

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN
Geoingegneria, georisorse e ingegneria geotecnica

Ciclo XXV

Settore Concorsuale di afferenza: 08/A2

Settore Scientifico disciplinare: ING – IND/29

VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE TRAMITE
METODOLOGIA LCA DI SISTEMI PER LO SFRUTTAMENTO DI
FONTI ALTERNATIVE DI ENERGIA E MATERIALI

Presentata da: Cristian Chiavetta

Coordinatore Dottorato:

Prof. Ing. Paolo Berry

Relatore:

Prof. Ing. Alessandra Bonoli

Esame finale anno 2013

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	15
2. I BIOCARBURANTI: CARATTERISTICHE, EVOLUZIONE ATTESA DEL LORO MERCATO, QUADRO NORMATIVO E VALUTAZIONE DELLA LORO SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE	20
2.1 I biocarburanti.....	20
2.2 Produzione e consumo dei biocarburanti nella Comunità Europea	26
2.2.1 Il biodiesel e gli oli vegetali in Italia	28
2.3 Le evoluzioni attese nel mercato dei biocarburanti	30
2.4 Il quadro normativo in materia di sostenibilità dei biocarburanti.....	32
2.4.1 La Direttiva 2009/28/CE	33
3. LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ DEI BIOCOMBUSTIBILI....	39
3.1 L’impatto sull’uso del suolo in LCA	40
3.1.1 Lo stato dell’arte dell’impatto sull’uso del suolo in LCA.....	41
3.2 Un approccio per includere l’impatto sull’uso del suolo nel ciclo di vita dei biocarburanti	47
4. MATERIALI E METODI.....	51
4.1 L’analisi del ciclo di vita	51
4.1.1 Definizione e normative di riferimento	51
4.1.2 Origini e sviluppo.....	54
4.1.3 Differenti tipologie di LCA.....	56
4.1.4 LCA: metodologia.....	59
4.1.5 Definizione di obiettivo e campo di applicazione dello studio	60
4.1.6 Analisi di inventario - LCI.....	63
4.1.7 Analisi degli impatti	66
4.1.8 Interpretazione dei risultati	80
4.1.9 Software per LCA.....	81
4.1.10 Database per LCA	82
4.1.11 GaBi 6.....	84
4.2 Il Soil Conditioning Index	85
4.2.1 Il modello PSIAC	88

5.	DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO	90
5.1	Il progetto Susbiofuel	90
5.1.1	Introduzione	90
5.1.2	Fase AB	91
5.1.3	Le fasi C e D	109
5.1.4	Fase E.....	110
6.	LCA DEL PROGETTO SUSBIOFUEL	112
6.1	Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio ..	112
6.1.1	Definizione degli obiettivi dell'analisi	112
6.1.2	Definizione del contesto decisionale	114
6.1.3	Definizione del campo di applicazione	114
6.2	Analisi di inventario	119
6.2.1	Inventario della produzione di olio da semi di soia	119
6.2.2	Inventario della produzione di olio da semi di tabacco	153
6.3	Valutazione degli impatti.....	192
6.3.1	Valutazione degli impatti per gli scenari di produzione di olio di soia analizzati	192
6.3.2	Valutazione degli impatti per gli scenari di produzione di olio di tabacco analizzati.....	211
6.3.3	Confronto tra gli impatti del ciclo di vita di 1 MJ prodotto da olio di soia e il ciclo di vita di 1 MJ prodotto da olio di tabacco e	227
7.	APPROFONDIMENTO SUL LAND USE IMPACT	233
8.	CONCLUSIONI	245
9.	BIBLIOGRAFIA	248
10.	Articoli e pubblicazioni scientifiche.....	255

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Produzione europea di biocarburanti (Fonte: Eurostat)	27
Figura 2: produzione e capacità produttiva degli impianti per la produzione di biodiesel in Italia (Mton)	29
Figura 3: Importazioni italiane di semi oleosi e oli vegetali 2005-2010 (Fonte: Eurostat, 2012)	29
Figura 4 – Produzione mondiale di bioetanolo (sopra) e biodiesel (sotto) per tipo di materia prima utilizzata (Fonte: OCCD-FAO, 2010)	30
Figura 5: Impatto sul land use in caso di cambiamento nella destinazione d'uso del suolo (Fonte: Milà i Canals, 2007).....	43
Figura 6: Andamento della qualità del suolo in un processo di trasformazione e occupazione seguito da una fase di rilassamento (Fonte: Milà i Canals, 2007)	44
Figura 7: Impatto sul land use dato da un processo di occupazione e trasformazione (Fonte: LANCA method report, figura 2.1).....	46
Figura 8: Digramma di flusso di un sistema produttivo	52
Figura 9: Schema di sintesi dei possibili approcci di uno studio LCA	57
Figura 10: Schema delle fasi che costituiscono la metodologia LCA.....	60
Figura 11: Galle da nematodi sulle radici (Fonte Susbiofuel report, anno di attività 2012)	93
Figura 12: Principali prodotti di idrolisi dei glucosinati ad opera dell'enzima tirosinasi (Fonte: Report progetto Susbiofuel anno di attività 2012).....	101
Figura 13: Confronto tra campo senza precessione di brassica a sinistra e campo con precessione di brassica, a destra. (Fonte: Progetto Susbiofuel report attività anno 2012)	106
Figura 14: Confronto tra radici di soia coltivata senza precessione di brassica (sono visibili le galle dei nematodi sulle radici) e radici di soia coltivata con precessione di brassica senza danni (Fonte: Progetto Susbiofuel report attività anno 2012).....	108
Figura 15: Fasi del ciclo di vita della soia con precessione di brassica	120
Figura 16: Diagramma di flusso della fase di coltivazione della brassica	121

Figura 17: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria e acqua) dei fertilizzanti azotati	125
Figura 18: Diagramma di flusso della coltivazione della brassica che mostra i processi di database utilizzati	126
Figura 19: Diagramma di flusso della coltivazione della soia con precessione di brassica	127
Figura 20: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria e acqua) dei fertilizzanti azotati	130
Figura 21: Diagramma di flusso del processo di coltivazione della soia senza precessione di brassica che mostra i processi di database utilizzati	131
Figura 22: Diagramma di flusso del processo di trasporto della soia	132
Figura 23: Diagramma di flusso del processo di spremitura dei semi di soia.	132
Figura 24: Diagramma di flusso ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di soia con precessione di brassica con valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase.	134
Figura 25: Fasi del ciclo di vita della coltivazione della soia con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente	134
Figura 26: Diagramma di flusso della fase di coltivazione della soia con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente	135
Figura 27: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria e acqua) dei fertilizzanti azotati	139
Figura 28: Diagramma di flusso della coltivazione della soia con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente che mostra i processi di database utilizzati	141
Figura 29: Diagramma di flusso del processo di trasporto della soia	142
Figura 30: Diagramma di flusso del processo di spremitura della soia	142
Figura 31: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di soia coltivata facendo ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente con valore di flussi di riferimento uscenti da ogni fase	144
Figura 32: Fasi del ciclo di vita della soia coltivata senza ricorso a fumiganti	144
Figura 33: Diagramma di flusso della fase di coltivazione della soia	145
Figura 34: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati	149

Figura 35: Diagramma di flusso della soia coltivata senza ricorso a fumiganti	150
Figura 36: Diagramma di flusso del processo di trasporto della soia	151
Figura 37: Diagramma di flusso del processo di spremitura della soia	151
Figura 38: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di soia coltivata senza ricorso a fumiganti con valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase	153
Figura 39: Fasi del ciclo di vita del tabacco con precessione di brassica	154
Figura 40: Diagramma di flusso della fase di coltivazione della brassica	155
Figura 41: Processo di produzione e uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati	159
Figura 42: Diagramma di flusso della coltivazione della brassica che mostra i processi di database utilizzati	160
Figura 43: Diagramma di flusso del processo di coltivazione di tabacco in serra riscaldata	161
Figura 44: Diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco	163
Figura 45: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati	165
Figura 46: Diagramma di flusso della coltivazione del tabacco che mostra i processi di database utilizzati	167
Figura 47: Diagramma di flusso del processo di trasporto del tabacco.....	167
Figura 48: Diagramma di flusso del processo di spremitura dei semi di tabacco	168
Figura 49: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di tabacco con precessione di brassica con valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase	169
Figura 50: Fasi del ciclo di vita della produzione di olio di tabacco con contenuto energetico di 1 MJ prodotto con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente.....	170
Figura 51: Diagramma di flusso del processo di coltivazione di tabacco in serra riscaldata	172
Figura 52: Diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco	173

Figura 53: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati	176
Figura 54: Diagramma di flusso della coltivazione del tabacco che mostra i processi di database utilizzati	178
Figura 55: Diagramma di flusso del processo di trasporto del tabacco.....	179
Figura 56: Diagramma di flusso del processo di spremitura dei semi di tabacco	179
Figura 57: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di tabacco con ricorso a fumiganti di sintetizzazione chimica con valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase.....	180
Figura 58: Fasi del ciclo di vita della produzione di olio di tabacco con contenuto energetico di 1 MJ prodotto senza ricorso a fumiganti nella fase vegetativa	181
Figura 59: Diagramma di flusso del processo di coltivazione di tabacco in serra riscaldata	183
Figura 60: Diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco	184
Figura 61: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati	187
Figura 62: Diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco	189
Figura 63: Diagramma di flusso del processo di trasporto del tabacco.....	189
Figura 64: Diagramma di flusso del processo di spremitura dei semi di tabacco	190
Figura 65: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di tabacco senza ricorso a fumiganti nella fase vegetativa con indicazione dei valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase	191
Figura 66: Grafico dei risultati di normalizzazione	194
Figura 67: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria del Global warming potential.....	196
Figura 68: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria dell'Acidification potential.....	197
Figura 69: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria dello Eutrophication potential	197

Figura 70: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria dell'Abiotic depletion potential.....	198
Figura 71: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria del Photochemical ozone creation potential	198
Figura 72: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria del Global warming potential per la fase di coltivazione della soia	200
Figura 73: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria dell'Acidification potential per la fase di coltivazione della soia.....	201
Figura 74: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria dello Eutrophication potential per la fase di coltivazione della soia	201
Figura 75: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria del Global warming potential per la fase di coltivazione della brassica.....	202
Figura 76: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione dell'Acidification potential per la brassica	203
Figura 77: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria dello Eutrophication potential per la fase di coltivazione della brassica	203
Figura 78: dettaglio dei fattori di ripartizione utilizzati dal modello che valuta le emissioni dirette in aria ed in acqua dell'azoto fornito al terreno tramite fertilizzazione	204
Figura 79: Valori di emissioni in aria ed in acqua dei composti generati a partire dall'azoto fornito al terreno tramite fertilizzazione	204
Figura 80: Emissioni di gas serra del processo di fertilizzazione: emissioni dirette (a sx) ed emissioni relative alla fase di produzione dei fertilizzanti (a dx)	205
Figura 81: Eutrofizzazione generata dal processo di fertilizzazione: emissioni dirette (a sx) ed emissioni relative alla fase di produzione dei fertilizzanti (a dx)	205
Figura 82: Confronto dei risultati di caratterizzazione per la categoria del GWP tra lo scenario di coltivazione della soia con precessione di brassica e lo scenario che fa ricorso ad un fumigante sintetizzato chimicamente	208
Figura 83: Confronto dei risultati di caratterizzazione per la categoria del Acidification potential tra lo scenario di coltivazione della soia con precessione	

di brassica e lo scenario che fa ricorso ad un fumigante sintetizzato chimicamente.....	209
Figura 84: Confronto dei risultati di caratterizzazione per la categoria dello Eutrophication potential tra lo scenario di coltivazione della soia con precessione di brassica e lo scenario che fa ricorso ad un fumigante sintetizzato chimicamente.....	210
Figura 85: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria dell'Acidification potential per il processo di coltivazione della soia dello scenario che prevede il ricorso al fumigante di natura chimica.....	210
Figura 86: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il Global warming potential	214
Figura 87: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per l'Acidification potential	215
Figura 88: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per lo Eutrophication potential	215
Figura 89: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per l'Abiotic depletion potential	216
Figura 90: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il Photochemical ozone creation potential	216
Figura 91: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per le categorie del GWP (sx) e del POCP (dx) per il processo di pre-coltivazione in serra riscaldata delle piantine di tabacco (contributo del processo di produzione del diesel sul valore totale di impatto per il processo <i>Serra riscaldata</i>)	218
Figura 92: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria dell'Abiotic depletion potential	219
Figura 93: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria del Photochemical ozone creation potential	219
Figura 94: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria del Global warming potential	220
Figura 95: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria dell'Acidification potential	221

Figura 96: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria dello Eutrophication potential	221
Figura 97: Grafico dei risultati di normalizzazione senza la categoria dell'Ozone layer depletion e le quattro categorie di tossicità previste dal metodo CML 2001	224
Figura 98: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione del confronto tra lo scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica e lo scenario che prevede il ricorso al fumigante sintetizzato chimicamente per la categoria del GWP	224
Figura 99: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione del confronto tra lo scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica e lo scenario che prevede il ricorso al fumigante sintetizzato chimicamente per la categoria dell'EP.....	225
Figura 100: Risultati di normalizzazione con indicazione delle riduzioni percentuali dei valori di impatto ottenibili nello scenario che non prevede la serra riscaldata per le piantine di tabacco.....	226
Figura 101: Grafico dei risultati di normalizzazione per il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica della soia e per il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra del tabacco	228
Figura 102: Risultati di caratterizzazione per la categoria dell'EP del il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica della soia e del ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra del tabacco	229
Figura 103: Risultati di caratterizzazione per la categoria del GWP del il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica della soia e del ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra del tabacco	230
Figura 104: Risultati per la categoria di impatto <i>Natural land transformation</i> del metodo ReCiPe per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio di brassica (blu) e lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a strumenti di lotta all'infestazione da nematodi (rosso)	235

Figura 105: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica	238
Figura 106: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica	239
Figura 107: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica	239
Figura 108: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica	241
Figura 109: Risultato del modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica	241
Figura 110: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a sistemi di lotta contro l'infestazione da nematodi	242
Figura 111: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica	242
Figura 112: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a sistemi di lotta contro l'infestazione da nematodi	243
Figura 113: Risultato del modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a sistemi di lotta contro l'infestazione da nematodi	243

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Lo sviluppo tecnologico nel campo dei biocarburanti (Fonte: IEA, 2011).....	22
Tabella 2: Biofuels nel mondo – principali paesi produttori (tonn) nel 2008 (Fonte: IEA, 2010)	26
Tabella 3: Consumo di energia e biocarburanti in Europa 2005-2009 (Ktoe) (Fonte: EurObserver, 2010)	27
Tabella 4: Import – Export di biodiesel in Italia (Fonte: Eurostat, 2012).....	28
Tabella 5: Metodi mid-points ed end-points per la valutazione del land use (Fonte: JRC, 2010. ILCD Handbook).....	45
Tabella 6: La serie ISO 14040	53
Tabella 7: Principali effetti ambientali divisi per scala di influenza	69
Tabella 8: Alcuni valori di GWP	71
Tabella 9: Alcuni valori di ODP	73
Tabella 10: Alcuni valori di AP	74
Tabella 11: Alcuni valori di NP	77
Tabella 12: Relazione tra valore calcolato ed erosione stimata nel modello PSIAC.....	89
Tabella 13: Panorama colture da olio tradizionali, alternative ed in fase di sperimentazione	92
Tabella 14: Tecnica agronomica per l'impiego di Brassica per il sovescio a scopo di biofumigazione (Fonte: Pinna M., 2007).....	104
Tabella 15: Protocollo di sperimentazione del progetto Susbiofuel.....	106
Tabella 16: Valori minimi e massimi stabiliti dalla normativa tecnica per il biodiesel (Fonte: EN 14214)	109
Tabella 17: Proprietà fisiche dell'olio di soia e del processo di spremitura utilizzate nell'analisi	133
Tabella 18: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica	133
Tabella 19: Proprietà fisiche dell'olio di soia e del processo di spremitura utilizzate nell'analisi	143
Tabella 20: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica	143

Tabella 21: Proprietà fisiche dell'olio di soia e del processo di spremitura utilizzate nell'analisi	152
Tabella 22: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica	152
Tabella 23: Dati del processo di coltivazione di tabacco in serra (pre-impianto in campo aperto) riferiti a 100 m ² di estensione.....	161
Tabella 24: Proprietà fisiche dell'olio di tabacco e del processo di spremitura utilizzati nell'analisi	169
Tabella 25: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica	169
Tabella 26: dati del processo di coltivazione di tabacco in serra (pre-impianto in campo aperto) riferiti a 100 m ² di estensione.....	171
Tabella 27: Proprietà fisiche dell'olio di tabacco e del processo di spremitura utilizzati nell'analisi	180
Tabella 28: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica	180
Tabella 29: Dati del processo di coltivazione di tabacco in serra (pre-impianto in campo aperto) riferiti a 100 m ² di estensione.....	182
Tabella 30: Proprietà fisiche dell'olio di tabacco e del processo di spremitura utilizzati nell'analisi	190
Tabella 31: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica	191
Tabella 32: Risultati per la fase di normalizzazione del ciclo di vita dell'olio di soia con contenuto di 1 MJ di energia ottenuto con precessione delle brassica	193
Tabella 33: Risultati per la fase di normalizzazione (senza ODP e le 4 categorie di tossicità) del ciclo di vita dell'olio di soia con contenuto di 1 MJ di energia ottenuto con precessione delle brassica	193
Tabella 34: Risultati della fase di caratterizzazione	195
Tabella 35: Risultati della fase di caratterizzazione con contributi percentuali delle varie fasi del ciclo di vita.....	195
Tabella 36: Risultati di caratterizzazione con contributi percentuali delle varie fasi del ciclo di vita dello scenario di produzione di olio di soia con contenuto energetico pari a 1 MJ ottenuto facendo ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente.....	206
Tabella 37: Dettaglio dei contributi percentuali degli impatti in fase di caratterizzazione del processo di coltivazione della soia	206

Tabella 38: Risultati di normalizzazione per lo scenario di produzione di olio di contenuto energetico pari ad 1 MJ ottenuto da coltivazione di tabacco con precessione della brassica.....	211
Tabella 39: Risultati di normalizzazione senza le categoria dell'ODP e delle 4 categorie di tossicità per lo scenario di produzione di olio di contenuto energetico pari ad 1 MJ ottenuto da coltivazione di tabacco con precessione della brassica.....	212
Tabella 40: Grafico dei risultati di normalizzazione.....	212
Tabella 41: Risultati di caratterizzazione per lo scenario di produzione di olio di contenuto energetico pari ad 1 MJ ottenuto da coltivazione di tabacco con precessione della brassica.....	213
Tabella 42: Risultati di caratterizzazione con i contributi percentuali delle varie fasi del ciclo di vita per ognuna delle categorie di impatto considerate dal metodo CML 2001	213
Tabella 43: Confronto dei risultati di caratterizzazione di tutti gli scenari di coltivazione del tabacco descritti nell'analisi di inventario rispetto allo scenario descritto nel precedente paragrafo che prevede la precessione della brassica (valori espressi in percentuale, fatto 100 il valore di impatto dello scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica.)	222
Tabella 44: Confronto dei risultati di normalizzazione.....	223
Tabella 45: Confronto dei risultati di normalizzazione senza la categoria dell'Ozone layer depletion e le quattro categorie di tossicità previste dal metodo CML 2001	223
Tabella 46: Risultati della fase di normalizzazione	226
Tabella 47: Risultati di normalizzazione per il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica della soia e per il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra del tabacco	228
Tabella 48: Confronto dei valori di impatto in fase di normalizzazione del ciclo di vita della soia con il ciclo di vita del tabacco (fatto 100 il valore di impatto del ciclo di vita del tabacco per ognuna delle categorie considerate).....	229
Tabella 49: Risultati delle analisi sul terreno effettuate su parcelle con e senza precessione di brassica	233

Tabella 50: Processi di database del modello SCI scelti per modellizzare le lavorazioni del terreno dello scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica.....	240
Tabella 51: : Processi di database del modello SCI scelti per modellizzare le lavorazioni del terreno dello scenario di coltivazione del tabacco tabacco senza ricorso a sistemi di lotta contro l'infestazione da nematodi	242

1. INTRODUZIONE

La strategia comunitaria di lotta ai cambiamenti climatici prevede la stabilizzazione del livello delle emissioni di gas a effetto serra nel prossimo decennio ed una loro sostanziale riduzione entro il 2050. Il Consiglio Europeo nel marzo 2007 ha affermato l'impegno della Comunità a favore dello sviluppo di energia da fonti rinnovabili, approvando un obiettivo obbligatorio del 20% di energia da fonti rinnovabili sul consumo complessivo di energia della Comunità entro il 2020 (Zecca, 2011). Tale obiettivo si è concretizzato con l'approvazione della Direttiva Europea 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (RED) che prevede un ruolo centrale per il settore dei trasporti indicando l'impiego di biocarburanti come una delle principali strategie per il raggiungimento dei target proposti. In questo contesto numerosi modelli previsionali (OCCD-FAO, 2010) suggeriscono concrete prospettive di crescita del mercato dei biocarburanti ed indicano una sostanziale prevalenza delle tecnologie di prima generazione nelle modalità di produzione almeno per i prossimi 7-10 anni. Nonostante il proliferare di ricerche su sistemi produttivi di terza e quarta generazione (alghe e microrganismi in grado persino di realizzare un bilancio negativo nella produzione di gas climalteranti) e la costruzione di moderni impianti per biocarburanti di seconda generazione, i risultati derivanti dal modello IPTS/AGLINK/COSIMO affermano che nel prossimo futuro (2010-2019) circa il 90% del bioetanolo e una quota variabile dal 90% al 75% del biodiesel continuerà ad essere prodotto con tecnologie di prima generazione. Rimangono, dunque, attuali i temi lungamente dibattuti dalla comunità scientifica internazionale riguardanti la sostenibilità ambientale e sociale da sempre considerati aspetti di criticità dei biocarburanti, come la competizione tra l'uso alimentare ed energetico di materiali edibili (Azar C., 2005), (Lagi M., 2012) e gli aspetti riguardanti le conseguenze del cambio di uso diretto (Searchinger, 2008) ed indiretto (Fritsche U.R., 2010) dei suoli (soprattutto nei paesi in via di sviluppo) sulla spinta delle politiche dei paesi occidentali nel campo delle bioenergie (Edwards, 2010). In questo senso, la direttiva RED ha fatto molto obbligando la Commissione Europea a relazionare al

Parlamento Europeo e al Consiglio Europeo con cadenza biennale (a partire dal 2012):

- sul rispetto nei paesi terzi delle regole sull'uso del suolo legato alla crescente domanda di biocombustibili
- sugli effetti della politica della Comunità in materia di biocombustibili sulla disponibilità di cibo a prezzi sostenibili in particolare per le popolazioni che vivono in paesi considerati in via di sviluppo.

Oltre a ciò, nell'articolo 19 la RED introduce esplicitamente il concetto di cambiamento indiretto dell'uso del suolo (Indirect Land Use Change, ILUC) obbligando la Commissione a relazionare sugli effetti della politica europea in materia di biocarburanti anche su questo tipo di impatto. Parallelamente, grande attenzione è stata posta sulla questione delle emissioni di gas climalteranti generati dal processo di produzione dei biocombustibili. La normativa, infatti, stabilisce dei criteri di sostenibilità man mano più stringenti nel corso degli anni per i bioliquidi che devono garantire ad oggi un risparmio del 35% delle emissioni di CO₂ equivalente (calcolati secondo le modalità stabilite dalla normativa stessa) rispetto al corrispondente fossile (benzina o gasolio), del 50% dal 1 gennaio 2017 e del 60% dal 1 gennaio 2018 per tutti i biocombustibili prodotti in stabilimenti che aprono i battenti dopo il 1 gennaio 2017. I risparmi di CO₂ ottenibili vanno calcolati in un'ottica di ciclo di vita (tramite lo strumento dell'LCA, Life Cycle Assessment) considerando le fasi di produzione della materia prima, di trasporto e trasformazione oltre che la fase d'uso (a quest'ultima fase la normativa assegna per i biocarburanti emissioni nulle considerando il carbonio emesso di origine biogenica), mentre le materie prime non devono provenire da terreni con elevato valore in termini di biodiversità e di stock di carbonio (commi 3 e 4, art. 17).

Minore attenzione è, invece, stata dedicata dalla normativa agli aspetti che riguardano la valutazione degli impatti sul suolo non direttamente riguardanti le emissioni di gas climalteranti legati alla coltivazione delle materie prime per la produzione di biocombustibili. L'impatto sul suolo è certamente uno degli aspetti da tenere in maggior considerazione nelle analisi di sostenibilità dei biocombustibili. In un recente lavoro di McKone

(McKone T.E., 2011) viene enfatizzata, infatti, l'incidenza sui risultati negli studi di LCA di biocombustibili del sito di produzione e delle pratiche agricole a cui si è fatto ricorso per la produzione delle materie prime. Nonostante ciò sono pochi gli studi che affrontano questi aspetti di sostenibilità, principalmente a causa di una lacuna metodologica nel campo dell'LCA riguardante la valutazione degli impatti sull'uso del suolo. La struttura della metodologia LCA, per come è stata originariamente concepita, poco si presta alla valutazione di processi che coinvolgono una fase di produzione agricola, principalmente a causa della natura sito-dipendente dei processi agronomici e della complessità dei sistemi coinvolti (terreno).

Gli aspetti di valutazione degli impatti sull'uso del suolo (*Land use impact*) della fase agronomica in LCA sono ancora in una fase di non completa maturità e la metodologia al momento non è in grado di distinguere agevolmente tra diversi livelli di sfruttamento del suolo (ad es. uso intensivo o estensivo di un terreno agricolo) all'interno dello stesso contesto d'uso (uso agricolo). Nonostante l'impegno della comunità scientifica internazionale che negli ultimi 10 anni ha proposto svariati approcci, ad oggi, infatti, non esiste un metodo universalmente riconosciuto e applicato trasversalmente che permetta di quantificare gli impatti sull'uso del suolo nella maniera opportuna per i biocarburanti e più in generale per la valutazione ambientale dei processi agronomici.

In questo contesto normativo e metodologico, ci si è approcciati alla valutazione di sostenibilità tramite metodologia LCA del processo di produzione di olio vegetale previsto dal protocollo di sperimentazione del progetto Susbiofuel, finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali (MIPAAF) che ha visto come principali partecipanti l'Università di Milano, la Società Cooperativa Agri2000 ed il laboratorio LCA ed Ecodesign del Centro Ricerche ENEA di Bologna.

Il progetto ha approfondito gli aspetti agronomici della coltivazione di essenze oleose per la produzione di biomasse energetiche su terreni resi non economicamente idonei alla produzione di materie prime ad uso alimentare dalla presenza di parassiti tellurici quali i nematodi. Sono stati indagati

principalmente 2 aspetti: in primo luogo, la possibilità di coltivare a scopi energetici cultivar abitualmente utilizzate per soddisfare altri mercati (tabacco, *Nicotiana tabacum*); in secondo luogo, la fattibilità tecnica del sovescio di specie con proprietà biofumiganti (brassicacee) in precessione alla coltivazione delle specie oleose al fine di recuperare la produttività del terreno inficiata dall'infestazione da nematodi, attraverso una pratica ambientalmente ed economicamente sostenibile.

L'analisi LCA prevista dal progetto Susbiofuel ha indagato gli scenari di coltivazione di 2 (soia e tabacco) delle 4 specie sottoposte a sperimentazione (soia, tabacco, colza e girasole) confrontando gli effetti della pratica agronomica con sovescio della brassica in precessione alla coltura energetica, con gli effetti di una coltivazione di tipo tradizionale che ricorre all'1-3-Dicloropropene per la lotta all'infestazione da nematodi del terreno. Ai fini di completare i risultati ottenuti dallo studio LCA con delle considerazioni sugli impatti derivanti dal differente uso del suolo attribuibile alle due pratiche agronomiche indagate, si è fatto ricorso ad un modello messo a punto dall'NRCS Servizio di Conservazione delle Risorse Naturali (NRCS) del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti d'America (USDA) che permette il calcolo di un indicatore quali-quantitativo definito *Soil Conditioning Index* (SCI), tramite il quale è possibile valutare gli effetti di una pratica agronomica sull'andamento del contenuto di sostanza organica nel terreno (SOM). Tale approccio rappresenta un metodo di facile implementazione che fornisce delle indicazioni di massima sulla sostenibilità di un sistema di management del terreno in ambito agricolo, essendo in grado di discriminare tra di versi livelli di sfruttamento del suolo all'interno del medesimo contesto d'uso (agronomico). Il metodo presenta dei limiti (è, ad esempio, costruito per l'analisi di siti sul solo territorio americano) e non si adatta all'analisi di tutti i possibili processi agronomici, tuttavia muove dalle stesse evidenze scientifiche alla base del metodo approntato da Milà i Canals (Milà i Canals, 2006) ad oggi indicato dall'ILCD Handbook (JRC, 2010) come metodo più solido per il calcolo del land use, che individua il contenuto di sostanza organica (o in maniera equivalente il contenuto di carbonio organico di un terreno, essendo le due proprietà in

relazione diretta) come un ottimo indicatore della qualità di un suolo in ambito agricolo.

Il lavoro di tesi che ci si accinge a presentare, dopo una rapida panoramica sull'evoluzione attesa del mercato dei biocarburanti, descrive la normativa europea vigente nell'ambito della valutazione della sostenibilità di tali combustibili (capitolo 2) ed evidenzia come lo strumento metodologico individuato per la valutazione degli impatti della loro produzione (l'LCA) presenti dei punti di debolezza nella definizione dei carichi ambientali determinati da differenti scenari di uso del suolo sulla categoria di impatto del Land use. Nel capitolo 3 viene offerta una breve descrizione dell'evoluzione metodologica della categoria di impatto sull'uso del suolo in LCA e viene presentato il metodo di Milà i Canals (ad oggi suggerito dall'ILCD come il più consistente dal punto di vista scientifico per la valutazione del Land use) sottolineando la difficoltà di implementare il metodo in casi studio che non debbano effettuare delle valutazioni a posteriori degli impatti ambientali, ma che debbano fornire delle indicazioni di carattere previsionale nel confronto tra vari sistemi agronomici, come nel caso del progetto Susbiofuel (descritto nel capitolo 5).

Nel capitolo 4 (Materiali e metodi) vengono presentati la metodologia LCA ed il modello per il calcolo del Soil Conditioning Index, strumenti utilizzati rispettivamente nel capitolo 6 e nel capitolo 7 al fine di fornire una valutazione ambientale quanto più completa possibile degli scenari agronomici proposti dal progetto Susbiofuel, nel rispetto del carattere olistico alla base della filosofia del Life Cycle Assessment.

2. I BIOCARBURANTI: CARATTERISTICHE, EVOLUZIONE ATTESA DEL LORO MERCATO, QUADRO NORMATIVO E VALUTAZIONE DELLA LORO SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

Il seguente capitolo nei primi due paragrafi definisce i biocarburanti e ne descrive brevemente lo stato dell'arte e le caratteristiche del mercato europeo. Il terzo paragrafo offre una panoramica dell'evoluzione attesa nella produzione e nel mercato dei biocarburanti sulla base dei risultati proposti da alcuni modelli previsionali mentre l'ultima parte del capitolo vengono approfonditi gli aspetti normativi di interesse per gli obiettivi di questo lavoro di tesi.

2.1 I biocarburanti

Con il termine "biocarburanti" si fa riferimento ai carburanti allo stato liquido o gassoso ottenuti dalla biomassa, che possono essere utilizzati per l'alimentazione dei motori a combustione interna (Iodice R., 2007). Tradizionalmente il loro impiego è legato al settore dei trasporti, tuttavia nel corso degli ultimi anni si è assistito a una rapida espansione del campo di applicazione dei biocarburanti in direzione della generazione elettrica e termica e in particolare della cogenerazione. Nella definizione attuale di biocarburanti, pertanto, si è superato il legame con il settore dei trasporti e si dà una maggiore enfasi all'eterogeneità delle applicazioni consentite dall'impiego dei motori endotermici.

I biocombustibili oggi disponibili sul mercato o in fase di sperimentazione vengono solitamente divisi in "generazioni", ad indicare le progressive introduzioni sul mercato di soluzioni tecniche in fase di produzione delle materie prime o di trasformazione delle stesse volte a migliorare la resa, a ridurre gli input di energia e materiali per il processo di trasformazione, ad annullare la competizione con materie destinate al consumo alimentare, ad

abbattere i costi di produzione e non ultimo ridurre le emissioni e gli impatti ambientali.

Dunque in base allo stato di maturità delle tecnologie di produzione e di utilizzo, i biocarburanti possono essere distinti in 4 successive generazioni:

- i biocarburanti di prima generazione vengono prodotti da materie prime solitamente utilizzate in ambito alimentare: il biodiesel e gli oli vegetali puri (da soia, colza, girasole, palma), il bioetanolo prodotto dai cereali e dalle materie prime zuccherine, il bio-ETBE (Etil Ter Butil Etere prodotto dal bioetanolo) e il biogas; la loro produzione e le loro applicazioni sono già avviate e i principali margini di miglioramento riguardano la riduzione dei costi di produzione, l'ottimizzazione del bilancio energetico e l'aumento delle percentuali di utilizzo in miscela con i combustibili fossili;
- i biocarburanti di seconda generazione vengono ottenuti da innovativi processi di trasformazione volti a superare i principali limiti dei biocarburanti di prima generazione, in primis l'utilizzo di materie prime utilizzabili a scopo alimentare. Il bioetanolo prodotto dalle materie prime ligno-cellulosiche e il diesel sintetico, ottenuto attraverso la reazione Fischer-Tropsch sono alcuni esempi di biocarburanti di seconda generazione. La loro produzione per ora è limitata in termini di volumi immessi sul mercato e proviene da impianti di recentissima costruzione. Numerosi sono gli impianti di sperimentazione in cui si cerca di ottimizzare soprattutto i processi di pretrattamento delle biomassa al fine di ridurre i costi per ora piuttosto elevati del processo di produzione.
- i cosiddetti biocarburanti di terza generazione, così come quelli di seconda, sono ottenuti da materiali non edibili, ma cercano di superare il problema dell'occupazione del suolo attraverso il ricorso a alghe o batteri come materie prime da trasformare poi in biocombustibili. Hanno prospettive molto interessanti sia dal punto di vista ambientale che economico, ma necessitano di sperimentazioni che li rendano una tecnologia matura per essere immessa sul mercato.

- completano il panorama i biocarburanti di quarta generazione che sono quelli capaci di generare un bilancio negativo delle emissioni di CO₂ riuscendo ad assorbire più anidride carbonica di quanta ne venga emessa nella loro fase di produzione ed uso. Sono attualmente ancora oggetto di sperimentazioni a livello di laboratorio e i tempi per una loro eventuale produzione industriale e commercializzazione sembrano piuttosto lunghi (10-30 anni).

Stato avanzamento Biocarburante	Avanzati			Convenzionali
	Ricerca di base	progetti dimostrativi	prima commercializzazione	Commerciale
Etanolo	Etanolo da cellulosa			Etanolo da canna da zucchero e da cereali
Biodiesel	da microalghe	BtL diesel	Oli vegetali idro-trattati	Datransesterificazione
Altri biocarburanti o additivi	Nuovi (es. furanici)	Biobutanolo, DME, fuel basati su pirolisi	Metanolo	
Biometano		Bio SG		Biogas da digestione anaerobica
Idrogeno	gassificazione senza reforming e altre tecnologie	reforming del biogas		

Tabella 1: Lo sviluppo tecnologico nel campo dei biocarburanti (Fonte: IEA, 2011)

Come accennato nell'introduzione il campo di applicazione dello studio presentato in questa tesi è quello degli oli vegetali puri. Tuttavia nell'ottica di fornire un quadro più generale e poter evidenziare problematiche comuni ai diversi biocombustibili verranno fornite informazioni e dati riguardanti anche il biodiesel ed il bioetanolo, anche in considerazione dell'ampia fetta di mercato che essi ricoprono.

Il biodiesel

Il biodiesel è costituito da una miscela di esteri metilici (o metilesteri) prodotti mediante la conversione chimica degli oli e dei grassi animali ed è caratterizzato da un'elevata densità energetica (37 MJ/kg). Alcune caratteristiche rendono questo biocarburante affine al gasolio e ne consentono la sostituzione nei motori a ciclo Diesel. Tra queste, una

particolare importanza è assunta dalla prontezza all'accensione, espressa dal numero di cetano: è simile e talora superiore a quella del gasolio e, pertanto, garantisce una buona risposta del biocarburante nell'accensione spontanea, tipica di questo tipo di motori. La sostituzione del gasolio con il biodiesel si riflette in importanti benefici ambientali. In primo luogo le emissioni, rilasciate nel corso della combustione, presentano qualità migliori di quelle legate dall'utilizzo del gasolio, soprattutto in termini di riduzione di monossido di carbonio, particolato e idrocarburi incombusti.

L'utilizzo del biodiesel, considerando anche la fase di produzione, può inoltre consentire un risparmio netto anche consistente delle emissioni di anidride carbonica. Le materie prime impiegate per la produzione del biodiesel possono provenire dalle colture oleaginose dedicate o dalla raccolta differenziata degli oli esausti a servizio delle attività di ristorazione, delle industrie di trasformazione degli alimenti e delle utenze domestiche. In Italia le principali colture oleaginose sono il girasole, il colza e in misura minore la soia mentre nel mondo la coltura oleaginosa a più larga diffusione è la palma da olio. La filiera a partire dalle colture dedicate è articolata nell'estrazione degli oli dai semi oleosi, nella raffinazione e nella conversione chimica (detta transesterificazione) degli stessi a biodiesel. A oggi il biodiesel è impiegato comunemente in miscela al 5% in volume con il gasolio. In Germania sono utilizzate formulazioni a percentuali superiori: 20% in volume nei motori non predisposti e puro nei motori predisposti.

Il bioetanolo

Il bioetanolo è l'alcol etilico (o etanolo) prodotto dalla fermentazione degli zuccheri presenti nella biomassa ed è caratterizzato da un elevato contenuto energetico (27 MJ/kg). In virtù di alcune caratteristiche, il bioetanolo ha un comportamento simile alla benzina e ne permette la sostituzione nell'alimentazione dei motori a ciclo Otto. Uno dei parametri di maggiore importanza agli effetti di questo utilizzo è il potere antidetonante, espresso dal numero di ottano: è superiore a quello della benzina e consente un risparmio nel ricorso agli antidetonanti. L'impatto ambientale dell'impiego del bioetanolo è più contenuto rispetto a quello esercitato dai combustibili fossili, in termini di emissione in atmosfera di composti

inquinanti (particolato, monossido di carbonio, anidride solforosa) soprattutto perché questo biocarburante è molto ossigenato. Il risparmio nelle emissioni di anidride carbonica, considerando anche la fase produttiva può essere anche consistente a seconda della materia prima usata e delle modalità di produzione. Il bioetanolo, infatti, può essere ottenuto a partire da molteplici biomasse vegetali, residuali e/o provenienti dalle colture dedicate. Le materie prime sono suddivise, a seconda del tipo di carboidrato che contengono, in saccarifere (zuccheri semplici), amidacee (amido) e ligno-cellulosiche (cellulosa ed emicellulosa). Le colture saccarifere tradizionalmente utilizzate sono la barbabietola in Europa e la canna in Brasile. In Italia il sorgo zuccherino appare promettente, in virtù della sua plasticità e del modesto fabbisogno idrico. Tra le colture amidacee, la più diffusa, soprattutto negli Stati Uniti, è il mais. L'impiego delle biomasse ligno-cellulosiche per la produzione di bioetanolo di seconda generazione è una prospettiva ormai concreta. La filiera produttiva del bioetanolo dipende dalla materia prima utilizzata. Nel caso si ricorra alle biomasse saccarifere, si procede con l'estrazione degli zuccheri dai tessuti vegetali preposti all'accumulo, la fermentazione dell'estratto zuccherino, la distillazione e la disidratazione del bioetanolo. Nell'ipotesi che si impieghino le materie prime amidacee, a monte della fermentazione la fase di estrazione è sostituita dalla macinazione della granella e dall'idrolisi dell'amido. La valorizzazione delle materie prime ligno-cellulosiche complica la filiera, poiché a monte della fermentazione si rendono necessari il pretrattamento della biomassa, per separare la lignina, e l'idrolisi della cellulosa e dell'emicellulosa. Nell'U.E. allo stato attuale il bioetanolo è utilizzato in miscela al 5% in volume con la benzina, mentre negli Stati Uniti e in Canada la percentuale è estesa al 20%. La tecnologia FFV (Fuel Flexible Vehicles) ha consentito la diffusione in alcuni Paesi europei (Francia, Svezia, Germania) di veicoli a doppio sistema di alimentazione, a benzina e a bioetanolo all'85% in volume con la benzina mentre in Brasile il bioetanolo è utilizzato puro nei veicoli predisposti.

Gli oli vegetali puri

Gli oli vegetali puri sono ottenuti mediante estrazione dai semi oleosi. In considerazione delle loro proprietà chimiche, fisiche e merceologiche, possono essere utilizzati in sostituzione del gasolio nei motori a ciclo Diesel. Alcune proprietà, in primis il potere calorifico inferiore PCI (37 MJ/kg), li accomunano al gasolio, consentendone la sostituzione, previa predisposizione, nei motori a ciclo Diesel e, in misura minore, nelle microturbine. Il principale parametro che differenzia gli oli vegetali puri dal gasolio è la loro maggiore viscosità (incrementano la sensibilità di questo biocarburante alle problematiche legate all'uso nei mesi invernali) mentre l'infiammabilità di tali oli (flash point più alto di quello del gasolio), conferisce a questo biocarburante una maggiore sicurezza nelle operazioni di manipolazione, trasporto e stoccaggio. Per altri versi il comportamento degli oli vegetali puri è peggiore di quello del gasolio. Il più alto numero di iodio conferisce a questo biocarburante una maggiore tendenza al deterioramento a causa della formazione di gomme. Inoltre la densità energetica degli oli vegetali puri, espressa dal PCI, è inferiore a quella del gasolio, sicché la sostituzione di un chilogrammo di gasolio implica l'utilizzo di 1,13 chilogrammi di oli vegetali puri. Essi sono infine caratterizzati da una minore prontezza all'accensione, a causa del numero di cetano più basso di quello del gasolio: a questa caratteristica va ricondotta la tendenza a utilizzarli soprattutto nei motori a basso numero di giri.

I benefici ambientali derivanti dalla sostituzione di diesel con olio vegetale sono riconducibili al risparmio nelle emissioni di anidride carbonica (dipendente dalle modalità di produzione delle materie prime) e nella migliore qualità dei gas di scarico, soprattutto per quanto riguarda il monossido di carbonio e per il particolato, legata ad una maggiore presenza di ossigeno in tali liquidi rispetto all'equivalente fossile. La riduzione dell'impatto ambientale può essere ancora più accentuata, se tali oli sono impiegati per sostituire gli oli combustibili per il riscaldamento domestico o per la produzione combinata di calore ed elettricità.

2.2 Produzione e consumo dei biocarburanti nella Comunità Europea

Secondo i dati dell'International Energy Agency (IEA, 2010) la produzione mondiale di biocarburanti nel 2008 è stata di più di 70 milioni di tonnellate utilizzati per la quasi totalità nel settore dei trasporti, con l'UE a coprire circa 20% sia della produzione che del consumo (Tabella 2).

	EU27	USA	Brasile	Cina	Argentina	Mondo
Produzione	13328	30665	21376	2050	743	70631
Importazioni	3560	2638	0	0	0	6664
Esportazioni	1390	2258	4078	0	725	-8772
Consumo finale	13111	30553	18087	2050	18	66681

Tabella 2: Biofuels nel mondo – principali paesi produttori (tonn) nel 2008 (Fonte: IEA, 2010)

Produzione di biodiesel in Europa

La produzione europea di biodiesel nel 2010 è stata di 9.046 mila tonnellate con una crescita elevata (16,6%) rispetto al 2009, seppur rallentata rispetto al valore record dell'anno precedente (35%). I principali paesi produttori sono stati la Germania, con oltre il 25% della produzione comunitaria, la Francia, la Spagna e l'Italia. Insieme questi quattro paesi superano il 50% della produzione totale. Il 70% del biodiesel in Europa è prodotto, attualmente, dall'olio di colza mentre l'utilizzazione di olio di soia o di palma, limitata da standard tecnici, è stimata rispettivamente nell'ordine del 14-24% e del 5-11%. Il biodiesel prodotto da residui si aggirerebbe invece intorno al 5-11% pari a circa 810 ktoe.

Produzione di bioetanolo in Europa

La parte restante della produzione di biocarburanti nell'UE, stimata nel 2009 in 3.674 milioni di litri, è composta da etanolo (pari a 2451 Mtoe). I principali paesi produttori sono stati la Francia, da cui proviene un terzo della produzione, la Germania e la Spagna. Questi tre paesi, insieme, contano per il 66% della produzione totale. L'etanolo è prodotto principalmente dal grano, dalla barbabietola e da altri cereali. Inoltre, secondo la Commissione Europea (CE 2011), circa 11 ktoe verrebbero prodotte da ligno-cellulosa in impianti di trasformazione di seconda generazione, principalmente in Germania, Paesi Bassi, Danimarca e, al di fuori dell'UE, in Norvegia. Secondo tali dati,

complessivamente solo il 9% della produzione europea è costituito da biocarburanti di seconda generazione.

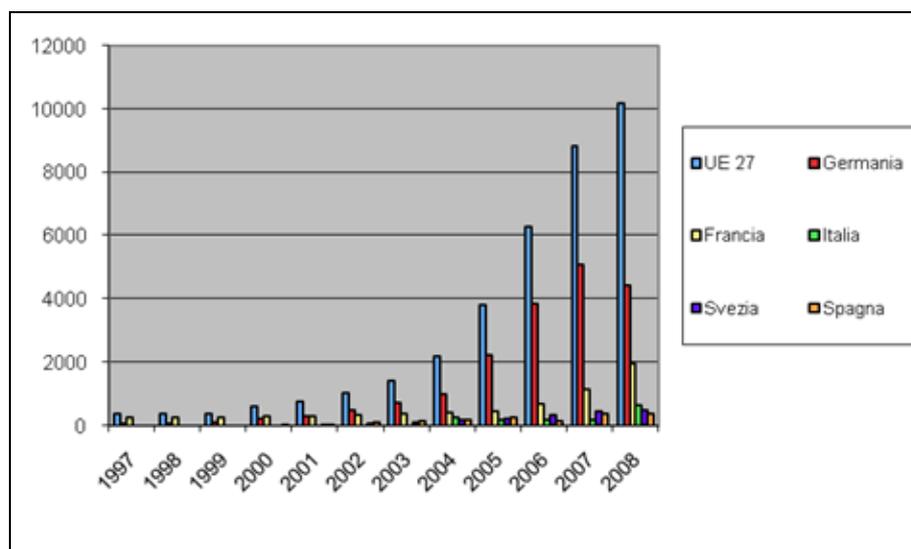


Figura 1: Produzione europea di biocarburanti (Fonte: Eurostat)

Il consumo di biocarburanti in Europa

Il consumo di biocarburanti nell'UE è stato di 12 Mtoe nel 2009, pari ad un tasso di miscelazione del 4%, e risulta in continua crescita nell'ultimo decennio anche se con un tasso rallentato nell'ultimo anno.

Negli ultimi anni il consumo è cresciuto in tutti i paesi dell'UE con l'eccezione della Germania dove si è registrato un calo a partire dal 2008, anno in cui è stata aumentata la tassa sul biodiesel (energy tax) e l'incentivo è stato sostituito dall'obbligo di miscelazione. Il 79,5% dell'ammontare complessivo di biocarburanti utilizzato nell'UE è costituito da biodiesel contro il 19,3% costituito da bioetanolo. La parte restante è data dall'olio vegetale puro consumato in Germania e dal biogas in Svezia. I primi cinque paesi consumatori sono Germania, Francia, Italia, Spagna e Regno Unito che insieme ammontano al 71% del consumo totale.

