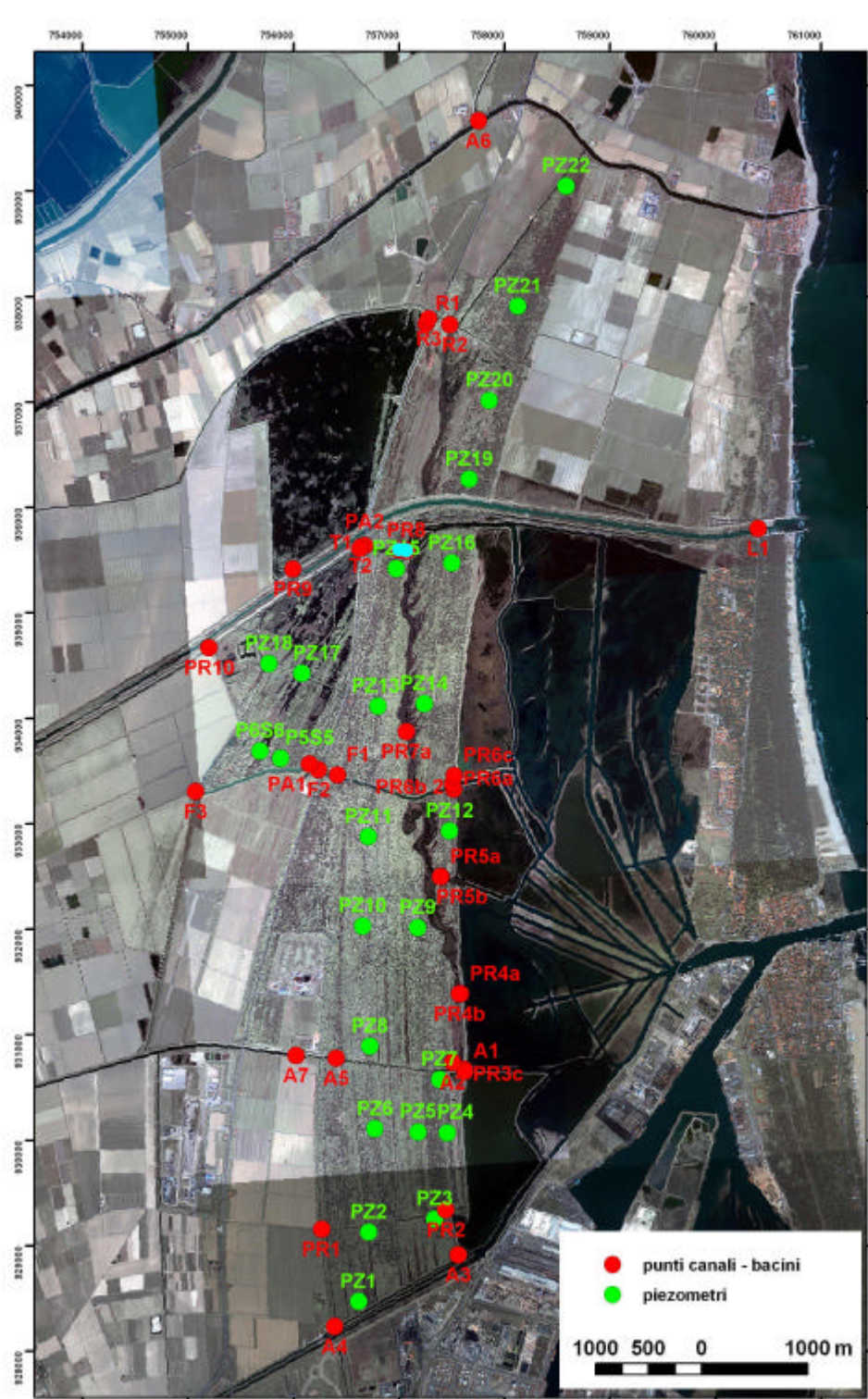
<http://iamest.jrc.it/pvgis/solradframe.php>