	Carburanti fossili	Biodiesel	Bioetanolo	Olio Vegetale	Totale biocarburanti	Quota % biocarburanti
2005	292876	2277	552	182	3011	1,02
2006	303125	4082	881	648	5611	1,82
2007	306295	6091	1246	768	8105	2,58
2008	346426	8018	1733	397	10189	3,4
2009	330797	9616	2339	137	12092	4,0

Tabella 3: Consumo di energia e biocarburanti in Europa 2005-2009 (Ktoe) (Fonte: EurObserver, 2010)

2.2.1 Il biodiesel e gli oli vegetali in Italia

L'Italia è il terzo produttore europeo di biodiesel dopo la Germania e la Francia. Sul territorio nazionale al 2011 erano presenti 19 impianti con un potenziale produttivo di circa 2.500.000 t/anno di biocombustibile e la maggiore concentrazione di impianti si ha nella regione Lombardia, con una capacità produttiva complessiva di 670.000 t/anno pari al 33% del totale.

Una parte della produzione di biodiesel è esportata verso Francia, Spagna e Grecia mentre le importazioni provengono sia dall'interno dell'UE che dai paesi terzi (prevalentemente Indonesia e Argentina). Le importazioni dagli Stati Uniti si sono azzerate dopo l'applicazione da parte dell'UE dei dazi antidumping, anche se è registrabile una certa quantità di elusione attraverso il Canada e Singapore.

	IMPORT			EXPORT		
	2008	2009	2010	2008	2009	2010
Totale	161.020	491.687	809.780	116.318	134.642	140.990
EU27_INTRA	95.320	362.032	338.936	116.049	134.187	139.947
EU27_EXTRA	65.700	129.655	470.844	269	454	1.042
FRANCIA	23.743	131.339	7.737	87.959	84.055	81.541
SPAGNA	23	92.687	202.979	14.610	44.055	41.334
GRECIA	21.196	7.589		3.072	4.567	12.130
SLOVENIA				573	1.303	3.340
PAESI BASSI	28.186	76.186	52.218		1	260
AUSTRIA	2.481	1.709	27.316	8.673	132	206
USA	45.084	5.981		17	17	129
BELGIO	745	11.308	15.964	273	0	114
GERMANIA	18.885	41.214	31.760	776	34	80
INDONESIA	9.643	61.104	233.176		3	33
ARGENTINA	10.972	54.012	209.183		1	6
CANADA		3.989	5.697	4		4
MALAYSIA			4.613			3
SINGAPORE		4.515	10.671			

Tabella 4: Import – Export di biodiesel in Italia (Fonte: Eurostat, 2012)

In Italia, come nel resto in tutta Europa la capacità produttiva degli impianti è largamente sottoutilizzata e la materia prima viene per la maggior parte importata.

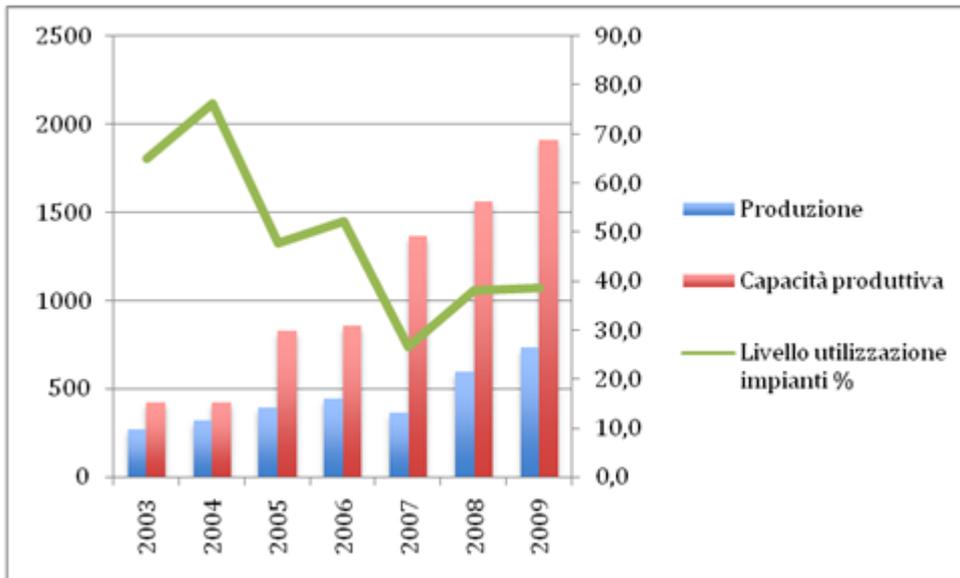


Figura 2: produzione e capacità produttiva degli impianti per la produzione di biodiesel in Italia (Mton)

I principali flussi di materia prima trasformata in biodiesel sul territorio italiano (oli grezzi e semi oleosi) riguardano l'olio di colza che proviene sia da paesi europei (Francia e Romania) che extraeuropei (USA, Russia e Canada), l'olio di palma da Indonesia, Malesia e Papua Nuova Guinea, l'olio di girasole e i semi di soia e di girasole.

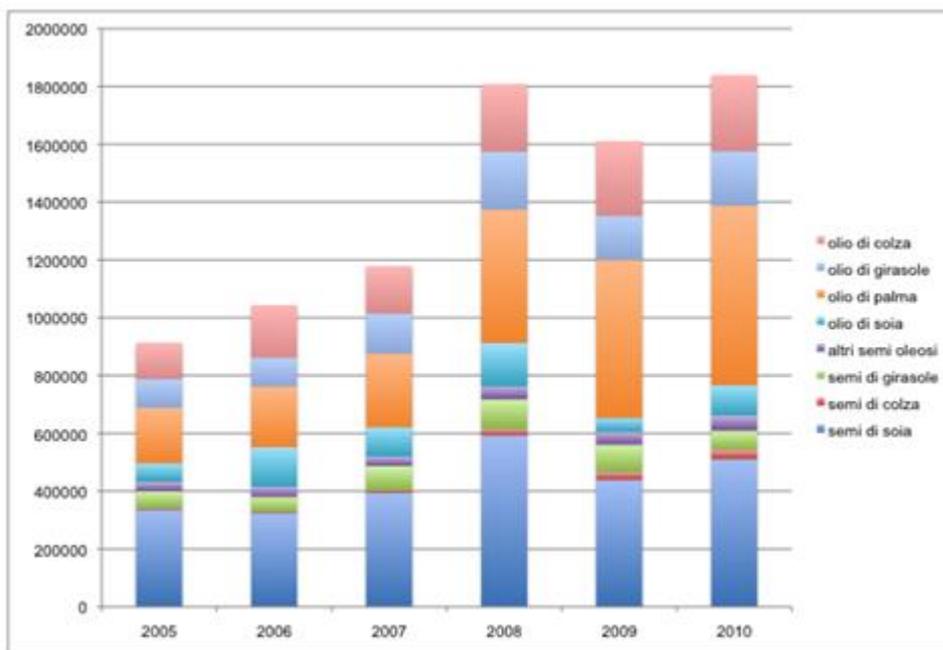


Figura 3: Importazioni italiane di semi oleosi e oli vegetali 2005-2010 (Fonte: Eurostat, 2012)

2.3 Le evoluzioni attese nel mercato dei biocarburanti

Sulla spinta degli incentivi di carattere normativo (ad esempio la RED 2009/28/CE, descritta nel paragrafo 2.4) ed economico che non solo in Europa stanno convogliando investimenti nel settore dei biocarburanti, si prevede una crescita nel mercato dei biocarburanti (OCCD-FAO, 2010) che porterà al 2020 ad una produzione mondiale di circa 200 miliardi di litri divisi tra biodiesel (20% del totale) ed etanolo (80% del totale).

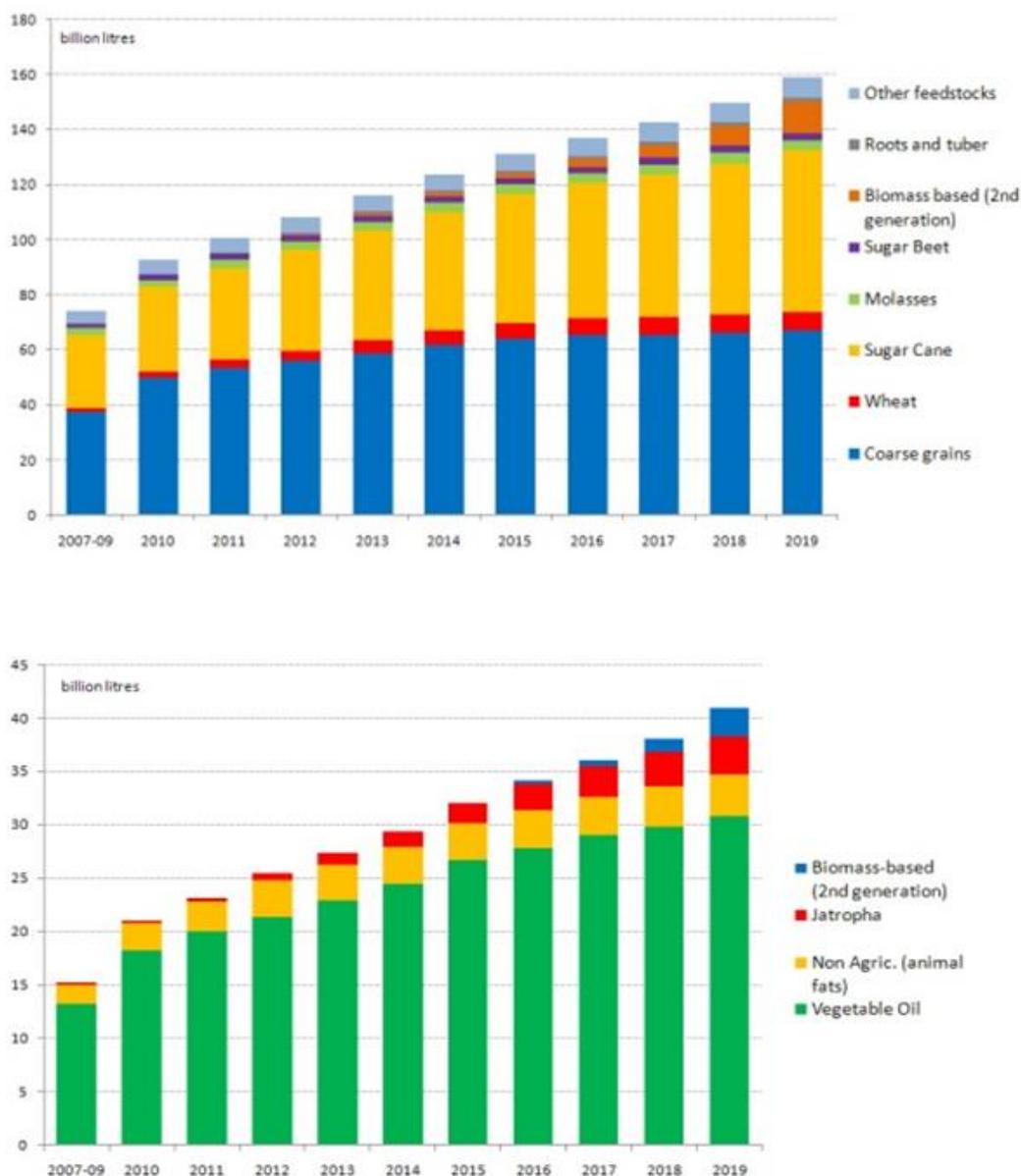


Figura 4 – Produzione mondiale di bioetanolo (sopra) e biodiesel (sotto) per tipo di materia prima utilizzata (Fonte: OCCD-FAO, 2010)

Una pubblicazione dell'Istituto Nazionale di Economia Agraria (Zezza, 2011) evidenzia come tutti i modelli previsionali analizzati dallo studio sulla produzione di biocarburanti concordino con questo scenario e propongano in gran parte dei risultati comuni che possono riassunti nei seguenti punti:

- aumento della produzione di etanolo e biodiesel nell'UE
- aumento dei prezzi mondiali dei biocarburanti per effetto della maggiore domanda europea
- aumento dei prezzi mondiali relativamente maggiore per il biodiesel rispetto all'etanolo
- rafforzamento del ruolo del Brasile come paese esportatore di etanolo
- rafforzamento del peso degli US come paese esportatore di biodiesel
- significativi cambiamenti nella distribuzione dell'area a cereali nell'UE che si dislocerebbe dall'Europa centrale verso le regioni nord-orientali, nord-occidentale e verso le regioni meridionali.

E' interessante sottolineare come i modelli suddetti diano delle prospettive di crescita per i biocarburanti di seconda generazione limitate nel breve termine al 5-7%. Secondo le stime dell'IEA (IEA, 2010), allo stato attuale dal 10% dei residui agricoli e forestali potrebbero essere prodotti biocarburanti di seconda generazione tali da soddisfare il 4,2 – 6% della domanda corrente di carburanti nel settore dei trasporti. Infatti affinché la produzione di biocarburanti di seconda generazione avvenga a costi competitivi, occorrono cospicui investimenti in infrastrutture che, a loro volta, richiedono approvvigionamenti costanti di rilevanti quantità di biomassa. I costi di investimento per un impianto da 50-150 Ml/anno sono stimati (IEA, 2009) nell'ordine di 125-250 milioni di dollari, circa dieci volte un impianto di prima generazione della stessa capacità. Differenze sostanziali nei costi si riscontrano riguardo alla complessità dell'impianto e alla efficienza di conversione. Riguardo al costo della biomassa si assume che questo cresca con la scala dell'impianto a causa dei maggiori oneri derivanti dal trasporto e dalla logistica. I costi sono anche influenzati dal tipo di materia prima in relazione alla sua densità e grado di idratazione. La competitività economica nei confronti dei combustibili fossili è, ovviamente, determinata dal prezzo del petrolio e, secondo i calcoli dell'IEA, al prezzo di 60

dollari barile il costo di produzione dei biocarburanti di seconda generazione è più alto sia del prezzo della benzina (2,1:1) che dell'etanolo di prima generazione anche se inferiore al biodiesel prodotto dal colza. L'IEA stima per esempio, che il costo di produzione dell'etanolo da lignocellulosa dovrebbe eguagliare quello dell'etanolo da canna da zucchero nel 2030.

Sulla base di queste considerazioni e facendo riferimento ai risultati derivanti dall'applicazione del modello IPTS/AGLINK/COSIMO è possibile affermare che nel prossimo futuro (2010-2019) l'etanolo sarà prodotto, in misura principale, dai cereali foraggeri la cui quota comincerà a rallentare la propria crescita nel 2015 quando dovrebbe entrare a regime la politica americana sulla seconda generazione. Il 40% dell'etanolo, a livello mondiale, proverrà dalla canna da zucchero brasiliana mentre, alla fine del periodo, la biomassa di seconda generazione dovrebbe contare per il 7% circa.

Per quanto riguarda il biodiesel la materia prima prevalente continuerà ad essere costituita dagli oli vegetali alimentari la cui quota dovrebbe scendere però dal 90 al 75% per l'emergere dell'uso della jatropha in India e della biomassa di seconda generazione che potrebbe raggiungere il 6,5% nel 2019. Il dato che emerge è dunque che almeno per i prossimi 10 anni la maggior parte del bioetanolo e del biodiesel continuerà ad essere prodotta utilizzando tecnologie e materie prime appartenenti alla prima generazione dei biocarburanti. Questo dato conferma la necessità di approfondire le conoscenze sulla sostenibilità della produzione di biocarburanti da coltivazioni dedicate e pone in primo piano il bisogno di affrontare nella maniera corretta gli studi volti a valutare tutti gli impatti ambientali generati da un determinato biocombustibile durante il suo ciclo di vita.

2.4 Il quadro normativo in materia di sostenibilità dei biocarburanti

A livello europeo la normativa vigente che disciplina la produzione, la distribuzione, lo stoccaggio e la vendita dei biocarburanti è costituita da un importante corpo di norme la cui descrizione esula dagli obiettivi e dall'argomento principale di questa tesi di dottorato. Al fine di dare un

inquadramento normativo agli argomenti già trattati e a quelli che verranno presentati nel seguito di questo lavoro si è ritenuto sufficiente offrire una breve trattazione della così detta direttiva RED, Renewable Energy Directive (European Directive 2009/28/CE) e degli allegati che trattano l'argomento dei biocombustibili, dando particolare enfasi agli aspetti riguardanti la valutazione della sostenibilità degli stessi.

2.4.1 La Direttiva 2009/28/CE

La normativa europea 2009/28/CE nota come Renewable Energy Directive (RED) indica nell'Allegato I (Annex I) i target da raggiungere entro il 2020 della percentuale di energia da fonti rinnovabili rispetto al totale dell'energia consumata per ogni paese membro e stabilisce che del totale di energia da fonte rinnovabile consumata, un 10% debba provenire dall'utilizzo di biocombustibili.

La normativa, oltre a definire degli obiettivi di consumo, al comma 2 dell'articolo 17 stabilisce dei criteri di sostenibilità man mano più stringenti nel corso degli anni: per essere conteggiati tra i quantitativi di energia consumata, utili al raggiungimento per ogni stato membro dei target sanciti nell'Allegato I, i bioliquidi devono garantire un risparmio del 35% delle emissioni di CO₂ equivalente (calcolati secondo le modalità stabilite dalla normativa stessa) rispetto al corrispondente fossile (benzina o gasolio). Dal 2017 il risparmio deve raggiungere almeno il 50% mentre dal 1 gennaio 2018 in poi il taglio delle emissioni deve essere pari al 60% per tutti i biocombustibili prodotti in stabilimenti che aprono i battenti dopo il 1 gennaio 2017. I risparmi di CO₂ ottenibili vanno calcolati in un'ottica di ciclo di vita (tramite lo strumento dell'LCA, Life Cycle Assessment) considerando le fasi di produzione della materia prima, di trasporto e trasformazione oltre che la fase d'uso (a quest'ultima fase la normativa assegna per i biocarburanti emissioni nulle considerando il carbonio emesso di origine biogenica). Oltre al controllo delle emissioni di gas climalteranti, la direttiva stabilisce dei criteri anche sulla provenienza delle materie prime, escludendo da un possibile utilizzo (commi 3 e 4, art. 17) i terreni con

elevato valore in termini di biodiversità e di stock di carbonio o suoli aventi nel 2008 o successivamente lo status di:

- foreste primarie
- aree protette (a meno che non siano fornite prove evidenti che la produzione delle materie prime non interferisca con i propositi di protezione della natura)
- pascoli e prati con elevato grado di biodiversità
- paludi o terreni coperti per una parte significativa dell'anno da H₂O
- zone boschive continue estese per più di 1 ettaro
- torbiere

La normativa introduce dunque due questioni fondamentali riguardo la sostenibilità dei biocombustibili: da una parte la necessità che questi producano un taglio consistente delle emissioni di CO₂ rispetto agli equivalenti di origine fossile e dall'altro che vengano prodotti su terreni che non abbiano un elevato valore in termini di biodiversità e di carbonio immagazzinato. Quanto alle modalità di calcolo delle emissioni di CO₂ del ciclo di produzione e consumo dei biocombustibili, queste vengono dettagliate nell'Allegato V (Annex V) di cui si darà maggior dettaglio nel prosieguo di questo capitolo (paragrafo 2.4.1.1).

Oltre a ciò la normativa pone l'attenzione sull'effetto delle politiche europee sulla disponibilità di cibo e sul consumo di suolo in paesi terzi. Infatti la direttiva RED obbliga la Commissione Europea a relazionare al Parlamento Europeo e al Consiglio Europeo con cadenza biennale (a partire dal 2012)

- sul rispetto nei paesi terzi delle regole sull'uso del suolo legato alla crescente domanda di biocombustibili
- sugli effetti della politica della Comunità in materia di biocombustibili sulla disponibilità di cibo a prezzi sostenibili in particolare per le popolazioni che vivono in paesi considerati in via di sviluppo.

Al comma 6 dell'articolo 19 la RED introduce inoltre esplicitamente il concetto di cambiamento indiretto dell'uso del suolo (Indirect Land Use Change, ILUC) obbligando la Commissione a relazionare anche su questo tipo di impatto. Nello stesso comma la normativa sottolinea la necessità di una proposta per una metodologia per il calcolo degli impatti legato al

cambio indiretto di utilizzo del suolo che abbia consistenza con quanto stabilito dalla direttiva stessa.

2.4.1.1 L'Allegato V della Direttiva Europea 2009/28/CE

Nell'Annex V della 2009/28/CE vengono forniti dei valori di default per la valutazione della riduzione (rispetto all'equivalente combustibile di origine fossile) delle emissioni di CO₂ legate al ciclo di produzione di numerosi biocombustibili e viene descritta la metodologia per il calcolo delle emissioni di CO₂ legate al ciclo di produzione di un determinato biocombustibile.

L'allegato è composto da 5 voci (A,B,C,D,E) che concorrono a definire la riduzione delle emissioni di CO₂ equivalente legata alla produzione di un biocombustibile rispetto al corrispondente fossile (benzina o gasolio). La normativa propone un approccio basato sull'analisi del ciclo di vita (LCA) e considera che contribuiscano al conteggio delle emissioni di CO₂ equivalente la CO₂, il CH₄ e l'N₂O. L'unità rispetto a cui calcolare le emissioni (quella che in LCA è chiamata unità funzionale) è stabilita dalla direttiva in MJ di energia esprimibile dal biocarburante oggetto di studio, in maniera tale che i risultati del computo delle emissioni risultino espressi in g CO₂eq/MJ. La normativa stabilisce inoltre che se nel processo di produzione del biocombustibile vengano generati dei sottoprodotti (prodotti secondari), le emissioni di gas a effetto serra vanno divise tra il biocombustibile e i prodotti secondari proporzionalmente al loro contenuto energetico (metodo di allocazione energetica).

Alle voci A e B dell'allegato vengono raccolti in tabella le riduzioni di emissioni di gas climalteranti da assegnare di default (senza effettuare il calcolo) ad un determinato biocombustibile nel caso il cui non intervenga un cambio di uso del suolo. Alla voce C dell'Allegato V è invece riportata la formula per il calcolo delle emissioni di gas climalteranti generate dal processo di produzione:

$$E \text{ (gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ)} = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccr} - e_{ccr} - e_{ee}$$

In cui:

e_{ec} = emissioni derivanti dalla coltivazione delle materie prime

e_l = emissioni annualizzate risultanti da modifiche degli stock di carbonio a seguito della destinazione di uso dei terreni (LUC - Land Use Change di cui verrà dato approfondimento nel prossimo paragrafo)

e_p = emissioni di processo derivanti dalle varie fasi di lavorazione

e_{td} = emissioni derivanti dai trasporti

e_u = emissioni derivanti dal combustibile al momento dell'uso (considerato pari a zero per i biocombustibili)

e_{sca} = riduzione delle emissioni grazie all'accumulo di carbonio nel suolo mediante una migliore gestione agricola

e_{ccr} = riduzioni delle emissioni grazie alla cattura e stoccaggio geologico del carbonio

e_{ccs} = riduzione delle emissioni grazie alla cattura e riutilizzo del carbonio

e_{ee} = riduzione delle emissioni grazie alla produzione di elettricità tramite cogenerazione

Le voci D ed E dell'Allegato V riportano valori di default delle emissioni di gas climalteranti per numerosi biocombustibili, disaggregati secondo le voci che compongono l'equazione alla voce D dell'allegato appena descritta.

In definitiva la riduzione delle emissioni di CO₂ derivanti dall'utilizzo di un biocombustibile può essere calcolata:

- utilizzando un valore di default disponibile nelle tabelle alle voci A e B dell'Allegato V nel caso in cui e_l sia minore o uguale a zero
- utilizzando un valore calcolato in accordo con la metodologia descritta alla voce C dell'Allegato V
- utilizzando ad una somma dei fattori che compongono l'equazione alla voce C dell'allegato facendo ricorso a valori calcolati ad hoc (quando possibile) e a valori di default offerti dalle tabelle alle voci D ed E dell'Allegato V

Va specificato infine che quando non disponibile un valore "reale" (calcolato) delle emissioni per il carburante fossile di riferimento con cui effettuare il confronto per valutare l'eventuale riduzione di CO₂ equivalente

generata, si può ricorrere ad un valore di default pari a 83,8 gCO₂eq/MJ in caso di utilizzo in mezzi di trasporto.

Nel caso in cui i bioliquidi vengano utilizzati per la produzione di elettricità il valore di riferimento è pari a 91 gCO₂eq/MJ.

Nel caso in cui i bioliquidi siano utilizzati per la produzione di calore il valore stabilito dalla direttiva scende a 77 gCO₂eq/MJ, mentre in caso di impianti cogenerativi ammonta a 85 gCO₂eq/MJ.

2.4.1.2 La Decisione 2010/335/EU

La Decisione della Commissione Europea del 10 giugno 2010 fornisce le linee guida per il calcolo dello stock di carbonio ai fini del calcolo del contributo denominato e_1 (emissioni annualizzate risultanti da modifiche degli stock di carbonio a seguito della destinazione di uso dei terreni) nella formula riportata alla voce C dell'Allegato V della direttiva 2009/28/CE.

Nell'allegato alla Decisione vengono definite le modalità per il calcolo dello stock di carbonio di un determinato terreno (nello strato compreso tra il piano campagna e i 30 centimetri di profondità) che la norma divide in due contributi:

- carbonio organico del terreno
- carbonio immagazzinato nella vegetazione (al di sopra e al di sotto del terreno)

L'indicatore individuato dalla normativa per il conteggio del carbonio di un terreno è il SOC (Soil Organic Carbon) ovvero il contenuto di carbonio organico.

La norma calcola i due fattori suddetti (stock di carbonio nel terreno e stock nella vegetazione) facendo riferimento a fattori numerici riferiti ai diversi tipi di clima e ai diversi tipi di terreno (sabbioso, argilloso, etc...) e moltiplicando gli stessi per fattori correttivi che tengano conto del tipo di copertura vegetale, degli apporti di biomassa al terreno e delle pratiche di coltivazione.

Nel caso più generale la norma consente di calcolare lo stock di carbonio nel suolo riferito ad un particolare terreno utilizzando la formula che segue:

$$CS = (SOC + C_{VEG}) \times A$$

Il contributo SOC alla precedente formula è dato da:

$$\text{SOC (massa/ha)} = \text{SOC}_{\text{ST}} \times F_{\text{LU}} \times F_{\text{MG}} \times F_{\text{I}}$$

In cui:

SOC = carbonio organico contenuto in un terreno (in massa di carbonio per ettaro)

SOC_{ST} = contenuto standard di carbonio nel terreno (in massa di carbonio per ettaro)

F_{LU} = fattore che esprime la differenza nel contenuto di carbonio organico tra un particolare tipo di suolo e il contenuto del terreno standard

F_{MG} = fattore che esprime la dipendenza del contenuto di carbonio organico dal sistema di gestione colturale di un suolo in riferimento al contenuto standard di carbonio nel terreno

F_I = fattore che considera l'effetto di input di carbonio in un terreno sempre in riferimento al contenuto standard di carbonio di un suolo

Mentre lo stock di carbonio negli apparati vegetali viene calcolato tramite la seguente formula:

$$C_{\text{VEG}} \text{ (massa/ettaro)} = C_{\text{BM}} + C_{\text{DOM}}$$

In cui:

C_{VEG} = stock di carbonio nella vegetazione epigea (al di sopra del piano campagna) ed ipogea (al di sotto)

C_{BM} = stock di carbonio nella vegetazione viva (epigea ed ipogea)

C_{DOM} = stock di carbonio nella vegetazione morta (epigea ed ipogea)

Tutti i fattori presenti nelle precedenti due equazioni sono calcolabili seguendo le indicazioni contenute nella Decisione 2010/335/EU o utilizzando i valori riportati nelle tabelle dell'allegato.

3. LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ DEI BIOCOMBUSTIBILI

Dal quadro riportato nel precedente capitolo emergono due aspetti interessanti ai fini di dello studio oggetto di questa tesi di dottorato.

Innanzitutto il dato che sulla spinta degli obiettivi stabiliti dalla normativa europea, la percentuale di biocarburanti utilizzati sul totale dell'energia continuerà a crescere nei prossimi anni. I modelli previsionali indicano inoltre che almeno per i prossimi 7-10 anni la maggior parte dei biocombustibili continuerà ad essere prodotta utilizzando tecnologie di prima generazione e che bioetanolo e biodiesel continueranno a coprire la quasi totalità dei combustibili in Europa, con una prevalenza di biodiesel per quanto riguarda il panorama italiano.

In secondo luogo il quadro normativo europeo evidenzia una sempre maggiore attenzione alle modalità secondo cui i biocombustibili vengono prodotti al fine di favorire l'affermazione sul mercato di prodotti ambientalmente sostenibili. La direttiva RED obbliga di tener in conto le emissioni di CO₂ legate al ciclo di vita di un biocombustibile con un approccio basato sulla metodologia del Life Cycle Assessment (LCA), al fine di un conteggio di tutte le emissioni di gas serra imputabili ad un combustibile dalla produzione delle materie prime fino all'uso finale come carburante per l'autotrazione o come combustibile per la produzione di energia elettrica e/o calore. Inoltre al fine di evitare emissioni derivanti dal cambio di destinazione d'uso del terreni e limitare il consumo di suolo con un elevato valore in termini di biodiversità, la normativa impone dei vincoli nella scelta del luogo di coltivazione delle materie prime.

Data la situazione descritta, il caso oggetto di questa tesi appare quanto mai opportuno riguardando l'analisi LCA di un biocarburante di prima generazione. Tuttavia lo studio intende anche sottolineare le lacune lasciate a livello normativo nelle analisi di sostenibilità dei biocombustibili di prima generazione (tutt'altro che superati secondo quanto evidenziato dai modelli previsionali): in questo capitolo infatti verrà affrontato il tema della

valutazione dell'utilizzo del suolo (*Land use*) sia in termini generali che più specificatamente per quanto riguarda il campo di applicazione dei biocombustibili, cercando di sottolineare come una valutazione corretta del ciclo di vita dei biocarburanti dovrebbe dare modo di distinguere tra diversi livelli di sfruttamento del terreno anche nello stesso contesto di uso del suolo ed esprimere quanto più possibile il carattere sito-dipendente dei processi agronomici. Dunque dopo aver delineato l'evoluzione della categoria di impatto del Land use, si descriverà brevemente lo stato dell'arte in materia e si introdurrà un possibile approccio per la valutazione della qualità del suolo adatta a completare lo studio di Life Cycle Assessment che costituisce l'analisi di sostenibilità degli scenari proposti dal progetto Susbiofuel.

3.1 L'impatto sull'uso del suolo in LCA

La sostenibilità sia ambientale che sociale è considerata da sempre un aspetto di criticità dei biocarburanti: la competizione tra l'uso alimentare ed energetico di materiali edibili (Azar C., 2005), (Lagi M., 2012) e gli aspetti riguardanti le conseguenze ambientali e sociali del cambio di uso diretto (Searchinger, 2008) ed indiretto (Fritsche U.R., 2010) dei suoli (soprattutto nei paesi in via di sviluppo) sulla spinta delle politiche dei paesi occidentali nel campo delle bioenergie (Edwards, 2010) sono temi dibattuti da anni dalla comunità scientifica.

Minore attenzione negli anni passati è, invece, stata dedicata agli aspetti che riguardano la valutazione degli impatti sul suolo non direttamente riguardanti le emissioni di gas climalteranti legati alla coltivazione delle materie prime per la produzione di biocombustibili. Gli aspetti di valutazione degli impatti sull'uso del suolo (Land use impact) della fase agronomica in LCA sono ancora in una fase di non completa maturità e la metodologia al momento non è in grado di distinguere tra diversi livelli di sfruttamento del suolo (ad es. uso intensivo o estensivo di un terreno agricolo) all'interno dello stesso contesto d'uso (ad es. uso agricolo). Di seguito si intende fare brevemente il punto sullo stato dell'arte nel campo degli indicatori di impatto

sull'uso del suolo in LCA, evidenziando come la metodologia ad oggi considerata più solida dal punto di vista scientifico per valutare il land use poco si presti ad essere utilizzata nel contesto di questa tesi. Più adatto, quanto meno a dare una indicazione in fase decisionale, appare lo strumento del Soil Conditioning Index (SCI), un indicatore quali-quantitativo sviluppato dal Ministero per l'Agricoltura degli Stati Uniti d'America (USDA) di cui si accennerà in questo capitolo e si darà più dettagliata descrizione nella parte dedicata ai materiali e metodi utilizzati in questo lavoro di dottorato (capitolo 4).

3.1.1 Lo stato dell'arte dell'impatto sull'uso del suolo in LCA

Il Life Cycle Assessment (LCA) è considerato lo strumento più completo per l'analisi degli impatti ambientali delle attività umane prevedendo un approccio olistico (dalla culla alla tomba) che evita il trasferimento degli impatti ambientali da una fase del ciclo di vita all'altra e da un aspetto ambientale all'altro considerando tutti i possibili impatti prodotti dall'attività analizzata attraverso il ricorso a diversi indicatori (per una descrizione approfondita dell'LCA vedi il capitolo 4 dedicato a materiali e metodi).

Ciononostante la struttura della metodologia LCA, per come è stata originariamente concepita, poco si presta alla valutazione di processi che coinvolgono una fase di produzione agricola, principalmente a causa della natura sito-dipendente dei processi agronomici e della complessità dei sistemi coinvolti (terreno). In questo capitolo si approfondiranno alcuni degli aspetti metodologici legati all'indicatore di impatto sul suolo solitamente definito Land Use Impact. In particolare si tratteranno le questioni legate agli effetti di diverse intensità di sfruttamento del suolo nel medesimo contesto di uso. Esulano dunque dalla trattazione gli aspetti spesso dibattuti nella comunità scientifica internazionale (e toccati anche dalla normativa RED, come descritto nel capitolo precedente) legati al cambio di destinazione d'uso del suolo (Land Use Change), sia diretto (DLUC, Direct Land Use Change) che indiretto (ILUC, Indirect Land Use Change)

L'impatto sul suolo è certamente uno degli aspetti da tenere in maggior considerazione nelle analisi di sostenibilità dei biocombustibili. In un

recente lavoro di (McKone T.E., 2011) viene enfatizzata l'importanza negli studi di LCA di biofuels del sito di produzione e delle pratiche agricole a cui si è fatto ricorso per la produzione delle materie prime.

Nonostante ciò non esiste, ad oggi, un metodo universalmente riconosciuto e applicato trasversalmente che permetta di quantificare gli impatti sull'uso del suolo nella maniera opportuna per i biocarburanti e più in generale per la valutazione ambientale dei processi agronomici. Negli ultimi 10 anni, tuttavia, la comunità scientifica internazionale ha proposto alcuni metodi anche molto strutturati che quantificano il land use tenendo conto degli impatti sulla biodiversità o sulle funzioni espresse dal suolo (vedi per esempio, (Bare, 2011) e (Brentrup F., 2002)).

Al contrario nei primi studi di LCA, l'utilizzo del suolo veniva semplicemente espresso tramite il concetto di occupazione del suolo, solitamente trattato con un indicatore di impatto in m^2 o in $m^2 \cdot \text{anno}$. Tale tipo di approccio, che potrebbe anche descrivere nella maniera corretta alcuni processi (ad esempio in campo edilizio), poco si presta alla valutazione del land use per i processi agronomici. Infatti misurare l'impatto sul suolo in m^2 o in $m^2 \cdot \text{anno}$ significa considerare meno impattanti sistemi che utilizzano una minore superficie di suolo (o per minore tempo) in ognuno dei casi possibili, senza discriminare il tipo di sfruttamento del suolo o il livello di intensità dello stesso. Successivamente, come evidenziato da Milà i Canals in (Milà i Canals L., 2007), introducendo una variabile che esprimesse un valore quantificabile (un indicatore) della qualità del suolo è stato possibile superare nella valutazione del land use il semplice concetto di occupazione per introdurre nel conteggio degli impatti anche gli effetti legati alla trasformazione del suolo.

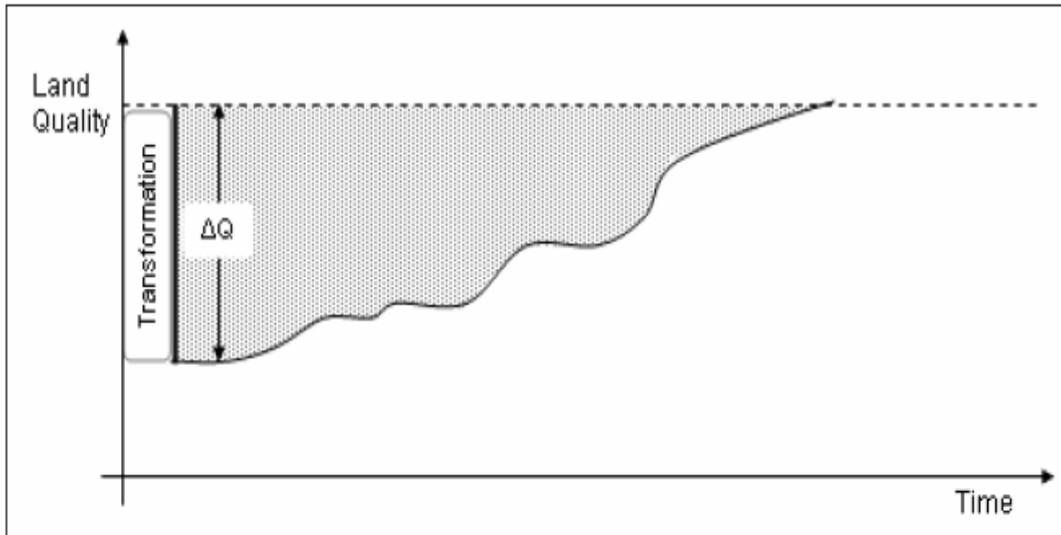


Figura 5: Impatto sul land use in caso di cambiamento nella destinazione d'uso del suolo (Fonte: Milà i Canals, 2007)

L'introduzione del concetto di qualità del suolo ha prodotto un acceso dibattito in primo luogo su quali dovessero essere le variabili rappresentative delle caratteristiche del suolo ed in secondo luogo su quale dovesse essere il riferimento rispetto a cui calcolare il valore di impatto.

Milà y Canals et al. nel 2006 avanzano una proposta (Milà i Canals, 2006) per definire su quale base di riferimento andasse calcolato l'impatto sul suolo prodotto da un determinato processo, introducendo il concetto di tempo di rilassamento di un suolo (relaxation time), ovvero il tempo che necessita un terreno non più occupato per assolvere ad una specifica funzione, a raggiungere uno stato stazionario rispetto ad un particolare indicatore della sua qualità. Tale stato stazionario, che costituisce il riferimento rispetto a cui calcolare l'impatto attraverso il computo dell'integrale dell'area evidenziata in figura, può essere rappresentato da un valore di qualità pari a quello precedente all'occupazione (completo recupero delle funzionalità del suolo dopo l'occupazione) o inferiore se l'occupazione ha prodotto una trasformazione permanente delle proprietà indagate del terreno.

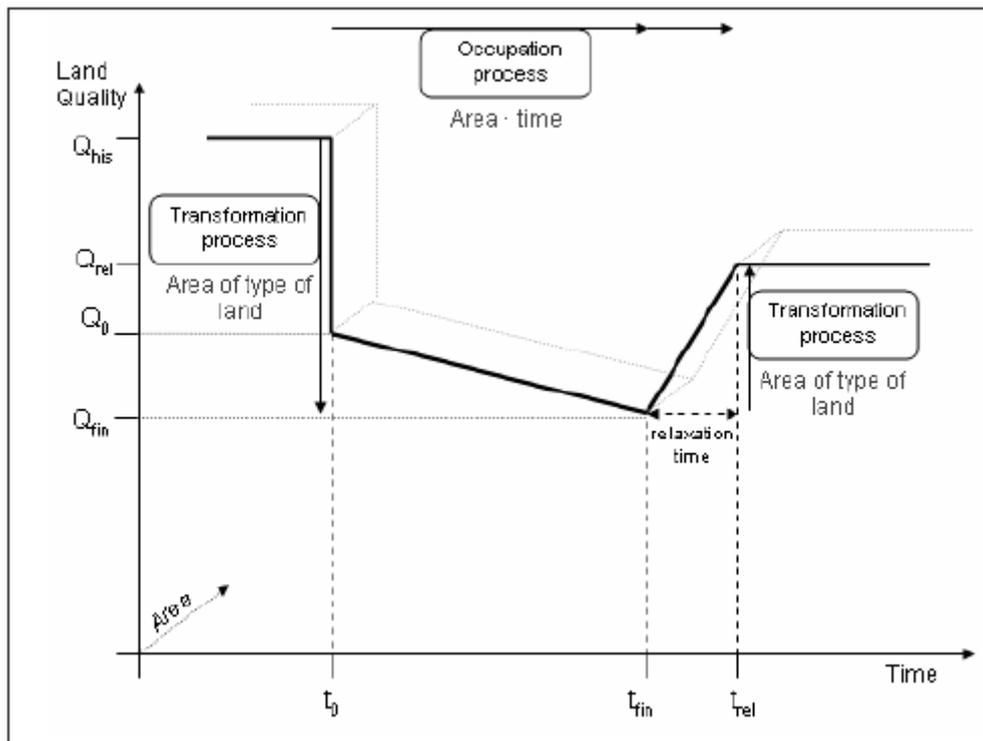


Figura 6: Andamento della qualità del suolo in un processo di trasformazione e occupazione seguito da una fase di rilassamento (Fonte: Milà i Canals, 2007)

Canals nel suo studio propone come indicatore della qualità del suolo il contenuto di carbonio organico nel terreno (SOC). Tuttavia in questa pubblicazione l'autore lascia aperti numerosi interrogativi tra i quali ad esempio l'orizzonte temporale da considerare per il recupero o quale metodo utilizzare per la determinare il valore di SOC in un terreno.

L'approccio proposto da Milà i Canals rimane ad oggi il più solido dal punto di vista metodologico ed è stato identificato dall'ILCD Handbook (JRC, 2010) come uno dei metodi consigliati per la valutazione del Land Use negli studi di LCA. In tabella sono riportati i metodi sia di tipo mid-point che di tipo end-point per la valutazione del land use riconosciuti dall'ILCD Handbook come validi dal punto di vista metodologico seppur ancora immaturi.

Midpoint method	Underlying model	Reference
ReCiPe	Not based on a specific model	De Schryver and Goedkoop (2009)
Milà I Canals	Based on Soil Organic Matter	Milà i Canals (2007)
Baitz	Based on seven quality indicators	Baitz (2002); Bos, Wittstock (2008)
Endpoint method	Underlying model	Reference
EPS 2000	Base on species diversity loss and production of wood	Jarvinen and Miettinen (1987)
Ecoindicator 99	Based on species diversity loss	Koller (2000), Goedkoop and Spriensma (2000)
ReCiPe	Based on species diversity loss	De Schryver, Goedkoop (2009)
LIME	Based on species diversity loss and production of wood	Itsubo et al (2008)
Swiss Ecoscarcity	Based on species diversity loss	Koller (2001), Koller and Scholz (2008)

Tabella 5: Metodi mid-points ed end-points per la valutazione del land use (Fonte: JRC, 2010. ILCD Handbook)

Dei tre metodi di tipo mid-point selezionati il meno strutturato risulta quello ReCiPe che tiene semplicemente conto dell'area occupata o trasformata senza ulteriori caratterizzazioni e non permette di assegnare diversi valori di impatto a diversi livelli di sfruttamento del suolo.

Il metodo di (Baitz M., 1999) descrive gli impatti riferiti all'occupazione o trasformazione di un suolo attraverso un inventario di diversi indicatori. Tale metodo è stato recentemente (2011) ripreso dagli sviluppatori del software Ga-Bi nell'approntare un metodo chiamato LANCA che permette di calcolare un valore di qualità di un terreno sulla base di 5 parametri che influenzano le caratteristiche dello stesso:

- resistenza all'erosione
- capacità di filtrazione meccanica
- capacità di filtrazione chimica
- capacità di accumulo di acqua in falda
- produzione di biomassa

La definizione di tali parametri deriva dall'introduzione nel modello di numerose informazioni: tessitura del terreno, capacità di scambio cationico, contenuto in humus, profondità della tavola d'acqua, tipo di suolo, precipitazioni e molte altre.

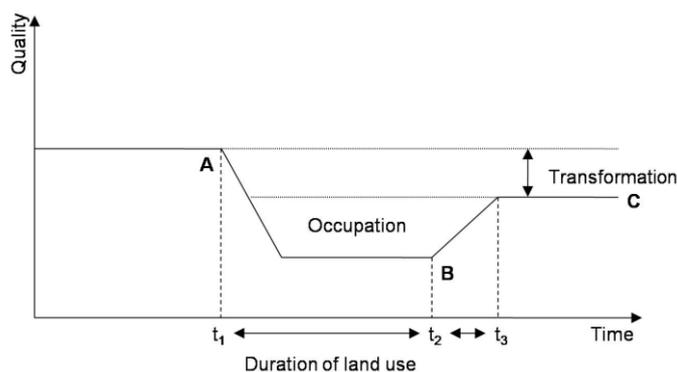


Figura 7: Impatto sul land use dato da un processo di occupazione e trasformazione (Fonte: LANCA method report, figura 2.1)

Le modalità secondo cui calcolare il valore di impatto una volta stabilita la situazione di riferimento e il tempo di rilassamento sono le stesse proposte da Milà i Canals, brevemente descritte in precedenza. Va segnalato che il calcolo dei valori di qualità del suolo tramite cui definire l'impatto non sono di facile definizione ed il modello necessita di molte informazioni in input.

Infine il metodo basato sulla proposta di Milà i Canals di legare la qualità del suolo all'andamento del contenuto di carbonio organico nel terreno (SOC), pur lasciando delle questioni aperte (come precedentemente evidenziato), risulta il più solido tanto da essere individuato come metodo più appropriato tra gli esistenti dallo stesso ILCD Handbook, che tuttavia definisce la metodologia ancora immatura per fornire risultati affidabili e facilmente riproducibili e dunque per essere incluso tra i metodi raccomandati raccolti in (JRC, 2010).

Un recente studio di Brandao (Brandao M., 2011) utilizza il suddetto approccio di Canals per valutare l'impatto sul suolo di differenti usi dello stesso. Lo studio considera il territorio dell'Inghilterra ma non fa riferimento ad un sito specifico per confrontare 4 diverse materie prime per la produzione di biocombustibili. Utilizza il SOC per determinare l'impatto sul Land use come da proposta di Milà i Canals ed il valore di riferimento del contenuto di carbonio è quello che la letteratura indica per un terreno con copertura boschiva, prevedendo dunque un recupero completo della qualità del suolo dopo l'utilizzo in agricoltura. I valori di SOC sono stati stimati da letteratura per ognuno dei 4 scenari di coltivazione e non sono stati considerati i contributi relativi al tipo di pratiche agricole utilizzate e l'influenza di fenomeni erosivi e delle variabili

climatiche. Va dato atto agli autori di essere tra i primi ad affrontare con un approccio olistico (proprio della filosofia LCA) la valutazione della sostenibilità di diversi scenari di utilizzo del suolo al fine di produrre biocombustibili. Tuttavia lo studio oltre a presentare una forte discrezionalità nelle scelte del tempo di rilassamento e del valore di riferimento del SOC che minano la riproducibilità dell'approccio in altri studi, trascura gli aspetti di sito-specificità propri di un processo agronomico. Questo è coerente con gli obiettivi e il campo di applicazione dello studio trattandosi di un'analisi a livello di macro scala (Inghilterra) che prevede il ricorso ad un LCA di tipo consequenziale che dia più enfasi alle ricadute di tipo sociale ed economico del processo analizzato (ad esempio ILUC, indirect land use change) che agli impatti a livello micro (impatti su uno specifico sito).

D'altra parte però, tale approccio poco si presta a supportare decisioni per uno specifico sito produttivo non riuscendo ad includere nell'analisi aspetti di sito-specificità e l'influenza di diversi sistemi di gestione di un terreno nel contesto di un medesimo uso (ad esempio uso agricolo con sistema di coltivazione di tipo intensivo vs uso agricolo con sistema di coltivazione di tipo estensivo).

3.2 Un approccio per includere l'impatto sull'uso del suolo nel ciclo di vita dei biocarburanti

Nel contesto dell'analisi LCA del progetto Susbiofuel (capitolo 7) per includere nello studio anche considerazioni sull'impatto sul suolo degli scenari analizzati, risulta necessario un approccio che permetta di considerare la sito-specificità legata alle caratteristiche del suolo oggetto della sperimentazione e che tenga conto dell'effetto delle diverse pratiche di management in campo agricolo.

A tal fine si è scelto di avvalersi di uno strumento che verrà descritto nel prossimo capitolo (paragrafo 4.2), il Soil Conditioning Index (SCI) che sfruttando alcuni dati in input di facile reperimento sulle caratteristiche del sito e sulle pratiche agronomiche utilizzate permette di effettuare una valutazione quali-quantitativa degli effetti di un sistema agronomico su un determinato terreno. Come verrà descritto con maggiore dovizia di particolari nel prossimo capitolo, una delle variabili che costituiscono l'indicatore SCI è il contenuto di

sostanza organica nel terreno indicato nel modello come organic matter (OM), ma più abitualmente definito nella letteratura tecnica come contenuto di sostanza organica del terreno, SOM (Soil organic matter). Il SOM non va confuso con il carbonio organico nel terreno (SOC, Soil organic carbon) utilizzato da Milà i Canals nel suo metodo per la valutazione del Land use. Infatti il contenuto di sostanza organica nel terreno (SOM) è costituito dall'insieme dei composti organici presenti nel terreno, mentre il SOC è la parte del SOM costituita dal carbonio organico e rappresenta circa il 60% della sostanza organica totale di un terreno (ARPAV, 2012). Dunque i due indicatori sono proporzionali, è possibile l'estrapolazione di uno avendo delle informazioni sull'altro tramite il ricorso ad appositi modelli e, in definitiva, possono essere usati entrambi come indicatori di qualità di un suolo, soprattutto in modelli in cui vengono valutati incrementi (o decrementi) o in cui tali indicatori debbano esprimere un andamento tendenziale degli effetti sul suolo di una pratica agricola su un terreno.

Va precisato che lo SCI non fornisce un valore numerico con un significato intrinseco, ma offre solo un'indicazione della bontà del sistema analizzato (essendo un indicatore quali-quantitativo) e dunque risulta uno strumento efficace solo se usato nel confronto tra diversi scenari. Nel contesto di questo lavoro di dottorato a valle dell'analisi LCA del progetto Susbiofuel (capitolo 6) condotta calcolando i risultati tramite il metodo CML 2001, che non prevede una categoria di impatto per il Land use, verranno forniti i risultati dell'analisi condotta tramite il software prodotto dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti d'America per la definizione dello SCI (capitolo 7) per due degli scenari previsti dal protocollo di sperimentazione del progetto Susbiofuel (capitolo 5). Il software in questione considera i dati climatici per il solo territorio statunitense, tuttavia si adatterà lo studio al caso del progetto Susbiofuel individuando la località statunitense con le medie climatiche e di precipitazione più simili a quelle di uno dei siti di sperimentazione (Altedo (BO)). I dettagli delle modalità con cui è stata condotta la valutazione dello SCI verranno forniti nel capitolo 7. Si specifica una volta di più che il cuore dello studio di questa tesi è costituito dallo studio LCA descritto nel capitolo 6, tuttavia in virtù di tutte le considerazioni presentate in questo capitolo è apparso opportuno sperimentare

le potenzialità di uno strumento che potrebbe essere replicato sul territorio italiano o europeo al fine di fornire informazioni nella fase decisionale di politiche o nella fase di progetto di un sistema agronomico. Sulla base dell'esperienza americana infatti, si potrebbero replicare alcuni aspetti del modello per il calcolo dello SCI così da produrre uno strumento di supporto alle decisioni in campo agronomico per il territorio italiano o europeo. Inoltre nell'attesa che venga delineata una metodologia solida e allo stesso tempo snella e facilmente riproducibile per la valutazione del land use, uno strumento semplificato come lo quello per il calcolo dello SCI potrebbe integrare i risultati offerti da un classico studio di LCA offrendo anche la possibilità di una semplice replicabilità dei risultati. Proprio in quest'ottica di integrazione dell'analisi LCA è stato effettuato il calcolo dello SCI per due degli scenari di produzione del tabacco facenti parte del protocollo di sperimentazione del progetto Susbiofuel. Inoltre il ricorso allo strumento dello SCI è stato considerato anche una conferma dell'andamento dei dati di sostanza organica nel suolo prodotti dalle analisi previste dal protocollo del progetto. La convergenza di questi risultati con i dati elaborati dal modello per il calcolo del Soil Conditioning Index verranno discussi sempre nel capitolo 7. A conclusione di questa parte generale sulla valutazione degli impatti sull'uso del suolo va detto che a fronte dei vantaggi accennati, lo SCI presenta il limite di essere un indicatore qualitativo che offre peraltro informazioni sullo stato del suolo considerando solo il contenuto di sostanza organica nel terreno (SOM) e non valutando l'influenza di altri parametri qualitativi del terreno. Tuttavia a conferire solidità all'approccio alla base del modello per il calcolo dello SCI c'è il fatto che la comunità scientifica in campo agronomico concorda che il contenuto di sostanza organica sia un buon indicatore della qualità agronomica di un suolo, dato che questo parametro influenza numerose altre funzioni che contribuiscono alla fertilità del terreno (Arshad M.A., 1992), (Karlen D.L., 1997):

- funzioni fisico-meccaniche:
 - capacità di ritenzione idrica di un terreno
 - permeabilità
 - resistenza all'erosione superficiale

- funzioni chimico-fisiche:
 - capacità di ritenzione delle basi
 - capacità di ritenzione del fosforo
 - aumento del potere tampone di un terreno
 - protezione dei microelementi dall'insolubilizzazione
- funzioni biologiche:
 - ruolo di substrato alimentare per pedofauna e microrganismi
 - capacità di rendere disponibili nutrienti ed acqua per la vita

Grazie a tutte le funzioni svolte dalla sostanza organica, un terreno ricco in SOM necessita di meno acqua, di minori quantitativi di fertilizzanti ed è più facile da lavorare e meno incline ai fenomeni erosivi legati all'azione degli agenti climatici (Barnabè D., 2012).

4. MATERIALI E METODI

4.1 L'analisi del ciclo di vita

4.1.1 Definizione e normative di riferimento

Il Life Cycle Assessment (LCA) è una procedura che consente l'identificazione dei carichi ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, seguendo l'oggetto dello studio lungo tutto il suo ciclo di vita. L'LCA è uno strumento di valutazione che permette un'analisi degli impatti generati sull'ambiente dal ciclo di vita di un processo o prodotto lungo il percorso definito dalla culla alla tomba che va dall'estrazione delle materie prime fino al trattamento dei rifiuti prodotti dal sistema, ricorrendo ad un approccio olistico che evita il trasferimento degli impatti da una fase del ciclo di vita all'altra e da una matrice ambientale (acqua, aria, suolo) verso un'altra (Chiavetta, 2009).

Tale percorso, che si esplica sia a monte sia a valle della fase di utilizzo, inizia con l'estrazione delle materie prime, attraversa la fase di lavorazione, distribuzione, uso e riuso del prodotto e termina con lo smaltimento finale, individuando e quantificando i consumi di materia ed energia e le emissioni nell'ambiente. L'insieme di queste macrofasi viene comunemente detto percorso "*from cradle to grave*", vale a dire "dalla culla alla tomba".

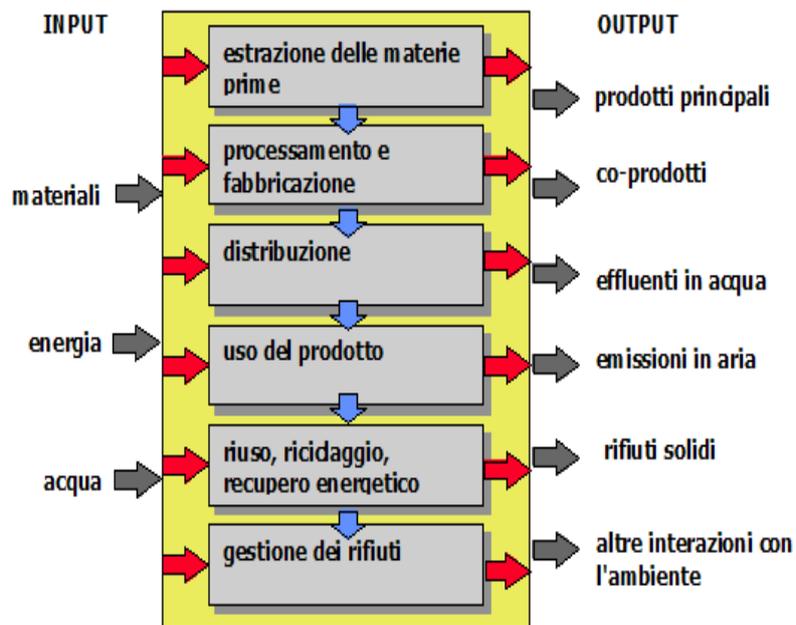


Figura 8: Digramma di flusso di un sistema produttivo

Il termine LCA, con cui in principio si intendeva indistintamente Life Cycle Assessment o Life Cycle Analysis, fu coniato durante il congresso della Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) di Smuggler Notch (Vermont-USA) nel 1990 per caratterizzare più dettagliatamente le analisi svolte fino ad allora con il nome di REPA (Resource and Environmental Profile Analysis). La definizione che venne stabilita è la seguente:

“è un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o attività, effettuato attraverso l’identificazione dell’energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell’ambiente. La valutazione include l’intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l’estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale.”

Nella definizione vengono sottolineati alcuni aspetti: l’oggettività del procedimento, vale a dire l’esecuzione di fasi analitiche precise e ben determinate, nonché lo studio di dati confrontabili e scientificamente verificabili e la considerazione dell’intero ciclo di vita, che presuppone una visione globale del sistema in esame.

L'obiettivo da perseguire, nella prospettiva di un possibile miglioramento, è rappresentato dalla valutazione degli impatti ambientali imputabili allo stato in essere del processo o dell'attività studiata.

La quantificazione dei carichi ambientali del ciclo di vita di un prodotto o servizio avviene attraverso la contabilizzazione di tutti i consumi di materie prime, acqua e fonti energetiche, detti "input" e di tutte le emissioni gassose, liquide e solide, di rifiuti e di altri rilasci, detti "output". In particolare l'LCA valuta anche i "risparmi ambientali" dovuti alla produzione evitata di materiali ed energia grazie al riuso, al riciclo o alla termovalorizzazione del prodotto considerato.

Infatti, è proprio grazie all'identificazione di criticità ambientali, in gergo "bottleneck" cioè "colli di bottiglia", che si può mirare all'ottimizzazione dei processi e dell'uso delle risorse. La normativa di riferimento nel campo della LCA è la serie ISO 14040 (ISO14040, 2006), (ISO14044, 2006):

Valutazione del Ciclo di Vita
Serie ISO 14040
UNI EN ISO 14040: 2006 "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento".
UNI EN ISO 14044: 2006 "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida".
ISO 14047: 2003 "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Esempi di applicazione delle ISO 14042".
ISO 14048: 2002 "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Modello per la documentazione della qualità del dato".
ISO 14049: 2000 "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Esempi di applicazione delle ISO 14041 per la definizione dell'obiettivo, dello scopo e dell'analisi d'inventario".

Tabella 6: La serie ISO 14040

Le edizioni delle norme internazionali **ISO 14040:2006** e **ISO 14044:2006** - elaborate in seno all'ISO/TC 207 "Environmental management" SC 5 "Life cycle assessment"- sono state pubblicate dall'UNI come norme UNI EN ISO in lingua inglese. Le due norme hanno l'obiettivo di facilitare il processo di valutazione degli effetti che un prodotto può avere sull'ambiente nell'intero suo ciclo di vita, incoraggiando in tal modo un più efficiente utilizzo delle risorse.

La **UNI EN ISO 14040:2006** "*Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*" fornisce in un quadro generale le pratiche, le applicazioni e le limitazioni dell'LCA, ed è destinata ad una vasta gamma di potenziali utenti e parti interessate, anche con una conoscenza limitata della valutazione del ciclo di vita. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 14040 (edizione luglio 2006). La norma descrive i principi ed il quadro di riferimento per la valutazione del ciclo di vita (LCA).

La **UNI EN ISO 14044:2006** "*Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida*" è stata elaborata per la preparazione, la gestione e la revisione critica del ciclo di vita. Fornisce le linee guida per la fase di valutazione dell'impatto dell'LCA, la fase di interpretazione dei risultati, la valutazione relativa alla natura e alla qualità dei dati raccolti.

Aggiornate per migliorarne la leggibilità ma inalterate nei requisiti e nei contenuti tecnici (eccetto per gli errori e le discordanze), le UNI EN ISO 14040:2006 e UNI EN ISO 14044:2006 sostituiscono le precedenti edizioni delle norme (UNI EN ISO 14040:1998, UNI EN ISO 14041:1999, UNI EN ISO 14042:2001 ed UNI EN ISO 14043:2001).

4.1.2 Origini e sviluppo

Le origini del concetto di analisi del "ciclo di vita" risalgono agli anni '60. La relazione di Harold Smith alla World Energy Conference del 1963, riguardante le richieste di energia per la produzione di intermedi chimici, si può considerare uno dei primi esempi della metodologia, seppure la valutazione degli impatti sull'ambiente fosse ancora marginale. Verso la fine degli anni Sessanta furono pubblicati alcuni studi di modelli globali in *The Limits to Growth* (Meadows et al., [1972]) nei quali si cercava di predire quali sarebbero stati gli effetti di un

aumento della popolazione mondiale sulla richiesta di materie prime e di energia. La prospettiva di un rapido esaurimento dei combustibili fossili e di eventuali modifiche climatiche, da attribuire soprattutto all'eccesso di calore immesso nell'atmosfera da parte dei processi di combustione, spinsero verso calcoli meticolosi sui consumi energetici e sui rifiuti termici delle industrie. In quel periodo furono compilati una dozzina di studi che stimavano i costi e le conseguenze ambientali di risorse energetiche alternative.

Nel 1969, un gruppo di ricercatori del Midwest Research Institute (MRI) condusse uno studio per conto della Coca-Cola confrontando diversi tipi di contenitori per le bevande, con lo scopo di determinare quale fosse l'involucro con il minor impatto sull'ambiente in termini di emissioni e di consumo di materie prime. Il calcolo fu realizzato quantificando le materie prime, il combustibile e i rilasci nell'ambiente per la produzione di ogni singolo contenitore. La procedura fu denominata Resource and Environmental Profile Analysis (REPA). Nel frattempo anche in Europa furono condotti studi simili, rivolti soprattutto ai sistemi d'imballaggio e denominati procedure di Ecobalance.

In Italia la necessità di uno strumento di contabilizzazione per i carichi ambientali associati alla produzione delle merci si delineò nel 1977-79 quando, presso l'Istituto di Merceologia dell'Università di Bari, l'economista Nebbia condusse ricerche sull'analisi dei flussi di energia attraverso i vari cicli produttivi distinguendo fra energia impiegata nell'impianto di produzione e energia incorporata nelle materie prime.

L'interesse per l'LCA aumentò negli anni Ottanta con lo sviluppo di una serie di metodi per la valutazione quantitativa degli impatti, riguardo a differenti tematiche ambientali (impoverimento delle risorse, riscaldamento globale, ecc.); in questo modo gli studi di LCA si diffusero divenendo sempre più trasparenti e disponibili al pubblico.

Alla fine degli anni Ottanta permaneva, tuttavia, una situazione di enorme confusione: rapporti riguardanti LCA condotti sugli stessi prodotti contenevano spesso risultati contrastanti. Il motivo di ciò è da attribuire alla scarsa uniformità delle valutazioni, perché gli studi effettuati si basavano su dati, metodi e terminologie fra di loro differenti. Divenne presto evidente la necessità di una

metodologia univoca e standardizzata. Il dibattito scientifico fu portato avanti sotto il patrocinio della SETAC e uno dei risultati più importanti fu la pubblicazione di un quadro di riferimento universalmente accettato (Consoli F., 1993).

Oggi la maturità e l'unificazione della metodologia sono testimoniate dall'emissione da parte del Technical Committee 207 (TC207) dell'ISO (International Standards Organization) della normativa tecnica della serie ISO 14040 e dalla pubblicazione da parte del JRC dell'International reference life cycle data system (ILCD) handbook (JRC, 2010) secondo le cui indicazioni è stato condotto lo studio LCA oggetto di questa tesi di dottorato.

4.1.3 Differenti tipologie di LCA

Il sopra citato approccio "*from cradle to grave*" fornisce la descrizione più accurata dei carichi ambientali del sistema in studio in una LCA.

La scelta di seguire l'oggetto dello studio dalla culla alla tomba è dettata principalmente da due ragioni: in primo luogo, una singola operazione industriale può apparentemente essere resa più efficiente e "più pulita" trasferendo l'inquinamento in altri comparti ambientali, così che i benefici derivanti da queste azioni vengono controbilanciati da problemi generati altrove, senza conseguire nel complesso alcun reale miglioramento; in secondo luogo tale approccio permette di passare da una tipologia di studio tipica dell'ingegneria tradizionale, focalizzata sull'efficienza dei singoli sistemi produttivi, ad una visione globale dell'intera catena produttiva.

Tuttavia condurre una LCA completa può risultare a volte molto oneroso sia in termini di tempo che di denaro. In risposta a queste considerazioni, sono stati individuati metodi per semplificare la metodologia di LCA, per renderla più veloce e meno dispendiosa, senza rinunciare alle caratteristiche fondamentali di uno studio completo e senza perdere l'accuratezza e l'attendibilità dei risultati. Infatti a seconda dello scopo e degli obiettivi dello studio, una LCA può essere condotta più o meno dettagliatamente.

Le strategie semplificative possono riguardare la limitazione degli obiettivi, la riduzione della quantità di dati richiesti o il restringimento dei confini del sistema.

In quest'ultimo caso le semplificazioni introdotte producono degli studi di LCA definiti come segue:

- “*from cradle to gate*” (dalla culla al cancello): lo studio inizia con l’approvvigionamento delle materie prime e delle fonti di energia e si conclude con l’immissione del prodotto finito sul mercato, escludendo quindi la fase di utilizzo e di smaltimento dello stesso;
- “*from gate to gate*” (dal cancello al cancello): lo studio analizza unicamente la realtà aziendale, quindi comprende le fasi di fabbricazione e assemblaggio del prodotto.

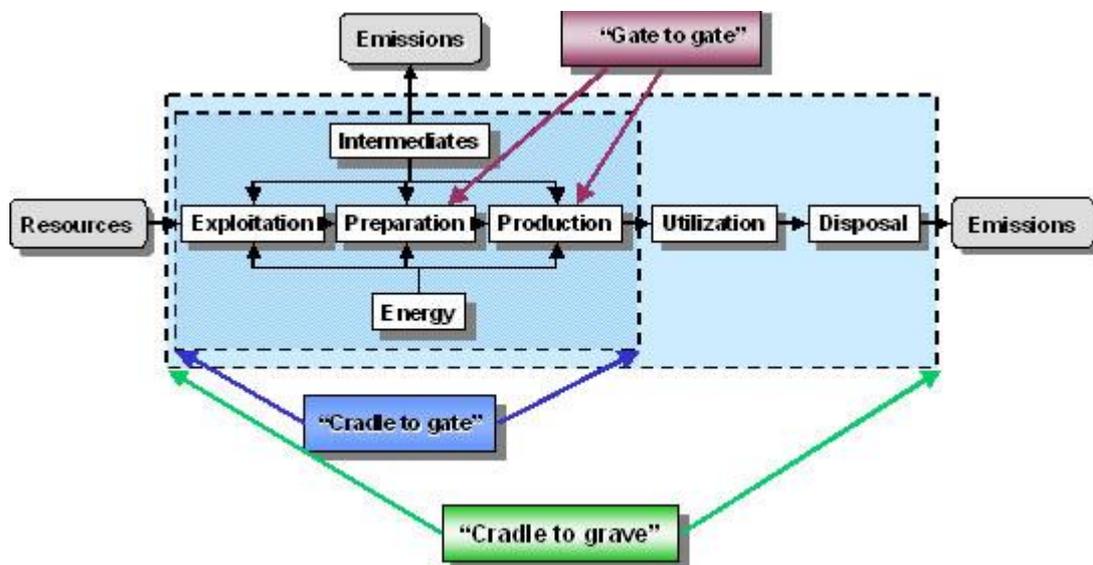


Figura 9: Schema di sintesi dei possibili approcci di uno studio LCA

Recentemente però gli studiosi del settore si sono orientati verso un approccio del tipo “*from cradle to cradle*” che comprende anche la rivalorizzazione del prodotto a fine vita attraverso il recupero di energia e materiali, nell’ottica di diminuire progressivamente la quantità di rifiuti da inviare allo smaltimento in discarica.

Conferire valore intrinseco a un qualsiasi prodotto a fine vita vuol dire promuovere ogni attività di recupero, reimpiego e riciclaggio, considerando lo smaltimento finale in discarica una fase residuale da attuare in condizioni di massima sicurezza che arrechi il minor danno possibile all’ambiente.

Nella pratica, chi conduce una LCA col fine di progettare o riprogettare un prodotto ecosostenibile non è interessato tanto alle quantità dettagliate, quanto piuttosto alle differenze tra le possibili alternative di progettazione in esame. Inoltre la progettazione di un processo o di un prodotto attraversa varie fasi prima di arrivare alla sua conclusione e non è detto che la LCA relativa ad esso debba essere compiuta solo alla fine, poiché tale analisi può essere importante anche nelle fasi intermedie per indirizzare le scelte dei progettisti. In queste fasi non sarà naturalmente possibile eseguire uno studio completo visto che il prodotto o processo in esame è ancora in fase di definizione. Dunque possiamo distinguere varie tipologie di LCA sulla base del tipo di dati a disposizione, della loro qualità e dello scopo per il quale lo studio viene eseguito.

La classificazione originaria sulle tipologie di LCA è quella offerta dalla CIT Ekologik, società svedese di consulenza in ecologia ambientale del prodotto e dell'amministrazione che coopera con alcune importanti organizzazioni mondiali come la SETAC e rappresenta la Svezia nel comitato ISO (International Standards Organization) nell'ambito delle norme concernenti l'LCA.

La classificazione proposta dalla CIT Ekologik è la seguente:

- *Streamlined LCA* - LCA semplificata o parziale – una LCA di questo tipo in genere costituisce la base sulla quale poggiano le decisioni prese per conferire la giusta direzione allo sviluppo di nuovi prodotti o servizi soprattutto quando questi non sono troppo complessi. Spesso i dati utilizzati in una LCA semplificata sono per la maggior parte di tipo qualitativo. Infine essa richiede un tempo di realizzazione breve, variabile da alcune settimane fino ad un paio di mesi;
- *Screening LCA* - LCA selettiva – questo tipo di LCA si utilizza principalmente nel caso in cui si vogliono individuare e “selezionare” le fasi di vita di un prodotto che determinano gli impatti ambientali più consistenti. Si ricorre per lo più a dati standard, senza approfondire la ricerca delle informazioni né dare loro effettiva valutazione. Solo in

seguito, dai risultati così ottenuti e da un'analisi di sensibilità, si individuano i dati critici dei quali è necessario migliorare la qualità. La LCA di screening pur non essendo uno studio esaustivo è un sistema rapido per la valutazione degli aspetti realmente importanti del ciclo di vita di un prodotto o servizio sui quali è necessario focalizzare l'attenzione negli eventuali approfondimenti successivi dello studio. In alcuni casi la LCA è condotta con tipologie di dati e modalità che appartengono in parte alla LCA di selezione e in parte a quella di screening. Le caratteristiche dello studio che ne deriva dipenderà naturalmente dalle scelte considerate relativamente ai dati considerati, dalla loro qualità e dai criteri adottati. I risultati che si possono ottenere sono buoni e addirittura in alcuni casi possono raggiungere una qualità prossima a quella dei risultati di una LCA dettagliata. In ogni caso l'uso di tali procedure semplificate dovrebbe avvenire per studi *compiuti* in tempi limitati e di portata ridotta e deve comunque essere opportunamente documentato e giustificato.

- *Detailed LCA* - LCA dettagliato - è lo studio necessario nel caso di una valutazione completa, che presuppone a monte uno o più studi di tipo selettivo. Un'analisi di questo tipo è indispensabile nel caso in cui i risultati debbano essere utilizzati per comunicazioni pubbliche. Una LCA dettagliata prevede una elevata qualità di dati e comprende, dunque, la raccolta sistematica di valori specifici del caso in esame (dati primari) da preferire a dati presi da bibliografia (dati secondari). Inoltre include lo studio di piccoli flussi di energia e di materiali in modo da aumentare il livello di dettaglio dell'analisi.

4.1.4 LCA: metodologia

Come definito dalla norma ISO 14040 la metodologia LCA si compone di quattro fasi principali:

1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema (*Goal and scope definition*).

2. Redazione e analisi dell'inventario (*Inventory analysis*) – compilazione di un inventario completo dei flussi in ingresso (materiali, energia, risorse naturali) e in uscita (emissioni in aria, acqua e suolo, rifiuti) che siano rilevanti per il sistema definito.
3. Valutazione degli impatti ambientali (*Life cycle impact assessment*) – valutazione dei potenziali impatti ambientali diretti e indiretti, associati a questi input e output e della loro significatività.
4. Interpretazione dei risultati e analisi di miglioramento (*Interpretation and improvement analysis*) – analisi dei risultati delle due fasi precedenti e definizione delle possibili linee di intervento.

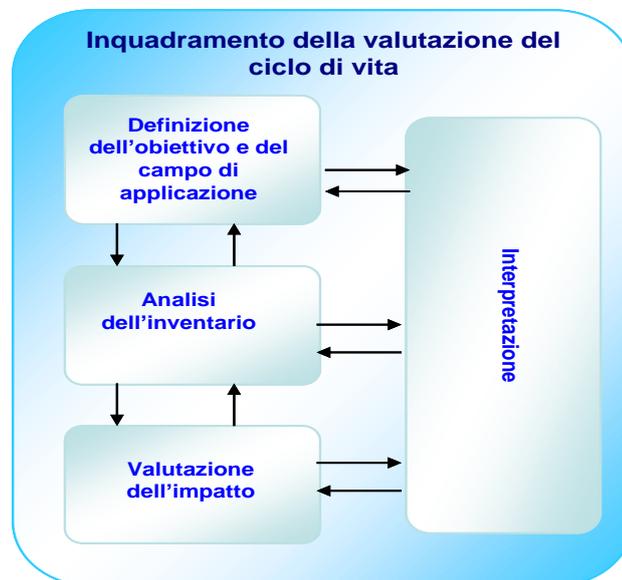


Figura 10: Schema delle fasi che costituiscono la metodologia LCA

4.1.5 Definizione di obiettivo e campo di applicazione dello studio

La prima fase di uno studio LCA consiste nella dichiarazione degli obiettivi e delle motivazioni dello studio e nella definizione dell'oggetto dell'analisi e dei confini del sistema.

L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità le motivazioni per le quali si realizza lo studio, quale sarà l'applicazione prevista per i suoi risultati ed il tipo di pubblico a cui è destinato. Nella definizione del campo di applicazione si deve descrivere il sistema oggetto dello studio ed elencare le categorie di dati da considerare in esso. Tale definizione deve essere fatta con cura per

assicurare che l'ampiezza, la profondità e il dettaglio dello studio siano compatibili con l'obiettivo che ci si è prefissi di conseguire. Essendo poi la LCA una tecnica iterativa, a volte può essere necessario modificare il campo di applicazione a seguito di informazioni supplementari raccolte nel corso del lavoro, allo scopo di soddisfare l'obiettivo originale dello studio.

E' evidente che questa prima fase delinea notevolmente le linee di svolgimento dell'analisi e può portare a significativi cambiamenti dei risultati.

Al fine di comprendere in che maniera nella metodologia LCA vengono scelti i confini del sistema, è utile riportare le definizioni di sistema di prodotto e unità di processo fornite dalla norma ISO 14040.

Per sistema di prodotto si intende un insieme di unità di processo interconnesse da flussi di prodotti intermedi che rappresentano una o più funzioni definite, in cui con il termine funzione si indica una caratteristica prestazionale del sistema. La descrizione di un sistema di prodotti comprende le unità di processo, i flussi elementari e i flussi di prodotti che oltrepassano i confini del sistema, nonché i flussi intermedi dentro il sistema.

Le unità di processo sopra citate sono la più piccola parte di un sistema di prodotto per la quale sono stati raccolti i dati nel corso della Valutazione del Ciclo di Vita. Sono collegate tra loro da flussi di prodotti intermedi (materiali di base, semilavorati) e/o rifiuti da trattare e sono collegate con altri sistemi di prodotti e con l'ambiente da flussi elementari in input (materie prime, energia) e in output (radiazioni, emissioni in aria, acqua, suolo).

La suddivisione di un sistema di prodotti in unità di processo rende più facile l'identificazione delle entità in ingresso e in uscita da esso. La sua descrizione comprenderà dunque quella delle unità di processo, dei flussi elementari e dei flussi di prodotti che oltrepassano i confini del sistema nonché quella dei flussi intermedi interni al sistema stesso.

La descrizione iniziale delle unità di processo considerate è fondamentale per definire innanzitutto dove ha inizio ogni sistema di prodotti in termini di ricevimento di materie prime e prodotti intermedi, ma anche per la definizione della natura delle trasformazioni e delle operazioni che si svolgono al suo interno. Inoltre, poiché una unità di processo genera a sua volta altre entità in

uscita come risultato delle sue attività, il suo confine sarà dunque determinato dal livello di dettaglio richiesto per soddisfare l'obiettivo dello studio.

Infine poiché il sistema considerato è un sistema fisico, ogni unità di processo deve soddisfare le leggi di conservazione di massa ed energia e perciò la validità della descrizione dell'unità di processo potrà essere controllata proprio attraverso un bilancio di massa ed energia.

Per una descrizione chiara di un sistema di prodotti può essere molto utile l'uso di un diagramma di flusso di processo, che permette di illustrare rapidamente quali sono le unità di processo considerate.

Gli studi di LCA sono dunque condotti mediante lo sviluppo di modelli descrittivi degli elementi chiave di un sistema fisico. La scelta degli elementi del sistema fisico da introdurre nel modello dipenderà dalla definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio. Infatti non sarebbe pratico né utile studiare tutte le relazioni tra le unità di processo di un sistema di prodotti o quelle tra un sistema di prodotti e l'ambiente. Ovviamente è necessario specificare le ipotesi alla base delle semplificazioni introdotte e descrivere i modelli utilizzati nell'analisi.

4.1.5.1 Le funzioni del sistema di prodotto e l'unità funzionale

Nella descrizione del campo di applicazione di una LCA si deve specificare con chiarezza quali sono le funzioni del sistema in analisi, ovvero le caratteristiche prestazionali del sistema di prodotti o dei sistemi nel caso di studi comparativi.

Allo scopo di quantificare le suddette funzioni si utilizza l'unità funzionale, definita dalla norma ISO 14040 come:

“Prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento in uno studio di Valutazione del Ciclo di Vita. Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata ed in uscita. Questo riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati della LCA, che risulta critica quando si valutano sistemi differenti perché ci si deve assicurare che il confronto venga fatto su base comune”.

In definitiva l'unità funzionale costituisce il riferimento a cui tutti i dati dello studio in ingresso e in uscita saranno normalizzati, perciò essa deve essere chiaramente definita e misurabile.

Va sottolineato che i confronti tra sistemi devono essere effettuati sulla base della medesima funzione e quantificati attraverso la stessa unità funzionale.

4.1.5.2 Le funzioni del sistema di prodotto e l'unità funzionale

I confini di un sistema di prodotto definiscono le unità di processo da includere nel sistema in cui si costruisce il modello e devono essere scelti in maniera tale che tutti i flussi in ingresso e in uscita siano flussi elementari. La scelta dei confini, il livello di aggregazione dei dati e il modello scelto per il sistema del sistema devono essere coerenti con l'obiettivo dello studio.

Quando non c'è sufficiente tempo, dati o risorse per condurre uno studio completo, si può decidere di escludere delle unità di processo dalla composizione del modello. In questo caso qualunque decisione di eliminare fasi del ciclo di vita, processi o flussi in ingresso o in uscita deve essere chiaramente indicata e giustificata.

4.1.6 Analisi di inventario - LCI

La redazione dell'inventario (Life Cycle Inventory – LCI) è il cuore di un'analisi LCA. In questa fase vengono riportati tutti i flussi di energia e di materia del sistema/prodotto in esame normalizzati all'unità funzionale. Questi flussi sono espressi in unità fisiche (unità di massa e di energia) e comprendono l'utilizzo di risorse e di energia e tutti i rilasci in aria, in acqua e nel suolo associati al sistema.

Nell'inventario devono essere inclusi i dati raccolti per ognuna delle unità di processo comprese nei confini del sistema. La qualità dei dati raccolti ed usati nella fase di inventario è propedeutica alla qualità finale dello studio LCA. La raccolta di informazioni deve rispondere a criteri di completezza, precisione, rappresentatività, coerenza e riproducibilità. Un metodo di valutazione semplice consiste nell'effettuare un bilancio di massa per ogni processo, tenendo conto del fatto che l'ammontare degli input deve essere pari al rilascio degli output. E' necessario descrivere dettagliatamente la qualità dei dati per poter

successivamente operare confronti fra studi su sistemi analoghi. Tale descrizione deve definire alcuni parametri quali:

- Fattori relativi ad area geografica, tecnologia e periodo temporale di riferimento.
- Precisione, completezza e rappresentatività dei dati.
- Incertezza dell'informazione.

Durante la raccolta è opportuno usare un consistente numero di fonti come altre analisi LCA, banche dati internazionali o disponibili in software, dati provenienti dalla letteratura, proceedings di convegni e congressi, informazioni disponibili in internet e dati raccolti sul campo presso aziende e industrie.

I dati misurati direttamente dall'autore presso siti industriali sono definiti dati primari (primary data) mentre quelli ricavabili da letteratura e da banche sono dati secondari (secondary data) di cui è bene controllare la fonte e la data di pubblicazione.

Allo stato attuale, il problema della qualità dei dati rappresenta ancora il punto critico della metodologia del ciclo di vita, poiché esistono sia troppi dati di natura confidenziale, sia differenze consistenti se si paragonano banche dati su uguali processi produttivi.

La situazione è complicata dal fatto che le realtà aziendali non sempre possiedono dati dei propri processi organizzati in maniera funzionale all'uso degli stessi in un'Analisi del Ciclo di Vita.

Nella fase di inventario si raccolgono i dati di processo anche per l'energia utilizzata nel sistema produttivo (energia elettrica, idrocarburi) e nel sistema di trasporto (idrocarburi).

Il procedimento per condurre un'analisi di LCA è iterativo, man mano che i dati vengono raccolti, i confini iniziali del sistema potrebbero essere revisionati in accordo con i criteri stabiliti nel campo di applicazione.

La definizione del confine del sistema e l'assegnazione degli input e output ai vari sottosistemi del processo non è sempre semplice da operare. Per agevolare l'indagine LCA, è opportuno suddividere il processo in una serie di sotto-sistemi in cui vengano correttamente assegnati gli input e output, in modo che riflettano le relazioni fisiche insite tra i flussi e i differenti prodotti.

Una volta individuati i flussi in ingresso ed in uscita dal sistema si passa all'aggregazione di questi, tenendo presente che le categorie di dati dovrebbero essere aggregate solo se si riferiscono a sostanze equivalenti e ad impatti ambientali simili.

4.1.6.1 Allocazione dei flussi e dei rilasci

Una analisi di inventario si basa essenzialmente sulla capacità di correlare delle unità di processo all'interno di un sistema con flussi elementari di materiali ed energia. Tuttavia in realtà sono davvero pochi i processi industriali che producono un solo flusso in uscita o che sono fondati sulla linearità tra materie prime in ingresso e in uscita. Nella maggior parte dei casi, infatti, i processi industriali comportano più di un prodotto, senza contare che alcuni prodotti intermedi o di scarto possono essere riciclati e riutilizzati come se fossero materie prime.

La conseguenza di tutto ciò è che i flussi di materiali ed energia, nonché i rilasci nell'ambiente ad essi associati, dovranno essere ripartiti nel sistema di prodotto considerato. Tale processo prende il nome di allocazione e dovrà essere documentato e giustificato per ognuna delle unità di processo considerate e dovrà essere condotto secondo procedure chiaramente definite.

Le procedure di allocazione, che dovrebbero approssimare meglio possibile le relazioni che sussistono tra i flussi in ingresso e in uscita, possono basarsi su:

- Proprietà fisiche: ad esempio in base al peso o al volume dei vari prodotti
- Valore economico di ciascun prodotto.

Se possibile il processo di allocazione dovrebbe essere sempre evitato, ad esempio mediante la divisione delle unità di processo da allocare in due sottoprocessi e collegando i dati in ingresso e in uscita relativi a tali sottoprocessi, oppure tramite l'espansione del sistema in modo che quest'ultimo includa funzioni aggiuntive relative ai coprodotti (JRC, 2010).

4.1.6.2 Interpretazione dei risultati e limitazioni dell'analisi di inventario

L'interpretazione dei risultati di una LCI deve avvenire in accordo con l'obiettivo ed il campo di applicazione dello studio e dovrà comprendere:

- una valutazione della qualità dei dati e un'analisi di sensibilità dei flussi in ingresso e in uscita significativi nonché delle scelte metodologiche adottate, con lo scopo di poter valutare l'incertezza dei risultati;
- l'identificazione delle limitazioni dello studio sempre mediante una valutazione della qualità dei dati e un'analisi di sensibilità;
- una verifica del fatto che le definizioni del sistema e dell'unità funzionale siano appropriate;
- una verifica del fatto che la definizione dei confini del sistema sia appropriata.

Si deve sempre tener presente che i risultati dell'interpretazione di una analisi di inventario si riferiscono a dati in ingresso e in uscita e non direttamente agli impatti sull'ambiente, anche per questo una LCI non dovrebbe essere utilizzata come base per fare dei confronti.

4.1.7 Analisi degli impatti

4.1.7.1 Definizione e finalità

Lo scopo di questa fase è di valutare la portata degli impatti ambientali del sistema trasformando ogni flusso di sostanze della tabella di inventario in un contributo agli impatti stessi mediante gli indicatori di impatto.

Questa valutazione possiede come matrice di base l'inventario dell'oggetto in esame, cioè il complesso bilancio materiale ed energetico in uscita dalla LCI, e permette di ottenere risultati di più immediata comprensione che permetteranno di definire i miglioramenti ambientali da apportare al sistema dello studio.

Nelle suddette norme ISO si legge:

“Il fine della LCIA è valutare i risultati dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI) di un sistema di prodotto, per comprendere meglio la loro significatività ambientale.”

Tale approccio si articola in quattro momenti principali:

- 1. classificazione,**
- 2. caratterizzazione,**
- 3. normalizzazione,**
- 4. ponderazione.**

Per la ISO i primi due momenti, cioè la raccolta dei risultati di indicatore per le diverse categorie d'impatto, sono obbligatori, mentre la normalizzazione e la ponderazione rappresentano elementi facoltativi da essere utilizzati in funzione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio LCA.

4.1.7.2 Classificazione

Durante la classificazione si identificano le categorie d'impatto attribuendo le emissioni inquinanti e i consumi di materie prime, energia ed acqua alle specifiche categorie da essi provocati.

4.1.7.3 Caratterizzazione

Nella fase di caratterizzazione si moltiplica la quantità di una certa sostanza (informazione presente nell'inventario) per la sua relativa attitudine o incidenza a provocare un impatto ambientali per una determinata categoria d'impatto. Generalmente questa incidenza riguarda una sostanza presa a riferimento, emblematica per quella categoria. Ad esempio, per l'effetto serra, la sostanza di riferimento è l'anidride carbonica (CO₂), e si esprimono i contributi di tutti i gas serra in kg di CO₂ equivalente.

Dire per esempio che il metano ha un potenziale effetto serra pari a 25 kg di CO₂ vuol dire che un kg di metano ha un'incidenza sull'effetto serra pari a 25 kg di CO₂. L'impatto totale sull'effetto serra del prodotto analizzato sarà dato dalla somma di tutti i contributi dei gas serra espressi in kg di CO₂ equivalenti.

Grazie alla classificazione e alla caratterizzazione si riduce notevolmente il numero di voci dell'inventario giungendo ad un numero limitato (in genere si considerano da otto a dieci effetti ambientali) che rappresenta il "profilo ambientale" (o "eco-profilo") dell'analisi.

Prima di passare al terzo momento vengono di seguito approfondite le categorie di impatto ambientale maggiormente considerate negli studi LCA.

4.1.7.3.1 Categorie di impatto

Nella maggioranza degli studi LCA vengono considerate principalmente le seguenti categorie d'impatto:

- diminuzione delle risorse (abiotiche e biotiche);
- riscaldamento globale
- impoverimento dell'ozono stratosferico;
- acidificazione del suolo;
- formazione di smog fotochimico;
- arricchimento in nutrienti (eutrofizzazione);
- tossicità umana;
- eco-tossicità;
- uso del territorio.

Queste categorie devono essere considerate soltanto effetti ambientali potenziali, essenzialmente per due motivi: in primo luogo lo strumento LCA non svolge una determinazione puntuale delle emissioni inquinanti in un preciso istante temporale e in un preciso sito, in secondo luogo esistono ancora incertezze nelle conoscenze scientifiche relative ai meccanismi causa-effetto dell'inquinamento globale.

Ciascun effetto ambientale è inoltre caratterizzato da una diversa e specifica sfera di influenza (globale, regionale o locale), come rappresentato in tabella. In particolare, esistono alcuni effetti, come l'eutrofizzazione, la tossicità ecologica e umana, ecc. che presentano una forte dipendenza dalle condizioni del corpo ricevente. E' in questo senso che deve muoversi la ricerca della metodologia LCA, tentando di diminuire le incertezze dovute alla variabilità geografica degli ecosistemi.

SCALA	EFFETTO
Globale	effetto serra impoverimento dell'ozono stratosferico diminuzione delle risorse non rinnovabili
Regionale	acidificazione del suolo eutrofizzazione formazione di smog fotochimico tossicità cronica (ambientale e umana)
Locale	tossicità acuta (ambientale e umana) degradazione dell'area disturbi di tipo fisico (traffico, rumori)

Tabella 7: Principali effetti ambientali divisi per scala di influenza

Diminuzione delle risorse

Considerando la categoria “risorse” nella sua globalità, è necessario effettuare una distinzione netta: quella tra le risorse intrinsecamente rinnovabili, anche definite risorse flusso (acqua, aria, energia solare, energia eolica, risorse biotiche) e le risorse non rinnovabili, denominate risorse stock (combustibili fossili e minerali, sabbia, ghiaia, risorse del territorio in generale).

Con il graduale aumento della conoscenza della loro disponibilità fisica, queste risorse diventano riserve note all'umanità e quindi sfruttate. Naturalmente è chiaro che il volume globale della riserva di una risorsa è limitato rispetto all'effettiva disponibilità fisica in tutta la litosfera.

Nell'ottica di uno sviluppo sostenibile la diminuzione delle riserve, delle risorse flusso e delle risorse stock assume un'importanza primaria e dipende soprattutto dalla loro grandezza fisica e dal loro grado di impiego (nell'indice di questa categoria è ragionevole considerare risorse il cui esaurimento potrebbe accadere in un periodo di cento anni). La letteratura prevede un indice per la diminuzione delle risorse calcolato come somma di valori dimensionali che fuoriescono dal seguente rapporto:

$$D = \text{materia prima utilizzata [kg]} / \text{produzione annuale materia[kg]}$$

Questo indicatore è stato però costruito senza tener presente la riserva della specifica materia prima, ignorando quindi il concetto della limitatezza della risorsa. Un approccio più rigoroso consiste nel confrontare il consumo di risorse con il rapporto riserve/produzione:

$$D = Ci / Ri / Pi$$

dove:

Ci rappresenta il consumo della risorsa considerata;

Ri rappresenta l'ammontare delle sue riserve;

Pi è la produzione annuale della risorsa.

In realtà D offre una stima della disponibilità delle riserve in maniera compatibile con i livelli attuali di consumo e produzione.

Riscaldamento globale

Il meccanismo noto come "effetto serra" si genera perché alcuni gas atmosferici non sono trasparenti (hanno una buona capacità di assorbimento) alla radiazione infrarossa riemessa dal suolo terrestre. Questo comportamento provoca il surriscaldamento di tutto il globo terrestre a causa dell'aumento di temperatura che si verifica negli strati più bassi dell'atmosfera.

Nell'ultimo secolo le attività antropiche industriali hanno fortemente disturbato il ciclo naturale della CO_2 in quanto l'enorme impiego di carbone e petrolio ha provocato l'immissione in atmosfera di circa $5 \cdot 10^{14}$ kg di anidride carbonica, facendone aumentare la concentrazione da ≈ 290 ppm nel 1890 a ≈ 354 ppm nel 1990, con un tasso, negli ultimi decenni, pari a 1,25 ppm all'anno (IPCC).

I gas serra più importanti sono l'anidride carbonica, il metano, l'ozono troposferico e il vapore acqueo. Oltre ai composti già citati, gas serra minori sono: il protossido di azoto (N_2O), i Cloro-Fluoro-Carburi (CFC) e i gas correlati (Idro-Cloro-Fluoro-Carburi, HCFCs).

I quantitativi di gas serra, espressi in kg di CO_2 -equivalenti, sono valutati utilizzando i potenziali di riscaldamento globale (*Global Warming Potentials – GWPs*). Determinati dalla IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), questi potenziali sono stati calcolati considerando sia l'attitudine del gas serra ad assorbire radiazioni infrarosse, sia il tempo di permanenza del gas in atmosfera. Il GWP è quindi la misura, basata sulla concentrazione e sul periodo

di esposizione, del potenziale contributo che una sostanza arreca all'effetto serra, rispetto a quello provocato dalla stessa quantità di anidride carbonica (Tabelle 8). In genere i GWPs sono valutati per diversi periodi di esposizione, "tempi-orizzonte", normalmente pari a 20, 100, 200 anni.

Il potenziale di riscaldamento dell'atmosfera sarà dato dalla seguente relazione:

$$GWP = \sum GWP_i * m_i$$

dove:

GWP_i è il potenziale di riscaldamento globale della sostanza i -esima,

m_i è la massa della stessa sostanza, espressa in kg.

Categoria d'impatto	Sostanza	GWP a 20 anni [kgCO ₂ equival.]
Effetto serra	CO ₂	1
	NH ₃	< 1
	C ₃ H ₈	20

Tabella 8: Alcuni valori di GWP

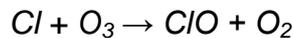
Impoverimento dell'ozono stratosferico

L'ozono (O₃) è presente in atmosfera con una concentrazione notevolmente variabile che va dai 50 ppb a suolo a circa 5 ppm in stratosfera. Nonostante la sua bassa concentrazione, l'ozono stratosferico è un costituente di fondamentale importanza per la vita sulla Terra. Infatti è in grado di assorbire efficacemente la radiazione solare ultravioletta con lunghezza d'onda compresa fra 0,2 e 0,3 µm, letale per le forme di vita terrestri.

L'esposizione eccessiva dell'uomo alla radiazione ultravioletta aumenta il rischio di cancro alla pelle, di depressione del sistema immunitario, di danni alla vista e la frequenza di dolorosi casi di eritema negli individui di pelle bianca. Sugli ecosistemi l'assottigliamento della fascia di ozono minaccia l'equilibrio alimentare oceanico e marino, causa una riduzione dell'azoto atmosferico che influisce sui raccolti agricoli, aumenta la frequenza di piogge acide e smog ed arreca un rapido degrado a diversi materiali.