<http://www.dgv.unina.it/meteo/meteolab/formulario.htm>

<http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/>

ALLEGATO – DATI DEL MONITORAGGIO

MAPPA DEI PUNTI DI MONITORAGGIO



(D) Profili verticali di salinità nei piezometri

	MARZO 2005			APRILE 2005			MAGGIO 2005			GIUGNO 2005			LUGLIO 2005			AGOSTO 2005			SETTEMBRE 2005		
	SAL. (g/l)	T (°C)	PROF (m)	SAL. (g/l)	T (°C)	PROF (m)	SAL. (g/l)	T (°C)	PROF (m)	SAL. (g/l)	T (°C)	PROF (m)	SAL. (g/l)	T (°C)	PROF (m)	SAL. (g/l)	T (°C)	PROF (m)	SAL. (g/l)	T (°C)	PROF (m)
PZ1	2.39	8.60	-0.07	2.19	10.40	0.04	2.16	12.00	-0.24	2.02	13.70	-0.44	2.00	15.50	-0.48	2.41	17.20	-0.34	2.25	17.80	0.04
	2.40	8.90	-1.07	2.19	10.40	-0.96	2.17	11.50	-1.24	2.03	13.30	-1.44	2.02	14.90	-1.48	2.42	16.50	-1.34	2.26	17.60	-0.96
	2.39	9.80	-2.07	2.20	10.60	-1.96	2.24	11.30	-2.24	2.29	12.50	-2.44	2.22	13.70	-2.48	2.51	15.00	-2.34	2.32	16.20	-1.96
	2.58	10.90	-3.07	2.38	11.00	-2.96	3.23	11.70	-3.24	2.80	12.30	-3.44	3.64	13.10	-3.48	3.47	14.20	-3.34	2.82	15.10	-2.96
	5.42	11.70	-4.07	6.04	11.80	-3.96	7.33	12.30	-4.24	8.17	12.80	-4.44	9.88	13.10	-4.48	9.28	13.90	-4.34	6.54	14.50	-3.96
	11.56	12.40	-4.77	11.13	12.60	-4.66	11.86	12.70	-4.74	11.31	12.90	-4.64	11.49	13.20	-4.68	13.49	13.70	-4.64	12.27	14.20	-4.66
PZ2	4.89	8.60	-0.30	4.51	10.30	-0.18	4.75	11.60	-0.34	5.02	13.20	-0.47	5.52	14.40	-0.61	6.59	15.70	-0.42	4.94	16.70	-0.17
	5.22	8.90	-1.30	5.09	10.30	-1.18	5.69	11.30	-1.34	6.27	12.70	-1.47	7.00	13.90	-1.61	8.39	14.80	-1.42	5.40	16.30	-1.17
	8.24	10.60	-2.30	8.36	10.80	-2.18	9.95	11.30	-2.34	10.78	12.00	-2.47	10.77	12.80	-2.61	12.27	13.80	-2.42	8.57	15.00	-2.17
	12.59	12.10	-3.30	12.71	11.70	-3.18	14.67	11.60	-3.34	14.86	12.10	-3.47	15.03	12.50	-3.61	17.02	13.30	-3.42	12.69	14.00	-3.17
	17.59	12.70	-4.30	17.85	12.40	-4.18	18.41	12.20	-4.34	17.72	12.30	-4.47	18.16	12.50	-4.61	21.20	13.20	-4.42	20.05	13.40	-4.17
	18.28	12.80	-4.50	18.73	12.40	-4.38													21.07	13.40	-4.47
PZ3	13.42	8.00	-0.29	12.61	9.80	-0.11	12.60	11.30	-0.38	13.31	13.00	-0.51	14.22	14.10	-0.62	16.12	15.70	-0.44	16.06	16.20	-0.14
	14.28	8.10	-1.29	13.09	9.90	-1.11	14.25	11.00	-1.38	16.28	12.20	-1.51	16.58	13.50	-1.62	18.45	14.90	-1.44	16.93	15.80	-1.14
	19.70	10.20	-2.29	18.37	10.60	-2.11	20.65	11.00	-2.38	21.03	11.80	-2.51	21.14	12.50	-2.62	23.98	13.60	-2.44	22.61	14.30	-2.14
	22.50	12.10	-3.29	21.67	11.40	-3.11	22.83	11.70	-3.38	22.31	11.90	-3.51	22.63	12.30	-3.62	26.21	12.80	-3.44	25.55	13.30	-3.14
	23.47	12.40	-4.29	22.95	12.30	-4.11	23.47	12.00	-4.38	23.09	12.10	-4.51	23.47	12.40	-4.62	27.66	12.70	-4.44	26.74	13.10	-4.14
	23.73	12.60	-4.89	23.34	12.30	-4.71	23.93	12.20	-4.88	23.15	12.00	-4.71	23.73	12.30	-4.82	28.46	12.60	-4.74	28.33	12.80	-4.74
PZ4	25.40	8.30	-0.15	24.79	10.20	0.08	0.54	11.80	-0.66	2.02	13.70	-0.55	6.02	15.30	-0.66	9.02	16.70	-0.53	12.12	17.10	-0.13
	25.40	8.30	-1.15	24.79	10.10	-0.92	0.59	11.80	-1.66	4.07	14.00	-1.55	7.00	15.30	-1.66	11.22	16.70	-1.53	12.55	17.10	-1.13
	25.26	9.00	-2.15	24.86	10.10	-1.92	3.90	11.60	-2.66	17.90	12.80	-2.55	25.15	13.90	-2.66	29.92	14.60	-2.53	21.30	16.60	-2.13
	24.67	9.50	-2.85	25.64	10.40	-2.62	18.36	11.40	-3.06										29.91	15.30	-2.63
PZ5	11.67	7.30	-0.27	11.28	9.70	-0.25	11.15	11.10	-0.38	11.01	13.00	-0.59	11.06	14.70	-0.65	12.91	16.70	-0.47	12.73	17.30	-0.05
	11.60	7.40	-1.27	11.34	9.60	-1.25	11.21	10.90	-1.38	11.01	12.80	-1.59	11.06	14.70	-1.65	12.92	16.60	-1.47	12.73	17.40	-1.05

	11.53	8.20	-2.27	11.34	9.80	-2.25	11.27	10.50	-2.38	11.14	12.40	-2.59	11.18	13.90	-2.65	13.17	15.50	-2.47	12.73	16.60	-2.05
	11.41	8.80	-2.67	11.40	9.70	-2.75	11.27	10.50	-0.38										12.74	16.10	-2.55
PZ6	5.85	8.40	-0.19	5.49	10.60	0.01	5.42	11.80	-0.39	5.10	13.40	-0.65	4.74	15.00	-0.84	5.25	16.00	-0.84	5.40	16.70	-0.49
	5.85	8.50	-1.19	5.51	10.50	-0.99	5.42	11.80	-1.39	5.10	13.30	-1.65	4.91	14.90	-1.84	5.28	16.00	-1.84	5.40	16.70	-1.49
	5.96	9.00	-2.19	5.70	10.80	-1.99	7.61	11.00	-2.39	7.07	12.50	-2.65	6.83	13.70	-2.54	8.16	14.90	-2.34	8.97	15.50	-2.29
	7.78	10.00	-2.59	8.00	10.70	-2.39															
PZ7	12.82	6.90	-0.06	12.12	10.60	0.10	11.98	12.70	-0.23	11.78	14.90	-0.43	11.88	16.70	-0.51	14.00	18.20	-0.35	13.82	18.10	0.06
	12.82	6.90	-1.06	12.18	10.30	-0.90	11.98	12.60	-1.23	11.78	14.70	-1.43	11.82	16.70	-1.51	14.00	18.20	-1.35	13.82	18.10	-0.94
	12.87	7.90	-2.06	12.30	10.10	-1.90	12.17	11.80	-2.23	12.39	13.70	-2.43	13.24	14.60	-2.51	14.70	16.30	-2.35	14.01	17.30	-1.94
	16.12	9.90	-3.06	15.92	10.70	-2.90	16.85	11.40	-2.93	16.46	12.70	-2.83	16.52	13.50	-2.91	20.36	15.00	-2.75	19.01	15.60	-2.94
PZ8	2.19	8.40	0.02	2.06	10.30	0.18	0.58	12.30	-0.19	1.52	13.90	-0.47	1.74	15.30	-0.63	1.91	16.60	-0.59	2.13	16.40	-0.30
	2.22	8.60	-0.98	2.11	10.30	-0.82	1.31	11.80	-1.19	2.04	13.40	-1.47	2.21	15.00	-1.63	2.23	16.30	-1.59	3.14	15.70	-1.30
	2.74	9.60	-1.98	3.34	10.70	-1.82	2.99	11.50	-2.19	4.74	12.70	-2.47	3.85	13.80	-2.63	5.52	14.80	-2.59	12.02	14.40	-2.30
	8.01	11.10	-2.98	8.53	11.50	-2.82	8.30	11.70	-3.19	12.89	12.60	-3.47	13.13	13.10	-3.63	14.71	13.90	-3.59	20.88	13.90	-3.30
	15.41	12.60	-3.98	15.78	12.60	-3.82	16.03	12.30	-4.19	17.59	12.60	-4.47	18.28	13.00	-4.63	21.40	13.40	-4.49	21.26	13.80	-4.30
	18.22	13.00	-4.58	18.41	12.80	-4.42														21.26	13.80
PZ9	2.38	8.80	0.17	2.55	10.50	0.37	2.50	11.70	0.02	2.51	13.00	-0.25	2.68	14.20	-0.37	3.48	15.20	-0.33	2.32	16.20	-0.03
	2.65	9.10	-0.83	2.89	10.60	-0.63	3.27	11.50	-0.98	3.97	12.70	-1.25	3.96	13.50	-1.37	5.34	14.50	-1.33	3.31	16.00	-1.03
	5.65	11.00	-1.83	6.20	11.20	-1.63	6.34	11.50	-1.98	7.13	12.30	-2.25	8.70	12.80	-2.37	11.13	13.60	-2.33	8.22	14.50	-2.03
	10.48	12.10	-2.83	10.30	11.80	-2.63	11.44	11.90	-2.98	13.13	12.40	-3.25	14.17	12.80	-3.37	17.14	13.30	-3.33	14.10	13.80	-3.03
	15.28	12.70	-3.83	15.84	12.60	-3.63	17.16	12.30	-3.98	17.59	12.50	-4.05	16.84	12.80	-3.97	20.76	13.20	-3.93	20.69	13.30	-4.03
	17.09	12.80	-4.03	17.28	12.50	-3.93															
PZ10	0.40	8.30	-0.29	0.35	10.00	-0.10	0.31	11.70	-0.24	0.34	13.40	-0.52	0.37	14.50	-0.68	0.49	15.50	-0.92	0.54	16.10	-0.74
	0.49	9.40	-1.29	0.48	10.10	-1.10	0.38	11.20	-1.24	0.41	12.80	-1.52	0.42	14.00	-1.68	0.59	14.80	-1.92	0.62	15.50	-1.74
	0.55	10.50	-2.29	0.63	10.60	-2.10	0.57	11.00	-2.24	0.58	11.90	-2.52	0.60	12.80	-2.68	0.74	13.70	-2.92	0.73	14.40	-2.74
	0.56	11.00	-3.29	0.63	11.00	-3.10	0.65	11.20	-3.24	0.64	11.80	-3.52	0.65	12.40	-3.68	0.80	13.00	-3.92	0.77	13.60	-3.74
	0.56	11.20	-4.29	0.63	11.10	-4.10	0.65	11.30	-4.24	0.66	11.80	-4.22	0.67	12.30	-4.18	0.83	12.80	-4.12	0.87	13.30	-4.24
PZ11	0.23	9.10	0.04	0.19	10.50	0.20	0.17	12.40	-0.04	0.18	14.50	-0.35	0.16	16.20	-0.59	0.24	16.90	-0.68	0.22	17.70	-0.46
	0.23	9.50	-0.96	0.20	10.50	-0.80	0.18	12.00	-1.04	0.19	13.60	-1.35	0.19	15.30	-1.59	0.27	16.00	-1.68	0.23	17.30	-1.46

	0.23	10.60	-1.96	0.23	10.70	-1.80	0.21	11.70	-2.04	0.20	12.90	-2.35	0.25	13.90	-2.59	0.39	14.80	-2.68	0.27	15.70	-2.46
	0.22	11.50	-2.96	0.29	11.50	-2.80	0.26	11.90	-3.04	0.31	12.60	-3.35	0.38	13.50	-3.59	0.51	14.30	-3.68	0.45	15.00	-3.46
	0.22	11.80	-3.96	0.37	12.20	-3.80	0.39	12.30	-4.04	0.40	12.70	-4.05	0.43	13.20	-4.09	0.52	14.10	-3.98	0.51	14.50	-4.06
	0.22	11.80	-4.16	0.37	12.10	-4.00	0.39	12.30	-0.04												
PZ12	13.05	8.10	0.14	12.54	10.50	0.27	12.59	12.30	0.09	12.57	14.50	0.08	12.74	16.10	0.08	14.93	17.40	0.09	14.81	17.40	0.33
	13.72	8.60	-0.86	12.85	10.50	-0.73	12.89	11.90	-0.91	13.12	13.90	-0.92	13.91	15.00	-0.92	16.30	16.80	-0.91	14.87	17.20	-0.67
	18.05	10.40	-1.86	16.17	10.80	-1.73	18.17	11.40	-1.91	17.97	12.70	-1.92	17.96	13.60	-1.92	22.48	15.00	-1.91	19.90	15.60	-1.67
	21.99	11.80	-2.86	23.09	11.60	-2.73	23.61	11.80	-2.91	24.64	12.30	-2.92	25.09	12.80	-2.92	28.72	13.90	-2.91	27.92	14.40	-2.67
	29.06	12.80	-3.86	28.19	12.50	-3.73	29.00	12.40	-3.91	29.19	12.60	-3.92	29.19	13.00	-3.92	34.32	13.50	-3.91	33.50	13.90	-3.67
	28.86	13.00	-4.46	29.53	12.60	-4.33	29.86	12.50	-4.31	29.46	12.50	-4.32	29.59	13.00	-4.32	35.08	13.40	-4.31	33.98	13.60	-4.27
PZ13	0.71	8.30	0.45	0.46	9.80	0.56	0.43	11.60	0.23	0.44	13.80	-0.08	0.52	15.40	-0.34	0.82	16.50	-0.41	0.70	17.30	-0.17
	0.71	8.60	-0.55	0.59	9.80	-0.44	0.57	11.20	-0.77	0.58	13.20	-1.08	0.67	14.40	-1.34	0.84	15.80	-1.41	0.80	16.90	-1.17
	0.71	9.70	-1.55	0.72	10.40	-1.44	0.71	10.80	-1.77	0.69	12.10	-2.08	0.70	13.10	-2.34	0.85	14.30	-2.41	0.85	15.60	-2.17
	0.70	10.80	-2.55	0.73	10.80	-2.44	0.71	11.00	-2.77	0.70	11.70	-3.08	0.71	12.50	-3.34	0.85	13.70	-3.41	0.87	13.40	-3.17
	0.70	11.20	-3.55	0.74	11.20	-3.44	0.71	11.10	-3.77	0.71	11.70	-4.08	0.73	12.30	-3.94	0.86	13.40	-3.91	0.88	13.90	-3.97
	0.69	11.20	-3.95	0.75	11.10	-3.84	0.72	11.10	-3.97												
PZ14	2.55	7.40	0.09	1.93	9.70	0.14	3.58	11.10	-0.08	3.64	12.90	-0.37	6.49	13.80	-0.58	7.92	15.00	-0.52	5.74	15.80	-0.18
	3.99	8.00	-0.91	3.84	9.80	-0.86	4.42	11.00	-1.08	8.47	12.20	-1.37	8.75	13.40	-1.58	11.12	14.60	-1.52	8.39	15.10	-1.18
	9.72	9.70	-1.91	12.54	10.40	-1.86	10.49	10.70	-2.08	14.43	11.60	-2.37	14.18	12.40	-2.58	16.45	13.50	-2.52	15.27	14.00	-2.18
	15.79	11.70	-2.91	16.29	11.30	-2.86	15.48	11.10	-3.08	16.47	11.80	-3.37	17.22	12.30	-3.58	20.12	13.00	-3.52	18.08	13.50	-3.18
	18.86	12.40	-3.91	18.73	12.00	-3.86	18.23	11.70	-4.08	19.68	11.80	-4.37	20.00	12.20	-4.38	23.59	12.80	-4.22	22.43	13.00	-4.18
	19.81	12.40	-4.41	20.26	12.10	-4.26	20.00	11.90	-4.48										23.33	13.00	-4.38
PZ15	0.66	9.60	0.26	0.50	10.20	0.26	0.54	10.80	0.06	0.54	12.18	-0.15	0.72	12.80	-0.31	0.84	14.20	-0.26	0.69	15.10	-0.04
	0.71	10.00	-0.75	0.60	10.30	-0.75	0.66	10.80	-0.94	0.79	11.80	-1.15	0.82	12.60	-1.31	1.12	13.70	-1.26	0.88	14.80	-1.04
	0.73	10.40	-1.75	1.10	11.20	-1.75	1.14	11.10	-1.94	1.31	11.70	-2.15	1.43	12.20	-2.31	1.73	13.10	-2.26	1.53	13.90	-2.04
	1.65	12.00	-2.75	2.27	12.00	-2.75	1.92	11.60	-2.94	3.01	11.90	-3.15	3.00	12.40	-3.31	4.06	12.90	-3.26	3.31	13.40	-3.04
	3.75	12.00	-3.75	3.99	12.10	-3.35	3.97	11.90	-3.54	3.66	11.80	-3.55	4.02	12.30	-3.61	4.85	12.80	-3.46	4.72	13.30	-3.54
PZ16	2.15	7.30	0.27	1.91	10.20	0.33	1.85	11.70	0.07	1.82	13.30	-0.20	2.17	14.10	-0.37	2.44	15.30	-0.30	2.10	16.00	-0.05
	2.19	7.60	-0.73	2.08	10.10	-0.67	2.05	11.30	-0.93	2.07	13.00	-1.20	2.81	13.70	-1.37	3.58	14.70	-1.30	2.34	15.80	-1.05