I principali responsabili della rottura delle molecole di ozono, composti molto stabili che raggiungono inalterati la stratosfera, sono i clorofluorocarburi (CFC)

e gli idroclorofluorocarburi; questi ultimi sono detti halons e comunemente usati come sostanze antincendio. In particolare le molecole di CFCl_3 e CF_2Cl_2 raggiungono stabilmente la stratosfera dove, per azione della radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda pari a $0,23 \mu\text{m}$, si scindono e liberano atomi di cloro. L'atomo di cloro interagisce con l'ozono secondo la reazione:



Dando luogo a una specie instabile, che si chiama ipoclorito (ClO) e a ossigeno molecolare. La molecola di ipoclorito appena formata, reagendo con ossigeno atomico, si dissocia rapidamente perché molto instabile e libera nuovamente atomi di cloro, pronti a distruggere altre molecole di ozono e molecole di ossigeno molecolare. Un singolo atomo di cloro può arrivare a rompere fino a diecimila molecole di ozono prima di tornare sulla troposfera, sottoforma di acido.

L'indice costruito per questa categoria d'impatto è il potenziale di riduzione dell'ozono (*Ozone Depletion Potential-ODP*) da parte della World Meteorological Organization (WMO). Per gli ODP la sostanza di riferimento è il CFCl_3 , anche conosciuto come CFC-11 (Tabella 9).

Come nel caso dei GWPs, anche qui il potenziale complessivo, espresso in kg di CFC-11 equivalenti, sarà dato dalla seguente relazione :

$$\text{ODP} = \sum \text{ODPi} * mi$$

dove:

ODPi è il potenziale di diminuzione dello strato di ozono del gas considerato, mi è la massa del generico gas rilasciato, espressa in kg.

Esistono però ancora incertezze sul fenomeno dell'impovertimento dell'ozono stratosferico; infatti, pur essendo riconosciuto l'effetto dannoso dell' NO_2 e dell' N_2O , non è mai stato possibile determinarne i relativi ODP, perché non sono ancora chiari alcuni meccanismi di causa-effetto.

Categoria d'impatto	Sostanza	ODP a 20 anni [kg CFC-11 equival.]
Diminuzione strato di ozono	CFCI	1
	CFCICFCl ₂	0,59
	CCl ₄	1,23

Tabella 9: Alcuni valori di ODP

Acidificazione del suolo

L'acidificazione è quel fenomeno che si genera in seguito al rilascio al suolo di particolari composti che hanno la capacità di rilasciare protoni; ne consegue l'abbassamento del pH di terreni agricoli, falde acquifere, laghi e foreste. Anche le costruzioni, i monumenti e i materiali in genere riportano danni rilevanti in seguito alle deposizioni acide. Vistosi effetti di acidificazione si sono registrati in Scandinavia e in alcune regioni europee centro-orientali.

Essendo un impatto ambientale regionale, l'acidificazione dipende molto dalla natura degli ecosistemi riceventi, quindi risulta particolarmente complesso valutare tutti i meccanismi che la generano.

I composti responsabili dell'acidificazione sono quelli che, con l'intervento di catalizzatori (per esempio ossidi di ferro e umidità), riescono a generare ioni idrogeno (H⁺), come SO_x, NO_x, NH_x.

La sostanza di riferimento per la standardizzazione è l'anidride solforosa (SO₂). L'indice costruito è il Potenziale di Acidificazione (*Acidificaton Potential – AP*), espresso in kg di SO₂ equivalente (Tabella 10).

Il potenziale di acidificazione del sistema in esame è dato dalla seguente relazione, analoga a quella per il GWP e l'ODP:

$$AP = \sum AP_i * m_i$$

dove per un generico gas:

AP_i è il potenziale di acidificazione della sostanza rilasciata,

m_i è la massa della sostanza, espressa in kg.

Categoria d'impatto	Sostanza	AP [kg SO₂ equival.]
Acidificazione	SO ₂	1
	NO ₃	1,88
	NO _x	0,7

Tabella 10: Alcuni valori di AP

Formazione di smog fotochimico

Lo smog fotochimico (*Photosmog*) costituisce una manifestazione dell'inquinamento atmosferico in ambiente urbano e suburbano. Il termine si riferisce ad un miscuglio di inquinanti, fra i quali predominano gli ossidi di azoto, l'ozono, l'ossido di carbonio, aldeidi e idrocarburi, che si forma nella bassa atmosfera per azione della luce solare sulle emissioni derivanti delle attività umane.

L'espressione "smog fotochimico" è stata coniata per analogia con lo "smog" convenzionale; anche quest'ultimo interessa le aree urbane, ma è formato prevalentemente da anidride solforosa, composti parzialmente combustibili e particolato carbonioso, e si manifesta prevalentemente intorno all'alba nella stagione invernale.

Nello smog fotochimico la luce solare fornisce l'energia di attivazione per numerose reazioni chimiche, di conseguenza esso assume intensità massima nel periodo estivo e nelle ore intorno a mezzogiorno.

In sintesi il fenomeno si articola in quattro fasi:

1. reazione tra i composti organici volatili (COV) e i radicali idrossidi (OH) per formare radicali-perossidi organici;
2. reazione dei radicali perossidi (ad esempio CH₃OO) con monossido di azoto (NO) per formare NO₂;
3. reazione del biossido di azoto, in presenza di raggi solari ($\lambda=0,43 \mu\text{m}$) per formare NO e atomi di ossigeno;
4. reazione degli atomi di ossigeno con le molecole di ossigeno (O₂) per formare ozono.

Durante la seconda fase l'NO₂ può anche reagire con i radicali perossidi e portare alla formazione del perossiacetil-nitrato (PAN) e del perossibenzoil-nitrato (PBzN), molecole altamente irritanti.

I disturbi generati da questo smog, legati essenzialmente alla presenza di ozono, PAN e PBzN negli strati bassi dell'atmosfera, sono irritazione agli occhi, problemi occasionali o cronici all'apparato respiratorio e danni agli alberi e alle coltivazioni (rallentamento della crescita e morte delle piante).

Sebbene lo smog fotochimico sia stato studiato prevalentemente in ambiente urbano, di recente si sono riscontrati processi analoghi in vaste regioni tropicali e subtropicali, determinati dai gas emessi dai periodici incendi delle erbe della savana. In queste aree il fenomeno è favorito dalla radiazione solare che può portare, attraverso le complesse reazioni, ad un livello ozono cinque volte superiore al valore normale.

L'indicatore di conversione utilizzato è il potenziale di formazione di smog fotochimico (*Photochemical Ozone Creation Potentials – POCP*), espresso in kg di etilene (C₂H₄) equivalente .

Il sistema in esame avrà un potenziale di formazione di smog fotochimico derivante dalla seguente relazione:

$$POCP = \sum POCP_i * m_i$$

dove:

POCP è il potenziale di formazione di ozono fotochimico relativo al gas rilasciato,

m_i è la massa del gas rilasciato, espressa in kg.

Eutrofizzazione

L'eutrofizzazione, detta anche fertilizzazione, è un processo di arricchimento di sostanze nutritive di un ambiente acquatico, per mutazione naturale o favorito da scarichi urbani, agricoli e industriali, che spesso determina uno sviluppo abnorme di alghe. Le sostanze di cui si parla sono in particolare fosforo e azoto e sono dette "biostimolanti". Questo fenomeno si verifica soprattutto nei laghi e nei fiumi a corso molto lento, dove queste sostanze tendono progressivamente a concentrarsi. Il graduale accumulo, che si sviluppa in modo naturale (tutte le acque che giungono al corpo d'acqua contengono sostanze nutritive derivanti

dal dilavamento del terreno, dalla presenza di organismi, ecc.), è stato esasperato dall'uomo con l'immissione, in modo massiccio e concentrato nel tempo, di grandi quantità di sostanze contenute nelle acque di rifiuto, oltre che nei fertilizzanti utilizzati in agricoltura.

Nel corpo d'acqua recettore si instaura allora una reazione a catena: le alte concentrazioni favoriscono la crescita, in particolare durante il periodo estivo, di grandi quantità di plancton, costituito specialmente da microalghe. Con le sfavorevoli condizioni climatiche del periodo invernale (scarsa luminosità, bassa temperatura), la flora acquatica formatasi in gran parte muore, precipita sul fondo del corso d'acqua e si decompone inducendo l'assorbimento di forti quantitativi di ossigeno.

Si instaura così un deficit di ossigeno, cioè si sviluppano condizioni anaerobiche che si estendono costantemente in tutta la massa liquida provocando gravi sconvolgimenti nell'equilibrio biologico dell'ecosistema. In particolare si liberano sostanze tossiche (come ammoniaca e idrogeno solforato) con conseguenti morie di pesci ed altri organismi che esigono un ambiente aerobico e si solubilizzano di nuovo le sostanze nutritive alla base del ciclo. Contemporaneamente l'acqua tende a intorbidirsi, limitando la trasmissione della luce in profondità e peggiorando ulteriormente la situazione.

Alcuni effetti negativi dell'eutrofizzazione sono:

- aumento della biomassa di fitoplancton
- sviluppo di specie tossiche di fitoplancton
- aumento della quantità di alghe gelatinose (mucillagini)
- aumento delle piante acquatiche in prossimità dei litorali
- aumento della torbidità e del cattivo odore dell'acqua
- diminuzione della quantità di ossigeno disciolto nell'acqua
- diminuzione della diversità biotica
- scomparsa di alcune specie ittiche pregiate (ad esempio i salmonidi).

Per contrastare l'eutrofizzazione sono necessari interventi che riducano gli afflussi di nutrienti ai corpi idrici (riduzione dei fertilizzanti in agricoltura, depurazione degli scarichi civili ed industriali, trattamento delle acque di scolo delle colture tramite agenti sequestranti ed impianti di fitodepurazione). Si

ritiene che il riscaldamento globale contribuirà a peggiorare il fenomeno dell'eutrofizzazione; il riscaldamento delle acque superficiali infatti fa diminuire la solubilità dei gas (e quindi anche dell'ossigeno).

L'entità del processo di eutrofizzazione dipende fortemente dalla qualità di partenza dell'acqua e dalla natura del corpo idrico; per questo motivo risulta molto complessa la risoluzione della componente spaziale nell'applicazione dell'indicatore specifico della categoria.

La standardizzazione di tale fenomeno si effettua utilizzando un indice che misura l'attitudine delle diverse sostanze emesse a favorire lo sviluppo di biomassa.

Con lo stesso approccio visto per le altre categorie, è stato costruito un potenziale di eutrofizzazione (*Nutrition Potential – NP*), espresso in kg di ione fosfato equivalente (Tabella 11).

Il sistema avrà un potenziale di eutrofizzazione globale dato dalla sommatoria dei diversi NP, come mostra la seguente relazione:

$$NP = \sum NP_i * m_i$$

dove:

NP_i è il potenziale di eutrofizzazione della generica sostanza,

m_i è la massa della rispettiva sostanza.

Categoria d'impatto	Sostanza	NP [kg PO₄³⁻ equival.]
Eutrofizzazione	PO ₄ ³⁻	1
	NO _x	0,13
	NH ₄	0,33

Tabella 11: Alcuni valori di NP

Tossicità umana

Per tossicità umana si intende un fenomeno fortemente complesso riguardante l'esposizione dell'uomo a composti chimici e biologici nocivi per le cellule del suo corpo.

Ad esempio una sostanza altamente tossica per l'uomo è il monossido di carbonio (CO); se respirato anche in piccole quantità il CO si lega all'emoglobina formando un complesso detto carbossi-emoglobina. L'emoglobina, molecola complessa del sangue che ha il compito di trasportare

l'ossigeno, si ritrova così a veicolare il CO in tutte le cellule del corpo umano. In un ambiente chiuso l'aumento repentino di CO (dovuto ad esempio ad una caldaia che non funzioni bene) ha effetti mortali.

Esistono poi sostanze tossiche che si accumulano lungo tutta la catena alimentare perché non sono né degradate né metabolizzate e giungono ad organismi di ordine superiore. E' il caso dei Poli-Cloro-Bifenili (PCB) che possono arrivare all'uomo, ad esempio, dopo l'ingestione involontaria di pesce contaminato. I PCB si depositano nel tessuto adiposo e possono procurare dermatiti, danni al fegato e ai reni e, benché non sia stata accertata la loro cancerogenicità, vi è il sospetto che siano anche potenzialmente oncogeni.

Questa categoria di impatto è complessa e intricata; in letteratura sono stati sviluppati diversi metodi che hanno preso in considerazione il tempo di permanenza degli inquinanti nell'ambiente, la loro tossicità rispetto al tempo di esposizione (basandosi su funzioni dose-effetto) e il loro effetto tossicologico. Il dibattito scientifico, sia in sede ISO che in sede SETAC, ha riguardato la possibilità di introdurre indicatori di categoria sulla salvaguardia nella catena cause-effetto, tra cui il numero di anni di vita persi, noto come YLL (*Years of Life Lost*), il numero di anni di vita con disabilità, noto come YLD (*Years Lived Disabled*) e il numero di anni di vita per rimediare alle inabilità, noto come DALY (*Years Disability Adjusted Life*).

Eco-tossicità

La eco-tossicità interessa gli ecosistemi, acquatici e terrestri, esposti a sostanze chimiche e biologiche nocive. Il destino di questi inquinanti nell'ambiente dipende da:

- bioaccumulazione,
- tassi di degradazione (anaerobica e aerobia, idrolitica e fotolitica),
- deposizione,
- evaporazione.

Generalmente l'ecotossicità è espressa come la percentuale di specie di piante che vivono in una certa area in condizioni ambientali mutate, ovvero in condizioni di stress dell'ecosistema.

Uso del territorio

Il degrado del territorio, nel quale sono inclusi anche disturbi di tipo fisico quali il traffico, il rumore e gli odori, rappresenta una categoria d'impatto piuttosto vasta per la quale sono ancora in atto elaborazioni di standardizzazione.

Gli effetti di un inopportuno uso del territorio consistono nel deterioramento del suolo (erosione, eventuali rischi di frane), nella lenta distruzione degli ecosistemi e nella perdita di qualità ambientale nel paesaggio.

Un approfondimento su tale categoria di impatto è presente nel capitolo 3 di questa tesi di dottorato.

4.1.7.4 Normalizzazione

Terminate le fasi di classificazione e caratterizzazione e ottenuto l'eco-profilo, si passa al terzo step: la normalizzazione. Le norme ISO la definiscono così:

“Calcolo dell'entità dei risultati di indicatore di categoria in rapporto all'informazione di riferimento.”

Infatti, una volta quantificati i differenti indicatori, risulta ancora complesso interpretare l'effettiva grandezza delle varie categorie d'impatto, essendo espresse in unità di misura diverse. Normalizzare vuol dire allora dividere la quantità calcolata di una categoria d'impatto per la quantità totale della stessa categoria che si verifica in uno specifico arco temporale e in una determinata zona. Si ottengono così degli indici sintetici, grazie ai quali si può effettivamente comprendere a quale categoria d'impatto il sistema contribuisce maggiormente. I risultati normalizzati mostrano i problemi ambientali generati dal ciclo di vita di un prodotto secondo il loro “ordine di grandezza”. Solo con la normalizzazione si iniziano a capire le fasi ambientalmente critiche del sistema in esame o si possono iniziare ad operare confronti tra prodotti che hanno a monte tecnologie produttive differenti.

La suddetta norma ISO definisce questa fase “opzionale” per le numerose incertezze legate all'individuazione della validità di un impatto circoscritto nel tempo e nello spazio; incertezze dovute essenzialmente alla carenza di dati statistici.

4.1.7.5 Ponderazione

La ponderazione o pesatura (*weighting across impact categories*) è definita dalle norme ISO nel seguente modo:

“La ponderazione è il processo di conversione dei risultati di indicatore delle diverse categorie d’impatto mediante fattori numerici basate sulle scelte dei valori. Essa può comprendere l’aggregazione dei risultati di indicatore ponderati.”

In questa fase si attribuisce un peso di importanza ai diversi effetti causati dal sistema, in modo che possano essere comparati tra loro per effettuare successivamente una ulteriore aggregazione dei dati.

Con la pesatura si determina alla fine un indice assoluto, il cosiddetto eco-indicatore, che esprime in modo complessivo le prestazioni ambientali del sistema. Questo indice sarà ottenuto dalla seguente relazione:

$$I = \sum w_i * E_i$$

dove:

E_i è l’effetto normalizzato della generica categoria d’impatto,
 w_i è il peso attribuito alla rispettiva categoria d’impatto.

4.1.8 Interpretazione dei risultati

La parte conclusiva di uno studio LCA è l’interpretazione che ha lo scopo di riassumere e discutere i risultati dell’inventario e della valutazione d’impatto. Viene definita nel seguente modo:

“L’interpretazione del ciclo di vita è un procedimento sistematico volto alla identificazione, qualifica, verifica e valutazione delle informazioni contenute nei risultati del LCI e/o LCIA di un sistema di prodotto, nonché alla loro presentazione in forma tale da soddisfare i requisiti dell’applicazione descritti nell’obiettivo e nel campo di applicazione dello studio.”

Questa fase si prefigge di analizzare e riportare i risultati in modo trasparente, di giungere alle conclusioni e di spiegare le limitazioni del sistema/prodotto dello studio.

Nella suddetta ISO questa fase comprende i tre stadi seguenti:

1. identificazione dei fattori ambientali significativi, sulla base dei risultati dell'inventario e della valutazione d'impatto, al fine di proporre eventuali opzioni di miglioramento,
2. valutazioni, cioè verifica della completezza di inputs e outputs, della sensibilità e della coerenza dei risultati,
3. conclusioni, raccomandazioni e redazione di un rapporto finale.

Infine la fase di miglioramento completa il ciclo di analisi e permette di indirizzare il sistema verso un reale obiettivo di eco-sostenibilità, nonché di eco-efficienza.

A livello organizzativo e progettuale, il miglioramento della produzione, attuato sulla base di uno studio LCA, richiede uno sforzo notevole, infatti risulta complicato scegliere tra le varie alternative applicabili al sistema o scegliere l'alternativa che massimizza l'efficienza energetico-ambientale totale.

4.1.9 Software per LCA

Negli ultimi decenni la rapida divulgazione della metodologia LCA è stata accompagnata dallo sviluppo di numerosi strumenti software tali da agevolare l'utente nella costruzione del modello da studiare offrendo fogli di calcolo e visualizzazioni grafiche che, evidenziando i risultati, ne facilitano l'interpretazione e le conclusioni.

Anche se con caratteristiche e livelli di complessità differenti, qualsiasi software LCA ha la principale funzione di supportare l'utente nelle seguenti tre fasi di analisi:

- **Inventario:** essendo la fase più impegnativa, un software LCA ha il vantaggio di offrire una notevole quantità di dati disponibili pertinenti a svariati settori e con ottimi livelli di qualità. Si cerca così di limitare la soggettività nella scelta delle fonti informative.

- **Analisi degli impatti:** la valutazione degli impatti viene effettuata grazie ai differenti modelli di calcolo presenti in questi strumenti. L'utente può scegliere il metodo di valutazione più appropriato al suo studio realizzando anche comparazioni tra i diversi metodi. Inoltre c'è anche la possibilità di considerare soltanto alcune categorie d'impatto oppure solo alcuni specifici stadi del ciclo di vita.
- **Interpretazione:** la fase conclusiva viene agevolata grazie al supporto di svariate visualizzazioni grafiche; inoltre alcuni software consentono anche analisi di sensibilità, simulazione di scenari alternativi ed elaborazioni statistiche dei risultati.

Essendo il mercato del settore in continua espansione, attualmente sono disponibili approssimativamente 35-40 software tools per analisi LCA, differenti tra loro in prestazioni e campi di applicazione.

4.1.10 Database per LCA

Uno studio LCA comporta, sin dall'inizio del lavoro, la gestione di un consistente set di informazioni quantitative riferite al ciclo di vita in esame; naturalmente l'attendibilità di questi dati è propedeutica alla validità dell'intera analisi.

I dati che costituiranno l'inventario possono essere distinti in tre categorie:

1. dati primari, provenienti da rilevazioni dirette,
2. dati secondari, ricavati da banche dati, studi di letteratura o da database presenti nel software,
3. dati terziari, provenienti da stime e da valori medi.

Per quanto possibile i dati dovrebbero essere raccolti da fonti dirette, solo così lo studio LCA potrà vantare un elevato grado di qualità. Nel caso si utilizzino informazioni ricavate da progetti simili o da fonti letterarie è necessario controllare la data di pubblicazione, operare dei confronti ed eventualmente effettuare rielaborazioni.

Agli inizi degli anni '90 il rapido sviluppo di numerosi strumenti software è stato accompagnato dal difficile scambio e confronto di dati tra soggetti differenti,

poiché i vari database utilizzavano metodi e formati diversi sia per la raccolta che per la rappresentazione delle informazioni. A questo problema si è tentato di porre rimedio con la creazione di un formato standard per i dati LCA. Attualmente sono due i formati presenti:

- formato SPINE (*Sustainable Product Information Network for the Environment*), sviluppato dalla CPM (Centre for Environmental Assessment of Product and Material System) dal 1993 al 1995;
- formato SPOLD, sviluppato dalla omonima società SPOLD (Society for Promotion of Life cycle Development) dal 1994 al 1997.

Lo sviluppo di questi formati vuole standardizzare le caratteristiche dei dati per un'applicazione LCA mediante la definizione di una struttura comune che contiene, oltre all'informazione numerica del dato in sé, anche informazioni sulla fonte e sull'applicabilità ad altri studi (*metadati*).

Entrambi i formati rispecchiano i requisiti di qualità dei dati quali la precisione, la coerenza, la rappresentatività e l'identificazione di caratteri spaziali, temporali e tecnologici.

Il formato SPOLD si distingue però per una maggiore complessità e un più alto dettaglio delle informazioni richieste, risulta quindi fruibile soprattutto da esperti di LCA a causa di un linguaggio più tecnico del formato SPINE.

Si riporta di seguito un elenco dei principali database per Life Cycle Inventory. Nell'LCA oggetto di questa tesi sono stati utilizzati dati provenienti dalla banca dati di Ecoinvent (Ecoinvent database v. 2.0, 2007), creata dall'Institute for Energy Technology ETH di Zurigo (CH). Il database Ecoinvent 2.0 contiene dati su quasi 4000 processi appartenenti ai seguenti settori industriali:

- Energia
- Trasporti
- Materiali da costruzione
- Chemicals
- Agenti di lavaggio
- Carta
- Agricoltura
- Gestione dei rifiuti

La documentazione di tutti i processi prevede un'ampia descrizione della tecnologia e in alcuni casi informazioni sull'incertezza dei dati.

4.1.11 GaBi 6

Lo studio di LCA prodotto in questo lavoro di tesi è stato realizzato tramite l'ausilio del software tedesco GaBi 6.

Con GaBi è possibile compiere una valutazione del Ciclo di Vita di un prodotto o servizio con approccio "dalla culla alla tomba", conformemente alla normativa relativa alla metodologia contenuta nella serie ISO 14040.

In GaBi il sistema in analisi viene schematizzato attraverso un diagramma di flusso visualizzato con l'aiuto dei diagrammi di Sankey in cui le caselle di testo rappresentano i processi e le frecce che li collegano i relativi flussi. Il suddetto diagramma, chiamato "plan" in GaBi, rappresenta la descrizione più generale delle fasi del ciclo di vita dell'oggetto dello studio. Ogni fase viene poi descritta attraverso un nuovo plan specifico per quello stadio del ciclo di vita e così via fino a giungere al grado di dettaglio sufficiente per il raggiungimento degli obiettivi stabiliti per lo studio. Questo modello a scatole cinesi rappresenta una descrizione molto intuitiva del sistema in esame: un semplice doppio clic su una delle caselle del diagramma che indica una particolare fase del ciclo di vita permette di visualizzare i processi contenuti in tale stadio.

La semplicità con cui l'utente interagisce con il software e la completezza dei suoi database fanno di GaBi un programma di LCA molto valido. Oltre che un potente strumento per la realizzazione di studi di LCA, GaBi è un ottimo supporto all'eco-design. Infatti attraverso la parametrizzazione dei dati di input permette di ottenere diversi scenari di impatto a seconda del valore scelto per ogni parametro. Tale funzione può essere molto utile in fase di progettazione poiché consente la valutazione in termini di impatti prodotti in riferimento a diverse strategie progettuali.

Il software mette a disposizione dell'utente una banca dati contenente più di 3000 flussi e consente di crearne di nuovi. Anche il database relativo ai processi industriali è molto ricco e flessibile: è infatti possibile modificare alcuni parametri dei processi in modo da poter analizzare rapidamente diversi scenari, tenendo conto della tecnologia disponibile o di quella che si prevede di

introdurre nel processo. Tutti i processi disponibili sono accompagnati da descrizioni sulla qualità dei dati, dalle modalità di raccolta alle tecnologie industriali di riferimento.

Il calcolo dei bilanci ambientali relativi all'intero ciclo di vita del sistema è automatico e può essere riportato secondo modalità differenti:

- variando la tipologia di bilancio (massa, energia, quantità ambientali);
- mostrando i differenti livelli del ciclo di vita e il contributo dei singoli flussi e processi;
- visualizzando non solo i valori assoluti ma anche i contributi percentuali relativi ad ogni flusso o ad un sotto-stadio del ciclo.

GaBi permette di realizzare automaticamente anche le fasi di Normalizzazione e Pesatura e di scegliere tra diversi metodi di valutazione degli impatti:

- ✓ CML 2001
- ✓ CML 1996
- ✓ EDIP 2003
- ✓ ReCiPe
- ✓ TRACI 2.1
- ✓ EcoIndicator 99
- ✓ EcoindicatorI 95
- ✓ UBP 2006

I risultati della valutazione possono essere visualizzati sotto forma di grafici, le cui impostazioni (tipologia, colori, etichette, ecc.) possono essere modificate a piacimento evitando il ricorso ad altri programmi. Tuttavia è possibile importare ed esportare singoli oggetti del software da/ad altri programmi come ad esempio Excel.

4.2 Il Soil Conditioning Index

Il Soil Conditioning Index (SCI) è un modello predittivo delle conseguenze di un sistema di coltivazione sul contenuto di carbonio organico nel suolo (Soil Organic Carbon, SOC), sviluppato dall'NRCS (Servizio di Conservazione delle

Risorse Naturali) dell'USDA (Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti). Il SOC è un indicatore della qualità del suolo (capitolo 3) ed un fattore importante nel processo di sequestro del carbonio atmosferico.

Lo SCI prevede con un approccio quali-quantitativo i cambiamenti del SOC nei primi 30 cm di suolo basandosi sull'effetto combinato di 3 aspetti determinanti sul contenuto di carbonio nel terreno, espresso dalla seguente equazione:

$$SCI = [OM \times (0,4)] + [FO \times (0,4)] + [ER \times (0,2)]$$

Dove OM (organic matter) rappresenta la materia organica da fonte animale o vegetale (letame o sfalci, sovescio) apportata al suolo, FO (field operation) tiene conto delle operazioni di lavorazione del terreno che favoriscono l'immagazzinamento o la perdita di SOC nel terreno, mentre ER (erosion rate) descrive l'influenza degli agenti atmosferici sul processo di erosione del suolo (NRCS, 2003). I tre fattori contribuiscono alla determinazione dello SCI secondo i pesi espressi dai valori numerici nella formula (40% per la sostanza organica (OM) e per le operazioni di campo (FO), 20% per il fattore erosivo (ER) del suolo).

Lo SCI costituisce un importante strumento per il management dei suoli ed è richiesto in diversi standard definiti dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, tra cui gli standard per la definizione delle rotazioni colturali e delle operazioni di campo oltre che nel Conservation Security Program del Farm Security and Rural Investment Act del 2002.

Lo SCI è stato originariamente sviluppato sui risultati di una ricerca condotta dal 1948 al 1959 nella regione del Renner in Texas (USA) ed è stato successivamente esteso a tutto il territorio statunitense e implementato su un foglio excel che ne permette una agevole determinazione.

Lo SCI consente una valutazione dell'effetto di sistema colturale, di una rotazione o di una pratica di gestione di un terreno sul contenuto di SOC attraverso l'ingresso delle seguenti voci di input al modello:

- tessitura del terreno
- colture che compongono la rotazione
- rese medie per ogni coltura

- aggiunte (ad es: sovescio, concimazione con letame) o rimozioni (ad es: aratura per eliminare i residui di coltivazione) di materia organica al terreno
- tutte le operazioni colturali
- grado di erosione

A supporto dell'utente sono state implementate nel software excel per il calcolo dello SCI delle banche dati a cui sono collegati specifici fattori che contribuiscono alla composizione dell'indicatore che permettono di scegliere:

- il sito oggetto di studio (sezione A del software denominata Site information)
- il numero di anni necessari per completare una rotazione (sezione B del software denominata Management information)
- le specie coinvolte nella rotazione (sezione C del software denominata Organic material, in cui va anche espressa la resa della coltura ed eventuali apporti o rimozioni di sostanza organica)
- le operazioni colturali (sezione D del software denominata Field operation)

A margine di queste informazioni che vengono introdotte nel software attraverso la scelta di una delle voci delle banche dati suddette, va introdotto il dato relativo al grado di erosione del terreno dovuto agli agenti atmosferici che deve essere stimato uno dei modelli disponibili in letteratura per la valutazione dell'erosione dei suoli. Nel caso descritto nel capitolo 7 è stato scelto per il calcolo del grado di erosione il modello PSIAC di cui si darà descrizione nel paragrafo che segue (paragrafo 4.2.1).

Una volta introdotti i dati per tutte le sezioni indicate, il software li elabora utilizzando dei fattori specifici per ognuna delle voci di database scelte restituendo in output il valore di SCI per lo scenario analizzato. Parallelamente al valore dello SCI vengono esplicitati anche i valori di Organic Matter (OM), Field Operation (FO) e Erosion Rate (ER) che compongono l'equazione per la definizione del Soil Conditioning Index.

Va sottolineato che lo SCI non è un indice di qualità del suolo. Esso valuta solo un fattore, seppur importante di un sistema complesso come il suolo (SOM) e non stabilisce quale valore di SOM un terreno dovrebbe avere, ma permette di

predire se un particolare sistema di gestione colturale di un terreno avrà un trend positivo o negativo sul contenuto di sostanza organica. I risultati del modello aiutano a progettare rotazioni e pratiche di coltivazione volte al contenimento dell'impoverimento dei suoli e dei fenomeni erosivi. Il software permette infatti di processare diversi "what-if scenarios" al fine di confrontare diverse pratiche colturali tra loro ed individuare quelle che garantiscono un aumento o una conservazione del livello di sostanza organica nel terreno.

Il modello propone un'analisi quali-quantitativa in cui uno SCI negativo indica un'alta probabilità che le pratiche colturali analizzate causino una riduzione della SOM, mentre un indice positivo evidenzia buone probabilità che questa aumenti. Tanto maggiore in valore assoluto è il risultato del modello tanto maggiore è la probabilità di un aumento o di una diminuzione di SOM. Inoltre a valori più elevati in valore assoluto dello SCI corrispondono più marcati accumuli o riduzioni della SOM in seguito alla pratica colturale indagata. Un valore dello SCI vicino allo zero indica invece un sostanziale mantenimento dei valori di sostanza organica nel terreno in relazione ad un particolare pratica colturale.

Va precisato che la valutazione del Soil Conditioning Index non rimpiazza misure dirette di sostanza organica nel terreno o altre analisi degli aspetti di qualità di un suolo come la salinità, la struttura o il livello di compattazione. Tuttavia permette di effettuare delle considerazioni di carattere previsionale su un'importante proprietà del terreno che può essere sfruttata in fase di progettazione del sistema di gestione di un suolo agricolo, cosa che le misure di SOM non permettono di fare essendo valutazioni a posteriori.

4.2.1 Il modello PSIAC

Il modello PSIAC (Pacific Southwest Inter-Agency Committee, 1968) è un modello sviluppato negli Stati Uniti nel 1968 per stimare l'erosione superficiale in un bacino. Esso consiste nel tenere conto di alcuni fattori e di stimarne l'influenza che hanno sul fenomeno erosivo tramite l'assegnazione di un valore tabellato. I fattori considerati e l'intervallo di valori che è possibile assegnare ad ognuno sono:

- geologia del terreno (caratteristiche litologiche, presenza di fratture; tra 0 e 10);
- caratteristiche del suolo (tessitura, pietrosità, contenuto di sostanza organica; tra 0 e 10);
- caratteristiche climatiche ed idrologiche (intensità e natura delle precipitazioni, fenomeni di gelo-disgelo; tra 0 e 10);
- deflusso superficiale (presenza di picchi di piena, portata liquida per unità di superficie del bacino; tra 0 e 10);
- topografia (pendenza; tra 0 e 20);
- copertura vegetale (natura e densità del popolamento vegetale; tra -10 e 10);
- utilizzo del suolo (tra -10 e 10);
- erosione areale (frequenza di segni di erosione sulla superficie del bacino; tra 0 e 25);
- erosione lineare fluviale (tra 0 e 25).

Dalla sommatoria dei valori assegnati si giunge ad un valore compreso tra 0 e 130 a cui corrisponde una classe ed un'erosione superficiale media annuale stimata secondo la seguente tabella:

Valore	Classe	Erosione stimata (m ³ /ha)
>100	1	>14,29
75-100	2	4,76-14,29
50-75	3	2,38-4,76
25-50	4	0,95-2,38
<25	5	<0,95

Tabella 12: Relazione tra valore calcolato ed erosione stimata nel modello PSIAC

5. DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO

5.1 Il progetto Susbiofuel

Il seguente capitolo descrive il progetto Susbiofuel (di cui è parte l'analisi LCA che costituisce il caso studio di questa tesi di dottorato) in tutte le sue fasi, dando particolare enfasi alla fase agricola del progetto che costituisce l'oggetto principale della valutazione ambientale con approccio di analisi di ciclo di vita che verrà descritta nel capitolo 6. In questo capitolo vengono presentati i protocolli di sperimentazione e le innovazioni introdotte dal progetto Susbiofuel ai fini di una più approfondita comprensione dello studio LCA che segue. Quanto ai risultati ottenuti dal progetto che esulano dagli interessi di questa trattazione verranno presentati senza dare dettagli numerici nel rispetto del carattere di riservatezza degli stessi e a tutela delle sperimentazioni ancora in corso.

5.1.1 Introduzione

Lo studio di sostenibilità con approccio LCA oggetto di questa tesi di dottorato fa parte del più ampio progetto finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MIPAAF) e denominato "Studio di fattibilità per la produzione di biocarburanti da semi oleosi di nuove specie e da sottoprodotti o materiali di scarto". Il progetto di durata quadriennale (marzo 2010 - febbraio 2014), indicato da ora in poi con il suo codice di protocollo (Susbiofuel) ha visto la partecipazione dell'Università di Milano, della Società Cooperativa Agri2000 e del laboratorio LCA ed Ecodesign dell'ENEA di Bologna.

Il progetto Susbiofuel ha approfondito gli aspetti agronomici della coltivazione di essenze oleose per la produzione di biomasse energetiche su terreni resi non economicamente idonei alla produzione di materie prime ad uso alimentare dalla presenza di parassiti tellurici quali nematodi, elateridi ecc. (Fase AB). In questa fase del progetto, seguita da Agri2000 Soc. Cooperativa sono stati indagati principalmente 2 aspetti: in primis la possibilità di coltivare a scopi energetici cultivar abitualmente utilizzate per soddisfare altri mercati (tabacco,

Nicotiana tabacum), in secondo luogo la fattibilità tecnica di un approccio agronomico volto a recuperare la produttività del terreno attraverso pratiche ambientalmente ed economicamente sostenibili in considerazione dell'infestazione da nematodi dei terreni scelti per la sperimentazione. Maggior dettaglio sui protocolli di sperimentazione seguiti e sui risultati ottenuti verrà dato nei paragrafi a seguire.

Al fine di garantire la sostenibilità sia tecnica che economica agli oli derivanti dalla sperimentazione agronomica alla fase AB di studio delle colture, il progetto Susbiofuel ha fatto seguire una fase di caratterizzazione chimico-fisica e standardizzazione degli oli ottenibile dai semi (fase C) ed una valutazione dell'idoneità dei prodotti di scarto della spremitura (panello) alla destinazione alimentare animale (fase D). A completamento del progetto è stata svolta una analisi di sostenibilità ambientale (oggetto di questa tesi di dottorato) con approccio LCA (fase E) al fine di evidenziare eventuali hot spots ambientali e sottolineare eventuali vantaggi della metodologia proposta dal progetto Susbiofuel e definire un profilo ambientale per le specie agronomiche innovative nel campo della produzione di biocombustibili (tabacco).

Di seguito verrà data una breve descrizione dei metodi utilizzati e dei risultati ottenuti nel progetto Susbiofuel, dedicando maggiore spazio alla fase AB (fase agronomica) rispetto alle fasi C e D (fasi di caratterizzazione e di trasformazione) in virtù degli obiettivi fissati dalla tesi che si sta descrivendo. Inoltre non sarà possibile dettagliare tutti metodi e dare conto di tutti i risultati ottenuti a causa della loro riservatezza anche in considerazione del fatto che il progetto al momento della stesura di questa tesi non ha visto la sua fine e dunque parte del lavoro svolto non è stato ancora reso pubblico. Si darà però descrizione di tutti gli aspetti del progetto funzionali alla redazione dell'analisi ambientale svolta e alle considerazioni che ne sono scaturite.

5.1.2 Fase AB

5.1.2.1 Introduzione

La prima fase del progetto Susbiofuel è stata denominata *Aspetti agronomici nella coltivazione di essenze oleaginose, in ambienti marginali, utili per la*

produzione di olio vegetale da destinarsi a motori endotermici per la produzione di energia. L'obiettivo di tale fase si concretizza nella individuazione di una soluzione agricola innovativa per la produzione di semi oleosi in terreni resi marginali (non utilizzabili ai fini della coltivazione) dalla presenza di particolari specie infestanti chiamati nematodi. Questa prima parte del progetto ha previsto due steps complementari: l'individuazione di una specie innovativa nel panorama degli energy crops e la definizione di una pratica agronomica che permetta il recupero di terreni resi marginali dall'infestazione di nematodi, in maniera sostenibile ovvero senza fare ricorso a pesticidi di origine chimica. Come precedentemente evidenziato nel capitolo 2, nonostante l'apparente varietà di oleaginose adatte alla coltivazione a scopi energetici, la produzione di olio su scala industriale interessa solo quattro principali specie a livello globale: colza e girasole (prevalentemente in Europa), soia (prevalentemente negli Stati Uniti) e palma (pressoché esclusivamente in Asia). Il panorama delle colture oleaginose tuttavia offre anche varietà di recente sperimentazione che mostrano potenziali promettenti (Tabella 13).

Colture tradizionali	Colture alternative per la produzione di carburante	Colture alternative per la produzione di carburante in fase di studio
Arachis hypogea Brassica napus spp. oleifera Carthamus tinctorius Cocos nucifera Elaeis guineensis Glycine max Gossypium hirsutum Helianthus annuus	Azadirachta indica Balanites aegyptiaca Brassica carinata Calophyllum inophyllum Camelina sativa Corylus avellana Eruca sativa spp. oleifera Hevea brasiliensis Jatropha curcas Linum usitatissimum Madhuca indica Olea europaea Oryza sativa Nicotiana tabacum Pongamia pinnata, P. glabra Ricinus communis Salvadora oleoides Sesamum indicum Simarouba glauca Sterculia foetida Thevetia peruviana B.nigra B.rapa B.campestris C.abysinica	Aleurites fordii Asclepias syriaca Astrocaryum vulgare Canarium ovatum Cerbera odollam Coffea spp. Cucurbita pepo Cuphea viscosissima x C. lanceolata Cynara cardunculus Cyperus esculentus Guizotia abyssinica Hura crepitans Idesia polycarpa Kosteletzkya virginica Melia azedarach Michelia champaca Moringa oleifera Orbignya oleifera Raphanus sativus Sclerocarya birrea Simmondsia chinensis Terminalia catappa B.juncea Eruca sativa spp.

Tabella 13: Panorama colture da olio tradizionali, alternative ed in fase di sperimentazione

Nel progetto Susbiofuel si è proceduto alla sperimentazione in campo della *Nicotiana Tabacum* per verificare che la sua coltivazione a scopo energetico sul territorio italiano abbia delle rese che la rendano conveniente dal punto di vista tecnico-economico e che non necessiti di eccessivi input idrici e di fertilizzazione tali da renderla poco interessante sotto il profilo ambientale ed economico. Il piano ha dunque indagato la fattibilità agronomica del tabacco per la produzione di olio sul territorio italiano secondo un piano sperimentale di cui si darà una rapida descrizione a breve.

Parallelamente l'innovatività del progetto Susbiofuel ha riguardato la riscoperta di una pratica antica come il sovescio (paragrafo 5.1.2.3) per recuperare terreni abbandonati dalla coltivazione a causa di massicce infestazioni di nematodi. I nematodi sono specie parassiti per un gran numero di piante, dotate di un apparato boccale che permette loro di alimentarsi dei succhi vegetali tramite la perforazione delle pareti cellulari delle radici delle piante. Questo provoca sulle piante deperimenti, ingiallimenti e appassimenti delle foglie, formazione di galle sulle radici (Figura 11) che nella maggior parte dei casi possono pregiudicare completamente la produttività di una coltivazione rendendo lo sfruttamento di un determinato terreno non più economico.

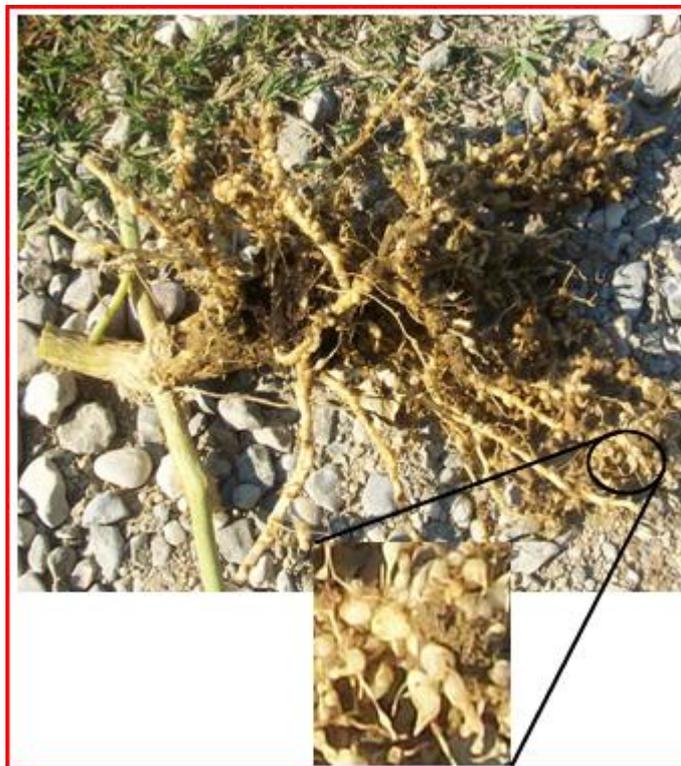


Figura 11: Galle da nematodi sulle radici (Fonte Susbiofuel report, anno di attività 2012)

L'interramento (*sovescio*) di specie con naturali caratteristiche fumiganti, ovvero di contrasto alla proliferazione e sopravvivenza dei nematodi nel terreno, può rappresentare una valida alternativa ai metodi di fumigazione chimica che oltre ad avere un'azione di impoverimento della biodiversità del terreno che favorisce la crescita dei nematodi stessi dopo un breve periodo di quiescenza, sono destinati all'uscita dal commercio in considerazione della loro elevata tossicità (Direttiva 91/414/CE). Al fine di verificare la bontà del sovescio per il recupero di tali terreni marginali per la produzione di specie da olio, il progetto Susbiofuel ha previsto una serie di campi che permettono di confrontare alcuni parametri agronomici e del terreno nel caso di utilizzo di fumigazione chimica e di fumigazione naturale tramite l'interramento di brassicacee coltivate in precessione alle specie oleose in via di sperimentazione. Tali sperimentazioni sono state condotte sia sul tabacco che su specie tradizionalmente utilizzate in campo energetico come il colza, il girasole e la soia.

Prima di procedere con la descrizione del piano di sperimentazione per la fase agronomica del progetto e fornire i risultati ottenuti si offre un breve approfondimento sul tema del sovescio (paragrafo 5.1.2.3) di specie con poteri bio-fumiganti (brassicacee) e sulle caratteristiche del tabacco (paragrafo 5.1.2.2) in riferimento al contesto italiano e alla possibilità di utilizzare tale specie come pianta da olio.

5.1.2.2 Il tabacco

Il tabacco (*Nicotiana tabacum*) è una coltivazione erbacea annuale appartenente alla famiglia delle Solanacee, ampiamente diffuse in Nord e Sud America, comunemente utilizzata per la produzione di foglie dedicate al mercato del fumo (Bianchi C., 2011). I semi sono molto piccolo (fino a 10.000 semi per grammo) e hanno un contenuto di olio compreso tra il 36 ed il 41% con un'alta percentuale di acido linoleico (Giannelos P., 2002). Attualmente la varietà più comune rivolta alla produzione di foglie raggiunge la modesta produzione di seme di 1-1,2 tonnellate di seme/ha (Usta N., 2005) essendo il risultato di una selezione varietale volta a ridurre il quantitativo di seme prodotto in favore di un maggiore sviluppo del fogliame. Recentemente numerose ricerche (Andrianov V., 2009) sono state

svolte al fine di sviluppare una specie di tabacco da olio. Importanti risultati sono stati raggiunti in tal senso (Fogher, 2008) ottenendo una specie di tabacco in grado di produrre fino a 5 t/ha di seme (specie coperta da brevetto sia nazionale (codice RM2007A000129) che internazionale (codice PCT/IB2007/053412)). Questa elevata produttività rende il tabacco da olio competitivo con i più diffusi energy crops come colza, girasole e soia. Inoltre gli scarti dell'operazione di spremitura hanno caratteristiche che li rendono adatti alla valorizzazione energetica o all'alimentazione animale. Approfondimenti in tal senso verranno forniti nel paragrafo 5.1.3, avendo costituito materia di indagine anche per lo stesso progetto Susbiofuel (fase D). Sono state infatti svolte analisi atte a valutare le caratteristiche chimiche del pannello di tabacco coltivato con precessione di brassica per accertare che non vi fossero tracce eccessive di zolfo tale da renderlo non adatto alla alimentazione del bestiame.

Oltre alle caratteristiche di produttività e di sfruttabilità del pannello, il tabacco, rispetto a molte specie emergenti tra gli energy crops, garantisce una più consolidata conoscenza delle pratiche agronomiche (sviluppate per la specie da foglia, ma altrettanto valide). Sotto il profilo tecnico, il tabacco ha il vantaggio di poter utilizzare macchine per la raccolta dei semi già esistenti in commercio ed inoltre alcune ricerche stanno mettendo a punto anche un sistema di semina direttamente in campo che eviti la precoltivazione in serra ed il successivo impianto in campo tramite un supporto spugnoso biodegradabile, in cui siano già presenti nutrienti (fertilizzanti) e disinfestanti indispensabili allo sviluppo del germoglio nelle primissime fasi di vita.

Date le caratteristiche chimico-fisiche, l'olio di tabacco si presta oltre che per la valorizzazione diretta come olio combustibile, anche per la trasformazione in biodiesel o come fonte altamente produttiva di acido linoleico, di glicerina ed acidi grassi. Da non trascurare inoltre un potenziale uso alimentare data la presenza di omega-3 e l'assenza di nicotina nella sua composizione.

5.1.2.3 Il sovescio

Il sovescio è una pratica agronomica che consiste nell'interramento di apposite colture allo scopo di mantenere o aumentare la produttività del terreno grazie all'incremento della materia organica nel suolo, al rallentamento dei fenomeni erosivi, al mantenimento del contenuto di azoto nitrico e all'effetto disinfestante e pesticida (Monaco S., 2008). Il sovescio, prima dell'avvento dei concimi minerali, era una pratica diffusa adottata per contrastare l'impovertimento del terreno dovuto alla coltivazione continua del suolo. Abbandonato per lungo tempo, ha riacquisito interesse negli ultimi anni in relazione alla necessità di sviluppare un'agricoltura a minor impatto ambientale e meno dipendente da risorse non rinnovabili.