	3.01	8.80	-1.73	3.65	10.30	-1.67	3.86	10.90	-1.93	4.12	11.90	-2.20	6.95	12.60	-2.37	7.64	13.60	-2.30	4.79	14.80	-2.05
	8.07	11.10	-2.73	9.66	10.90	-2.67	9.54	11.20	-2.93	11.86	11.90	-3.20	11.86	12.20	-3.37	14.05	12.90	-3.30	11.79	13.50	-3.05
	13.20	12.00	-3.73	13.81	11.90	-3.67	15.72	11.90	-3.93	16.47	12.20	-4.20	16.59	12.20	-4.37	20.44	12.80	-4.30	18.85	13.00	-4.05
	17.15	12.40	-4.53	17.85	12.20	-4.27	17.54	11.90	-4.53	17.22	12.10	-4.40	16.91	12.00	-4.57				20.50	12.90	-4.45
PZ17	3.12	10.70	0.60	2.68	11.70	0.60	1.63	12.60	0.43	1.92	14.20	0.46	3.05	14.50	0.18	2.88	16.20	0.20	3.08	18.10	0.44
	3.13	10.90	-0.40	2.80	11.80	-0.40	2.80	12.30	-0.57	2.40	13.40	-0.54	3.52	13.90	-0.82	3.03	15.60	-0.80	3.35	17.30	-0.56
	3.13	11.60	-1.40	2.89	12.10	-1.40	2.96	12.40	-1.57	2.88	13.10	-1.54	4.65	13.60	-1.82	3.32	14.80	-1.80	3.46	16.00	-1.56
	3.18	12.20	-2.40	3.07	12.70	-2.40	3.54	12.70	-2.57	5.69	13.20	-2.54	8.11	13.70	-2.82	5.61	14.40	-2.80	3.59	15.20	-2.56
	5.90	13.10	-3.40	6.78	13.50	-3.40	9.05	13.30	-3.57	9.16	13.50	-3.54	10.70	13.90	-3.82	12.99	14.20	-3.80	6.08	14.90	-3.56
9.99	14.10	-4.00	10.16	14.40	-3.80	10.71	13.40	-3.97	10.35	13.60	-3.94	10.88	14.20	-4.02				9.98	14.70	-3.96	
PZ18	1.01	7.80	0.37	0.97	10.80	0.37	0.61	12.40	0.17	1.68	13.20	0.13	1.58	13.90	-0.09	1.20	15.80	-0.12	1.86	17.00	0.20
	1.02	8.20	-0.63	0.98	10.70	-0.63	0.76	12.40	-0.83	3.24	13.10	-0.87	1.78	13.60	-1.09	1.45	15.10	-1.12	2.15	16.80	-0.80
	1.02	9.10	-1.63	1.02	11.10	-1.63	1.76	12.20	-1.83	5.47	13.10	-1.87	2.89	13.50	-2.09	1.96	14.50	-2.12	2.44	16.10	-1.80
	1.02	10.30	-2.63	1.05	11.70	-2.63	3.71	12.50	-2.83	8.05	13.20	-2.87	5.41	13.50	-3.09	3.80	14.20	-3.12	2.55	15.10	-2.80
	1.27	11.70	-3.63	1.43	12.30	-3.63	8.58	13.00	-3.83	12.64	13.40	-3.87	10.23	13.60	-4.09	10.94	14.20	-4.12	3.58	14.40	-3.80
	7.65	12.50	-4.63	8.23	13.30	-4.63	9.88	13.20	-4.63	13.92	13.40	-4.57	13.30	13.60	-4.69	15.02	14.30	-4.52	12.87	14.10	-4.60
PZ19	3.26	8.90	-0.14	3.53	10.50	-0.05	3.56	11.70	-0.30	3.73	13.00	-0.52	3.89	14.00	-0.67	4.51	15.40	-0.63	4.17	16.00	-0.43
	3.63	9.40	-1.14	4.00	10.60	-1.05	3.90	11.50	-1.30	4.30	12.70	-1.52	4.48	13.50	-1.67	5.69	14.70	-1.63	4.90	15.50	-1.43
	5.85	11.10	-2.14	6.62	11.30	-2.05	5.88	11.40	-2.30	6.90	12.30	-2.52	7.36	12.90	-2.67	8.92	14.00	-2.63	7.98	14.60	-2.43
	8.76	12.10	-3.14	10.18	12.00	-3.05	8.71	11.60	-3.30	10.95	12.50	-3.52	11.25	12.70	-3.67	15.33	13.60	-3.63	14.04	14.00	-3.43
	14.42	12.40	-4.14	14.85	12.30	-4.05	14.86	12.00	-4.10	14.36	12.40	-4.02	14.11	12.70	-4.07	17.71	13.30	-4.03	17.20	13.60	-4.03
PZ20	0.34	10.40	-0.94	0.31	10.60	-0.85	0.27	11.80	-0.82	0.30	12.90	-1.00	0.30	14.00	-1.17	0.38	15.10	-1.38	0.37	15.70	-1.36
	0.34	10.50	-1.94	0.36	10.70	-1.85	0.30	11.60	-1.82	0.35	12.70	-2.00	0.32	13.70	-2.17	0.44	14.70	-2.38	0.38	15.50	-2.36
	0.85	11.50	-2.94	0.80	11.20	-2.85	0.71	11.60	-2.82	1.15	12.30	-3.00	1.25	12.90	-3.17	2.77	13.70	-3.38	1.22	14.30	-3.36
	4.10	12.50	-3.94	4.05	12.10	-3.85	3.01	11.90	-3.82	5.83	12.40	-4.00	5.98	12.70	-4.17	7.41	13.30	-4.18	6.89	13.60	-4.26
	6.04	12.50	-4.24	5.98	12.20	-4.15	6.15	12.00	-4.22	6.44	12.30	-4.20									
PZ21	0.66	11.30	-1.87	0.63	11.10	-1.81	0.59	11.40	-1.77	0.52	12.00	-1.91	0.49	12.70	-2.00	0.64	13.50	-2.09	0.56	14.00	-2.09
	0.64	11.50	-2.87	0.62	11.30	-2.81	0.59	11.40	-2.77	0.57	12.00	-2.91	0.52	12.60	-3.00	0.68	13.30	-3.09	0.59	13.80	-3.09
	0.64	11.70	-3.87	0.62	11.50	-3.81	0.59	11.60	-3.77	0.69	12.20	-3.91	0.80	12.60	-4.00	1.16	13.10	-4.09	1.08	13.30	-4.09