Il processo di degradazione cui va incontro il materiale vegetale una volta interrato è svolto dalla pedofauna e dalle comunità microbiche e fungine presenti nel suolo. La decomposizione della sostanza organica è influenzata da fattori ambientali, quali temperatura e umidità del terreno, ma anche dalle caratteristiche della biomassa interrata. In particolare, in rapporto tra carbonio e azoto (C/N) dei tessuti vegetali è fondamentale per determinare il tipo di processo di trasformazione cui il materiale va incontro. Di seguito viene proposto un elenco dei vantaggi conseguibili con la pratica del sovescio.

Incremento materia organica

In una coltura da sovescio lo sviluppo dell'apparato radicale e l'interramento della biomassa vegetale apportano una grande quantità di sostanza organica al suolo, migliorandone nel breve periodo la struttura e le proprietà chimiche e biologiche, soprattutto se questa pratica viene ripetuta per più anni con materiale vegetale molto sviluppato.

L'effetto di questi apporti sulla sostanza organica del suolo varia a seconda della specie utilizzata per il sovescio, della modalità di gestione, del tipo di suolo e delle condizioni climatiche. In particolare, il tipo di lavorazione del terreno influisce in modo determinante sulla quantità di sostanza organica che si accumula nel suolo. Prove sperimentali hanno dimostrato che l'adozione di tecniche di lavorazione conservative (minima lavorazione o

semina su sodo), in associazione all'utilizzo di sovesci maturi, determina il più elevato arricchimento del terreno in sostanza organica.

Contrasto ai fenomeni erosivi

Grazie all'aumento del tenore della sostanza organica e al miglioramento della struttura del terreno, si aumentano nel breve periodo la resistenza del suolo al compattamento, la capacità di infiltrazione e di immagazzinamento dell'acqua e si diminuisce la resistenza del suolo alla lavorazione.

In una monosuccessione o in una rotazione annuale di colture primaverili-estive, l'inserimento di un sovescio autunno-vernino determina un evidente miglioramento delle caratteristiche del suolo, soprattutto in quei sistemi colturali in cui non è possibile effettuare fertilizzazioni organiche, specie con letame.

Per di più, il ricorso alle cover crop riduce la capacità erosiva dei fenomeni meteorologici (vento e soprattutto pioggia) attenuando il fenomeno del ruscellamento superficiale delle acque piovane e diminuendo i fenomeni di trasporto del terreno e dunque permette un efficace contrasto al fenomeno dell'erosione dei suoli.

Mantenimento del contenuto di azoto nel terreno e riduzione del fenomeno della lisciviazione dei nitrati

Nelle rotazioni annuali i sovesci autunno-vernini esplicano un'azione protettiva sulle acque sotterranee, riducendo l'inquinamento da nitrati. Queste coltivazioni, definite "cover crop o catch crop", coprendo il suolo tra la coltura principale e quella successiva trattengono gli elementi nutritivi, in particolare l'azoto, negli strati di terreno esplorati dalle radici delle piante. In questo modo è possibile ridurre la quantità di nitrati trasportati in profondità dalle acque piovane con un effetto positivo per l'ambiente, ma anche con un risparmio sull'utilizzo di concimi azotati. Per di più, il ricorso alle cover crop riduce il fenomeno del ruscellamento delle acque piovane attenua la dispersione di elementi nutritivi (in particolare di fosforo) nelle acque superficiali.

Negli ambienti dell'Italia settentrionale, il periodo autunnale e quello primaverile sono caratterizzati da precipitazioni elevate e dunque nei terreni dove non è presente una coltura, si possono verificare ingenti perdite di

azoto, sotto forma di nitrati, per lisciviazione. Questo fenomeno, variabile in funzione dell'andamento climatico stagionale, è più accentuato in presenza di terreni sciolti (con un'alta percentuale di sabbia) o con una non corretta gestione delle fertilizzazioni, in particolare di quelle organiche. Infatti quando si effettua lo spandimento di reflui zootecnici nel periodo autunnale una parte dell'azoto apportato viene persa, aumentando il rischio di inquinamento delle falde acquifere sotterranee.

Attività biocida

Alcune specie vegetali contengono delle sostanze che una volta interrate nel terreno sono in grado di esplicare una naturale attività fungicida, nematocida e insetticida (di cui si dà maggiore descrizione in seguito essendo di centrale importanza nel progetto Susbiofuel). Il sovescio di queste piante, oltre a fornire tutti i noti effetti benefici dei sovesci convenzionali, come il miglioramento delle caratteristiche chimiche e fisiche dei terreni, minori perdite per dilavamento, minore erosione, consente di combattere alcuni patogeni del terreno, proprio in virtù dell'azione biocida svolta dalle molecole contenute nei tessuti vegetali. Le specie più diffuse, per questo tipo di sovescio, appartengono alla famiglia delle Brassicaceae. Le selezioni operate negli anni su *Brassica juncea*, *Brassica napus* e *Brassica carinata* (descritta successivamente) hanno permesso di ottenere cultivar con un elevato contenuto di glucosinati, sostanze in grado di liberare composti che svolgono una vera e propria azione fumigante del terreno. L'impiego delle piante biocide rappresenta, pertanto, un'importante strategia finalizzata alla riduzione dell'impatto ambientale dell'attività agricola, in modo particolare per la coltivazione delle piante orticole, che richiedono un cospicuo impiego di mezzi tecnici e rotazioni molto strette.

Il sovescio di queste specie è un'efficace alternativa ai mezzi chimici usualmente impiegati per il contenimento dei parassiti terricoli, ovvero fumiganti e geodisinfestanti, sicuramente poco rispettosi dell'ambiente a causa della loro persistenza, della scarsa selettività (poiché agiscono per asfissia), nonché delle elevate dosi di impiego.

Inoltre l'utilizzo di colture da sovescio autunno-vernine può favorire il controllo delle infestanti, mediante la copertura del suolo e quindi la competizione e soppressione di specie indesiderate.

AGROTECNICA DEL SOVESCIO

Preparazione del terreno e semina

La preparazione del terreno per la semina può essere eseguita con modalità differenti a seconda del tipo di terreno, dei residui lasciati dalla coltura precedente, della specie seminata e del risultato che si vuole ottenere con il sovescio. In genere si ricorre ad una minima lavorazione con un erpice, che può essere effettuata anche dopo la semina a spaglio, con l'unica finalità di interrare il seme distribuito, ma si può anche effettuare una "non lavorazione" con semina diretta del sovescio. La semina può avvenire con una seminatrice a file oppure utilizzando uno spandiconcime per la semina a spaglio. In questo secondo caso, la dose di semente deve essere aumentata ed è necessario eseguire una leggera erpicatura per consentire l'interramento del seme, con un erpice a denti elastici o rigidi.

Epoca e modalità di interramento

In generale, l'epoca di interramento ottimale si ha quando la coltura del sovescio è in fase di prefioritura, inizio fioritura. In questa fase, infatti, la pianta ha raggiunto il suo massimo sviluppo ed i suoi tessuti vegetali hanno un contenuto equilibrato in fibre e proteine che ne permetterà una più rapida degradazione. Inoltre, la rimozione nel momento ottimale della coltura da sovescio riduce il rischio che questa si sviluppi successivamente, infestando la coltura principale.

La trinciatura del sovescio si esegue con una macchina trinciatrice ed è finalizzata allo sminuzzamento del materiale vegetale in modo da facilitarne l'interramento e la degradazione da parte degli organismi del terreno. È importante lasciare essiccare il materiale trinciato prima dell'interramento (almeno 48 ore), ma soprattutto non interrarlo troppo profondamente per evitare processi di fermentazione negativi per lo sviluppo radicale della coltura successiva. L'interramento serve a rimescolare il materiale vegetale con gli strati superficiali di terreno (non oltre 10-20 cm) nel modo più

omogeneo possibile e può essere eseguito con una zappatrice, un erpice a dischi o, al limite, effettuando un'aratura superficiale.

Bilancio idrico

Nelle regioni del Nord Italia, in condizioni di normale andamento delle piogge, i sovesci autunno-vernini hanno un impatto positivo sul bilancio idrico di un terreno. Infatti la copertura vegetale nei mesi autunnali e invernali permette una buona infiltrazione nel suolo dell'acqua di precipitazione, grazie alla riduzione della crosta superficiale (minor ruscellamento durante i periodi di pioggia) ed all'aumento della porosità. Infine, il ricorso abituale alla pratica del sovescio, aumentando la sostanza organica e migliorando la struttura del suolo, produce un effetto positivo sulla capacità del terreno di trattenere l'acqua.

Scelta della specie da sovescio

Per adottare la pratica del sovescio con successo è indispensabile individuare la specie che possa determinare gli effetti sperati (miglioramento della struttura del suolo, apporto di azoto, effetto biocida) e che sia conciliabile con il sistema colturale il cui si inserisce.

La famiglia delle brassicacee (di cui si dà più approfondita descrizione in seguito) è quella che meglio risponde alle molteplici necessità individuate dal progetto Susbiofuel precedentemente descritte: contrasto ai fenomeni erosivi soprattutto nel periodo autunno-vernino, apporto di sostanza organica al terreno ed effetto biocida per contrastare la cronica infestazione da nematodi dei suoli oggetto di analisi. Nello specifico la Brassica Carinata è stata individuata come la specie da sovescio più adatta all'interno della famiglia delle brassicacee in considerazione della sua importante attività biofumigante e del fatto che è una specie autunno-vernina che ben si adatta ai climi considerati nella sperimentazione.

LE BRASSICACEE ED IL LORO POTERE FUMIGANTE

Le Brassicaceae o Cruciferae sono una grande famiglia di piante erbacee distribuite in tutti i continenti e in tutti i climi, ma l'areale di massima biodiversità per questa famiglia, in termini di specie, è il bacino del Mediterraneo. Il genere Brassica, che ha dato il nome alla famiglia,

comprende piante erbacee bienni o perenni e comprende da 30 a 60 specie, la cui definizione è complicata dall'esistenza di ibridi naturali e artificiali. Alcuni esempi di specie “capostipite” sono *B. nigra*, *B. oleracea*, *B. rapa*, mentre specie di origine ibrida sono *B. carinata*, *B. juncea*, *B. napus*.

Meccanismo di difesa fisiologico delle Brassicaceae

Ai fini dello studio SUSBIOFUEL è interessante descrivere nel dettaglio il meccanismo di difesa fisiologico delle Brassicaceae. La famiglia delle Brassicaceae è caratterizzata dalla presenza sia negli organi vegetativi che in quelli riproduttivi di composti glicosidici, i glucosinolati (GL). Tali composti sono formati da un gruppo zuccherino, generalmente una molecola di glucosio, un gruppo non zuccherino detto aglicone caratterizzato da un legame S-C=N e da una catena laterale che differenzia in natura oltre 120 diversi glucosinolati e che può essere di natura alchilica, alifatica, benzilica, idrossilica o tiofunzionalizzata. I glucosinolati, in presenza dell'enzima endogeno mirosinasi, in ambiente acquoso vengono rapidamente idrolizzati producendo una serie di metaboliti secondari principalmente rappresentati da isotiocianati, ed in misura minore da nitrili, epitionitrili e tiocianati. Tali composti sono la parte attiva di molti agrofarmaci di sintesi (come il Mancozeb).

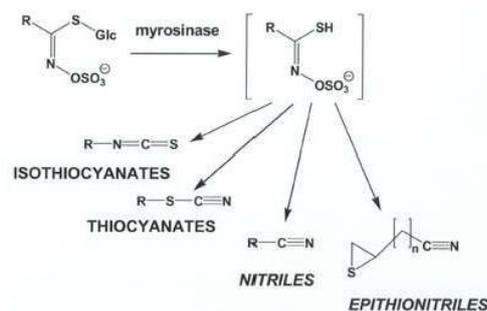


Figura 12: Principali prodotti di idrolisi dei glucosinolati ad opera dell'enzima mirosinasi (Fonte: Report progetto Susbiofuel anno di attività 2012)

Numerosi studi hanno dimostrato che questo meccanismo molecolare si riflette in un sistema di difesa che le Brassicaceae attuano naturalmente nei confronti di insetti, nematodi e funghi del terreno. Infatti i glucosinolati e la mirosinasi risiedono costitutivamente in diversi compartimenti cellulari che a

seguito di una lesione dei tessuti vegetali, dovuta ad esempio alla penetrazione delle larve del nematode nel tessuto radicale, fanno entrare in contatto enzima e substrato e liberano i prodotti di idrolisi dei glucosinolati, tossici per il patogeno (Curto G., 2006).

Le Brassicaceae con un elevato contenuto di glucosinolati nelle radici sono comunemente dette piante-trappola (catch crop). I nematodi, attirati sulla radice dagli essudati radicali, penetrano nelle radici lacerandole e innescando il rilascio di isotiocianati che impediscono loro di completare il ciclo di sviluppo.

Vi sono poi alcune varietà di Brassicacee in cui i glucosinolati si concentrano prevalentemente nella parte epigea offrendo l'opportunità di utilizzare queste piante principalmente per un'azione di tipo biofumigante attraverso la pratica del sovescio. Infatti, per questo scopo, le coltivazioni di Brassicacee in fase di piena fioritura vengono trinciate finemente e immediatamente interrate in accordo con la logica del meccanismo molecolare glucosinolati-mirosinasi descritto nel precedente paragrafo. Alla trinciatura e al sovescio della coltura segue un sufficiente apporto di acqua al fine di evitare la dispersione delle sostanze nematocide nell'atmosfera. L'effetto biofumigante è dovuto alla tossicità degli isotiocianati naturali che vengono a contatto con i parassiti del terreno grazie alla elevata mobilità che manifestano questi prodotti una volta liberati dai residui colturali delle Brassicacee. Tale azione è assimilabile a quella rilevata con l'impiego dei principali prodotti fumiganti di sintesi.

La pratica agronomica del sovescio di Brassicacee per la biofumigazione del terreno è ancora in fase di sperimentale. Risultati incoraggianti sono stati ottenuti in Emilia-Romagna a seguito di approfondimenti ottenuti con l'impiego di farine o pellet o soluzioni derivate dal condizionamento tecnologico di particolari essenze di Brassicacee.

5.1.2.3.1 La Brassica carinata

La Brassica Carinata è una coltura molto adattabile nei climi temperati della regione mediterranea ed è una pianta idonea sia alla semina primaverile che autunnale (Canestrone R., 2011). Si tratta di una specie erbacea annuale molto simile al colza, derivata dall'ibridazione interspecifica di B.

nigra e *B. oleracea* nota anche come “Ethiopian mustard” in quanto originaria degli altopiani etiopici dove è in grado di fornire alte produzioni anche ad altitudini superiori ai 2000 m (Mazzoncini et al., 1998).

In considerazione dell’elevata rusticità la coltura si adatta bene a terreni marginali e declivi consentendo indubbi vantaggi a livello ambientale, quali la riduzione della lisciviazione in inverno ed il contenimento dell’erosione.

Lo schema classico di lavorazione è analogo a quello del colza. La lavorazione principale consiste in un’aratura a 25-30 cm di profondità, seguita da lavorazioni secondarie quali l’erpicatura, in modo da ottenere un letto di semina sufficientemente affinato e adeguato alle ridotte dimensioni del seme. A seconda delle zone e della natura del terreno, è possibile sostituire la lavorazione principale con discissura ed erpicatura creando uno strato lavorato di 15-20 cm senza compattare gli strati più profondi. *Brassica carinata* infatti mostra rispetto al colza migliori risposte alla ridotta lavorazione del terreno (Cardone M., 2003). L’epoca di semina ha un importante effetto sulla produzione in considerazione di una maggiore sensibilità alle basse temperature rispetto al colza. Nel Nord Italia la semina viene consigliata tra metà settembre ed inizio novembre, al Sud, non oltre la fine di novembre, in modo da ottenere un adeguato sviluppo della rosetta prima dell’inverno. La semina viene generalmente effettuata con seminatrice a file, mantenendo una distanza tra le file di 30-50 cm ed impiegando da 6 a 10 kg/ha di seme.

Brassica carinata ha medie esigenze nutrizionali ed è in grado di beneficiare delle fertilità residua delle colture precedenti.

Relativamente al controllo di infestanti, la coltura è molto competitiva nei confronti di numerose specie e riesce a chiudere precocemente le fila soprattutto in semina autunnale. Per quanto riguarda la difesa dai parassiti *Brassica carinata* ha evidenziato una diffusa resistenza a molti comuni patogeni delle Brassicacee. Per questo motivo l’incidenza del danno di eventuali parassiti sembra essere contenibile semplicemente adottando una buona pratica agronomica. Come già detto, *Brassica carinata* possiede un sistema di difesa fisiologico che si basa sul meccanismo chimico glucosinolati-mirosinasi.

Il sovescio della Brassica carinata oltre a fornire un notevole supporto biofumigante, è utile a fornire sostanza organica al suolo, controllare le infestanti e migliorare la fertilità del terreno. Inoltre, la Brassica carinata è utilizzata come catch crop, grazie alla sua capacità di accumulare l'azoto residuo del terreno, riducendo la lisciviazione di nitrati. Inoltre il rapporto C/N non troppo elevato della biomassa (da 14 a 21), permette, una volta interrata, una sua rapida decomposizione, con rilascio degli elementi nutritivi e una buona resa in humus.

Fattore agronomico	Descrizione
Epoca di semina	In condizioni climatiche paragonabili a quelle della realtà italiana è possibile seminare Brassica durante tutto il corso dell'anno fatta eccezione dei mesi più freddi (Novembre-Febbraio). Tuttavia, per l'impiego come pianta da sovescio a scopo biofumigante risulta più efficace una semina nel periodo compreso fra fine agosto-inizio settembre. Questo permette alla pianta di sviluppare una maggiore massa vegetale, con un consistente sviluppo dell'apparato radicale
Densità di semina	8-10 kg seme/ha
Macchinari per la semina	Semina a spaglio o con seminatrice da frumento
Profondità di semina	~ 3 cm
Irrigazione	Irrigazione di soccorso nei mesi più caldi
Epoca di sovescio	In fase di piena fioritura (quando il contenuto in glucosinolati è maggiore)
Tecnica di biofumigazione	Viste le peculiarità del meccanismo di difesa naturale (glucosinolati-mirosinasi), ai fini di una maggiore efficacia, è di fondamentale importanza che in fase di sovescio si abbia una trinciatura molto fine dei tessuti vegetali con un trinciastocchi o una fresa fuori terra. La pianta trinciata deve poi essere interrata mediante erpice a dischi, frese o eseguendo un'aratura superficiale. Immediatamente dopo l'operazione di interrimento il suolo deve essere coperto con un telone PET o con acqua per evitare che il gas sfugga rapidamente. Il terreno, coperto, deve essere lasciato a riposo per circa due settimane.
Coltura in successione	Nelle rotazioni colturali non dovrebbero seguire o precedere altre <i>Brassicaceae</i> .

Tabella 14: Tecnica agronomica per l'impiego di Brassica per il sovescio a scopo di biofumigazione (Fonte: Pinna M., 2007)

5.1.2.4 Il piano sperimentale della fase AB

Dopo questa breve introduzione agli aspetti di maggiore innovatività del progetto Susbiofuel (uso del tabacco come specie da olio e tecnica del sovescio) si fornisce una descrizione del piano agronomico, finalizzata alla corretta e completa comprensione dello studio di analisi del ciclo di vita che costituisce il cuore di questa trattazione (capitolo 6).

La fase AB del progetto Susbiofuel ha visto la coltivazione di 4 diverse specie oleaginose:

- *Glicine max* (soia)
- *Helianthus annuus* (girasole)
- *Brassica nappe* (colza)
- *Nicotiana tabacum* (tabacco)

Tali specie sono state testate in 3 campi di prova siti ad Altedo (Bologna, Emilia Romagna), Vaccolino (Ferrara, Emilia Romagna) e a Santa Margherita di Savoia (Foggia, Puglia). Tutti i siti scelti si presentano come terreni sabbiosi con un basso livello di materia organica e una importante infestazione da nematodi che li ha resi non economicamente produttivi se non a fronte di un massiccio trattamento con fumiganti chimici (1-3-Dicloropropene).

Il progetto Susbiofuel, preso atto del divieto in vigore dal 1 gennaio 2005 che concerne l'utilizzo dell'1-3-Dicloropropene come fumigante in agricoltura (utilizzo concesso poi in deroga per situazioni particolarmente critiche, come già detto nell'Introduzione, capitolo 1) ha proposto una fase di test per un sistema di fumigazione naturale (biofumigazione) tramite il sovescio di specie coltivate in precessione (*brassica carinata*) con particolari caratteristiche di pesticida nei confronti dei nematodi del terreno.

Questo approccio è stato sperimentato su tutte e quattro le specie oleaginose scelte per il progetto prevedendo delle parcelle coltivate ad oleaginosa con precessione di brassica nelle immediate vicinanze di parcelle coltivate ad oleaginosa senza precessione di brassica come mostrato in Figura 13.



Figura 13: Confronto tra campo senza precessione di brassica a sinistra e campo con precessione di brassica, a destra. (Fonte: Progetto Susbiofuel report attività anno 2012)

Oltre a ciò sono stati previste 5 diverse tesi di fertilizzazione per ogni coltura al fine di individuare il livello di input ottimale. Dunque per ogni specie oleaginosa e per ogni sito sono stati realizzate 10 parcelle date dalle combinazioni *precessione di brassica-non precessione di brassica* per ognuna delle 5 tesi di fertilizzazione riportate nella Tabella 15 che riassume il programma sperimentale di campo appena descritto.

Località	3: (Altedo-BO; Vaccolino-FE; S. Margherita di Savoia-FG)
Durata della sperimentazione	3 anni (2010-2012)
Numero colture in successione	2: <i>B.carinata</i> /altra coltura oleaginosa
Numero colture sperimentate	4 (<i>B.carinata</i> ; <i>B.napus</i> ; <i>G.max</i> ; <i>H.annuus</i> ; <i>N.tabacum</i>)
Prove in pieno campo	Ogni sito di prova ha una parte del campo che è seminata con <i>B.carinata</i> (in autunno) e una seconda parte non seminata. A primavera vengono seminate le colture oleaginose su entrambe le parti. Per tutti e 4 gli anni della durata del progetto verranno rispettate le medesime procedure di campo mantenendo fisse le parcelle sull'area individuata negli anni precedenti.
Tesi	5 tesi di concimazione: - Non trattato (NT) - Basso input (NPK_30) - Medio input (NPK_90) - Alto input (NPK_140) - Concimazione organica con pollina (ORGANICO)

Tabella 15: Protocollo di sperimentazione del progetto Susbiofuel

La ricerca agronomica e la relativa sperimentazione di campo sono state condotte eseguendo una serie di azioni:

- sopralluoghi periodici dei siti di sperimentazione con raccolta di documentazione fotografica e osservazioni visive annotate in report specifici;
- rilievo di produttività: biomassa parcellare in termini di peso della pianta verde a pieno sviluppo vegetativo; confronto fra diverse tesi di concimazione e confronto fra prova con sovescio di brassica e prova in assenza di precessione di brassica;
- documentazione fotografica delle caratteristiche macroscopiche dei semi delle oleaginose: confronto fra prova con sovescio di brassica e prova in assenza di precessione di brassica;
- quantificazione dello zolfo totale presente nei semi e nell'olio ottenuti dal raccolto della prova con sovescio di brassica e dal raccolto della prova in assenza di precessione di brassica;
- campionamento del terreno delle parcelle non sottoposte a concimazione (NT): confronto fra prova con sovescio di brassica e prova in assenza di precessione di brassica;
- valutazione dell'effetto biofumigante del sovescio: analisi nematologica dei campioni di terreno con sovescio di brassica ed in assenza di brassica;

La presentazione dei risultati di tutte le variabili misurate nella fase agronomica (fase AB) del progetto Susbiofuel è al momento ancora coperta da riservatezza (in quanto il progetto non ha ancora visto la sua conclusione) ed esula completamente dagli obiettivi di questa trattazione. Quindi di seguito verrà data solo una breve descrizione di carattere qualitativo dei risultati generali conseguiti nei primi 3 anni di sperimentazione.

In Figura 14, ad esempio, viene mostrato l'effetto biofumigante del sovescio di brassica sulle radici dell'oleaginosa in successione. La figura a sinistra mostra le escrescenze (galle) sulle radici mostrate dalla presenza di nematodi nel terreno mentre la figura di destra mostra delle radici in buona salute.



Figura 14: Confronto tra radici di soia coltivata senza precessione di brassica (sono visibili le galle dei nematodi sulle radici) e radici di soia coltivata con precessione di brassica senza danni (Fonte: Progetto Susbiofuel report attività anno 2012)

In generale tutte le parcelle con precessione di brassica hanno mostrato una maggiore produzione di biomassa e una migliore resa in olio. Il tabacco in particolare, data la spiccata sofferenza alla presenza di nematodi nel terreno (Perez M., 1998) ha dimostrato una sostanziale differenza di resa e di benessere generale della pianta nel caso di ricorso o meno al sovescio.

Le analisi effettuate sui vari campioni di terreno rappresentativi delle varie parcelle di sperimentazione hanno registrato maggiori valori di sostanza organica e valori pressoché nulli dell'infestazione da nematodi nel caso di sovescio della brassica.

Infine sia nell'olio che più in generale nei semi ottenuti da parcelle su cui è avvenuto il sovescio della brassica, le analisi hanno riscontrato un livello di zolfo assolutamente nella norma e non sensibilmente maggiore rispetto ai risultati delle parcelle senza sovescio. Tali analisi sono servite a fugare la possibilità che le sostanze biofumiganti a base di zolfo liberate durante il sovescio della brassica venissero assimilate dalla coltura oleaginosa in successione portando i livelli di zolfo nel seme e nell'olio a livelli non adatti rispettivamente alla valorizzazione alimentare delle farine ottenute dal pannello e alla valorizzazione energetica dell'olio.

5.1.3 Le fasi C e D

La fase C e la fase D del progetto Susbiofuel hanno costituito aspetti di minore interesse nell'ottica degli obiettivi di valutazione della sostenibilità della produzione di olio fissati dallo studio di LCA che verrà presentato in seguito (fase E). Ne viene data rapida descrizione ugualmente, allo scopo di inquadrare lo studio nel panorama più ampio del progetto Susbiofuel.

La fase C - *Analisi di laboratorio chimico-industriale: caratterizzazione e standardizzazione delle caratteristiche dell'olio ottenuto dai semi e altri prodotti di scarto* - ha riguardato in primis l'analisi chimico-fisica degli oli ottenuti dalla sperimentazione agronomica. In generale le caratteristiche indagate nei vari oli ottenuti hanno interessato le proprietà riportate in Tabella 16, come per esempio il contenuto di zolfo precedentemente discusso.

Caratteristica	Unità di misura	Valori	
		Min	Max
Contenuto di esteri	% (m/m)	96,5	
Densità a 15 °C	Kg/m ³	860	900
Viscosità a 40 °C	mm ² /s	3,50	5,00
Flash point	°C	120	
Zolfo	mg/kg		10
Residuo carbonioso	% (m/m)		0,30
Numero di cetano		51,00	
Ceneri solforate	% (m/m)		0,02
Contenuto di acqua	mg/kg		500
Contaminazione totale	mg/kg		24
Stabilità all'ossidazione a 110 °C	h (ore)	6,0	
Acidità	mg KOH/g		0,5
Numero di Iodio	gr I ₂ /100 gr		120
Metil estere dell'acido linolenico	% (m/m)		12,0
Metilesteri polinsaturi >= 4 doppi legami	% (m/m)		1
Metanolo	% (m/m)		0,20
Monogliceridi	% (m/m)		0,80
Digliceridi	% (m/m)		0,20
Trigliceridi	% (m/m)		0,20
Glicerolo libero	% (m/m)		0,02
Glicerolo totale	% (m/m)		0,25
Metalli gruppo I (Na+K)	mg/kg		5,0
Fosforo	mg/kg		10,0

Tabella 16: Valori minimi e massimi stabiliti dalla normativa tecnica per il biodiesel (Fonte: EN 14214)

In definitiva questa fase del progetto è servita a dimostrare che gli oli ottenuti in seguito a sovescio della brassica avessero caratteristiche adatte alla loro valorizzazione energetica diretta o in seguito a transesterificazione in biodiesel. Senza entrare nel dettaglio dei risultati, la sperimentazione ha dimostrato buoni valori per tutti gli oli testati, compreso l'olio di tabacco che costituiva uno degli aspetti di innovatività del progetto.

Altro obiettivo della fase C è stato definire una metodologia innovativa per la standardizzazione degli oli vegetali e la loro successiva trasformazione in biodiesel. Essendo il campo di applicazione dell'analisi LCA (di cui si tratterà in seguito) quello degli oli vegetali grezzi, tutti gli aspetti riguardanti queste sperimentazioni della fase C non costituiranno argomento di trattazione. Per eventuali approfondimenti si rimanda al report finale del progetto Susbiofuel di prossima pubblicazione.

La fase D – *Aspetti nutrizionali dei sottoprodotti industriali: caratterizzazione del pannello di estrazione e studio della sua idoneità alla destinazione alimentare* – ha indagato le caratteristiche degli scarti del processo di spremitura del seme (panello) al fine di valutarne la possibilità di valorizzarli ai fini dell'alimentazione animale. Tutti gli scarti di estrazione dell'olio hanno mostrato caratteristiche in linea con le esigenze nutrizionali del bestiame. Anche il pannello di tabacco ha evidenziato idoneità alla destinazione alimentare animale, confermando la profittabilità di una filiera per lo sfruttamento dei semi di tabacco sia sotto il punto di vista energetico (olio) che sotto quello di valorizzazione degli scarti di spremitura (panello).

5.1.4 Fase E

La fase E del progetto - *Sostenibilità ambientale della fase di campo (Fase AB) con approccio Life Cycle Thinking* – costituisce l'oggetto di questa tesi di dottorato. L'obiettivo della fase E è delineare il profilo ambientale dei diversi scenari indagati nella sperimentazione della fase di campo. Come già detto a margine del paragrafo dedicato alla fase AB, nel rispetto della riservatezza dei dati ottenuti del progetto Susbiofuel, i risultati ottenuti non funzionali alla realizzazione dello studio di LCA non verranno divulgati.

Lo studio di LCA in cui si concretizza la fase E è stato ristretto all'analisi di 2 delle 4 specie oleose sperimentate nella fase AB: la soia ed il tabacco. Inoltre allo scopo di permettere delle analisi di confronto tra le due specie e tra queste e la normativa vigente in materia di sostenibilità dei biocarburanti (2009/28/CE), i confini del sistema non sono stati ristretti alla sola fase agronomica, ma sono stati allargati anche alla fase di spremitura fino all'ottenimento dell'olio vegetale grezzo.

6. LCA DEL PROGETTO SUSBIOFUEL

Nel seguente capitolo viene data descrizione dell'analisi LCA effettuata nel contesto del progetto Susbiofuel precedentemente descritto. Lo studio è stato condotto in conformità con la ISO 14040 e la ISO 14044 e con le indicazioni dell'ILCD Handbook. In ogni paragrafo del report di LCA prodotto si rimanda alla sezione delle ISO e dell'ILCD Handbook che descrive le corrette modalità per eseguire l'analisi (riferimento in blu al di sotto del titolo di ogni paragrafo).

Al fine di garantire la riproducibilità dello studio verrà fornita ampia descrizione dei dati utilizzati fatta eccezione per quei dati sensibili del progetto protetti da carattere di riservatezza in quanto non ancora resi pubblici.

Il capitolo è strutturato secondo le modalità previste per la fase di reporting di uno studio LCA suggerita da ISO e ILCD Handbook e dunque prevede una prima parte di definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio (paragrafo 6.1), una parte in cui viene descritta la fase di inventario dello studio (paragrafo 6.2) ed infine una parte che riporta e discute i risultati ottenuti (paragrafo 6.3).

6.1 Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio

6.1.1 Definizione degli obiettivi dell'analisi

[\(Riferimento ISO 14044:2006 capitolo 4.2.2 e ILCD Handbook capitolo 5\)](#)

Obiettivo dello studio di LCA oggetto di questa tesi di dottorato è la valutazione ambientale della produzione di olio combustibile da semi di soia (*glycine max*) e di tabacco (*nicotiana tabacum*). L'analisi vuole indagare sotto il profilo ambientale la produzione di olio combustibile ottenuto dalla coltivazione di una specie poco diffusa a scopi energetici sul territorio nazionale (soia) e di una specie innovativa come il tabacco ed è volta all'individuazione degli hot spots dei due processi di produzione con particolare attenzione alla fase agronomica di produzione dei semi oleosi. Lo studio si pone inoltre l'obiettivo di confrontare

gli effetti di diversi sistemi di coltivazione attraverso la creazione di scenari che considerano due diversi sistemi di fumigazione (chimica e biologica). Lo studio intende inoltre verificare se la filiera di produzione del tabacco produce impatti in linea con quelli delle filiere degli energy crops di più larga diffusione attraverso un confronto con i risultati dell'analisi LCA svolta per la soia e con i valori determinati dal progetto europeo Biograce per l'olio di colza. Altro obiettivo del progetto è verificare la conformità alla normativa vigente in materia (Direttiva RED 2009/28/CE) dell'olio combustibile da tabacco prodotto secondo le pratiche agronomiche individuate dal progetto Susbiofuel.

Lo studio è stato commissionato da Agri 2000 Società Cooperativa ad ENEA nell'ambito del progetto Susbiofuel finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole (capitolo 5) al fine di corredare di una valutazione ambientale la proposta di produzione di specie oleaginose a scopo energetico su terreni resi marginali dall'infestazione di nematodi attraverso una pratica disinfestante che prevede il sovescio di brassica coltivata in precessione alla specie da olio (colza, girasole, soia e tabacco). Il campo di applicazione dello studio è stato ristretto all'analisi di soia e tabacco perché considerate a diverso titolo innovative nel panorama nazionale delle oleaginose coltivate a scopo energetico.

Lo studio è stato prodotto al fine di fornire una valutazione ambientale del progetto Susbiofuel da allegare alla relazione tecnica da produrre a fine progetto e da inviare all'ente finanziatore (Ministero delle Politiche Agricole). L'analisi ha valutato inoltre le pratiche con maggiore carattere di innovatività proposte dal progetto Susbiofuel in un'ottica di ciclo di vita a scopo di ricerca. Dunque in definitiva lo studio è rivolto da una parte al Ministero delle Politiche Agricole e dall'altra alla comunità scientifica nel campo dell'LCA e nel campo agronomico essendo tra gli obiettivi del progetto l'adeguata diffusione dei risultati ottenuti dalla sperimentazione.

6.1.2 Definizione del contesto decisionale

(Riferimento ILCD Handbook capitolo 5.3)

Coerentemente con gli obiettivi delineati nel precedente paragrafo il contesto decisionale dello studio è quello classificato dall'ILCD con la sigla C2 ovvero una situazione di *accounting* che prevede una struttura dell'LCA di tipo attribuzionale (JRC, 2010, capitoli 7.2.3, 6.5.2). Lo studio si caratterizza infatti per un carattere di contabilizzazione degli impatti delle soluzioni proposte dal protocollo di sperimentazione previsto dal progetto Susbiofuel e intende proporre un profilo ambientale per una coltura da olio nuova come il tabacco. Questi risultati possono essere utilizzati per effettuare un controllo della sostenibilità ambientale della soluzione confrontandola con i risultati di altri studi, senza la pretesa di individuare la migliore opzione in un contesto decisionale che farebbe ricadere lo studio in un contesto di tipo A ovvero di studio a supporto delle decisioni. Inoltre l'analisi può essere utilizzata come dataset in situazioni simili al contesto in cui si è sviluppato il progetto confermando la natura di tipo attribuzionale e di contabilità dello studio.

6.1.3 Definizione del campo di applicazione

(Riferimento ISO 14044:2006 capitolo 4.2.3 e ILCD Handbook capitolo 6)

Le analisi LCA prodotte all'interno dello studio sono due: una riferita alla produzione di olio da soia e una alla produzione di olio da tabacco. Il campo di applicazione di tali studi è la produzione di olio combustibile da semi di soia e tabacco coltivati su un terreno reso marginale da una infestazione di nematodi. Sono stati oggetto dello studio la fase agricola di produzione dei semi e la fase di spremitura. Per ognuno dei 2 sistemi analizzati sono stati proposti diversi scenari al fine di riprodurre differenti sistemi di management agronomico (di cui si dettagliata descrizione nel prosieguo del capitolo). Lo studio è stato condotto con l'intento di produrre risultati di LCIA (Life Cycle Impact Assessment) per i diversi scenari a confronto. L'analisi è stata condotta seguendo le indicazioni fornite dalle norme ISO in materia (ISO14040-44, 2006) e dalle disposizioni dell'ILCD Handbook (JRC, 2010), al fine di assicurare la consistenza dello

studio e la riproducibilità dei risultati. Dettaglio delle fonti di dati utilizzate, delle ipotesi fatte, dei principi di allocazione a cui si è fatto ricorso e dell'unità funzionale scelta verrà data nel seguito di questo paragrafo dedicato alla descrizione del campo di applicazione così come previsto dalle norme ISO e dall'ILCD Handbook.

6.1.3.1 Funzione del sistema e unità funzionale

(Riferimento ISO 14044:2006 capitolo 4.2.3.2 e ILCD Handbook capitolo 6.4)

La funzione dei sistemi analizzati è la generazione di energia tramite la combustione dell'olio prodotto. In maniera consistente con la funzione del sistema che si intende indagare e coerentemente con la cosiddetta Direttiva RED (2009/28/CE) precedentemente descritta (capitolo 2) si è scelta come unità funzionale 1 MJ di contenuto energetico dell'olio analizzato. In altre parole tutte le emissioni e gli impatti ottenuti effettuando l'analisi del ciclo di vita sia dell'olio di soia che di tabacco sono state riferite all'unità di energia (1 MJ). Questo permettere di effettuare dei confronti tra le due filiere analizzate oltre che tra queste e i risultati ottenuti da studi che hanno seguito le indicazioni dell'Allegato 5 della normativa sopracitata. Inoltre tale scelta dell'unità funzionale consente di verificare la conformità delle emissioni di CO₂ prodotte dai due sistemi analizzati alla normativa vigente (riduzione delle emissioni del 35% rispetto all'equivalente fossile, del 50% dal 1 gennaio 2017 e del 60% dal 1 gennaio 2018 per impianti che entrano in produzione dopo il 1 gennaio 2017).

6.1.3.2 Multifunzionalità del sistema e criterio di allocazione degli impatti

(Riferimento ISO 14040:2006 capitolo 4.2.3.1 e ILCD Handbook capitolo 6.5.3)

La produzione di olio da soia è un classico esempio di multifunzionalità di un sistema. Infatti la coltivazione della soia a scopo energetico genera due prodotti: l'olio ed il pannello (ricco di sostanze proteiche) per la produzione di farine per l'alimentazione animale.

Come evidenziato nel capitolo 5, il progetto Susbiofuel ha mostrato delle evidenze riguardo la possibilità di utilizzare gli scarti del processo di spremitura dei semi (panello) di tabacco per la produzione di farine con un buone proprietà

nutritive. Anche il sistema di produzione dell'olio di tabacco presenta dunque un modello multi-output. In entrambi i casi la multifunzionalità è stata superata tramite il metodo dell'allocazione degli impatti coerentemente con il contesto decisionale già descritto. Coerentemente con le indicazioni della Direttiva RED è stato utilizzato un'allocazione basata su un criterio energetico: gli impatti sono stati ripartiti tra i diversi output del sistema (olio e pannello) sulla base del loro contenuto energetico.

Oltre ad essere quella indicata dalla normativa, l'allocazione energetica pare tra le possibili (criterio di massa, criterio economico) la più consistente con l'unità funzionale scelta e con gli obiettivi dello studio.

6.1.3.3 Confini del sistema e cut-off applicati

(Riferimento ISO 14044:2006 capitolo 4.2.3.3.1., 4.2.3.3.2 e ILCD Handbook capitolo 6)

I due sistemi sono stati analizzati con un approccio dalla culla al cancello, non avendo considerato le emissioni dirette legate alla combustione del biocarburante nel modello, anche coerentemente con la RED che indica pari a zero le emissioni di gas serra imputabili alla fase di combustione di un bioliquido.

Dunque sono stati inclusi all'interno dei confini del sistema:

- la produzione di tutte le materie prime e i flussi di energia utilizzati nel sistema;
- la fase agronomica di produzione del seme;
- la fase di spremitura del seme.

Trattando gli aspetti di completezza dello studio, va precisato che non sono stati considerati all'interno dei confini del sistema, ricorrendo ad un cut-off coerente con gli obiettivi dello studio precedentemente delineati:

- i trasporti delle materie prime. Mentre sono stati considerati dei trasporti medi degli intermedi di lavorazione (ad esempio il trasporto dei semi dal campo di coltivazione al luogo di spremitura). Non sono stati considerati i trasporti legati ad un'eventuale sistema di distribuzione;
- la produzione e lo smaltimento degli imballaggi
- lo stoccaggio e la movimentazione interna di prodotti e coprodotti

- lo smaltimento dei residui di coltivazione sia per il caso della soia che per il caso del tabacco.

6.1.3.4 Metodo di valutazione di impatto scelto

(Riferimento ISO 14044:2006 capitoli 4.2.3.4, 4.4.2.2, 4.4.5 e ILCD Handbook capitolo 6.7.2)

Il metodo di valutazione scelto è il metodo CML 2001 aggiornato al Novembre 2010 (Guinée J., 2001 e <http://www.cml.leiden.edu/>) sviluppato dall'Istituto di Scienze Ambientali della Facoltà di Scienze dell'Università di Leiden (Paesi Bassi).

Il metodo CML 2001 prevede le seguenti categorie di impatto di tipo midpoint:

- Global Warming Potential
- Acidification Potential
- Eutrophication Potential
- Ozone Layer Depletion Potential
- Abiotic Depletion Potential
- Abiotica Depletion fossil
- Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential
- Human Toxicity Potential
- Marine Aquatic Ecotoxicity Potential
- Photochemical Ozone Creation Potential
- Terrestrial Ecotoxicity Potential

Tra le categorie elencate verrà data maggiore enfasi ai risultati riferiti al Global Warming Potential in virtù dell'importanza conferitagli a livello normativo nel campo dei biocarburanti ed anche in considerazione del livello assegnato al metodo utilizzato per calcolare gli impatti secondo la classificazione proposta dall'ILCD nel manuale *Recommendations for life impact assessment in the European context* (JRC, 2010). Infatti per il metodo *Baseline model of 100 years* dell'IPCC è stato espresso un giudizio "*recommended and satisfactory*" corrispondente al livello I delle III categorie proposte:

- categoria I: *raccomandato e soddisfacente*
- categoria II: *raccomandato ma per il quale sono necessari dei miglioramenti*
- categoria III: *raccomandato ma da applicare con cautela*

Infine la classificazione propone un giudizio (*interim*) assegnato a quei metodi che sono considerati i migliori per il calcolo degli impatti di una determinata categoria ma che sono ancora troppo immaturi per poter essere raccomandati come metodi da utilizzare per quella categoria di impatto. Ad esempio secondo l'ILCD rientra in questa categoria il già citato (capitolo 3) metodo sulla misura del carbonio organico nel terreno proposto da Mila i Canals per la valutazione dell'impatto legato all'utilizzo del suolo.

Verrà fornita anche una rapida panoramica dei risultati ottenuti con il metodo ReCiPe (<http://www.lcia-recipe.net>) per la categoria di impatto sull'uso del suolo (Land use impact) nel capitolo 7.

Per un approfondimento sui tre metodi di valutazione sopracitati si rimanda ai riferimenti bibliografici proposti.

6.1.3.5 Fonti e qualità dei dati utilizzati

(Riferimento ISO 14040:2006 capitolo 4.2.3.6.2 e ILCD Handbook capitoli 6.8, 6.9)

I dati utilizzati nello studio sono per la maggior parte dati primari derivanti dai protocolli di sperimentazione del progetto Susbiofuel e dai suoi risultati. La sperimentazione di tipo parcellare effettuata in campo offre dei dati che non presentano problemi di scaling-up in quanto le prove, seppur condotte su superfici ridotte, prevedono gli stesi quantitativi in input ed in output di coltivazioni su superfici più estese. Per tutti i processi di background sono stati invece utilizzati processi appartenenti alla banca dati svizzera di Ecoinvent, versione 2.0 (Ecoinvent, 2007).

La rappresentatività geografica, tecnica e temporale è garantita per tutti i dati di tipo primario. Per quanto riguarda i dati secondari, un'attenta revisione dei processi utilizzati ha permesso di adattare i datasets utilizzati alla specifica situazione analizzata ad esempio modificando alcuni parametri come nel caso delle lavorazioni del terreno o creando nuovi processi di database come nel caso delle emissioni in aria legate ai fertilizzanti (maggiori approfondimenti verranno forniti nella fase di inventario, paragrafo 6.2).

Non è stata effettuata una valutazione della precisione dei dati utilizzati, anche se essendo stati mutuati da protocolli sperimentali ed incrociati con i disciplinari per l'agricoltura della regione Emilia-Romagna i margini di variabilità dei dati in

input possono considerarsi pressoché nulli. Diverso discorso andrebbe fatto per la variabilità dei risultati e dei dati di output del sistema (ad es: rese della fase agricola) data l'influenza del clima, ampiamente variabile di anno in anno. Tuttavia aver considerato dati ottenuti da sperimentazioni di tre anni può aver ridotto il margine di errore in maniera sensibile rispetto all'utilizzo di dati relativi a un solo ciclo di sperimentazione di durata annuale.

6.2 Analisi di inventario

(Riferimento ISO 14044:2006 capitoli 4.2.3.3.2, 4.3.2.1. e ILCD Handbook capitolo 7)

Di seguito verrà fornito l'inventario dello studio LCA sia per la soia che per il tabacco. In entrambi i casi si darà dettagliata descrizione di tutti i dati utilizzati, dei metodi di allocazione e delle ipotesi alla base di ognuno degli scenari considerati (fumigante naturale, fumigante chimico, ricorso o meno alla serra per la crescita delle piantine di tabacco prima dell'impianto in campo aperto). Per ognuno degli scenari creati sia per la soia che per il tabacco verranno esplicitati tutti i sotto-processi utilizzati ed al fine di evitare continui richiami a paragrafi precedenti, tutti i processi verranno descritti in ogni scenario anche nel caso in cui questi siano già stati presentati precedentemente. Questa struttura permette di fornire una fotografia completa di uno scenario modellizzato nel paragrafo che lo descrive senza dover far riferimento a informazioni fornite nei paragrafi dedicati ad altri scenari. In questa maniera il lettore è libero di raccogliere informazioni su ognuno degli scenari in maniera indipendente senza dover trovare riferimenti negli altri.

6.2.1 Inventario della produzione di olio da semi di soia

Lo studio ha previsto per la produzione di olio combustibile da semi di soia il confronto tra 2 scenari indagati dal progetto Susbiofuel:

- La coltivazione di soia con precessione di brassica trinciata e interrata nel campo di coltivazione al fine di combattere l'infestazione da nematodi senza il ricorso a pesticidi di sintetizzazione chimica (1-3-Dicloropropene);

- la coltivazione di soia secondo un protocollo tradizionale che prevede l'utilizzo di pesticidi di origine chimica (1-3-Dicloropropene).

Tutte le voci di input e di output degli scenari suddetti verranno elencanti nei prossimi due paragrafi.

6.2.1.1 Scenario coltivazione soia con precessione di brassica

Lo scenario di coltivazione della soia preceduto dal sovescio della brassica cresciuta sullo stesso terreno ricalca il protocollo previsto dalla sperimentazione del progetto Susbiofuel. Il ciclo di vita di questo scenario prevede 4 fasi riportate in Figura 15 e dettagliate con tutti i valori di input ed output in seguito:

- la fase di coltivazione della brassica (in figura come *green manure*)
- la fase di coltivazione della soia
- il trasporto dei semi di soia al luogo di spremitura
- la fase di spremitura dei semi



Figura 15: Fasi del ciclo di vita della soia con precessione di brassica

Il diagramma di flusso, che rappresenta una schermata del modello costruito nel software Gabi (descritto nel paragrafo 4.1.11), mostra lo schema logico del processo analizzato. La coltivazione della brassica precede la coltivazione della soia al fine di sfruttarne i suoi poteri biofumiganti ed evitare l'uso di pesticidi di formulazione chimica (Mancozeb, 1-3-Dicloropropene). Successivamente i semi di soia prodotti in campo vengono trasportati al luogo di spremitura dove avviene l'estrazione dell'olio e la sua separazione dal pannello.