	0.64	11.70	-4.57	0.62	11.40	-4.51	0.59	11.50	-4.47	0.83	12.20	-4.41	1.01	12.50	-4.50	1.25	12.90	-4.49	1.24	13.10	-4.49
PZZ2	3.92	9.70	-0.24	3.94	10.90	-0.16	3.81	11.70	-0.36	3.86	12.80	-0.60	3.85	13.50	-0.70	4.59	14.70	-0.69	4.55	15.00	-0.57
	3.97	10.10	-1.24	3.94	11.00	-1.16	3.95	11.60	-1.36	3.87	12.50	-1.60	3.85	13.20	-1.70	4.60	14.10	-1.69	4.59	14.30	-1.57
	4.14	11.20	-2.24	3.95	11.20	-2.16	4.01	11.60	-2.36	4.02	12.20	-2.60	4.04	12.70	-2.70	4.78	13.50	-2.69	4.88	13.60	-2.57
	4.24	12.20	-3.24	4.08	12.20	-3.16	4.07	11.90	-3.36	4.56	12.50	-3.60	4.61	12.70	-3.70	5.75	13.50	-3.69	5.63	13.50	-3.57
	4.22	12.30	-4.24	4.46	12.50	-3.86	4.20	12.00	-4.06	5.21	12.40	-4.00	5.27	12.70	-4.00	6.38	13.30	-3.99	6.61	13.30	-3.97

TABELLE DATI DI MONITORAGGIO - CANALI E BACINI D'ACQUA

(A) Livelli – dati mensili (m l.m.m.)

EST_UTM32	NORD_UTM32	NOME	note	LIV. OTT 2004	LIV. NOV 2004	LIV. DIC 2004	LIV. GEN 2005	LIV. FEB 2005	LIV. MAR 2005	LIV. APR 2005	LIV. MAG 2005	LIV. GIU 2005	LIV. LUG 2005	LIV. AGO 2005	LIV. SET 2005
756271	929179	PR1	paratoria Fiumetto	-0.55	-0.31	-0.25	-0.37	-0.35	-0.3	-0.22	-0.28	-0.33	-0.4	-0.31	-0.18
757444	929365	PR2	paratoia Fiumetto	-0.56	-0.30	-0.27	-0.42	-0.4	-0.33	-0.24	-0.34	-0.38	-0.42	-0.34	-0.20
757613	930691	PR3c	(lato a terra, verso Cavedone)	-0.04	0.32	0.14	-0.25	-0.25	0.05	0.14	-0.07	-0.11	-0.06	-0.01	0.08
757584	931400	PR4a	(verso mare, Risega)		0.54		-0.45	-0.02	0.12	0.09	0.29	0.01	-0.21	0.47	0.33
757572	931400	PR4b	(verso terra, Buca del Cavedone)	0.08	0.25	0.15	0.06	0.1	0.13	0.26	0.15	0.22	0.22	0.21	0.28
757509	930754	A2	Buca del Cavedone_carraia Cerba nord	0.10	0.31	0.2	0.10	0.15	0.18	0.32	0.20	0.26	0.26	0.25	0.30
757399	932506	PR5a	(verso mare, Chiaro del Cavedone)	0.03	0.08	0.07	0.07	0.08	1.41	0.20	0.13	0.20	0.14	0.11	0.14
757393	932505	PR5b	(verso terra, Buca del Cavedone)	0.10	0.27	0.16	0.08	0.14	0.15	0.28	0.16	0.24	0.22	0.22	0.29
757520	933334	PR6a	(verso mare, Chiaro del Cavedone)	0.08	0.15	0.1	0.10	0.09	0.15	0.22	0.16	0.22	0.17	0.11	0.17
757509	933382	PR6b 2	(verso Pialassa)		0.69	0.36	-0.25	0.04	0.22	-0.03	0.17	0.06	-0.18	0.48	0.18
757521	933460	PR6c	(verso mare, Chiaro del Comune)	0.05	0.11	0.09	0.10	0.05	0.04	0.20	0.18	0.22	0.18	0.14	0.16
757070	933875	PR7a		-0.06	0.03	0.1	0.10	0.03	0.12	0.10	0.01	-0.20			-0.05
757003	935591	PR8a	(verso mare)	0.10	0.60	0.41	-0.27	-0.1	-0.11	-0.01	0.22	-0.20	0.2	0.46	0.14