6.2.1.1.1 Coltivazione della brassica

Il plan costruito in Gabi per modellizzare nel software la coltivazione della brassica considera i dati utilizzati nel progetto Susbiofuel che a sua volta ha organizzato il processo seguendo i dettami del disciplinare sull'agricoltura dell'Emilia Romagna, rivisitato in un'ottica di bassi input di coltivazione.

In Figura 16 il diagramma di flusso del processo di coltivazione della brassica:

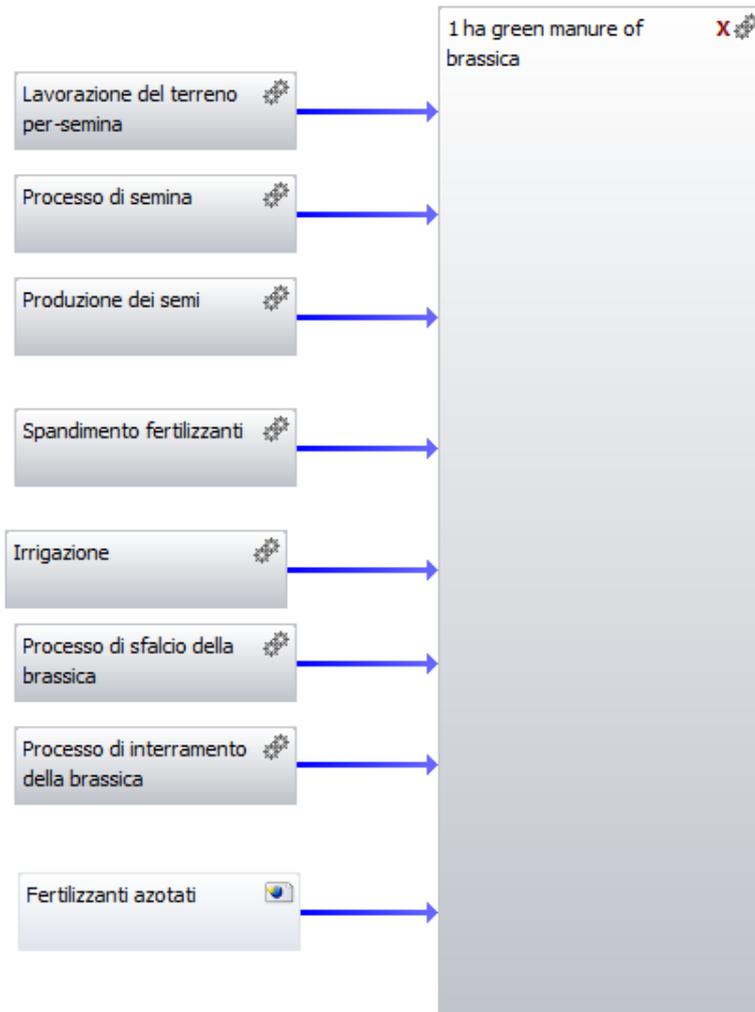


Figura 16: Diagramma di flusso della fase di coltivazione della brassica

Il processo prevede:

- la lavorazione del terreno pre-semina
- il processo di semina
- la produzione dei semi in input
- il processo di spandimento dei fertilizzanti
- il processo di irrigazione
- il processo di sfalcio della brassica
- il processo di interrimento della brassica sfalciata
- la produzione e le emissioni dirette in aria derivanti dall'utilizzo di fertilizzanti azotati.

Il processo è stato creato utilizzando come flusso di riferimento 1 ettaro (1 ha) coltivato a brassica e tutti i processi di banca dati scelti tra quelli disponibili in Ecoinvent per modellizzare i processi di lavorazione del terreno, sono stati scelti ed adattati per avere lo stesso consumo di carburante indicato dal disciplinare per la coltivazione della brassica in Emilia Romagna.

I dettagli su tutti i processi che costituiscono la coltivazione di 1 ha di brassica sono riportati di seguito.

Lavorazione del terreno pre-semina

La lavorazione pre-semina del terreno prevede per la brassica una aratura a media profondità, a cui segue un ammutinamento e un pareggiamento del terreno. Nel banca dati Ecoinvent è stato individuato come coerente con le lavorazioni suddette il processo *CH: Tillage, harrowing, by spring tine harrow* considerato per il territorio svizzero (CH). Data l'omogeneità delle modalità di lavorazione e il comune grado di meccanizzazione delle operazioni agricole il dato è stato ritenuto rappresentativo a livello sia geografico che tecnico e anche le misurazioni fatte per ottenere il dataset (1991-2001) sono sufficientemente recenti da renderlo rappresentativo a livello temporale. Il flusso di riferimento di tale processo è 1 ha e dunque il processo è stato richiamato per 1 volta nel processo costruito per modellizzare la coltivazione della brassica dato che i flussi sono stati normalizzati tutti ad 1 ha coltivato a brassica.

Processo di semina

La semina della brassica avviene attraverso un processo meccanizzato che prevede il ricorso ad apposite macchine seminatrici. Il dataset scelto è stato il processo denominato *CH: Sowing* nella banca dati di Ecoinvent. Per tale processo valgono le considerazioni sulla rappresentatività del dato fatte al punto precedente per il processo di lavorazione del terreno pre-semina. Il processo in questo caso però è stato richiamato 1,8 volte al fine di rendere coerenti i consumi contenuti nel dataset *CH: Sowing* (3,82 kg/ha) con i dati di consumo di diesel ricavati dal prontuario dell'agricoltura della regione Emilia Romagna che ammontano a 6,8 kg/ha.

Processo di produzione dei semi di brassica

Come indicato nella normativa europea vigente (Annex V, direttiva 2009/28/CE) per la determinazione delle emissioni di CO₂ dei biocarburanti nell'inventario della fase agricola va considerata anche la produzione dei semi necessari per la coltivazione. Prevedendo il progetto Susbiofuel, la coltivazione di brassica come parte integrante del processo di coltivazione della soia per la produzione di olio combustibile, anche la produzione di semi di brassica va considerata. Poiché il disciplinare per la coltivazione indica la semina in file distanti 30-35 cm una dall'altra e 9-10 kg per ettaro di seme, si è ritenuto opportuno prendere il valore superiore con un approccio conservativo (10 kg). Il processo utilizzato è stato *CH: Rapeseed IP, at regional storehouse* che descrive la produzione di seme da Brassica Napus (colza) e non da brassica carinata. Tuttavia gli input di coltivazione, le operazioni necessarie e le rese sono assolutamente identiche tra le due specie tanto che l'utilizzo di questo dataset per il modello della brassica risulta un'ottima approssimazione.

Processo di spandimento dei fertilizzanti

Per quanto riguarda il processo di fertilizzazione si possono considerare 3 contributi: il processo di produzione dei fertilizzanti, il processo di spandimento degli stessi e le emissioni derivanti dal loro utilizzo. Nel processo *spandimento dei fertilizzanti* si considera il primo contributo e si rimanda al processo denominato *Fertilizzanti azotati* in Figura 17 per gli altri due.

Il processo utilizzato (*CH: fertilizing by broadcaster*) al pari di tutti quelli presi da banca dati è parte del database Ecoinvent e valgono le stesse considerazioni fatte per i precedenti essendo anch'esso riferito al territorio svizzero e frutto di una raccolta dati effettuata nel periodo 1991-2001. Tale processo avendo come flusso di riferimento il valore di 1 ha è stato introdotto nel plan coltivazione brassica con un fattore 1.

Processo di irrigazione

Nell'ottica di produrre brassica a scopo di sovescio e bassi input di coltivazione l'acqua fornita è stata pari a 50 m³/ha. Infatti tale quantitativo d'acqua rappresenta pressoché solo l'acqua necessaria a coprire completamente il terreno subito dopo la pratica del sovescio. Infatti come già spiegato nel capitolo 5, al fine di avere una più efficace azione fumigante il terreno viene

ricoperto d'acqua per evitare che le sostanze biocide evaporino e vengano disperse in aria. Il progetto ha fatto ricorso a tale soluzione per sostituire l'utilizzo nella pratica tradizionale di un telone in plastica applicato per ottenere lo stesso risultato, ma con tutti gli inconvenienti ambientali legati alla produzione e allo smaltimento della copertura stessa. Il processo di database utilizzato è stato *CH: irrigating* di Ecoinvent che oltre a prevedere il consumo di acqua, considera i consumi energetici correlati e tutte le strutture ed i macchinari necessari per l'irrigazione. Considerando che tale processo di database prevedeva un apporto di acqua pari a 1200 m³/ha, questo è stato introdotto nel plan di coltivazione della brassica con un fattore pari a 0,042. Valgono anche per questo processo le considerazioni fatte per gli altri in relazione alla rappresentatività del dato.

Processo di sfalcio della brassica

Per il processo di trinciatura della brassica è stato scelto il dataset denominato nella banca dati Ecoinvent *CH: Mowing by rotor mower*, moltiplicato per 3 per coerenza con i consumi indicati dal disciplinare (8-10 kg di diesel per ettaro contro i 3 kg/ha indicati dal processo di Ecoinvent).

Processo di interrimento della brassica sfalciata

Il processo interrimento (sovescio) della brassica viene effettuato attraverso una macchina frangizolle a dischi che dal disciplinare può avere un consumo di diesel per ettaro variabile tra i 6,5 kg/ha e i 12 kg/ha. Con un approccio conservativo si è utilizzato con un fattore pari ad 1 il processo di Ecoinvent *CH: tillage, harrowing, by rotary harrow* che prevede un consumo di diesel pari a 11,5 kg/ha. Il processo come gli altri processi di lavorazione del terreno considera anche la produzione di strutture e mezzi secondo una quota parte allocata in base al consumo considerato.

Processo di produzione dei fertilizzanti azotati e generazione di emissioni in aria legate al loro spandimento

A completamento del plan di coltivazione della brassica è stato inserito anche un processo costruito ad hoc che includesse il processo di produzione dei fertilizzanti utilizzati (da database Ecoinvent) e le emissioni in aria dei composti dell'azoto legati alla ripartizione in aria di parte del fertilizzante speso.

Il processo riguardante le emissioni è stato costruito seguendo la metodologia proposta dall'IPCC nel 2006 (IPCC, 2006) e facendo riferimento all'approccio di (Fantin V., 2011). In Figura 17 una schermata del software Gabi che rappresenta il processo costruito per modellizzare la produzione di fertilizzanti azotati e le emissioni in aria correlate secondo la metodologia proposta dall'IPCC ripresa da Fantin.

Inputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ RER: urea, as N, at regional store	☿ Mass	1	kg
Flusso			
<hr/>			
Outputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ Fertilizzanti azotati [mineral ferti	☿ Mass	1	kg
➔ Ammonia [Inorganic emissions to air]	☿ Mass	0,121	kg
➔ Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	☿ Mass	1,33	kg
➔ Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	☿ Mass	0,0194	kg
Flusso			

Figura 17: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria e acqua) dei fertilizzanti azotati

Il processo in questione è stato costruito in riferimento ad 1 kg di fertilizzante utilizzato, ma è stato poi utilizzato nel plan della coltivazione della brassica con un fattore 45 dato che l'input di fertilizzazione previsto dal protocollo Susbiofuel per la brassica prevede un apporto di 45 kg di fertilizzanti azotati come N, urea nello specifico, modellizzata nello studio come *RER: Urea, as N, at regional storehouse*. In questo caso il dato di Ecoinvent ha una rappresentatività geografica di carattere europeo (RER) e si riferisce all'anno 1999. Considerando il prodotto e l'andamento recente della sua evoluzione tecnica, si ritiene il dato, seppur riferito a più di 10 anni fa, ancora rappresentativo a livello sia temporale che tecnologico.

La figura di seguito costituisce una sintesi di quanto detto precedentemente e rappresenta tutti i processi utilizzati nel software Gabi per realizzare il processo di coltivazione di 1 ettaro di brassica.

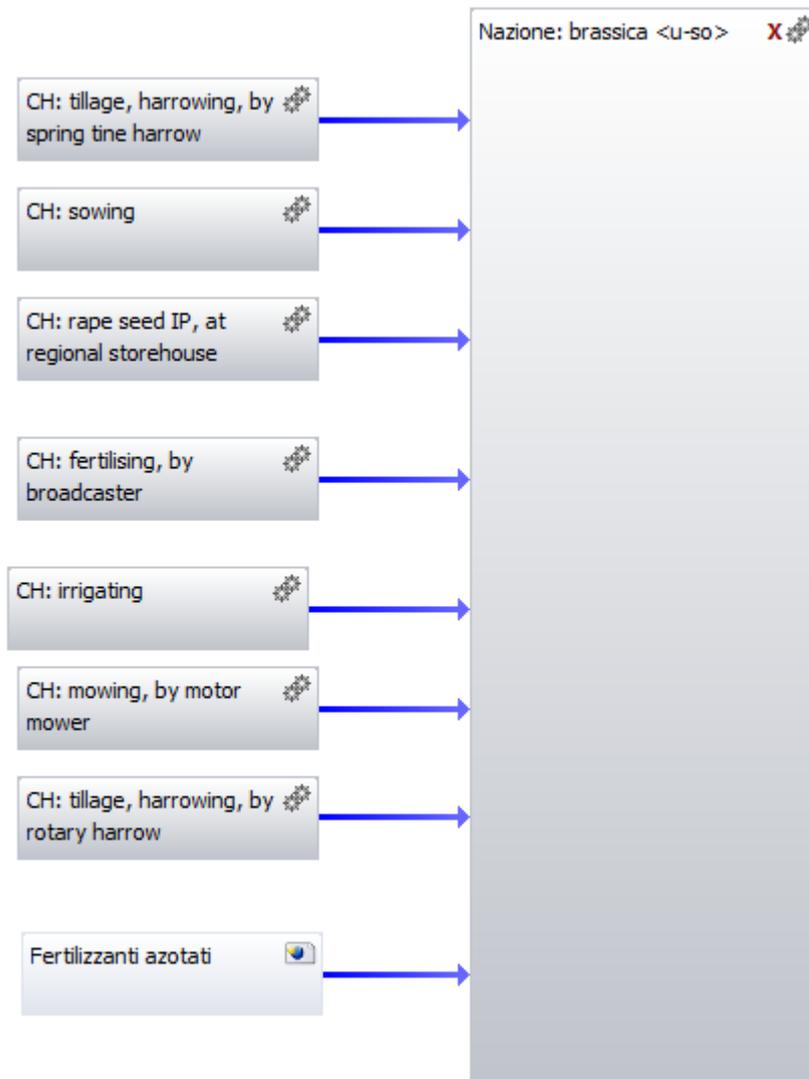


Figura 18: Diagramma di flusso della coltivazione della brassica che mostra i processi di database utilizzati

6.2.1.1.2 Coltivazione della soia

In questo paragrafo si darà descrizione dettagliata dei processi che costituiscono il plan di coltivazione della soia in seguito al sovescio della brassica. Questa precisazione è importante perché nello scenario che non prevede la precessione della brassica il processo di coltivazione della soia ha un protocollo diverso.

La precessione della brassica ed il suo successivo interrimento permettono nella coltivazione che segue di evitare l'aratura del terreno e trattamenti pre-semina, poiché possono considerarsi sostitutive di queste le operazioni necessarie alla pratica del sovescio.

In Figura 19 il diagramma di flusso del processo di coltivazione della soia.

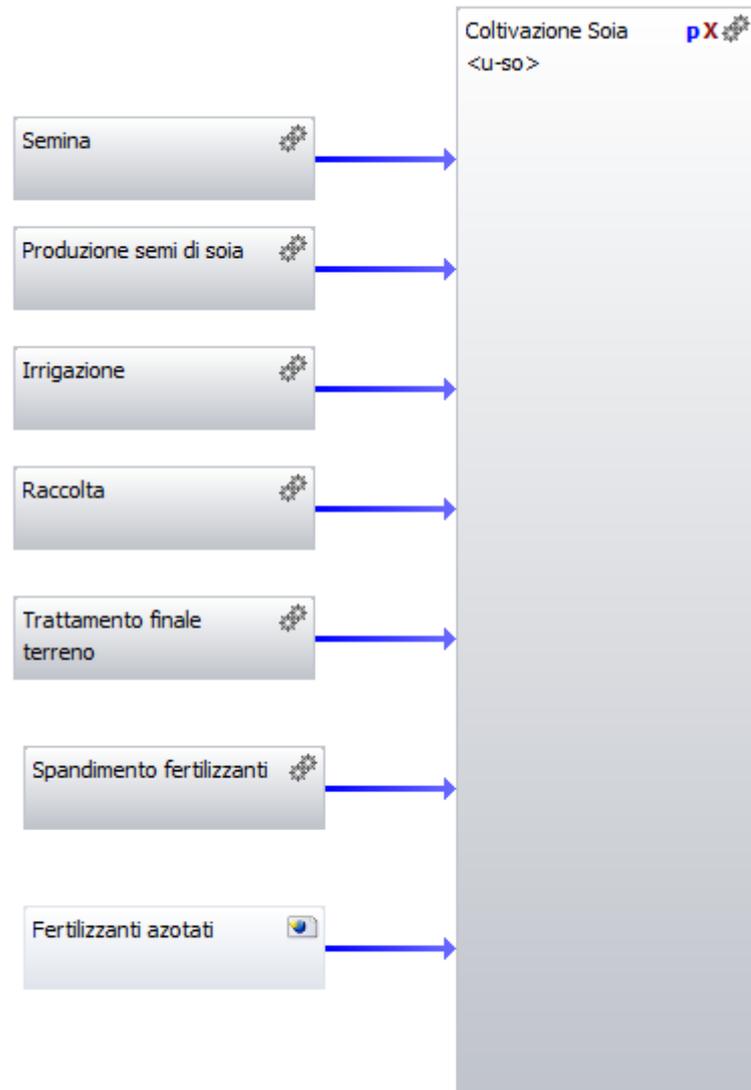


Figura 19: Diagramma di flusso della coltivazione della soia con precessione di brassica

Dunque la coltivazione della soia se preceduta da brassica prevede:

- il processo di semina
- la produzione dei semi in input
- il processo di spandimento dei fertilizzanti
- il processo di irrigazione
- la produzione e le emissioni dirette in aria derivanti dall'utilizzo di fertilizzanti azotati.
- il processo di sfalcio e raccolta della soia
- il processo di trattamento finale del terreno

Il processo di coltivazione della soia è stato creato tenendo conto degli input di coltivazione necessari alla lavorazione di 1 ettaro di terreno, tuttavia il flusso di riferimento utilizzato è stata la produzione di semi (in kg) su un ettaro ottenuta dalla resa, misurata per lo scenario soia più brassica, pari a 2800 kg/ha. Dunque tutti i processi in input (descritti di seguito) sono stati rapportati alla produzione di 2800 kg di semi di soia e in maniera equivalente alla coltivazione di un ettaro con una resa pari a 2800 kg/ha.

Processo di semina

La semina della soia avviene attraverso un processo meccanizzato che prevede il ricorso ad apposite macchine seminatrici. Il dataset scelto è stato il processo denominato *CH: Sowing* nella banca dati di Ecoinvent. Per tale processo valgono le considerazioni sulla rappresentatività del dato fatte al punto precedente per il processo di lavorazione del terreno pre-semina. Il processo in questo caso però è stato richiamato 1,8 volte al fine di rendere coerenti i consumi contenuti nel dataset *CH: Sowing* (3,82 kg/ha) con i dati di consumo di diesel ricavati dal prontuario dell'agricoltura della regione Emilia Romagna che ammontano a 6,8 kg/ha.

Processo di produzione dei semi di soia

Come indicato nella normativa europea vigente (Annex V, direttiva 2009/28/CE) per la determinazione delle emissioni di CO₂ dei biocarburanti nell'inventario della fase agricola va considerata anche la produzione dei semi necessari per la coltivazione. Il disciplinare indica 80 kg per ettaro di seme ed è stato anche il quantitativo utilizzato nella sperimentazione del protocollo Susbiofuel. Il processo utilizzato è stato *CH: Soybeans IP, at farm*.

Processo di spandimento dei fertilizzanti

Il processo utilizzato (*CH: fertilizing by broadcaster*) al pari di tutti quelli presi da banca dati è parte del database Ecoinvent e valgono le stesse considerazioni fatte per i precedenti essendo anch'esso riferito al territorio svizzero e frutto di una raccolta dati effettuata nel periodo 1991-2001. Tale processo avendo come flusso di riferimento il valore di 1 ha è stato introdotto nel plan coltivazione soia con un fattore 1.

Processo di irrigazione

Il processo di database utilizzato è stato *CH: irrigating* di Ecoinvent che oltre a prevedere il consumo di acqua, considera i consumi energetici correlati e tutte le strutture ed i macchinari necessari per l'irrigazione. Per la soia c'è stato un input di irrigazione pari a 350 m³/ha distribuiti in 5 interventi. Considerando che il suddetto processo di database prevede un apporto di acqua pari a 1200 m³/ha, questo è stato introdotto nel plan di coltivazione della soia con un fattore pari a 0,291. Valgono anche per questo processo le considerazioni fatte per gli altri in relazione alla rappresentatività del dato.

Processo di sfalcio e raccolta della soia

Per il processo di raccolta della soia è stato scelto il dataset denominato nella banca dati Ecoinvent *CH: Combine harvesting*, che considera l'utilizzo di una mietitrebbiatrice da grano come è effettivamente accaduto anche nel caso del progetto Susbiofuel. Il flusso di riferimento del dataset è 1 ha e dunque questo viene utilizzato nel plan di coltivazione della soia con un fattore pari ad 1.

Processo di trattamento finale: rizollatura del terreno

A fine ciclo di coltivazione il terreno viene dissodato per prepararlo alla coltura successiva e per eliminare i residui di coltivazione. Con un approccio conservativo questo processo è stato interamente allocato alla coltivazione della soia e non in parte o del tutto alla coltura successiva. Il processo di Ecoinvent *CH: tillage, harrowing, by rotary harrow* che prevede un consumo di diesel pari a 11,5 kg/ha, viene preso con un fattore pari a 1 perché coerente con i consumi di diesel considerati (12 kg/ha). Il processo come gli altri processi di lavorazione del terreno considera anche la produzione di strutture e mezzi secondo una quota parte allocata in base al consumo considerato.

Processo di produzione dei fertilizzanti azotati e generazione di emissioni in aria legate al loro spandimento

A completamento del plan di coltivazione della soia è stato inserito anche un processo costruito ad hoc che includesse il processo di produzione dei fertilizzanti utilizzati (da database Ecoinvent) e le emissioni in aria di derivati di composti dell'azoto legati alla ripartizione in aria di parte del fertilizzante speso.

Il processo riguardante le emissioni è stato costruito seguendo la metodologia proposta dall'IPCC nel 2006 (IPCC, 2006) e facendo riferimento all'approccio di (Fantin V., 2011).

In Figura 20 una schermata del software Gabi che rappresenta il processo costruito per modellizzare la produzione di fertilizzanti azotati e le emissioni in aria correlate secondo la metodologia proposta dall'IPCC e ripresa da Fantin.

Inputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ RER: urea, as N, at regional store	☘ Mass	1	kg
Flusso			

Outputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ Fertilizzanti azotati [mineral ferti	☘ Mass	1	kg
➔ Ammonia [Inorganic emissions to air]	☘ Mass	0,121	kg
➔ Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	☘ Mass	1,33	kg
➔ Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	☘ Mass	0,0194	kg
Flusso			

Figura 20: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria e acqua) dei fertilizzanti azotati

Il processo in questione è stato costruito in riferimento ad 1 kg di fertilizzante utilizzato, ma è stato poi utilizzato nel plan della coltivazione della brassica con un fattore 45 dato che l'input di fertilizzazione previsto dal protocollo Susbiofuel per la soia prevede un apporto di 45 kg di fertilizzanti azotati come N, urea nello specifico, modellizzata nello studio come *RER: Urea, as N, at regional storehouse*. In questo caso il dato di Ecoinvent ha una rappresentatività geografica di carattere europeo (RER) e si riferisce all'anno 1999. Considerando il prodotto in questione e l'andamento recente della sua evoluzione tecnica, si ritiene il dato, seppur riferito a più di 10 anni fa, ancora rappresentativo a livello sia temporale che tecnologico.

La Figura 21 di seguito costituisce una sintesi di quanto detto precedentemente e rappresenta tutti i processi utilizzati nel software Gabi per realizzare il processo di coltivazione di 1 ettaro di soia (2800 kg si semi).

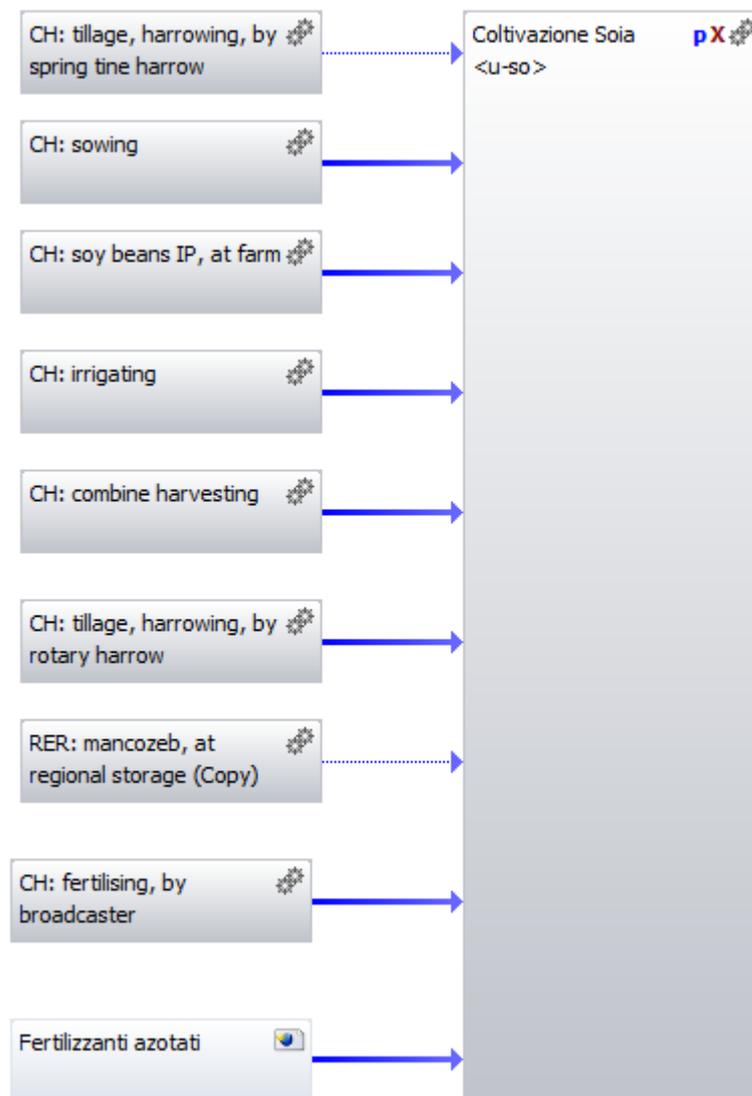


Figura 21: Diagramma di flusso del processo di coltivazione della soia senza precessione di brassica che mostra i processi di database utilizzati

6.2.1.1.3 Trasporto dei semi di soia

Per il trasporto dei semi dal luogo di produzione al luogo di spremitura è stato considerato una distanza media di 50 km ed un trasporto su un mezzo Euro 3 da 16-32 tonnellate di stazza. In figura viene riportato il plan costruito su Gabi riferito alla fase di trasporto.



Figura 22: Diagramma di flusso del processo di trasporto della soia

6.2.1.1.4 Spremitura dei semi di soia

Il processo di spremitura dei semi considerato nel progetto Susbiofuel è costituito dalla spremitura meccanica che presenta minori rese in olio rispetto alla spremitura chimica con solventi, ma permette di ottenere migliori caratteristiche nutrizionali del pannello e minori costi sia ambientali che economici.

Il progetto è stato modellizzato considerando un consumo elettrico pari a 0,05 kWh/kg di seme. Per il consumo elettrico è stato utilizzato un processo della banca dati Ecoinvent denominato *IT: electricity, low voltage, at grid* che contiene al suo interno il processo di produzione di elettricità secondo il mix energetico italiano ed il processo di distribuzione in rete.



Figura 23: Diagramma di flusso del processo di spremitura dei semi di soia

6.2.1.1.5 1 MJ di energia da olio di soia e procedimenti di allocazione.

Come già spiegato nel paragrafo dedicato al campo di applicazione dello studio, l'unità funzionale dello studio è costituita da 1 MJ di energia di olio, in altre parole dal quantitativo di olio (in volume o in massa) che ha un contenuto di energia pari a 1 MJ.

Nel caso della soia considerando i parametri raccolti in Tabella 17 si ottiene che 1 MJ di energia è espresso da un quantitativo di olio di soia pari a 0,0272 kg.

PCI	36,7 MJ/kg
Contenuto in olio del seme	22%
Resa di spremitura	80%
Resa totale spremitura	17%

Tabella 17: Proprietà fisiche dell'olio di soia e del processo di spremitura utilizzate nell'analisi

6.2.1.1.6 Procedimento di allocazione

Essendo l'obiettivo dello studio quantificare gli impatti generati dalla produzione dell'olio di soia e avendo lasciato la produzione di farine destinate all'alimentazione animale al di fuori dei confini del sistema, è necessario il ricorso ad un procedimento di allocazione. Quello introdotto come principio di allocazione base nel software Gabi è stato quello basato sul contenuto energetico dell'olio e del pannello nel rispetto della normativa vigente e utilizzando i dati del progetto Biograce (<http://www.biograce.net/>).

Dato l'elevato quantitativo di proteine e grassi contenuto nel pannello di soia soprattutto se ottenuto da una spremitura di tipo meccanico, i valori secondo cui sono stati allocati gli impatti sono riportati nella Tabella 18:

Sottosistema	Base di allocazione
Olio di soia	35%
Pannello di soia	65%

Tabella 18: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica

Nel rispetto del tale principio allocativo i valori dei flussi di riferimento in uscita da ognuna delle 4 fasi descritte (coltivazione brassica, coltivazione soia, trasporto soia e spremitura soia) sono mostrati nella Figura 24:



Figura 24: Diagramma di flusso ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di soia con precessione di brassica con valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase.

Dunque al fine di produrre il quantitativo di olio di soia con un contenuto di energia pari a 1 MJ, sono necessari 0,056 kg di seme e 0,2 m² di terreno coltivato a soia con precessione di brassica.

6.2.1.2 Scenario coltivazione di soia con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente

Lo scenario di coltivazione della soia senza precessione della brassica rappresenta lo scenario tradizionale di produzione dell'olio di soia del progetto Susbiofuel in quanto ricorre a fumiganti sintetizzati chimicamente per combattere l'infestazione da nematodi che caratterizza i terreni di prova. Il ciclo di vita di questo scenario prevede 3 fasi riportate in Figura 25 e dettagliate con tutti i valori di input ed output in seguito:

- la fase di coltivazione della soia
- il trasporto dei semi di soia al luogo di spremitura
- la fase di spremitura dei semi

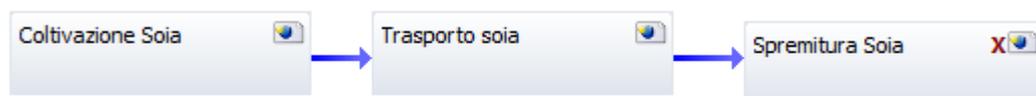


Figura 25: Fasi del ciclo di vita della coltivazione della soia con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente

Il diagramma di flusso in figura, che rappresenta una schermata del modello costruito nel software Gabi, mostra lo schema logico del processo analizzato. Contrariamente allo scenario precedente non c'è la coltivazione della brassica

ad anticipare la coltivazione della soia. Analogamente a quanto già visto invece, i semi di soia prodotti in campo vengono trasportati al luogo di spremitura dove avviene l'estrazione dell'olio e la sua separazione dal pannello.

6.2.1.2.1 Coltivazione della soia

In questo paragrafo si darà descrizione dettagliata dei processi che costituiscono il plan di coltivazione della soia. Va precisato che questo processo di coltivazione della soia differisce da quello precedente in quanto non essendoci il sovescio della brassica in precessione sono necessari alcuni trattamenti addizionali del terreno ed una profilassi contro i nematodi del terreno.

In Figura 26 il diagramma di flusso del processo di coltivazione della soia.

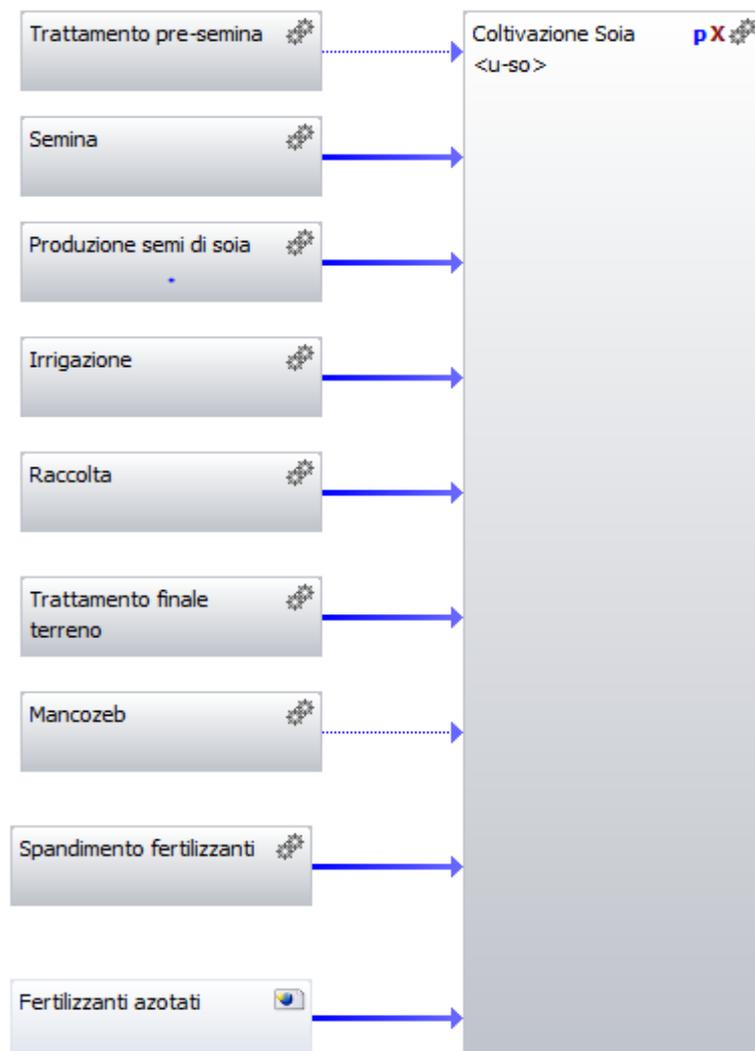


Figura 26: Diagramma di flusso della fase di coltivazione della soia con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente

Dunque la coltivazione della soia senza precessione di brassica prevede:

- *il processo di trattamento del terreno pre-semina*
- il processo di semina
- la produzione dei semi in input
- il processo di spandimento dei fertilizzanti
- il processo di irrigazione
- *il processo di trattamento degli infestanti con Mancozeb*
- la produzione e le emissioni dirette in aria derivanti dall'utilizzo di fertilizzanti azotati.
- il processo di sfalcio e raccolta della soia
- il processo di trattamento finale del terreno

In *corsivo* sono indicati i processi non presenti nel processo di coltivazione della soia preceduta dal sovescio della brassica.

La precessione della brassica ed il suo successivo interrimento permettono infatti nella coltivazione che segue di evitare l'aratura del terreno e trattamenti pre-semina, poiché possono considerarsi sostitutive di queste le operazioni necessarie alla pratica del sovescio. Inoltre l'azione biofumigante della brassica sovesciata permette di evitare il ricorso a pesticidi di natura chimica (Mancozeb (nome commerciale): 1-3-Dicloropropene).

Il processo di coltivazione della soia è stato creato considerando gli input di coltivazione necessari per la lavorazione di 1 ettaro di terreno, tuttavia il flusso di riferimento utilizzato è stata la produzione di semi (in kg) su un ettaro ottenuta dalla resa misurata pari tale a 2800 kg/ha. Dunque tutti i processi in input (descritti di seguito) sono stati rapportati alla produzione di 2800 kg di semi di soia e in maniera equivalente alla coltivazione di un ettaro con una resa pari a 2800 kg/ha.

Processo di trattamento del terreno pre-semina

La lavorazione pre-semina del terreno prevede per la soia una aratura a media profondità, a cui segue un ammutinamento e un pareggiamento del terreno. Nel banca dati Ecoinvent è stato individuato come coerente con i le lavorazioni suddette il processo *CH: Tillage, harrowing, by spring tine harrow* considerato per il territorio svizzero (CH). Data l'omogeneità delle modalità di lavorazione e

il comune grado di meccanizzazione delle operazioni agricole il dato è stato ritenuto rappresentativo a livello sia geografico che tecnico e anche le misurazioni fatte per ottenere il dataset (1991-2001) sono sufficientemente recenti da renderlo rappresentativo a livello temporale. Il flusso di riferimento di tale processo è 1 ha e dunque il processo è stato richiamato per 1 volta nel processo costruito per modellizzare la coltivazione della brassica dato che i consumi di diesel sono in linea con quelli del progetto Susbiofuel.

Processo di semina

La semina della soia avviene attraverso un processo meccanizzato che prevede il ricorso ad apposite macchine seminatrici. Il datasets scelto è stato il processo denominato *CH: Sowing* nella banca dati di Ecoinvent. Per tale processo valgono le considerazioni sulla rappresentatività del dato fatte al punto precedente per il processo di lavorazione del terreno pre-semina. Il processo in questo caso però è stato richiamato 1,8 volte al fine di rendere coerenti i consumi contenuti nel dataset *CH: Sowing* (3,82 kg/ha) con i dati di consumo di diesel ricavati dal prontuario dell'agricoltura della regione Emilia Romagna che ammontano a 6,8 kg/ha.

Processo di produzione dei semi di soia

Come indicato nella normativa europea vigente (Annex V, direttiva 2009/28/CE) per la determinazione delle emissioni di CO₂ dei biocarburanti nell'inventario della fase agricola va considerata anche la produzione dei semi necessari per la coltivazione. Il disciplinare indica 80 kg per ettaro di seme ed è stato anche il quantitativo utilizzato nella sperimentazione del protocollo Susbiofuel. Il processo utilizzato è stato *CH: Soybeans IP, at farm*.

Processo di spandimento dei fertilizzanti

Il processo utilizzato (*CH: fertilizing by broadcaster*) al pari di tutti quelli presi da banca dati è parte del database Ecoinvent e valgono le stesse considerazioni fatte per i precedenti essendo anch'esso riferito al territorio svizzero e frutto di una raccolta dati effettuata nel periodo 1991-2001. Tale processo avendo come flusso di riferimento il valore di 1 ha è stato introdotto nel plan coltivazione soia con un fattore 1.

Processo di irrigazione

Il processo di database utilizzato è stato *CH: irrigating* di Ecoinvent che oltre a prevedere il consumo di acqua, considera i consumi energetici correlati e tutte le strutture ed i macchinari necessari per l'irrigazione. Per la soia c'è stato un input di irrigazione pari a 350 m³/ha distribuiti in 5 interventi. Considerando che il suddetto processo di database prevede un apporto di acqua pari a 1200 m³/ha, questo è stato introdotto nel plan di coltivazione della soia con un fattore pari a 0,291. Valgono anche per questo processo le considerazioni fatte per gli altri in relazione alla rappresentatività del dato.

Processo di produzione ed uso del fumigante chimico (Mancozeb)

Al fine di modellizzare la lotta chimica all'infestazione da nematodi del terreno si è ricorsi ad un processo di database *RER: Mancozeb , at regional storehouse* che include al suo interno tutti i flussi e processi necessari alla produzione di 1 kg di 1-3-Dicloropropene (nome commerciale del pesticida utilizzato in Susbiofuel = Mancozeb) e le emissioni che questo genera in acqua ed in aria. Il processo è stato incluso nel plan di coltivazione della soia con un fattore pari ad 8 dato che il quantitativo annualmente conferito per ettaro ammonta ad 8 kg.

Processo di sfalcio e raccolta della soia

Per il processo di raccolta della soia è stato scelto il dataset denominato nella banca dati Ecoinvent *CH: Combine harvesting*, che considera l'utilizzo di una mietitrebbiatrice da grano come effettivamente accade anche nel caso del progetto Susbiofuel. Il flusso di riferimento del dataset è 1 ha e dunque questo viene utilizzato nel plan di coltivazione della soia con un fattore pari ad 1.

Processo di trattamento finale: rizollatura del terreno

A fine ciclo di coltivazione il terreno viene dissodato per prepararlo alla coltura successiva e per eliminare i residui di coltivazione. Con un approccio conservativo questo processo è stato interamente allocato alla coltivazione della soia e non in parte o del tutto alla coltura successiva. Il processo di Ecoinvent *CH: tillage, harrowing, by rotary harrow* che prevede un consumo di diesel pari a 11,5 kg/ha, viene preso con un fattore pari a 1 perché coerente con i consumi di diesel considerati (12 kg/ha). Il processo come gli altri processi

di lavorazione del terreno considera anche la produzione di strutture e mezzi secondo una quota parte allocata in base al consumo considerato.

Processo di produzione dei fertilizzanti azotati e generazione di emissioni in aria legate al loro spandimento

A completamento del plan di coltivazione della soia è stato inserito anche un processo costruito ad hoc che includesse il processo di produzione dei fertilizzanti utilizzati (da database Ecoinvent) e le emissioni in aria dei composti dell'azoto legati alla ripartizione in aria di parte del fertilizzante speso.

Il processo riguardante le emissioni è stato costruito seguendo la metodologia proposta dall'IPCC nel 2006 (IPCC, 2006) e facendo riferimento all'approccio di (Fantin V., 2011).

In Figura 27 una schermata del software Gabi che rappresenta il processo costruito per modellizzare la produzione di fertilizzanti azotati e le emissioni in aria correlate secondo la metodologia proposta dall'IPCC ripresa da Fantin.

Inputs				
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità	
➡ RER: urea, as N, at regional store	🌿 Mass	1	kg	
<i>Flusso</i>				
←				
Outputs				
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità	
➡ Fertilizzanti azotati [mineral ferti	🌿 Mass	1	kg	
➡ Ammonia [Inorganic emissions to air]	🌿 Mass	0,121	kg	
➡ Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	🌿 Mass	1,33	kg	
➡ Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	🌿 Mass	0,0194	kg	
<i>Flusso</i>				

Figura 27: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria e acqua) dei fertilizzanti azotati

Il processo in questione è stato costruito in riferimento ad 1 kg di fertilizzante utilizzato, ma è stato poi utilizzato nel plan della coltivazione della soia con un fattore 90 dato che l'input di fertilizzazione previsto dal protocollo Susbiofuel per la soia prevede un apporto di 90 kg di fertilizzanti azotati come N, urea nello specifico, modellizzata nello studio come *RER: Urea, as N, at regional*

storehouse in assenza del sovescio della brassica. In definitiva nei 2 scenari analizzati (*soia+sovescio brassica* e *soia senza sovescio brassica*) l'apporto di fertilizzanti azotati ammonta sempre ad un totale di 90 kg. Nel caso di sovescio 45 kg di fertilizzanti vengono forniti prima della coltivazione della brassica ed i rimanenti 45 kg prima della coltivazione della soia. Nel caso dello scenario tradizionale della coltivazione della soia con ricorso a fumiganti chimici, l'intero quantitativo di 90 kg di fertilizzanti viene invece conferito in un'unica soluzione prima della semina della soia. Il dataset di Ecoinvent utilizzato (*RER: Urea, as N, at regional storehouse*) ha una rappresentatività geografica di carattere europeo (RER) e si riferisce all'anno 1999. Considerando il prodotto in questione e l'andamento recente della sua evoluzione tecnica, si ritiene il dato, seppur riferito a più di 10 anni fa, ancora rappresentativo a livello sia temporale che tecnologico.

La Figura 28 di seguito costituisce una sintesi di quanto detto precedentemente e rappresenta tutti i processi utilizzati nel software Gabi per realizzare il processo di coltivazione di 1 ettaro di soia (2800 kg si semi).

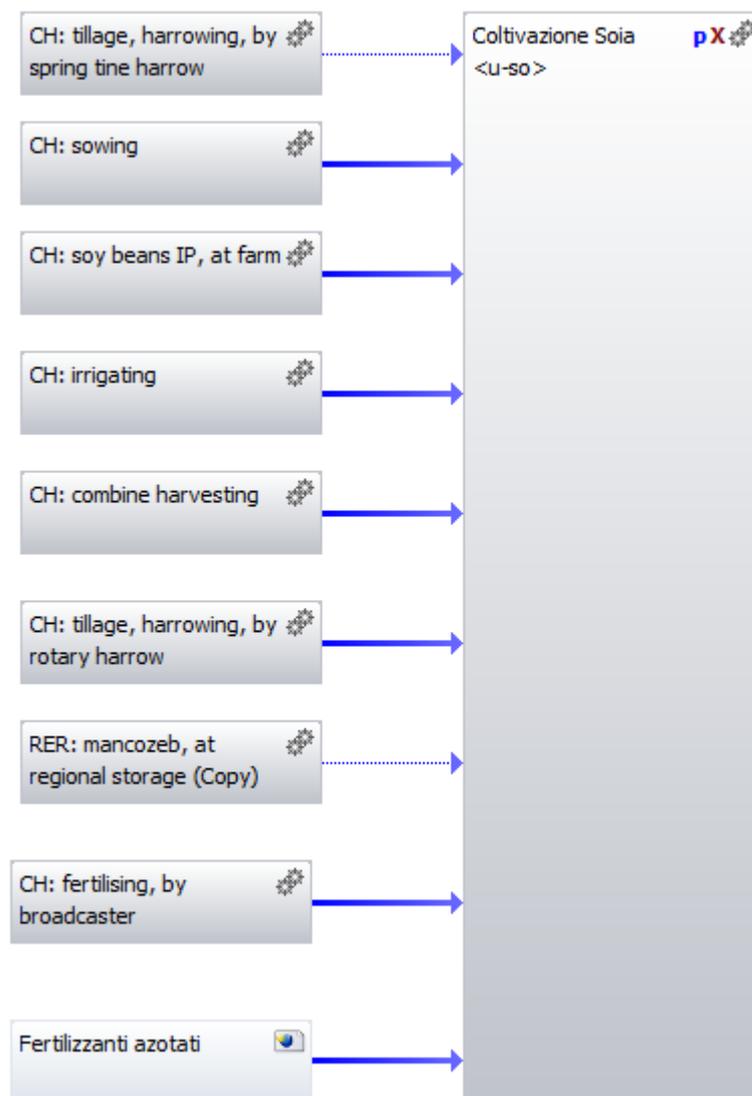


Figura 28: Diagramma di flusso della coltivazione della soia con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente che mostra i processi di database utilizzati

6.2.1.2.2 Trasporto dei semi di soia

Per il trasporto dei semi dal luogo di produzione al luogo di spremitura è stato considerato una distanza media di 50 km ed un trasporto su un mezzo Euro 3 da 16-32 tonnellate di stazza. In Figura 29 viene riportato il plan costruito su Gabi riferito alla fase di trasporto.



Figura 29: Diagramma di flusso del processo di trasporto della soia

6.2.1.2.3 Spremitura dei semi di soia

Il processo di spremitura dei semi considerato nel progetto Susbiofuel è costituito dalla spremitura meccanica che presenta minori rese in olio rispetto alla spremitura chimica con solventi, ma permette di ottenere migliori caratteristiche nutrizionali del pannello e minori costi sia ambientali che economici.

Il progetto è stato modellizzato considerando un consumo elettrico pari a 0,05 kWh/kg di seme. Per il consumo elettrico è stato utilizzato un processo della banca dati Ecoinvent denominato *IT: electricity, low voltage, at grid* che contiene al suo interno il processo di produzione di elettricità secondo il mix energetico italiano ed il processo di distribuzione in rete.