757069	935590	PR8c	(verso mare)	0.18	0.71	0.39	-0.28	-0.12	-0.12	-0.05	0.19	-0.27		0.44	0.11
756423	933466	F1	Fossatone (vicino canaletta ANIC)	1.27	1.10	0.88	1.26	1.27	1.36	1.10	0.85	1.29	1.29	1.23	1.35
756242	933517	F2	Fossatone , ponte Romea	0.98	0.84	0.594	1.00	1.044	1.094	1.84	0.56	1.02	1.03	1.04	1.09
755085	933308	F3	Fossatone, estremità ovest Punte Alberete	0.98	0.84	0.594	1.00	1.044	1.094	1.84	0.56	1.02	1.03	1.04	1.09
756647	935621	T1	TAGLIO_SS309 (a monte paratoia)	0.58	1.08	0.77	0.47	0.55	0.62	0.70	0.47	1.75	0.54	0.63	0.79
756677	935629	T2	TAGLIO SS309 (a valle paratoia)	1.09	1.67	1.29	0.95	1.03	1.13	1.27	0.99	1.14	1.03	1.06	1.38
757560	928939	A3	Pontazzo -Canala	-1.00	-0.65	-0.91	-1.26	-1.3	-1	-0.93	-1.08	-1.07	-1.1	-1.05	-0.93
756000	935408	PR9	Valle della Canna_Paratoia Lamone	0.46	0.57	0.75	0.77	0.72	0.65	0.59	0.57	0.50	0.47	0.47	0.55
756395	928262	A4	Scolo Canala_Ponte davanti a Ca' Ponticelle	-0.36	0.06	-0.26	-0.62	-0.68	-0.36	-0.17	-0.44	-1.46	-0.46	-0.39	-0.29
756409	930793	A5	Scolo Via Cerba_Ponte Ca' Nova (argine sx)	-0.43	-0.13	-0.34	-0.70	-0.74	-0.43	-0.26	-0.51	-0.57	-0.51	-0.45	-0.29
757752	939636	A6	Destra Reno (a sx Romea, lato dx del fiume)	-1.37	-1.23	-1.49	-1.99	-2.06	-1.98	-1.56	-1.31	-1.16	-1.34	-1.38	-1.56
755211	934668	PR10	Partitore (Collettore-Argine Ghigi-Lamone)	0.47	0.16	0	0.43	0.51	0.59	0.25	-0.04	0.49	0.48	0.47	0.47
757260	937724	R1	Rivalone (chiavica a ridosso della Romea)		0.67	0.72	0.74	0.7	0.58	0.70	0.64	0.33	0.24	0.30	0.60
757482	937714	R2	Rivalone (in pineta)		-0.45	-0.17	-0.12	-0.16	-0.1	-0.08	-0.29				-0.39

757280	937770	R3	Rivalone (chiavica in destra)			0.72	0.75	0.7	0.63	0.56	0.19				
756157	933568	PA1	Entrata Ponte Alberete (Fossatone)	0.50	0.73	0.64	0.70	0.75	0.65	0.59	0.47	0.48	0.31	0.27	0.48
756631	935604	PA2	Uscita Ponte Alberete (Taglio)	0.30	0.73	0.66	0.70	0.76	0.65	0.58	0.49	0.50	0.06	0.25	0.49
756032	930822	A7	Idrovora di Via Cerba (asta a monte idrovora)		-1.51	-1.45	-1.27	-1.1	-1.23	-1.34	-1.02	-1.28	-1.12		-1.25

(B) Salinit  superficiale – dati mensili (g/l)

EST_UTM32	NORD_UTM32	NOME	appunti	S SUP OTT 2004	S SUP NOV 2004	S SUP DIC 2004	S SUP GEN 2005	S SUP FEB 2005	S SUP MAR 2005	S SUP APR 2005	S SUP MAG 2005	S SUP GIU 2005	S SUP LUG 2005	S SUP AGO 2005	S SUP SET 2005
756271	929179	PR1	paratoria Fiumetto	0.55	6.22	2.66	2.17	4.69	4.59	4.09	2.04	1.56	0.80	0.61	1.70
757444	929365	PR2	paratoia Fiumetto	0.86	4.92	1.79	1.56	2.55	2.44	2.85	2.01	1.73	0.98	0.67	2.32
757620	930692	PR3b	(lato a mare, verso Chiaro della Risega)	17.88	8.36	13.19	16.38	14.65	26.58	11.61	22.12	23.45	24.28	28.57	26.87
757613	930691	PR3c	(lato a terra, verso Cavedone)	1.34	3.06	1.15	2.79	5.69	2.59	1.40	3.81	2.64	1.46	2.09	2.82
757623	930671	A1	Pontazzo (adiacente a Risega)	1.30	2.87	3.32	3.72	4.41	2.93	1.41	3.67	2.57	1.51	1.76	2.76
757584	931400	PR4a	(verso mare, Risega)	19.86	15.47		16.00	14.20	27.51	19.28	25.38	24.88	25.94	29.93	27.49
757572	931400	PR4b	(verso terra, Buca del Cavedone)	0.95	0.94	0.92	2.54	3.65	3.79	4.80	15.18	4.41	2.86	2.24	23.81
757509	930754	A2	Buca del Cavedone_carraia Cerba nord	1.64	1.16	2.75	1.42	1.72	2.28	2.66	3.53	4.83	3.85	2.55	1.56
757399	932506	PR5a	(verso mare, Chiaro del Cavedone)	2.40	3.73	2.56	3.47	4.44	5.25	4.54	3.91	3.77	5.08	6.03	5.73
757393.341	932505.257	PR5b	(verso terra, Buca del Cavedone)	0.70	0.98	1.37	3.35	6.74	5.94	4.18	2.26	0.89	0.58	0.85	0.66
757520	933334	PR6a	(verso mare, Chiaro del Cavedone)	0.47	4.11	4.06	4.51	4.41	5.58	4.11	3.51	0.38	3.99	3.52	3.57
757506	933381	PR6b 1	(verso Fossatone)	0.21	0.46	5.73	8.22	0.71	8.54	1.19	7.49	0.37	0.63	7.47	0.87
757509	933382	PR6b 2	(verso Pialassa)	21.19	17.01	13.14	16.00	26.36	28.05	24.69	26.16	26.27	26.71	31.40	28.81
757521	933460	PR6c	(verso mare, Chiaro del Comune)	1.71	2.33	4.56	4.45	3.62	0.75	1.63	1.28	0.36	0.94	1.19	1.30
757070	933875	PR7a		11.97	9.82	3.86	4.27	8.56	7.85	4.13	6.39	11.92	14.77	17.42	8.48
757003	935591	PR8a	(verso mare)	21.59	14.57	12.97	14.16	20.72	4.77	20.97	25.50	6.97	0.78	30.73	27.15
756998	935594	PR8	(verso terra)	19.80	12.43	12.43	0.71	0.42	0.81	0.56	7.78	0.84	0.79	30.12	0.92
757069	935590	PR8c	(verso mare)	21.66	16.12	13.22	14.59	8.18	24.03	21.81	26.36	24.89		30.86	27.61

757072	935580	PR8	(verso Pirottole, alle spalle del PR8c)	11.38	13.73	7.68	6.59	5.49	11.53	6.46	6.99	21.52	17.70	26.92	26.95
756423	933466	F1	Fossatone (vicino canaletta ANIC)	0.21	0.29	0.27	0.37	0.39	0.49	0.33	0.47	0.27	0.36	0.25	0.31
756242	933517	F2	Fossatone , ponte Romea	0.21	0.31	0.29	0.37	0.41	0.46	0.28	0.51	0.25	0.32	0.23	0.30
755085	933308	F3	Fossatone, estremità ovest Ponte Alberete	0.21	0.28	0.40	0.37	0.34	0.46	0.32	0.54	0.25	0.28	0.23	0.28
756647	935621	T1	TAGLIO_SS309 (a monte paratoia)	21.39	0.34	0.33	0.33	0.36	0.37	0.31	0.36	0.35	0.35	24.54	0.34
756677	935629	T2	TAGLIO SS309 (a valle paratoia)	22.47	5.54	9.36	0.32	0.36	0.37	0.31	0.40	0.36	0.36	17.53	9.31
757560	928939	A3	Pontazzo -Canala	1.53	2.04	1.94	3.94	4.93	3.11	1.46	2.75	2.42	2.45	1.66	2.70
756000.347	935407.521	PR9	Valle della Canna_Paratoia Lamone	0.35	0.28	0.25	0.30	0.31	0.31	0.29	0.28	0.32	0.28	0.35	0.31
756394.595	928261.657	A4	Scolo Canala_Ponte davanti a Ca' Ponticelle	0.72	1.37	1.74	3.42	4.93	2.60	1.30	1.70	0.93	0.86	1.64	1.87
756409.043	930793.076	A5	Scolo Via Cerba_Ponte Ca' Nova (argine sx)	0.28	1.67	1.09	4.06	6.10	2.37	2.27	1.60	0.81	0.42	0.49	0.93
757752	939636	A6	Destra Reno (a sx Romea, lato dx del fiume)	0.38	0.43	0.59	1.54	18.57	1.33	0.77	0.38	0.34	0.33	1.13	0.20
755211	934668	PR10	Partitore (Collettore-Argine Ghigi-Lamone)	0.21	0.37	0.29	0.36	0.43	0.47	0.32	0.56	0.25	0.25	0.23	0.28
757260	937724	R1	Rivalone (chiavica a ridosso della Romea)		0.22	0.27	0.30	0.31	0.30	0.31	0.31	0.25	0.26	0.28	0.24
757482	937714	R2	Rivalone (in pineta)		0.52	0.47	0.45	0.47	0.50	0.42	0.82				0.64
757280	937770	R3	Rivalone (chiavica in destra)			0.31	0.30	0.33	0.30	0.30					
756157	933568	PA1	Entrata Ponte Alberete (Fossatone)	0.21	0.30	0.28	0.38	0.40	0.46	0.29	0.52	0.26	0.34	0.23	0.30
756631	935604	PA2	Uscita Ponte Alberete (Taglio)	0.22	0.33	0.28	0.30	0.36	0.36	0.30	0.33	0.35	0.34	0.35	0.29

760392	935792	L1	Ponte Lamone, vicino a bagno Boca Barranca			1.99	2.26	1.91	4.14	0.75	3.84	23.65	27.25	25.59	1.76
--------	--------	----	--	--	--	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	------

(C) Salinit  profonda – dati mensili (g/l)

<i>EST_UTM32</i>	<i>NORD_UTM32</i>	<i>NOME</i>	<i>appunti</i>	<i>S PROF OTT 2004</i>	<i>S PROF NOV 2004</i>	<i>S PROF DIC 2004</i>	<i>S PROF GEN 2005</i>	<i>S PROF FEB 2005</i>	<i>S PROF MAR 2005</i>	<i>S PROF APR 2005</i>	<i>S PROF MAG 2005</i>	<i>S PROF GIU 2005</i>	<i>S PROF LUG 2005</i>	<i>S PROF AGO 2005</i>	<i>S PROF SET 2005</i>
756271	929179	PR1	paratoria Fiumetto	0.55	6.22	2.66	2.17	4.69	4.59	4.09	2.04	1.56	0.80	0.61	1.70
757444	929365	PR2	paratoia Fiumetto	0.86	4.92	1.79	1.56	2.55	2.44	2.85	2.01	1.73	0.98	0.67	2.32
757620	930692	PR3b	(lato a mare, verso Chiaro della Risega)	18.45	15.85	12.82	16.51	14.63	26.65	13.13	25.17	24.96	25.53	30.00	26.87
757613	930691	PR3c	(lato a terra, verso Cavedone)	3.13	3.29	6.73	11.84	10.37	14.61	1.43	12.29	5.54	1.43	7.36	9.19
757623	930671	A1	Pontazzo (adiacente a Risega)	3.02	3.54	4.05	9.22	9.65	10.77	1.44	11.09	3.23	1.51	6.16	8.13
757584	931400	PR4a	(verso mare, Risega)	19.86	15.47		16.00	14.20	27.38	19.28	25.38	24.88	25.94	29.93	27.29
757572	931400	PR4b	(verso terra, Buca del Cavedone)	1.20	1.36	1.13	2.54	3.65	19.87	4.80	15.18	4.41	2.86	2.24	23.81
757509	930754	A2	Buca del Cavedone_carraia Cerba nord	1.64	1.16	2.75	1.42	1.72	2.28	2.66	3.53	4.83	3.85	2.55	1.56
757399	932506	PR5a	(verso mare, Chiaro del Cavedone)	2.40	3.73	2.56	3.47	4.44	5.25	4.54	3.91	4.79	5.08	6.03	5.73
757393.341	932505.257	PR5b	(verso terra, Buca del Cavedone)	0.70	0.98	1.37	3.63	6.74	6.03	4.52	2.56	1.71	0.74	0.86	0.67
757520	933334	PR6a	(verso mare, Chiaro del Cavedone)	0.47	4.11	4.06	4.51	4.41	5.58	4.11	3.51	0.38	3.99	3.52	3.57
757506	933381	PR6b 1	(verso Fossatone)	0.21	0.46	5.73	8.22	0.71	8.54	1.19	7.49	0.37	0.63	7.47	0.87
757509	933382	PR6b 2	(verso Pialassa)	21.19	17.01	13.14	16.00	26.36	28.05	24.69	26.16	26.27	26.71	31.40	28.81