Figura 30: Diagramma di flusso del processo di spremitura della soia

6.2.1.2.4 1 MJ di energia da olio di soia e procedimenti di allocazione.

Come già spiegato nel paragrafo dedicato al campo di applicazione dello studio, l'unità funzionale dello studio è costituita da 1 MJ di energia di olio, in altre parole dal quantitativo di olio (in volume o in massa) che ha un contenuto di energia pari a 1 MJ.

Nel caso della soia considerando i parametri raccolti in Tabella 19 si ottiene che 1 MJ di energia è espresso da un quantitativo di olio di soia pari a 0,0272 kg.

PCI	36,7 MJ/kg
Contenuto in olio del seme	22%
Resa di spremitura	80%
Resa totale spremitura	17%

Tabella 19: Proprietà fisiche dell'olio di soia e del processo di spremitura utilizzate nell'analisi

6.2.1.2.5 Procedimento di allocazione

Essendo l'obiettivo dello studio quantificare gli impatti generati dalla produzione dell'olio di soia e avendo lasciato la produzione di farine destinate all'alimentazione animale al di fuori dei confini del sistema, è necessario il ricorso ad un procedimento di allocazione. Quello introdotto come principio di allocazione base nel software Gabi è stato quello basato sul contenuto energetico dell'olio e del pannello nel rispetto della normativa vigente e utilizzando i dati del progetto Biograce (<http://www.biograce.net/>).

Dato l'elevato quantitativo di proteine e grassi contenuto nel pannello di soia soprattutto se ottenuto da una spremitura di tipo meccanico, i valori secondo cui sono stati allocati gli impatti sono riportati nella Tabella 20:

Sottosistema	Base di allocazione
Olio di soia	35%
Pannello di soia	65%

Tabella 20: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica

Nel rispetto del tale principio allocativo i valori dei flussi di riferimento in uscita da ognuna delle 4 fasi descritte (coltivazione brassica, coltivazione soia, trasporto soia e spremitura soia) sono mostrati nella Figura 31:



Figura 31: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di soia coltivata facendo ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente con valore di flussi di riferimento uscenti da ogni fase

Dunque al fine di produrre il quantitativo di olio di soia con un contenuto di energia pari a 1 MJ, sono necessari 0,056 kg di seme e 0,2 m² di terreno coltivato a soia con precessione di brassica.

6.2.1.3 Scenario di coltivazione della soia senza ricorso a fumiganti

E' stato infine realizzato uno scenario di coltivazione della soia senza ricorso a fumiganti del terreno per combattere l'infestazione da nematodi. Il ciclo di vita di questo scenario prevede 3 fasi riportate in Figura 32 e dettagliate con tutti i valori di input ed output in seguito:

- la fase di coltivazione della soia
- il trasporto dei semi di soia al luogo di spremitura
- la fase di spremitura dei semi

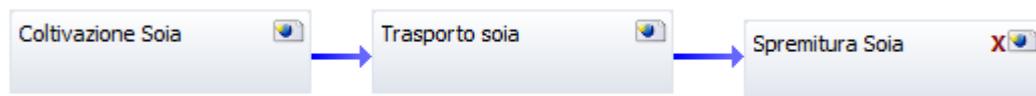


Figura 32: Fasi del ciclo di vita della soia coltivata senza ricorso a fumiganti

Il diagramma di flusso in figura, che rappresenta una schermata del modello costruito nel software Gabi, mostra lo schema logico del processo analizzato. Tale scenario presenta gli stessi processi del caso di coltivazione di soia con ricorso a fumiganti chimici, fatta eccezione proprio per il processo denominato Mancozeb (non essendo presente nello scenario in questione un sistema di lotta all'infestazione da nematodi). L'ulteriore (sostanziale) differenza con lo

scenario che prevede l'utilizzo di fumiganti chimici è nel valore della resa per ettaro che risulta ridotta del 30% (1960 kg/ha).

6.2.1.3.1 Coltivazione della soia

In Figura 33 il diagramma di flusso del processo di coltivazione della soia.

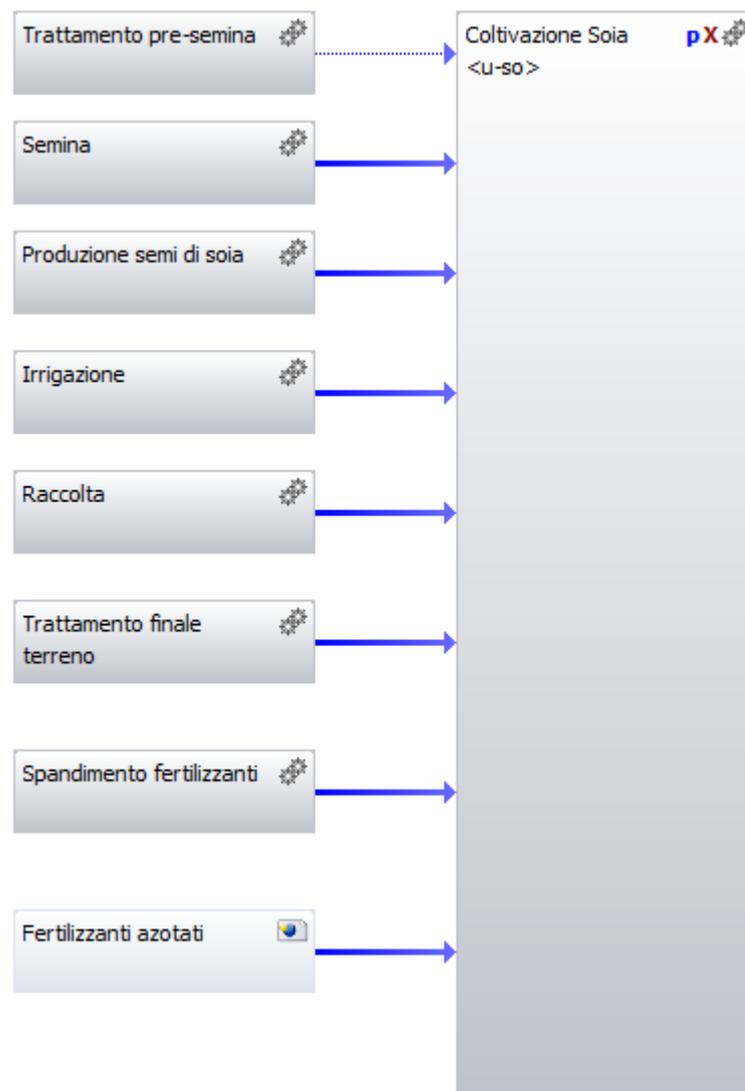


Figura 33: Diagramma di flusso della fase di coltivazione della soia

Dunque la coltivazione della soia senza precessione di brassica prevede:

- il processo di trattamento del terreno pre-semina
- il processo di semina
- la produzione dei semi in input
- il processo di spandimento dei fertilizzanti
- il processo di irrigazione

- la produzione e le emissioni dirette in aria derivanti dall'utilizzo di fertilizzanti azotati.
- il processo di sfalcio e raccolta della soia
- il processo di trattamento finale del terreno

Il processo di coltivazione della soia è stato creato considerando gli input di coltivazione necessari per la lavorazione di 1 ettaro di terreno, tuttavia il flusso di riferimento utilizzato è stata la produzione di semi (in kg) su un ettaro ottenuta dalla resa misurata pari tale a 1960 kg/ha. Dunque tutti i processi in input (descritti di seguito) sono stati rapportati alla produzione di 1960 kg di semi di soia e in maniera equivalente alla coltivazione di un ettaro con una resa pari a 1960 kg/ha.

Processo di trattamento del terreno pre-semina

La lavorazione pre-semina del terreno prevede per la soia una aratura a media profondità, a cui segue un ammutinamento e un pareggiamento del terreno. Nel banca dati Ecoinvent è stato individuato come coerente con le lavorazioni suddette il processo *CH: Tillage, harrowing, by spring tine harrow* considerato per il territorio svizzero (CH). Data l'omogeneità delle modalità di lavorazione e il comune grado di meccanizzazione delle operazioni agricole il dato è stato ritenuto rappresentativo a livello sia geografico che tecnico e anche le misurazioni fatte per ottenere il dataset (1991-2001) sono sufficientemente recenti da renderlo rappresentativo a livello temporale. Il flusso di riferimento di tale processo è 1 ha e dunque il processo è stato richiamato per 1 volta nel processo costruito per modellizzare la coltivazione della brassica dato che i consumi di diesel sono in linea con quelli del progetto Susbiofuel.

Processo di semina

La semina della soia avviene attraverso un processo meccanizzato che prevede il ricorso ad apposite macchine seminatrici. Il datasets scelto è stato il processo denominato *CH: Sowing* nella banca dati di Ecoinvent. Per tale processo valgono le considerazioni sulla rappresentatività del dato fatte al punto precedente per il processo di lavorazione del terreno pre-semina. Il processo in questo caso però è stato richiamato 1,8 volte al fine di rendere coerenti i consumi contenuti nel dataset *CH: Sowing* (3,82 kg/ha) con i dati di

consumo di diesel ricavati dal prontuario dell'agricoltura della regione Emilia Romagna che ammontano a 6,8 kg/ha.

Processo di produzione dei semi di soia

Come indicato nella normativa europea vigente (Annex V, direttiva 2009/28/CE) per la determinazione delle emissioni di CO₂ dei biocarburanti nell'inventario della fase agricola va considerata anche la produzione dei semi necessari per la coltivazione. Il disciplinare indica 80 kg per ettaro di seme ed è stato anche il quantitativo utilizzato nella sperimentazione del protocollo Susbiofuel. Il processo utilizzato è stato *CH: Soybeans IP, at farm*.

Processo di spandimento dei fertilizzanti

Il processo utilizzato (*CH: fertilizing by broadcaster*) al pari di tutti quelli presi da banca dati è parte del database Ecoinvent e valgono le stesse considerazioni fatte per i precedenti essendo anch'esso riferito al territorio svizzero e frutto di una raccolta dati effettuata nel periodo 1991-2001. Tale processo avendo come flusso di riferimento il valore di 1 ha è stato introdotto nel plan coltivazione soia con un fattore 1.

Processo di irrigazione

Il processo di database utilizzato è stato *CH: irrigating* di Ecoinvent che oltre a prevedere il consumo di acqua, considera i consumi energetici correlati e tutte le strutture ed i macchinari necessari per l'irrigazione. Per la soia c'è stato un input di irrigazione pari a 350 m³/ha distribuiti in 5 interventi. Considerando che il suddetto processo di database prevede un apporto di acqua pari a 1200 m³/ha, questo è stato introdotto nel plan di coltivazione della soia con un fattore pari a 0,291. Valgono anche per questo processo le considerazioni fatte per gli altri in relazione alla rappresentatività del dato.

Processo di sfalcio e raccolta della soia

Per il processo di raccolta della soia è stato scelto il dataset denominato nella banca dati Ecoinvent *CH: Combine harvesting*, che considera l'utilizzo di una mietitrebbiatrice da grano come effettivamente accade anche nel caso del progetto Susbiofuel. Il flusso di riferimento del dataset è 1 ha e dunque questo viene utilizzato nel plan di coltivazione della soia con un fattore pari ad 1.

Processo di trattamento finale: rizollatura del terreno

A fine ciclo di coltivazione il terreno viene dissodato per prepararlo alla coltura successiva e per eliminare i residui di coltivazione. Con un approccio conservativo questo processo è stato interamente allocato alla coltivazione della soia e non in parte o del tutto alla coltura successiva. Il processo di Ecoinvent *CH: tillage, harrowing, by rotary harrow* che prevede un consumo di diesel pari a 11,5 kg/ha, viene preso con un fattore pari a 1 perché coerente con i consumi di diesel considerati (12 kg/ha). Il processo come gli altri processi di lavorazione del terreno considera anche la produzione di strutture e mezzi secondo una quota parte allocata in base al consumo considerato.

Processo di produzione dei fertilizzanti azotati e generazione di emissioni in aria legate al loro spandimento

A completamento del plan di coltivazione della soia è stato inserito anche un processo costruito ad hoc che includesse il processo di produzione dei fertilizzanti utilizzati (da database Ecoinvent) e le emissioni in aria dei composti dell'azoto legati alla ripartizione in aria di parte del fertilizzante speso.

Il processo riguardante le emissioni è stato costruito seguendo la metodologia proposta dall'IPCC nel 2006 (IPCC, 2006) e facendo riferimento all'approccio di (Fantin V., 2011).

In Figura 34 una schermata del software Gabi che rappresenta il processo costruito per modellizzare la produzione di fertilizzanti azotati e le emissioni in aria correlate secondo la metodologia proposta dall'IPCC ripresa da Fantin.

Inputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ RER: urea, as N, at regional store	🌿 Mass	1	kg
Flusso			
Outputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ Fertilizzanti azotati [mineral fert	🌿 Mass	1	kg
➔ Ammonia [Inorganic emissions to air]	🌿 Mass	0,121	kg
➔ Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	🌿 Mass	1,33	kg
➔ Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	🌿 Mass	0,0194	kg
Flusso			

Figura 34: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati

Il processo in questione è stato costruito in riferimento ad 1 kg di fertilizzante utilizzato, ma è stato poi utilizzato nel plan della coltivazione della soia con un fattore 90 dato che l'input di fertilizzazione previsto dal protocollo Susbiofuel per la soia prevede un apporto di 90 kg di fertilizzanti azotati come N, urea nello specifico, modellizzata nello studio come *RER: Urea, as N, at regional storehouse* in assenza del sovescio della brassica. In definitiva nei 2 scenari analizzati (*soia+sovescio brassica* e *soia senza sovescio brassica*) l'apporto di fertilizzanti azotati ammonta sempre ad un totale di 90 kg. Nel caso di sovescio 45 kg di fertilizzanti vengono forniti prima della coltivazione della brassica ed i rimanenti 45 kg prima della coltivazione della soia. Nel caso dello scenario della coltivazione della soia senza ricorso a fumiganti, l'intero quantitativo di 90 kg di fertilizzanti viene invece conferito in un'unica soluzione prima della semina della soia. Il dataset di Ecoinvent utilizzato (*RER: Urea, as N, at regional storehouse*) ha una rappresentatività geografica di carattere europeo (RER) e si riferisce all'anno 1999. Considerando il prodotto in questione e l'andamento recente della sua evoluzione tecnica, si ritiene il dato, seppur riferito a più di 10 anni fa, ancora rappresentativo a livello sia temporale che tecnologico.

La figura di seguito costituisce una sintesi di quanto detto precedentemente e rappresenta tutti i processi utilizzati nel software Gabi per realizzare il processo di coltivazione di 1 ettaro di soia (1960 kg si semi).



Figura 35: Diagramma di flusso della soia coltivata senza ricorso a fumiganti

6.2.1.3.2 Trasporto dei semi di soia

Per il trasporto dei semi dal luogo di produzione al luogo di spremitura è stato considerato una distanza media di 50 km ed un trasporto su un mezzo Euro 3 da 16-32 tonnellate di stazza. In Figura 36 viene riportato il plan costruito su Gabi riferito alla fase di trasporto.

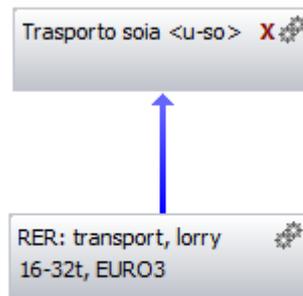


Figura 36: Diagramma di flusso del processo di trasporto della soia

6.2.1.3.3 Spremitura dei semi di soia

Il processo di spremitura dei semi considerato nel progetto Susbiofuel è costituito dalla spremitura meccanica che presenta minori rese in olio rispetto alla spremitura chimica con solventi, ma permette di ottenere migliori caratteristiche nutrizionali del pannello e minori costi sia ambientali che economici.

Il progetto è stato modellizzato considerando un consumo elettrico pari a 0,05 kWh/kg di seme. Per il consumo elettrico è stato utilizzato un processo della banca dati Ecoinvent denominato *IT: electricity, low voltage, at grid* che contiene al suo interno il processo di produzione di elettricità secondo il mix energetico italiano ed il processo di distribuzione in rete.



Figura 37: Diagramma di flusso del processo di spremitura della soia

6.2.1.3.4 1 MJ di energia da olio di soia e procedimenti di allocazione.

Come già spiegato nel paragrafo dedicato al campo di applicazione dello studio, l'unità funzionale dello studio è costituita da 1 MJ di energia di olio, in altre parole dal quantitativo di olio (in volume o in massa) che ha un contenuto di energia pari a 1 MJ.

Nel caso della soia considerando i parametri raccolti in Tabella 21 si ottiene che 1 MJ di energia è espresso da un quantitativo di olio di soia pari a 0,0272 kg.

PCI	36,7 MJ/kg
Contenuto in olio del seme	22%
Resa di spremitura	80%
Resa totale spremitura	17%

Tabella 21: Proprietà fisiche dell'olio di soia e del processo di spremitura utilizzate nell'analisi

Essendo l'obiettivo dello studio quantificare gli impatti generati dalla produzione dell'olio di soia e avendo lasciato la produzione di farine destinate all'alimentazione animale al di fuori dei confini del sistema, è necessario il ricorso ad un procedimento di allocazione basato sul contenuto energetico dell'olio e del pannello nel rispetto della normativa vigente e utilizzando i dati del progetto Biograce (<http://www.biograce.net/>).

Dato l'elevato quantitativo di proteine e grassi contenuto nel pannello di soia soprattutto se ottenuto da una spremitura di tipo meccanico, i valori secondo cui sono stati allocati gli impatti sono riportati nella Tabella 22:

Sottosistema	Base di allocazione
Olio di soia	35%
Pannello di soia	65%

Tabella 22: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica

Nel rispetto dei tale principio allocativo i valori dei flussi di riferimento in uscita da ognuna delle 4 fasi descritte (coltivazione brassica, coltivazione soia, trasporto soia e spremitura soia) sono mostrati nella Figura 38:



Figura 38: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di soia coltivata senza ricorso a fumiganti con valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase

Si noti come al fine di produrre il quantitativo di olio di soia con un contenuto di energia pari a 1 MJ, siano necessari 0,056 kg di seme e in questo caso 0,26 m² di terreno coltivato a soia a causa della minore resa del terreno.

6.2.2 Inventario della produzione di olio da semi di tabacco

Lo studio ha previsto per la produzione di olio combustibile da semi di tabacco il confronto tra 3 diversi scenari:

- 1 la precessione di brassica trinciata e interrata nel campo di coltivazione della tabacco al fine di combattere l'infestazione da nematodi senza il ricorso a pesticidi di sintesi chimica;
- 2 la coltivazione di tabacco secondo un protocollo tradizionale che prevede l'utilizzo di pesticidi di origine chimica (Mancozeb);
- 3 la coltivazione di tabacco senza alcuna forma di lotta all'infestazione da nematodi del terreno.

Oltre a ciò per i primi 2 scenari sono stati modellizzati secondo 2 ulteriori alternative:

- semina in serra riscaldata del tabacco e successivo impianto in campo aperto
- semina diretta in campo aperto ricorrendo a particolari supporti spugnosi biodegradabili con all'interno i necessari quantitativi di fertilizzanti e diserbanti su cui posizionare il seme.

Per lo scenario 3 (coltivazione senza ricorso né a sovescio né a fumiganti chimici) è stato considerato la sola alternativa della crescita preliminare in serra riscaldata.

Tutte le voci di input e di output degli scenari suddetti verranno elencanti nei prossimi paragrafi.

6.2.2.1 Scenario coltivazione tabacco con precessione di brassica

Lo scenario di coltivazione del tabacco preceduto dal sovescio della brassica cresciuta sullo stesso terreno ricalca il protocollo previsto dalla sperimentazione del progetto Susbiofuel. Il ciclo di vita di questo scenario prevede 5 fasi riportate in Figura 39 e dettagliate con tutti i valori di input ed output in seguito:

- la fase di coltivazione della brassica (in figura come *green manure*)
- la fase di crescita in serra delle piantine di tabacco da trapiantare successivamente in campo aperto
- la fase di coltivazione del tabacco
- il trasporto dei semi di tabacco al luogo di spremitura
- la fase di spremitura dei semi

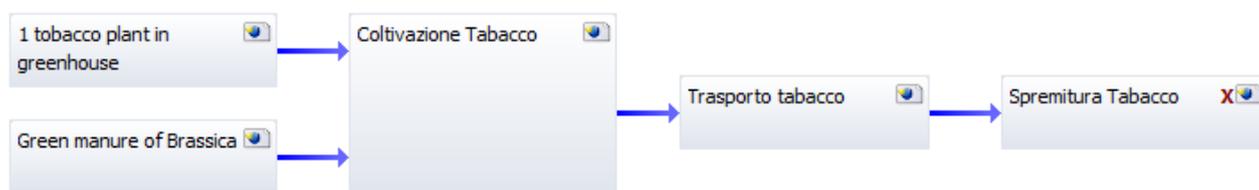


Figura 39: Fasi del ciclo di vita del tabacco con precessione di brassica

Il diagramma di flusso, che rappresenta una schermata del modello costruito nel software Gabi, mostra lo schema logico del processo analizzato. La coltivazione della brassica precede la coltivazione del tabacco al fine di sfruttarne i suoi poteri biofumiganti ed evitare l'uso di pesticidi di formulazione chimica (mancozeb). Successivamente i semi di tabacco prodotti in campo vengono trasportati al luogo di spremitura dove avviene l'estrazione dell'olio e la sua separazione dal pannello.

6.2.2.1.1 Coltivazione della brassica

Il plan costruito in Gabi per modellizzare nel software la coltivazione della brassica considera i dati utilizzati nel progetto Susbiofuel che a sua volta ha organizzato il processo seguendo i dettami del disciplinare sull'agricoltura dell'Emilia Romagna, rivisitato in un'ottica di bassi input di coltivazione.

In Figura 40 il diagramma di flusso del processo di coltivazione della brassica:

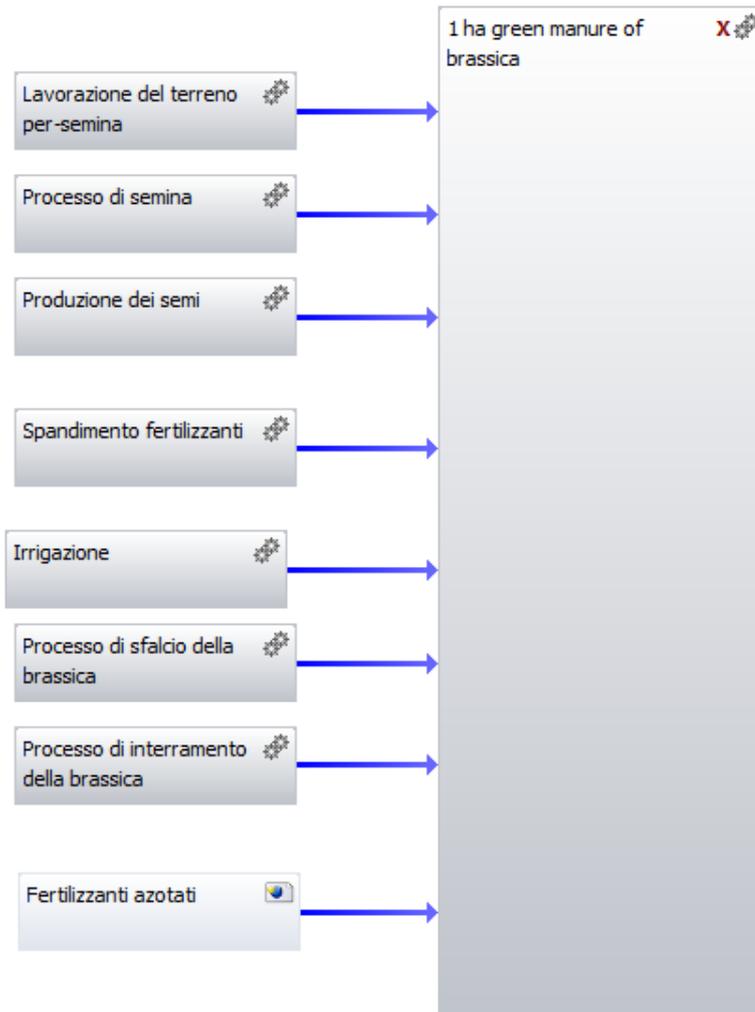


Figura 40: Diagramma di flusso della fase di coltivazione della brassica

Il processo prevede:

- la lavorazione del terreno pre-semina
- il processo di semina
- la produzione dei semi in input
- il processo di spandimento dei fertilizzanti
- il processo di irrigazione
- il processo di sfalcio della brassica
- il processo di interrimento della brassica sfalciata
- la produzione e le emissioni dirette in aria derivanti dall'utilizzo di fertilizzanti azotati.

Il processo è stato creato utilizzando come flusso di riferimento 1 ettaro (1 ha) coltivato a brassica e tutti i processi di banca dati scelti tra quelli disponibili in Ecoinvent per modellizzare i processi di lavorazione del terreno sono stati scelti ed adattati per avere lo stesso consumo di carburante indicato dal disciplinare per la coltivazione della brassica in Emilia Romagna.

I dettagli su tutti i processi che costituiscono la coltivazione di 1 ha di brassica sono riportati di seguito.

Lavorazione del terreno pre-semina

La lavorazione pre-semina del terreno prevede per la brassica una aratura a media profondità, a cui segue un ammutinamento e un pareggiamento del terreno. Nel banca dati Ecoinvent è stato individuato come coerente con le lavorazioni suddette il processo *CH: Tillage, harrowing, by spring tine harrow* considerato per il territorio svizzero (CH). Data l'omogeneità delle modalità di lavorazione e il comune grado di meccanizzazione delle operazioni agricole il dato è stato ritenuto rappresentativo a livello sia geografico che tecnico e anche le misurazioni fatte per ottenere il dataset (1991-2001) sono sufficientemente recenti da renderlo rappresentativo a livello temporale. Il flusso di riferimento di tale processo è 1 ha e dunque il processo è stato richiamato per 1 volta nel processo costruito per modellizzare la coltivazione della brassica dato che i flussi sono stati normalizzati tutti ad 1 ha coltivato a brassica.

Processo di semina

La semina della brassica avviene attraverso un processo meccanizzato che prevede il ricorso ad apposite macchine seminatrici. Il dataset scelto è stato il processo denominato *CH: Sowing* nella banca dati di Ecoinvent. Per tale processo valgono le considerazioni sulla rappresentatività del dato fatte al punto precedente per il processo di lavorazione del terreno pre-semina. Il processo in questo caso però è stato richiamato 1,8 volte al fine di rendere coerenti i consumi contenuti nel dataset *CH: Sowing* (3,82 kg/ha) con i dati di consumo di diesel ricavati dal prontuario dell'agricoltura della regione Emilia Romagna che ammontano a 6,8 kg/ha.

Processo di produzione dei semi di brassica

Come indicato nella normativa europea vigente (Annex V, direttiva 2009/28/CE) per la determinazione delle emissioni di CO₂ dei biocarburanti nell'inventario della fase agricola va considerata anche la produzione dei semi necessari per la coltivazione. Prevedendo il progetto Susbiofuel, la coltivazione di brassica come parte integrante del processo di coltivazione del tabacco per la produzione di olio vegetale, anche la produzione di semi di brassica va considerata. Poiché il disciplinare per la coltivazione indica la semina in file distanti 30-35 cm una dall'altra e 9-10 kg per ettaro di seme, si è ritenuto opportuno prendere il valore superiore con un approccio conservativo (10 kg). Il processo utilizzato è stato *CH: Rapeseed IP, at regional storehouse* che descrive la produzione di seme da Brassica Napus (colza) e non da brassica carinata. Tuttavia gli input di coltivazione, le operazioni necessarie e le rese sono assolutamente identiche tra le due specie tanto da poter considerare l'utilizzo di questo dataset per il modello della brassica un'ottima approssimazione.

Processo di spandimento dei fertilizzanti

Per quanto riguarda il processo di fertilizzazione si possono considerare 3 contributi: il processo di produzione dei fertilizzanti, il processo di spandimento degli stessi e le emissioni derivanti dal loro utilizzo. Nel processo *spandimento dei fertilizzanti* si considera il primo contributo e si rimanda al processo denominato *Fertilizzanti azotati* per gli altri due.

Il processo utilizzato (*CH: fertilizing by broadcaster*) al pari di tutti quelli presi da banca dati è parte del database Ecoinvent e valgono le stesse considerazioni fatte per i precedenti essendo anch'esso riferito al territorio svizzero e frutto di una raccolta dati effettuata nel periodo 1991-2001. Tale processo avendo come flusso di riferimento il valore di 1 ha è stato introdotto nel plan coltivazione brassica con un fattore 1.

Processo di irrigazione

Nell'ottica di produrre brassica a scopo di sovescio e bassi input di coltivazione l'acqua fornita è stata pari a 50 m³/ha. Infatti tale quantitativo d'acqua rappresenta pressoché solo l'acqua necessaria a coprire completamente il terreno subito dopo la pratica del sovescio. Infatti come già spiegato nel

capitolo dedicato al progetto Susbiofuel, al fine di avere una più efficace azione fumigante il terreno viene ricoperto d'acqua per evitare che le sostanze biocide evaporino e vengano disperse in aria. Il progetto ha fatto ricorso a tale soluzione per sostituire l'utilizzo nella pratica tradizionale di un telone in plastica applicato per ottenere lo stesso risultato, ma con tutti gli inconvenienti ambientali legati alla produzione e allo smaltimento della copertura stessa. Il processo di database utilizzato è stato *CH: irrigating* di Ecoinvent che oltre a prevedere il consumo di acqua, considera i consumi energetici correlati e tutte le strutture ed i macchinari necessari per l'irrigazione. Considerando che tale processo di database prevedeva un apporto di acqua pari a 1200 m³/ha, questo è stato introdotto nel plan di coltivazione della brassica con un fattore pari a 0,042. Valgono anche per questo processo le considerazioni fatte per gli altri in relazione alla rappresentatività del dato.

Processo di sfalcio della brassica

Per il processo di trinciatura della brassica è stato scelto il dataset denominato nella banca dati Ecoinvent *CH: Mowing by rotor mower*, moltiplicato per 3 per coerenza con i consumi indicati dal disciplinare (8-10 kg di diesel per ettaro contro i 3 kg/ha indicati dal processo di Ecoinvent).

Processo di interrimento della brassica sfalciata

Il processo interrimento (sovescio) della brassica viene effettuato attraverso una macchina frangizolle a dischi che dal disciplinare può avere un consumo di diesel per ettaro variabile tra i 6,5 kg/ha e i 12 kg/ha. Con un approccio conservativo si è utilizzato con un fattore pari ad 1 il processo di Ecoinvent *CH: tillage, harrowing, by rotary harrow* che prevede un consumo di diesel pari a 11,5 kg/ha. Il processo come gli altri processi di lavorazione del terreno considera anche la produzione di strutture e mezzi secondo una quota parte allocata in base al consumo considerato.

Processo di produzione dei fertilizzanti azotati e generazione di emissioni in aria legate al loro spandimento

A completamento del plan di coltivazione della brassica è stato inserito anche un processo costruito ad hoc che includesse il processo di produzione dei fertilizzanti utilizzati (da database Ecoinvent) e le emissioni in aria di derivati di composti dell'azoto legati alla ripartizione in aria di parte del fertilizzante speso.

Il processo riguardante le emissioni è stato costruito seguendo la metodologia proposta dall'IPCC nel 2006 (IPCC, 2006) e facendo riferimento all'approccio di (Fantin V., 2011).

In Figura 41 una schermata del software Gabi che rappresenta il processo costruito per modellizzare la produzione di fertilizzanti azotati e le emissioni in aria correlate secondo la metodologia proposta dall'IPCC e ripresa da Fantin.

Inputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ RER: urea, as N, at regional store	☘ Mass	1	kg
Flusso			
<hr/>			
Outputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ Fertilizzanti azotati [mineral ferti	☘ Mass	1	kg
➔ Ammonia [Inorganic emissions to air]	☘ Mass	0,121	kg
➔ Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	☘ Mass	1,33	kg
➔ Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	☘ Mass	0,0194	kg
Flusso			

Figura 41: Processo di produzione e uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati

Il processo in questione è stato costruito in riferimento ad 1 kg di fertilizzante utilizzato, ma è stato poi utilizzato nel plan della coltivazione della brassica con un fattore 45 dato che l'input di fertilizzazione previsto dal protocollo Susbiofuel per la brassica prevede un apporto di 45 kg di fertilizzanti azotati come N, urea nello specifico, modellizzata nello studio come *RER: Urea, as N, at regional storehouse*. In questo caso il dato di Ecoinvent ha una rappresentatività geografica di carattere europeo (RER) e si riferisce all'anno 1999. Considerando il prodotto e l'andamento recente della sua evoluzione tecnica, si ritiene il dato, seppur riferito a più di 10 anni fa, ancora rappresentativo a livello sia temporale che tecnologico.

La figura di seguito costituisce una sintesi di quanto detto precedentemente e rappresenta tutti i processi utilizzati nel software Gabi per realizzare il processo di coltivazione di 1 ettaro di brassica.

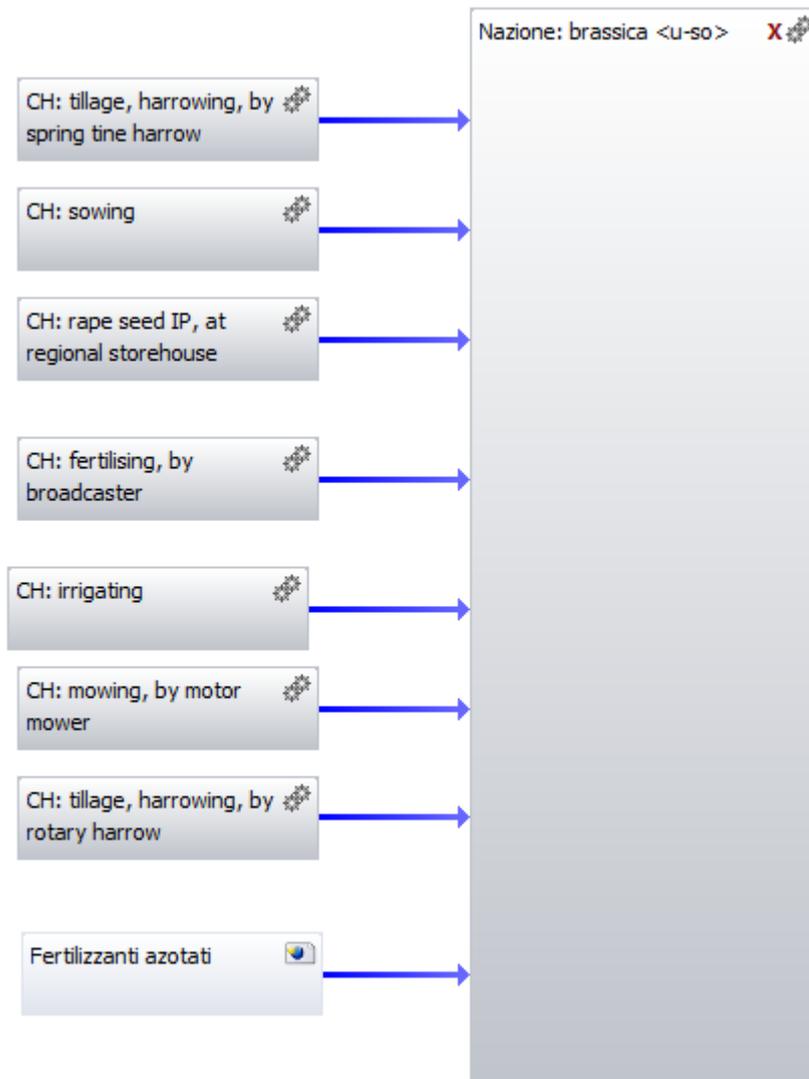


Figura 42: Diagramma di flusso della coltivazione della brassica che mostra i processi di database utilizzati

6.2.2.1.2 Crescita in serra riscaldata delle piantine di tabacco

Il processo di crescita in serra delle piantine di tabacco è stato costruito riferendo i dati al flusso di riferimento di 1 piantina di tabacco. Il prontuario per l'agricoltura dell'Emilia Romagna indica una serra di una superficie di 100 m² per la crescita di 60.000 piantine.

Il prontuario indica per la gli input di fertilizzazione, la quantità di semi e il consumo di gasolio per una serra di 100 m². Dunque considerando questi dati e dividendoli per 60.000 (il numero di piantine coltivabili in una serra di 100 m²) sono stati ottenuti i valori per il dataset creato in Gabi per la serra.

In tabella si riportano i dati riferiti a 100 m² di serra:

Seme di tabacco	0,12 kg
Acqua	100 m ³
Gasolio	300 l
Fertilizzante N	4 kg
Mancozeb	5 kg

Tabella 23: Dati del processo di coltivazione di tabacco in serra (pre-impianto in campo aperto) riferiti a 100 m² di estensione

Non essendo presente nel database di Ecoinvent il processo riferito alla produzione del seme di tabacco, questo è stato approssimato con la produzione di seme di colza. Si tratta di una riproduzione non troppo fedele della realtà studiata, ma che si ritiene possa generare un errore accettabile considerando gli obiettivi dello studio. In figura il plan costruito per modellizzare la serra riscaldata con tutti i processi di database utilizzati:

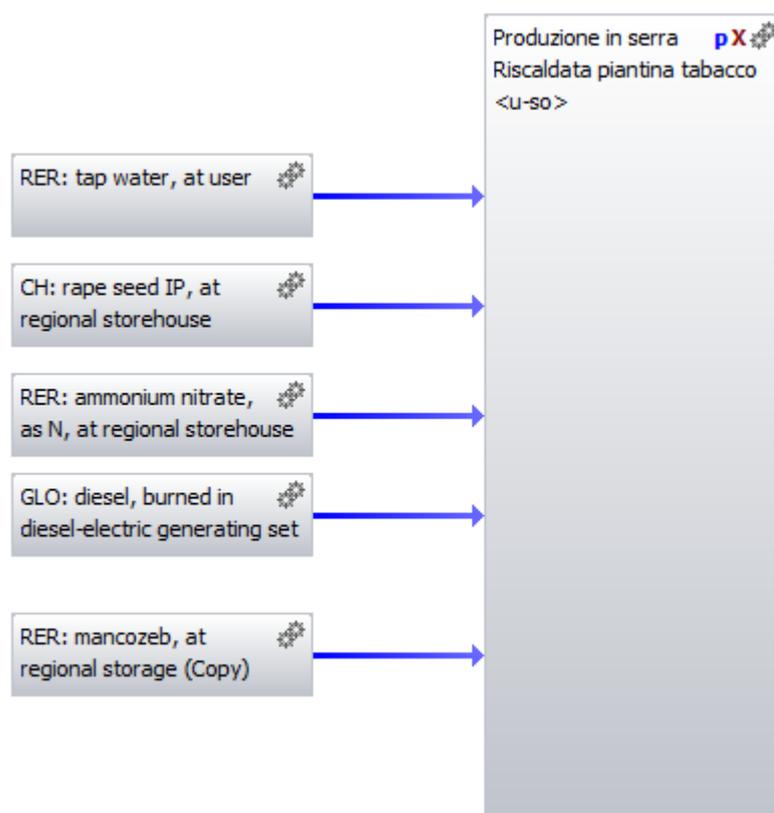


Figura 43: Diagramma di flusso del processo di coltivazione di tabacco in serra riscaldata

Va sottolineato che questo processo è presente solo nell'alternativa che prevede appunto la crescita delle piantine in serra nella loro fase iniziale di sviluppo. Nell'alternativa che prevede la crescita delle piantine su un supporto

biodegradabile, non sono stati considerati i consumi di gasolio (non c'è riscaldamento in questo caso), ma sono stati considerati i consumi di Mancozeb, fertilizzanti e acqua. A causa di carenza di informazioni riguardo le modalità di produzione e i materiali utilizzati per il supporto spugnoso di sostegno al seme questi aspetti non sono stati inclusi nell'analisi. Data la natura biodegradabile di tali materiali si ritiene di poter considerare l'errore generato da questo cut-off in linea con le incertezze naturalmente connesse con la metodologia LCA.

6.2.2.1.3 Coltivazione del tabacco

In questo paragrafo si darà descrizione dettagliata dei processi che costituiscono il plan di coltivazione del tabacco in seguito al sovescio della brassica. Questa precisazione è importante perché nello scenario che non prevede la precessione della brassica il processo di coltivazione del tabacco ha un protocollo diverso.

La precessione della brassica ed il suo successivo interrimento permettono nella coltivazione che segue di evitare l'aratura del terreno e trattamenti pre-semina, poiché possono considerarsi sostitutive di queste le operazioni necessarie alla pratica del sovescio.

In Figura 44 il diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco:

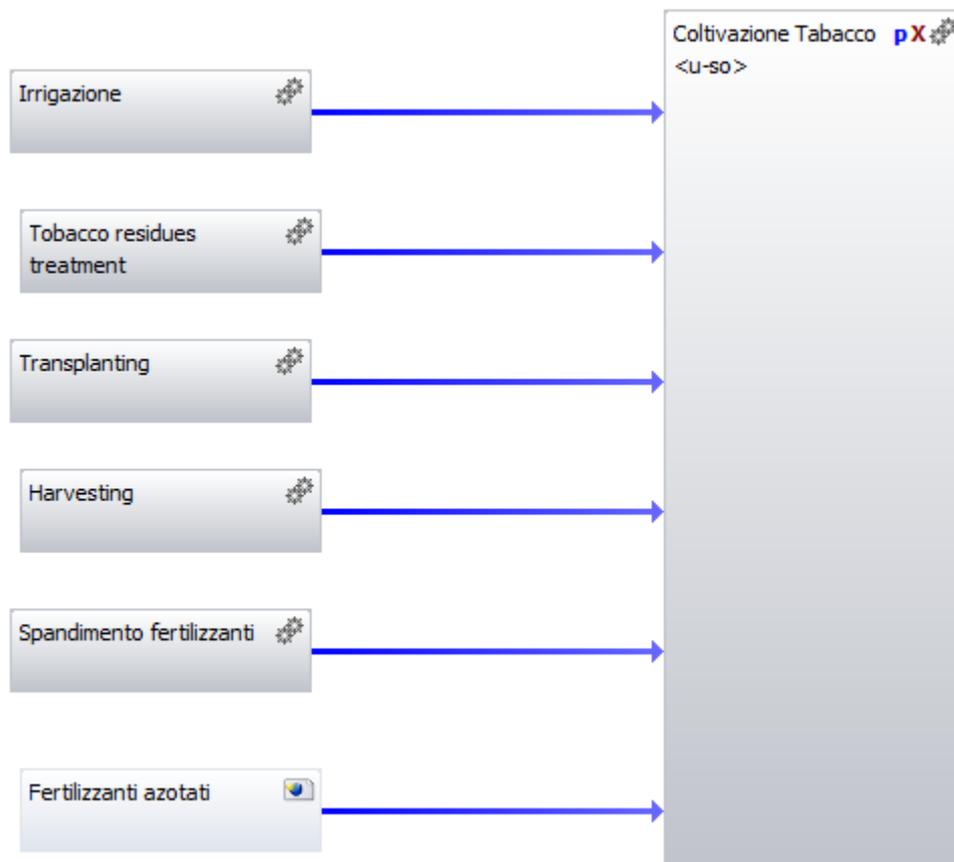


Figura 44: Diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco

Dunque la coltivazione del tabacco se preceduta da brassica prevede:

- il processo di trapianto delle piantine di tabacco cresciute in serra
- il processo di irrigazione
- il processo di spandimento dei fertilizzanti
- la produzione e le emissioni dirette in aria derivanti dall'utilizzo di fertilizzanti azotati.
- il processo di raccolta dei semi di tabacco
- il processo di trattamento finale del terreno con la rimozione dei residui di coltivazione

Il processo di coltivazione del tabacco è stato creato tenendo conto degli input di coltivazione necessari alla lavorazione di 1 ettaro di terreno, tuttavia il flusso di riferimento utilizzato è stata la produzione di semi (in kg) su un ettaro ottenuta dalla resa, misurata per lo scenario tabacco più brassica, pari a 4000 kg/ha. Dunque tutti i processi in input (descritti di seguito) sono stati rapportati

alla produzione di 4000 kg di semi di tabacco e in maniera equivalente alla coltivazione di un ettaro con una resa pari a 4000 kg/ha.

Processo di trapianto delle piantine di tabacco coltivate in serra

Il processo di trapianto è stato modellizzato utilizzando il processo di Ecoinvent *CH: tillage, rotary cultivator* che ha un consumo di diesel per ettaro pari a 14,4 kg. Essendo il consumo di diesel per ettaro dell'operazione di trapianto pari a 12,5 kg/ha il processo scelto risulta una ipotesi cautelativa che ben si sposa con gli obiettivi dello studio.

Processo di irrigazione

Il processo di database utilizzato è stato *CH: irrigating* di Ecoinvent che oltre a prevedere il consumo di acqua, considera i consumi energetici correlati e tutte le strutture ed i macchinari necessari per l'irrigazione. Per il tabacco il progetto Susbiofuel ha previsto un input di irrigazione pari a 2350 m³/ha distribuiti in 5 interventi. Considerando che il suddetto processo di database prevede un apporto di acqua pari a 1200 m³/ha, questo è stato introdotto nel plan di coltivazione del tabacco con un fattore pari a 1,96. Valgono anche per questo processo le considerazioni fatte per gli altri in relazione alla rappresentatività del dato.

Processo di spandimento dei fertilizzanti

Il processo utilizzato (*CH: fertilizing by broadcaster*) al pari di tutti quelli presi da banca dati è parte del database Ecoinvent e valgono le stesse considerazioni fatte per i precedenti essendo anch'esso riferito al territorio svizzero e frutto di una raccolta dati effettuata nel periodo 1991-2001. Tale processo avendo come flusso di riferimento il valore di 1 ha è stato introdotto nel plan di coltivazione del tabacco con un fattore 1.

Processo di produzione dei fertilizzanti azotati e generazione di emissioni in aria legate al loro spandimento

A completamento del plan di coltivazione del tabacco è stato inserito anche un processo costruito ad hoc che includesse il processo di produzione dei fertilizzanti utilizzati (da database Ecoinvent) e le emissioni in aria dei composti dell'azoto legati alla ripartizione in aria di parte del fertilizzante speso.

Il processo riguardante le emissioni è stato costruito seguendo la metodologia proposta dall'IPCC nel 2006 e facendo riferimento all'approccio di (Fantin et al., 2011).

In Figura 45 una schermata del software Gabi che rappresenta il processo costruito per modellizzare la produzione di fertilizzanti azotati e le emissioni in aria correlate secondo la metodologia proposta dall'IPCC ripresa da Fantin.

Inputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ RER: urea, as N, at regional store	☘ Mass	1	kg
Flusso			
<hr/>			
Outputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ Fertilizzanti azotati [mineral fert	☘ Mass	1	kg
➔ Ammonia [Inorganic emissions to air]	☘ Mass	0,121	kg
➔ Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	☘ Mass	1,33	kg
➔ Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	☘ Mass	0,0194	kg
Flusso			

Figura 45: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati

Il processo in questione è stato costruito in riferimento ad 1 kg di fertilizzante utilizzato, ma è stato poi utilizzato nel plan della coltivazione del tabacco con un fattore 90 dato che l'input di fertilizzazione previsto dal protocollo Susbiofuel per il tabacco prevede un apporto di 90 kg di fertilizzanti azotati come N, urea nello specifico, modellizzata nello studio come *RER: Urea, as N, at regional storehouse*. In questo caso il dato di Ecoinvent ha una rappresentatività geografica di carattere europeo (RER) e si riferisce all'anno 1999. Considerando il prodotto in questione e l'andamento recente della sua evoluzione tecnica, si ritiene il dato, seppur riferito a più di 10 anni fa, ancora rappresentativo a livello sia temporale che tecnologico.