757521	933460	PR6c	(verso mare, Chiaro del Comune)	1.71	2.33	4.56	4.45	3.62	0.75	1.63	1.28	0.36	0.94	1.19	1.30
757070	933875	PR7a		11.97	9.82	3.86	4.27	8.56	7.85	4.13	6.39	11.92	14.77	17.42	8.48
757003	935591	PR8a	(verso mare)	21.59	15.80	12.97	14.16	20.72	4.77	20.97	25.50	6.97	0.78	30.73	27.15
756998	935594	PR8	(verso terra)	19.80	12.43	12.43	0.71	0.42	0.81	0.56	7.78	0.84	0.79	30.12	0.92
757069	935590	PR8c	(verso mare)	21.66	16.36	13.08	14.59	8.18	24.03	21.81	26.36	24.89		31.48	27.61
757072	935580	PR8	(verso Pirottolo, alle spalle del PR8c)	11.38	13.73	7.68	6.59	5.49	11.53	15.68	11.81	21.52	17.70	26.92	26.95
756423	933466	F1	Fossatone (vicino canaletta ANIC)	0.21	0.29	0.27	0.37	0.39	0.49	0.33	0.47	0.27	0.36	0.25	0.31
756242	933517	F2	Fossatone , ponte Romea	0.21	0.31	0.29	0.37	0.42	0.47	0.28	0.51	0.26	0.34	0.23	0.30
755085	933308	F3	Fossatone, estremità ovest Punte Alberete	0.21	0.28	0.41	0.37	0.44	0.46	0.32	0.54	0.25	0.28	0.23	0.28
756647	935621	T1	TAGLIO_SS309 (a monte paratoia)	21.39	0.34	0.33	0.33	0.36	0.37	0.31	0.36	0.35	0.35	24.54	0.34
756677	935629	T2	TAGLIO SS309 (a valle paratoia)	22.47	5.54	9.36	0.32	0.36	0.37	0.31	0.40	0.36	0.36	17.53	9.31
757560	928939	A3	Pontazzo -Canala	1.55	2.07	1.94	3.98	4.93	3.14	1.51	2.75	2.42	2.45	1.79	2.82
756000.347	935407.521	PR9	Valle della Canna_Paratoia Lamone	0.36	0.28	0.25	0.30	0.32	0.31	0.29	0.28	0.32	0.28	0.35	0.31
756394.595	928261.657	A4	Scolo Canala_Ponte davanti a Ca' Ponticelle	0.72	1.37	1.74	3.42	4.93	2.60	1.30	1.70	0.93	0.86	1.64	1.87
756409.043	930793.076	A5	Scolo Via Cerba_Ponte Ca' Nova (argine sx)	0.28	1.78	1.09	4.06	6.10	2.51	2.39	2.77	0.81	0.43	0.50	0.90
757752	939636	A6	Destra Reno (a sx Romea, lato dx del fiume)	0.39	0.56	8.25	10.83	20.72	1.57	13.17	1.07	0.62	0.46	25.67	20.64
755211	934668	PR10	Partitore (Collettore-Argine Ghigi-Lamone)	0.21	0.37	0.29	0.36	0.43	0.47	0.32	0.56	0.25	0.25	0.23	0.28
757260	937724	R1	Rivalone (chiavica a ridosso della Romea)		0.22	0.27	0.30	0.31	0.30	0.31	0.31	0.25	0.26	0.28	0.24

757482	937714	R2	Rivalone (in pineta)		0.52	0.47	0.45	0.47	0.50	0.42	0.82					0.64
757280	937770	R3	Rivalone (chiavica in destra)			0.31	0.30	0.33	0.30	0.30						
756157	933568	PA1	Entrata Ponte Alberete (Fossatone)	0.21	0.30	0.28	0.38	0.40	0.46	0.29	0.52	0.26	0.34	0.23	0.30	
756631	935604	PA2	Uscita Ponte Alberete (Taglio)	0.22	0.33	0.29	0.30	0.36	0.36	0.30	0.33	0.35	0.34	0.35	0.29	
760392	935792	L1	Ponte Lamone, vicino a bagno Boca Barranca			1.99	12.96	25.55	26.93	29.01	23.76	28.07	27.52	32.36	21.79	

RILIEVO FIUME LAMONE (18 LUGLIO 2005)

PUNTO	DISTANZA DA DIGA (m)	S (g/l)	T (°C)
diga (a monte)	0	0.21	27.6
93	10	3.44	28.0
		5.19	28.0
		20.65	26.8
		21.87	26.7
		3.29	29.3
94 (mark 88)	420	11.57	28.5
		22.26	27.1
		3.70	29.3
95 (mark 84)	769	14.61	28.7
		20.97	27.8
		22.45	27.5
		4.24	30.0
96 (mark 79)	1299	15.84	29.3
		23.10	27.8
		6.36	29.8
		15.22	29.4
97	1809	24.53	28.2
		26.65	25.8
		26.71	25.6
		7.73	30.0
		11.56	30.0
98	2622	23.61	28.9
		26.98	27.0
		27.31	26.9
		8.20	30.0
		18.98	30.0
99	2968	25.05	28.5
		27.11	27.4
		27.24	27.2
		8.43	29.9
		16.77	30.0
100 (mark 59)	3063	25.18	28.5
		26.90	27.7
		27.24	27.3
		27.37	27.2
		11.08	30.6
101	3531	15.22	30.9
		24.45	30.0
		27.17	27.9
		26.77	27.5
		11.74	30.4
102	3892	14.29	31.1
		24.20	29.4
		27.24	27.9
		13.56	30.4
103	4495	15.03	30.9
		25.71	28.8
		27.50	27.7
		15.53	29.7
104	5575	18.22	30.0
		27.30	28.1
		27.64	27.4
		23.61	28.5
105 (mark 24)	6676	26.37	28.4
		27.64	27.1
		28.11	26.5
106	7628	26.90	27.7
		27.24	27.6
		27.84	27.3
		28.24	26.5