Raccolta dei semi di tabacco

Per il processo di raccolta del tabacco è stato scelto il dataset denominato nella banca dati Ecoinvent *CH: Combine harvesting*, che considera l'utilizzo di una

mietitrebbiatrice da grano. Nel progetto Susbiofuel in realtà la pianta di tabacco non viene trebbiata, ma si procede alla raccolta dei semi senza trinciare la pianta. Tuttavia avendo utilizzato in tutto lo studio come criterio di scelta nei datasets delle operazioni colturali il consumo di diesel, la scelta pare opportuna. Il processo di database prevede un consumo di 33,3 kg/ha, mentre l'operazione per il tabacco un consumo di 18 kg/ha di diesel. Dunque il processo è stato incluso nel plan con un fattore pari a 0,56.

Processo di trattamento finale: rimozione dei residui di coltivazione

A fine ciclo di coltivazione il terreno viene dissodato per prepararlo alla coltura successiva e per eliminare i residui di coltivazione. Con un approccio conservativo questo processo è stato interamente allocato alla coltivazione del tabacco e non in parte o del tutto alla coltura successiva. Il processo di Ecoinvent *CH: tillage, harrowing, by rotary harrow* che prevede un consumo di diesel pari a 11,5 kg/ha, viene preso con un fattore pari a 1 perché coerente con i consumi di diesel considerati (12 kg/ha). Il processo come gli altri processi di lavorazione del terreno considera anche la produzione di strutture e mezzi secondo una quota parte allocata in base al consumo considerato.

La figura di seguito costituisce una sintesi di quanto detto precedentemente e rappresenta tutti i processi utilizzati nel software Gabi per realizzare il processo di coltivazione di 1 ettaro di tabacco (4000 kg di semi).

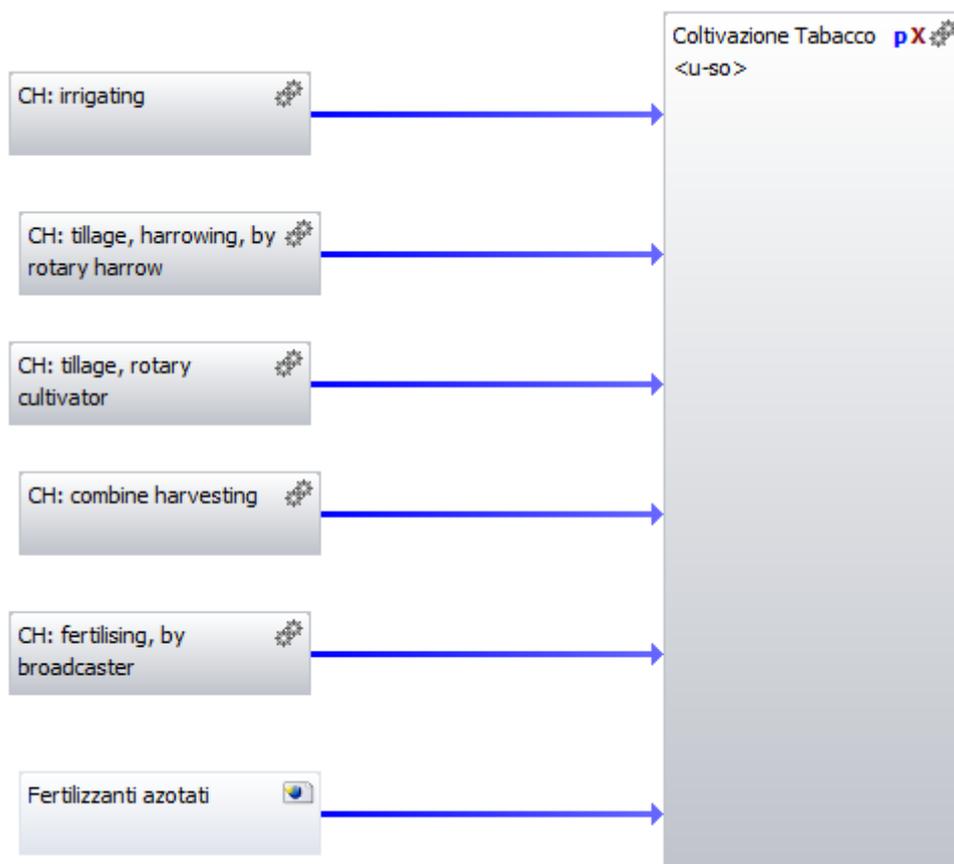


Figura 46: Diagramma di flusso della coltivazione del tabacco che mostra i processi di database utilizzati

6.2.2.1.4 Trasporto dei semi di tabacco

Per il trasporto dei semi dal luogo di produzione al luogo di spremitura è stato considerato una distanza media di 50 km ed un trasporto su un mezzo Euro 3 da 16-32 tonnellate di stazza. In Figura 47 viene riportato il plan costruito su Gabi riferito alla fase di trasporto.

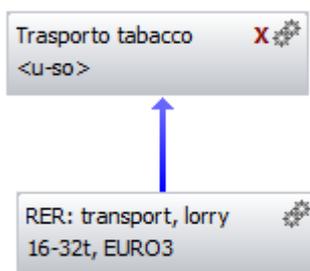


Figura 47: Diagramma di flusso del processo di trasporto del tabacco

6.2.2.1.5 Spremitura dei semi di tabacco

Il processo di spremitura dei semi considerato nel progetto Susbiofuel è costituito dalla spremitura meccanica che presenta minori rese in olio rispetto alla spremitura chimica con solventi, ma permette di ottenere migliori caratteristiche nutrizionali del pannello e minori costi sia ambientali che economici.

Il progetto è stato modellizzato considerando un consumo elettrico pari a 0,05 kWh/kg di seme. Per il consumo elettrico è stato utilizzato un processo della banca dati Ecoinvent denominato *IT: electricity, low voltage, at grid* che contiene al suo interno il processo di produzione di elettricità secondo il mix energetico italiano ed il processo di distribuzione in rete.

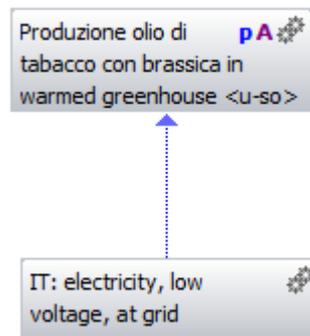


Figura 48: Diagramma di flusso del processo di spremitura dei semi di tabacco

6.2.2.1.6 1 MJ di energia da olio di soia e procedimenti di allocazione.

Come già spiegato nel paragrafo dedicato al campo di applicazione dello studio, l'unità funzionale dello studio è costituita da 1 MJ di energia di olio, in altre parole dal quantitativo di olio (in volume o in massa) che ha un contenuto di energia pari a 1 MJ.

Nel caso del tabacco considerando i parametri raccolti in Tabella 24 si ottiene che 1 MJ di energia è espresso da un quantitativo di olio di soia pari a 0,0265 kg.

PCI	37,7 MJ/kg
Contenuto in olio del seme	41%
Resa di spremitura	80%
Resa totale spremitura	33%

Tabella 24: Proprietà fisiche dell'olio di tabacco e del processo di spremitura utilizzati nell'analisi

6.2.2.1.7 Procedimento di allocazione

Essendo l'obiettivo dello studio quantificare gli impatti generati dalla produzione dell'olio di tabacco e avendo lasciato la produzione di farine destinate all'alimentazione animale al di fuori dei confini del sistema, è necessario il ricorso ad un procedimento di allocazione. Il principio di allocazione introdotto è stato quello basato sul contenuto energetico dell'olio e del pannello nel rispetto della normativa vigente e utilizzando i dati del progetto Biograce (<http://www.biograce.net/>).

I valori secondo cui sono stati allocati gli impatti sono riportati nella Tabella 25:

Sottosistema	Base di allocazione
Olio di tabacco	61%
Pannello di tabacco	39%

Tabella 25: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica

Nel rispetto dei tale principio allocativo i valori dei flussi di riferimento in uscita da ognuna delle fasi descritte (coltivazione brassica, crescita in serra, coltivazione tabacco, trasporto tabacco e spremitura tabacco) sono mostrati nella Figura 49:

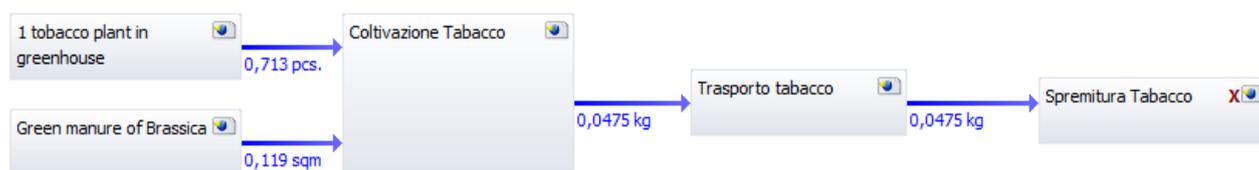


Figura 49: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di tabacco con precessione di brassica con valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase

Dunque al fine di produrre il quantitativo di olio di tabacco con un contenuto di energia pari a 1 MJ, sono necessari 0,0475 kg di seme e 0,119 m² di terreno coltivato a tabacco con precessione di brassica.

6.2.2.2 Scenario coltivazione di tabacco con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente

Lo scenario di coltivazione del tabacco senza precessione della brassica può essere considerato lo scenario alternativo di produzione dell'olio di tabacco a quello appena descritto in quanto ricorre a fumiganti sintetizzati chimicamente per combattere l'infestazione da nematodi che caratterizza i terreni di prova. Il ciclo di vita di questo scenario prevede 4 fasi riportate in Figura 50 e dettagliate con tutti i valori di input ed output in seguito:

- la fase di crescita in serra delle piantine di tabacco
- la fase di coltivazione del tabacco
- il trasporto dei semi di tabacco al luogo di spremitura
- la fase di spremitura dei semi



Figura 50: Fasi del ciclo di vita della produzione di olio di tabacco con contenuto energetico di 1 MJ prodotto con ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente

Il diagramma di flusso in figura, che rappresenta una schermata del modello costruito nel software Gabi, mostra lo schema logico del processo analizzato. Contrariamente allo scenario precedente non c'è la coltivazione della brassica ad anticipare la coltivazione del tabacco. Analogamente a quanto già visto invece, i semi di soia prodotti in campo vengono trasportati al luogo di spremitura dove avviene l'estrazione dell'olio e la sua separazione dal pannello.

6.2.2.2.1 Crescita in serra riscaldata delle piantine di tabacco

Il processo di crescita in serra delle piantine di tabacco è stato costruito riferendo i dati al flusso di riferimento di 1 piantina di tabacco. Il prontuario per l'agricoltura dell'Emilia Romagna indica una serra di una superficie di 100 m² per la crescita di 60.000 piantine.

Il prontuario indica per la gli input di fertilizzazione, la quantità di semi e il consumo di gasolio per una serra di 100 m². Dunque considerando questi dati e dividendoli per 60.000 (il numero di piantine coltivabili in una serra di 100 m²) sono stati ottenuti i valori per il dataset creato in Gabi per la serra.

In tabella si riportano i dati riferiti a 100 m² di serra:

Seme di tabacco	0,12 kg
Acqua	100 m ³
Gasolio	300 l
Fertilizzante N	4 kg
Mancozeb	5 kg

Tabella 26: dati del processo di coltivazione di tabacco in serra (pre-impianto in campo aperto) riferiti a 100 m² di estensione

Non essendo presente nel database di Ecoinvent il processo riferito alla produzione del seme di tabacco, questo è stato approssimato con la produzione di seme di colza. Si tratta di una riproduzione non troppo fedele della realtà studiata, ma che si ritiene possa generare un errore accettabile considerando gli obiettivi dello studio.

In figura il plan costruito per modellizzare la serra riscaldata con tutti i processi di database utilizzati:

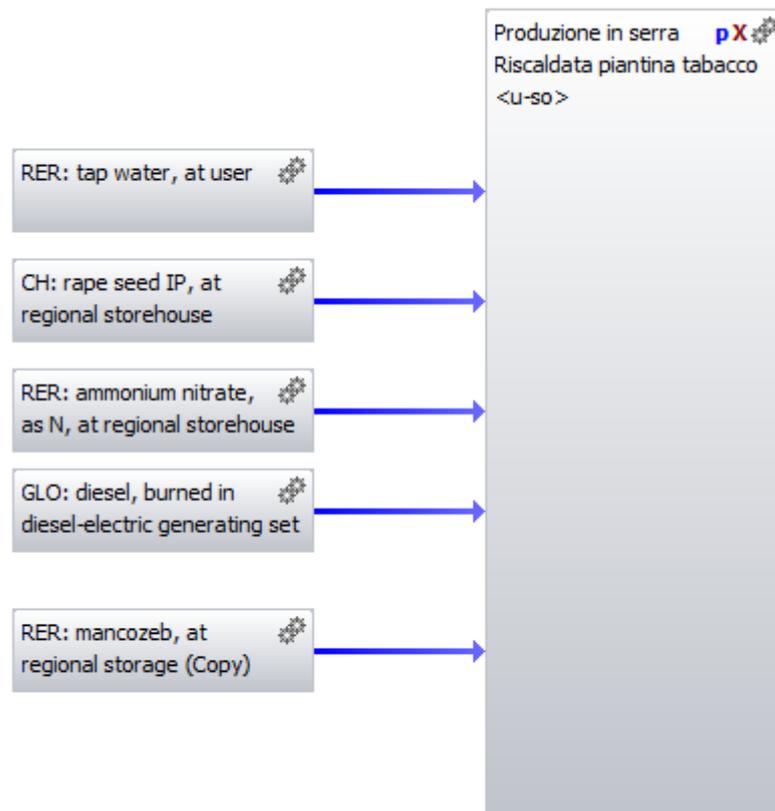


Figura 51: Diagramma di flusso del processo di coltivazione di tabacco in serra riscaldata

Va sottolineato che questo processo è presente solo nell'alternativa che prevede appunto la crescita delle piantine in serra nella loro fase iniziale di sviluppo. Nell'alternativa che prevede la crescita delle piantine su un supporto biodegradabile, non sono stati considerati i consumi di gasolio (non c'è riscaldamento in questo caso), ma sono stati considerati i consumi di Mancozeb, fertilizzanti e acqua, come specificato con maggiore precisione in precedenza.

6.2.2.2 Coltivazione del tabacco

In questo paragrafo si darà descrizione dettagliata dei processi che costituiscono il plan di coltivazione del tabacco.

Non essendoci la precessione della brassica sono necessari il ricorso ad un fumigante di sintetizzazione chimica (Mancozeb, pesticida dei nematodi) e delle lavorazioni del terreno pre-impianto del tabacco cresciuto in serra (o alternativamente pre-semina su supporto biodegradabile, come già spiegato).

In Figura 52 il diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco:

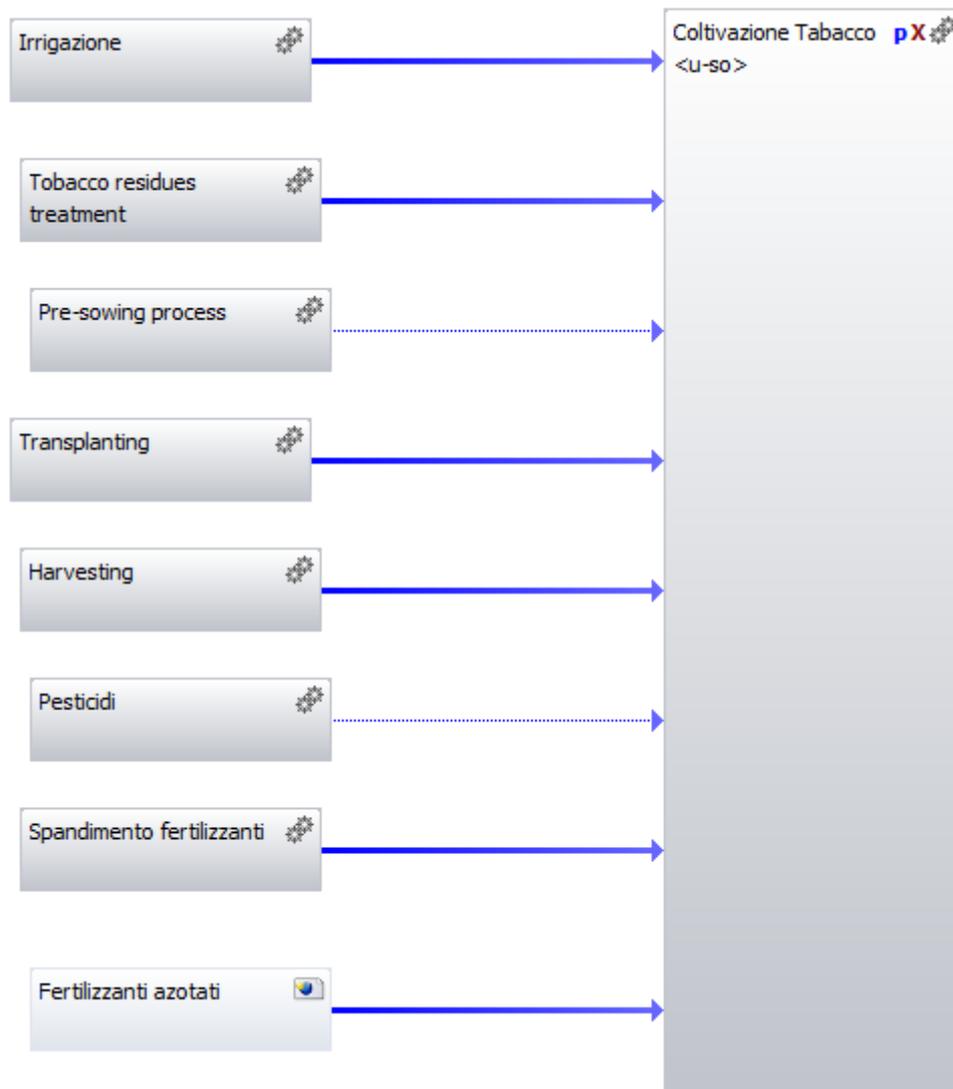


Figura 52: Diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco

Dunque la coltivazione del tabacco prevede:

- il processo di trattamento del terreno pre-impianto/semina
- il processo di trapianto delle piantine di tabacco cresciute in serra
- il processo di irrigazione
- il processo di produzione e uso del pesticida (Mancozeb)
- il processo di spandimento dei fertilizzanti
- la produzione e le emissioni dirette in aria derivanti dall'utilizzo di fertilizzanti azotati.
- il processo di raccolta dei semi di tabacco

- il processo di trattamento finale del terreno con la rimozione dei residui di coltivazione

Il processo di coltivazione del tabacco è stato creato tenendo conto degli input di coltivazione necessari alla lavorazione di 1 ettaro di terreno, tuttavia il flusso di riferimento utilizzato è stata la produzione di semi (in kg) su un ettaro ottenuta dalla resa pari a 4000 kg/ha. Dunque tutti i processi in input (descritti di seguito) sono stati rapportati alla produzione di 4000 kg di semi di tabacco e in maniera equivalente alla coltivazione di un ettaro con una resa pari a 4000 kg/ha.

Processo di trattamento del terreno pre-impianto/semina

La lavorazione pre-impianto/semina del terreno prevede per il tabacco una aratura a media profondità, a cui segue un ammutinamento e un pareggiamento del terreno. Nel banca dati Ecoinvent è stato individuato come coerente con i le lavorazioni suddette il processo *CH: Tillage, harrowing, by spring tine harrow* considerato per il territorio svizzero (CH). Data l'omogeneità delle modalità di lavorazione e il comune grado di meccanizzazione delle operazioni agricole il dato è stato ritenuto rappresentativo a livello sia geografico che tecnico e anche le misurazioni fatte per ottenere il dataset (1991-2001) sono sufficientemente recenti da renderlo rappresentativo a livello temporale. Il flusso di riferimento di tale processo è 1 ha e dunque il processo è stato richiamato per 1 volta nel processo costruito per modellizzare la coltivazione della brassica dato che i consumi di diesel sono in linea con quelli del progetto Susbiofuel.

Processo di trapianto delle piantine di tabacco coltivate in serra

Il processo di trapianto è stato modellizzato utilizzando il processo di Ecoinvent *CH: tillage, rotary cultivator* che ha un consumo di diesel per ettaro pari a 14,4 kg. Essendo il consumo di diesel per ettaro dell'operazione di trapianto pari a 12,5 kg/ha il processo scelto risulta una ipotesi cautelativa che ben si sposa con gli obiettivi dello studio.

Processo di irrigazione

Il processo di database utilizzato è stato *CH: irrigating* di Ecoinvent che oltre a prevedere il consumo di acqua, considera i consumi energetici correlati e tutte

le strutture ed i macchinari necessari per l'irrigazione. Per il tabacco il progetto Susbiofuel ha previsto un input di irrigazione pari a 2350 m³/ha distribuiti in 5 interventi. Considerando che il suddetto processo di database prevede un apporto di acqua pari a 1200 m³/ha, questo è stato introdotto nel plan di coltivazione del tabacco con un fattore pari a 1,96. Valgono anche per questo processo le considerazioni fatte per gli altri in relazione alla rappresentatività del dato.

Processo di produzione ed uso del fumigante chimico (Mancozeb)

Al fine di modellizzare la lotta chimica all'infestazione da nematodi del terreno si è ricorsi ad un processo di database *RER: Mancozeb*, at regional storehouse che include al suo interno tutti i flussi e processi necessari alla produzione di 1 kg di 1-3-Dicloropropene (nome commerciale del pesticida utilizzato in Susbiofuel = Mancozeb) e le emissioni che questo genera in acqua ed in aria. Il processo è stato incluso nel plan di coltivazione del tabacco con un fattore pari ad 9 dato che il quantitativo annualmente conferito per ettaro ammonta ad 9 kg.

Processo di spandimento dei fertilizzanti

Il processo utilizzato (*CH: fertilizing by broadcaster*) al pari di tutti quelli presi da banca dati è parte del database Ecoinvent e valgono le stesse considerazioni fatte per i precedenti essendo anch'esso riferito al territorio svizzero e frutto di una raccolta dati effettuata nel periodo 1991-2001. Tale processo avendo come flusso di riferimento il valore di 1 ha è stato introdotto nel plan di coltivazione del tabacco con un fattore 1.

Processo di produzione dei fertilizzanti azotati e generazione di emissioni in aria legate al loro spandimento

A completamento del plan di coltivazione del tabacco è stato inserito anche un processo costruito ad hoc che includesse il processo di produzione dei fertilizzanti utilizzati (da database Ecoinvent) e le emissioni in aria di derivati di composti dell'azoto legati alla ripartizione in aria di parte del fertilizzante speso. Il processo riguardante le emissioni è stato costruito seguendo la metodologia proposta dall'IPCC nel 2006 e facendo riferimento all'approccio di (Fantin et al. 2011).

In Figura 53 una schermata del software Gabi che rappresenta il processo costruito per modellizzare la produzione di fertilizzanti azotati e le emissioni in aria correlate secondo la metodologia proposta dall'IPCC ripresa da Fantin.

Inputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➡ RER: urea, as N, at regional store	🌿 Mass	1	kg
Flusso			
←			
Outputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➡ Fertilizzanti azotati [mineral ferti	🌿 Mass	1	kg
➡ Ammonia [Inorganic emissions to air]	🌿 Mass	0,121	kg
➡ Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	🌿 Mass	1,33	kg
➡ Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	🌿 Mass	0,0194	kg
Flusso			

Figura 53: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati

Il processo in questione è stato costruito in riferimento ad 1 kg di fertilizzante utilizzato, ma è stato poi utilizzato nel plan della coltivazione tabacco con un fattore 90 dato che l'input di fertilizzazione previsto dal protocollo Susbiofuel per il tabacco prevede un apporto di 90 kg di fertilizzanti azotati come N. In definitiva nei 2 scenari analizzati (*tabacco+sovescio brassica* e *tabacco senza sovescio brassica*) l'apporto di fertilizzanti azotati ammonta sempre ad un totale di 90 kg . Nel caso di sovescio 45 kg di fertilizzanti vengono forniti prima della coltivazione della brassica ed i rimanenti 45 kg prima della coltivazione del tabacco. Nel caso dello scenario della coltivazione del tabacco senza ricorso a fumiganti, l'intero quantitativo di 90 kg di fertilizzanti viene invece conferito in un'unica soluzione prima della semina del tabacco. Il processo di produzione di fertilizzante di database utilizzato è stato *RER: Urea, as N, at regional storehouse*. In questo caso il dato di Ecoinvent ha una rappresentatività geografica di carattere europeo (RER) e si riferisce all'anno 1999. Considerando il prodotto in questione e l'andamento recente della sua

evoluzione tecnica, si ritiene il dato, seppur riferito a più di 10 anni fa, ancora rappresentativo a livello sia temporale che tecnologico.

Raccolta dei semi di tabacco

Per il processo di raccolta del tabacco è stato scelto il dataset denominato nella banca dati Ecoinvent *CH: Combine harvesting*, che considera l'utilizzo di una mietitrebbiatrice da grano. Nel progetto Susbiofuel in realtà la pianta di tabacco non viene trebbiata, ma si procede alla raccolta dei semi senza trinciare la pianta. Tuttavia avendo utilizzato in tutto lo studio come criterio di scelta nei datasets delle operazioni colturali il consumo di diesel, la scelta pare opportuna. Il processo di database prevede un consumo di 33,3 kg/ha, mentre l'operazione per il tabacco un consumo di 18 kg/ha di diesel. Dunque il processo è stato incluso nel plan con un fattore pari a 0,56.

Processo di trattamento finale: rimozione dei residui di coltivazione

A fine ciclo di coltivazione il terreno viene dissodato per prepararlo alla coltura successiva e per eliminare i residui di coltivazione. Con un approccio conservativo questo processo è stato interamente allocato alla coltivazione del tabacco e non in parte o del tutto alla coltura successiva. Il processo di Ecoinvent *CH: tillage, harrowing, by rotary harrow* che prevede un consumo di diesel pari a 11,5 kg/ha, viene preso con un fattore pari a 1 perché coerente con i consumi di diesel considerati (12 kg/ha). Il processo come gli altri processi di lavorazione del terreno considera anche la produzione di strutture e mezzi secondo una quota parte allocata in base al consumo considerato.

La figura di seguito costituisce una sintesi di quanto detto precedentemente e rappresenta tutti i processi utilizzati nel software Gabi per realizzare il processo di coltivazione di 1 ettaro di tabacco (4000 kg di semi).

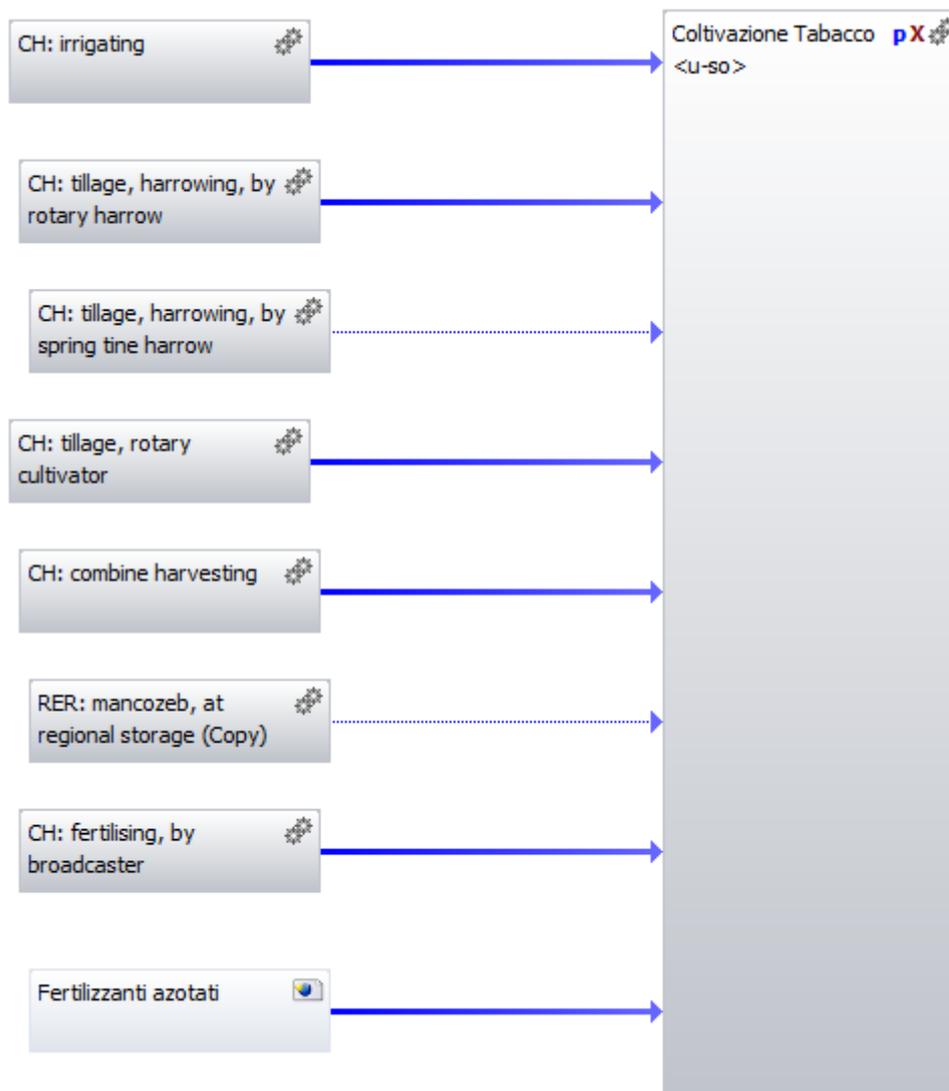


Figura 54: Diagramma di flusso della coltivazione del tabacco che mostra i processi di database utilizzati

6.2.2.2.3 Trasporto dei semi di tabacco

Per il trasporto dei semi dal luogo di produzione al luogo di spremitura è stato considerato una distanza media di 50 km ed un trasporto su un mezzo Euro 3 da 16-32 tonnellate di stazza. In Figura 55 viene riportato il plan costruito su Gabi riferito alla fase di trasporto.



Figura 55: Diagramma di flusso del processo di trasporto del tabacco

6.2.2.2.4 Spremitura dei semi di tabacco

Il processo di spremitura dei semi considerato nel progetto Susbiofuel è costituito dalla spremitura meccanica che presenta minori rese in olio rispetto alla spremitura chimica con solventi, ma permette di ottenere migliori caratteristiche nutrizionali del pannello e minori costi sia ambientali che economici.

Il progetto è stato modellizzato considerando un consumo elettrico pari a 0,05 kWh/kg di seme. Per il consumo elettrico è stato utilizzato un processo della banca dati Ecoinvent denominato *IT: electricity, low voltage, at grid* che contiene al suo interno il processo di produzione di elettricità secondo il mix energetico italiano ed il processo di distribuzione in rete.

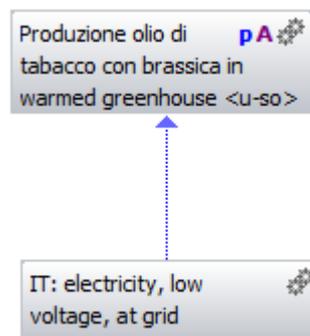


Figura 56: Diagramma di flusso del processo di spremitura dei semi di tabacco

6.2.2.2.5 1 MJ di energia da olio di soia e procedimenti di allocazione.

Come già spiegato nel paragrafo dedicato al campo di applicazione dello studio, l'unità funzionale dello studio è costituita da 1 MJ di energia di olio, in altre parole dal quantitativo di olio (in volume o in massa) che ha un contenuto di energia pari a 1 MJ.

Nel caso del tabacco considerando i parametri raccolti in Tabella 27 si ottiene che 1 MJ di energia è espresso da un quantitativo di olio di soia pari a 0,0265 kg.

PCI	37,7 MJ/kg
Contenuto in olio del seme	41%
Resa di spremitura	80%
Resa totale spremitura	33%

Tabella 27: Proprietà fisiche dell'olio di tabacco e del processo di spremitura utilizzati nell'analisi

6.2.2.2.6 Procedimento di allocazione

Essendo l'obiettivo dello studio quantificare gli impatti generati dalla produzione dell'olio di tabacco e avendo lasciato la produzione di farine destinate all'alimentazione animale al di fuori dei confini del sistema, è necessario il ricorso ad un procedimento di allocazione. Il principio di allocazione utilizzato è stato quello basato sul contenuto energetico dell'olio e del pannello nel rispetto della normativa vigente e utilizzando i dati del progetto Biograce (<http://www.biograce.net/>).

I valori secondo cui sono stati allocati gli impatti sono riportati nella Tabella 28:

Sottosistema	Base di allocazione
Olio di tabacco	61%
Pannello di tabacco	39%

Tabella 28: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica

Nel rispetto dei tale principio allocativo i valori dei flussi di riferimento in uscita da ognuna delle fasi descritte (crescita in serra, coltivazione tabacco, trasporto tabacco e spremitura tabacco) sono mostrati nella Figura 57:

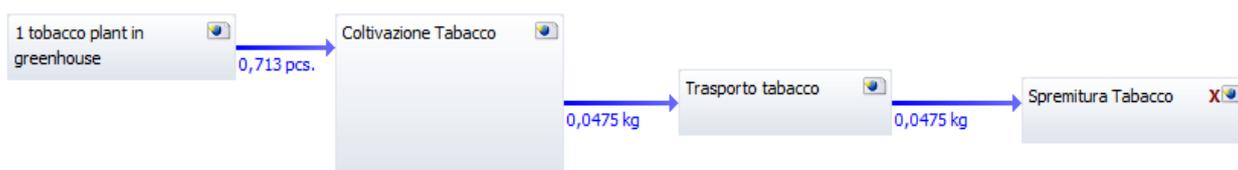


Figura 57: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di tabacco con ricorso a fumiganti di sintetizzazione chimica con valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase

Dunque al fine di produrre il quantitativo di olio di tabacco con un contenuto di energia pari a 1 MJ, sono necessari 0,0475 kg di seme e 0,119 m² di terreno coltivato a tabacco, come nel caso di precessione di brassica essendo la stessa la resa di coltivazione.

6.2.2.3 Scenario coltivazione di tabacco senza ricorso a fumiganti nella fase vegetativa

E' stato infine realizzato uno scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a fumiganti del terreno per combattere l'infestazione da nematodi nella fase vegetativa della pianta. Va infatti precisato che in questo scenario durante la fase di crescita in serra è stato applicato lo stesso apporto di Mancozeb a piantina ($8,33 \cdot 10^{-5}$) considerato in tutti i precedenti scenari che includono la crescita in serra. Infatti nelle prime fasi di sviluppo il tabacco soffre particolarmente l'attacco dei nematodi e dunque un ciclo di coltivazione assolutamente privo di un sistema di lotta a tali infestanti è impensabile per il tabacco. A conferma di questa particolare sofferenza il fatto che la resa senza il ricorso a sistemi di fumigazione durante la fase vegetativa causa un crollo delle rese quantificabile in almeno il 35% in meno rispetto ai 4000 kg/ha considerati negli scenari precedenti.

Il ciclo di vita di questo scenario *senza ricorso a fumiganti nella fase vegetativa* prevede 4 fasi riportate in Figura 58 e dettagliate con tutti i valori di input ed output in seguito:

- la fase di crescita in serra delle piantine di tabacco
- la fase di coltivazione del tabacco
- il trasporto dei semi di tabacco al luogo di spremitura
- la fase di spremitura dei semi



Figura 58: Fasi del ciclo di vita della produzione di olio di tabacco con contenuto energetico di 1 MJ prodotto senza ricorso a fumiganti nella fase vegetativa

Il diagramma di flusso in figura, che rappresenta una schermata del modello costruito nel software Gabi, mostra lo schema logico del processo analizzato. Contrariamente allo scenario precedente non c'è la coltivazione della brassica ad anticipare la coltivazione del tabacco. Analogamente a quanto già visto invece, i semi di soia prodotti in campo vengono trasportati al luogo di spremitura dove avviene l'estrazione dell'olio e la sua separazione dal pannello.

6.2.2.3.1 Crescita in serra riscaldata delle piantine di tabacco

Il processo di crescita in serra delle piantine di tabacco è stato costruito riferendo i dati al flusso di riferimento di 1 piantina di tabacco. Il prontuario per l'agricoltura dell'Emilia Romagna indica una serra di una superficie di 100 m² per la crescita di 60.000 piantine.

Il prontuario indica per la gli input di fertilizzazione, la quantità di semi e il consumo di gasolio per una serra di 100 m². Dunque considerando questi dati e dividendoli per 60.000 (il numero di piantine coltivabili in una serra di 100 m²) sono stati ottenuti i valori per il dataset creato in Gabi per la serra.

In tabella si riportano i dati riferiti a 100 m² di serra:

Seme di tabacco	0,12 kg
Acqua	100 m ³
Gasolio	300 l
Fertilizzante N	4 kg
Mancozeb	5 kg

Tabella 29: Dati del processo di coltivazione di tabacco in serra (pre-impianto in campo aperto) riferiti a 100 m² di estensione

Non essendo presente nel database di Ecoinvent il processo riferito alla produzione del seme di tabacco, questo è stato approssimato con la produzione di seme di colza. Si tratta di una riproduzione non troppo fedele della realtà studiata, ma che si ritiene possa generare un errore accettabile considerando gli obiettivi dello studio.

In figura il plan costruito per modellizzare la serra riscaldata con tutti i processi di database utilizzati:

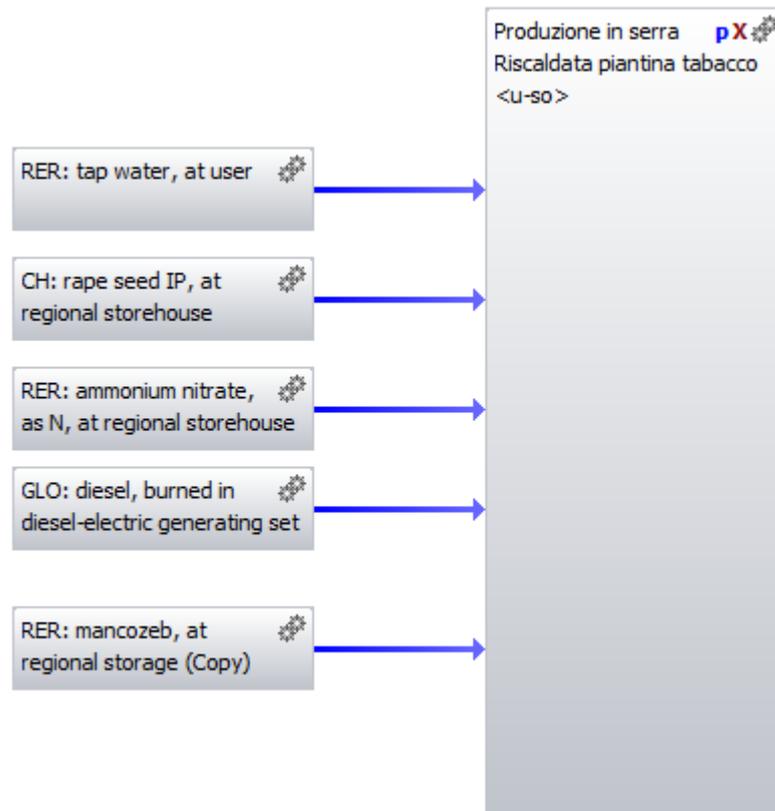


Figura 59: Diagramma di flusso del processo di coltivazione di tabacco in serra riscaldata

Va sottolineato che questo processo è presente solo nell'alternativa che prevede appunto la crescita delle piantine in serra nella loro fase iniziale di sviluppo. Nell'alternativa che prevede la crescita delle piantine su un supporto biodegradabile, non sono stati considerati i consumi di gasolio (non c'è riscaldamento in questo caso), ma sono stati considerati i consumi di Mancozeb, fertilizzanti e acqua.

6.2.2.3.2 Coltivazione del tabacco

In questo paragrafo si darà descrizione dettagliata dei processi che costituiscono il plan di coltivazione del tabacco.

In Figura 60 il diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco:

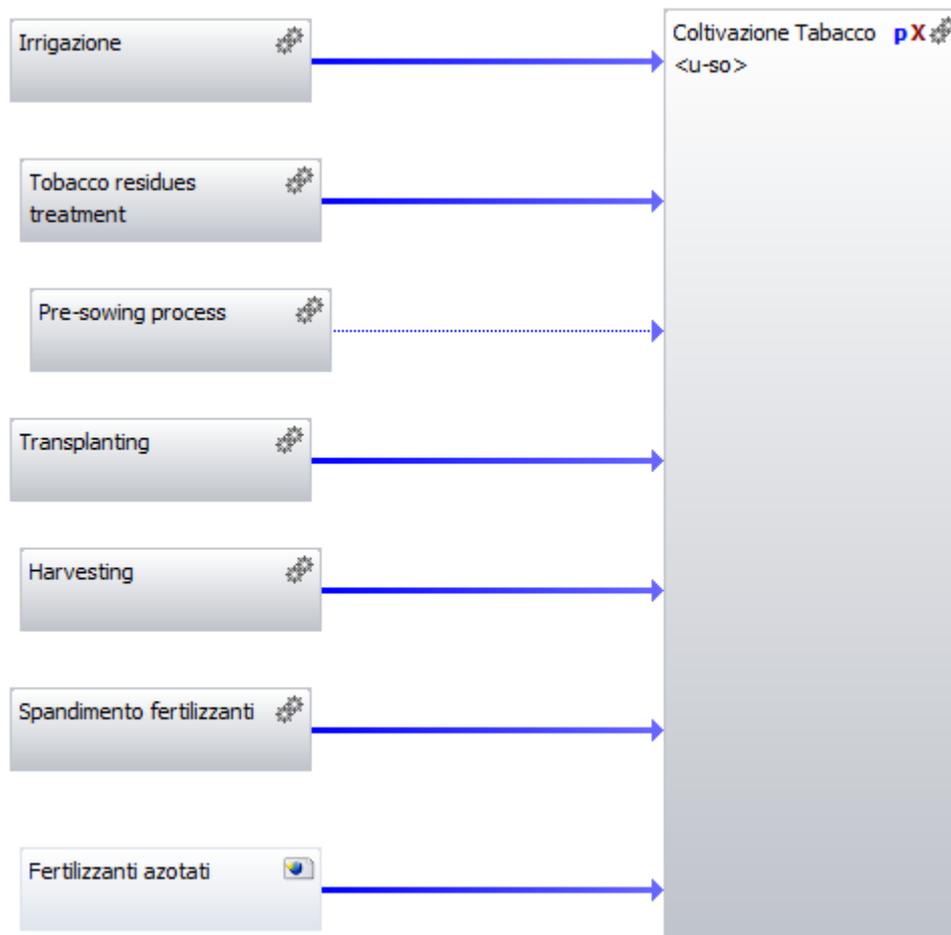


Figura 60: Diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco

Dunque la coltivazione del tabacco prevede:

- il processo di trattamento del terreno pre-impianto/semina
- il processo di trapianto delle piantine di tabacco cresciute in serra
- il processo di irrigazione
- il processo di spandimento dei fertilizzanti
- la produzione e le emissioni dirette in aria derivanti dall'utilizzo di fertilizzanti azotati.
- il processo di raccolta dei semi di tabacco
- il processo di trattamento finale del terreno con la rimozione dei residui di coltivazione

Il processo di coltivazione del tabacco è stato creato tenendo conto degli input di coltivazione necessari alla lavorazione di 1 ettaro di terreno, tuttavia il flusso di riferimento utilizzato è stata la produzione di semi (in kg) su un ettaro

ottenuta dalla resa pari a 2600 kg/ha (- 35% rispetto alla resa ricorrendo a brassica o Mancozeb per la lotta ai nematodi). Dunque tutti i processi in input (descritti di seguito) sono stati rapportati alla produzione di 2600 kg di semi di tabacco e in maniera equivalente alla coltivazione di un ettaro con una resa pari a 2600 kg/ha.

Processo di trattamento del terreno pre-impianto/semina

La lavorazione pre-impianto/semina del terreno prevede per il tabacco una aratura a media profondità, a cui segue un ammutinamento e un pareggiamento del terreno. Nel banca dati Ecoinvent è stato individuato come coerente con i le lavorazioni suddette il processo *CH: Tillage, harrowing, by spring tine harrow* considerato per il territorio svizzero (CH). Data l'omogeneità delle modalità di lavorazione e il comune grado di meccanizzazione delle operazioni agricole il dato è stato ritenuto rappresentativo a livello sia geografico che tecnico e anche le misurazioni fatte per ottenere il dataset (1991-2001) sono sufficientemente recenti da renderlo rappresentativo a livello temporale. Il flusso di riferimento di tale processo è 1 ha e dunque il processo è stato richiamato per 1 volta nel processo costruito per modellizzare la coltivazione della brassica dato che i consumi di diesel sono in linea con quelli del progetto Susbiofuel.

Processo di trapianto delle piantine di tabacco coltivate in serra

Il processo di trapianto è stato modellizzato utilizzando il processo di Ecoinvent *CH: tillage, rotary cultivator* che ha un consumo di diesel per ettaro pari a 14,4 kg. Essendo il consumo di diesel per ettaro dell'operazione di trapianto pari a 12,5 kg/ha il processo scelto risulta una ipotesi cautelativa che ben si sposa con gli obiettivi dello studio.

Processo di irrigazione

Il processo di database utilizzato è stato *CH: irrigating* di Ecoinvent che oltre a prevedere il consumo di acqua, considera i consumi energetici correlati e tutte le strutture ed i macchinari necessari per l'irrigazione. Per il tabacco il progetto Susbiofuel ha previsto un input di irrigazione pari a 2350 m³/ha distribuiti in 5 interventi. Considerando che il suddetto processo di database prevede un apporto di acqua pari a 1200 m³/ha, questo è stato introdotto nel plan di coltivazione del tabacco con un fattore pari a 1,96. Valgono anche per questo

processo le considerazioni fatte per gli altri in relazione alla rappresentatività del dato.

Processo di spandimento dei fertilizzanti

Il processo utilizzato (*CH: fertilizing by broadcaster*) al pari di tutti quelli presi da banca dati è parte del database Ecoinvent e valgono le stesse considerazioni fatte per i precedenti essendo anch'esso riferito al territorio svizzero e frutto di una raccolta dati effettuata nel periodo 1991-2001. Tale processo avendo come flusso di riferimento il valore di 1 ha è stato introdotto nel plan di coltivazione del tabacco con un fattore 1.

Processo di produzione dei fertilizzanti azotati e generazione di emissioni in aria legate al loro spandimento

A completamento del plan di coltivazione del tabacco è stato inserito anche un processo costruito ad hoc che includesse il processo di produzione dei fertilizzanti utilizzati (da database Ecoinvent) e le emissioni in aria di derivati di composti dell'azoto legati alla ripartizione in aria di parte del fertilizzante speso. Il processo riguardante le emissioni è stato costruito seguendo la metodologia proposta dall'IPCC nel 2006 e facendo riferimento all'approccio di (Fantin et al., 2011). In Figura 61 una schermata del software Gabi che rappresenta il processo costruito per modellizzare la produzione di fertilizzanti azotati e le emissioni in aria correlate secondo la metodologia proposta dall'IPCC ripresa da Fantin.

Inputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ RER: urea, as N, at regional store	🌿 Mass	1	kg
Flusso			
Outputs			
Flusso	Quantità	Ammontare	Unità
➔ Fertilizzanti azotati [mineral ferti	🌿 Mass	1	kg
➔ Ammonia [Inorganic emissions to air]	🌿 Mass	0,121	kg
➔ Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	🌿 Mass	1,33	kg
➔ Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	🌿 Mass	0,0194	kg
Flusso			

Figura 61: Processo di produzione ed uso (emissioni in aria ed acqua) dei fertilizzanti azotati

Il processo in questione è stato costruito in riferimento ad 1 kg di fertilizzante utilizzato, ma è stato poi utilizzato nel plan della coltivazione tabacco con un fattore 90 dato che l'input di fertilizzazione previsto dal protocollo Susbiofuel per il tabacco prevede un apporto di 90 kg di fertilizzanti azotati come N. In definitiva nei 2 scenari analizzati (*tabacco+sovescio brassica* e *tabacco senza sovescio brassica*) l'apporto di fertilizzanti azotati ammonta sempre ad un totale di 90 kg . Nel caso di sovescio 45 kg di fertilizzanti vengono forniti prima della coltivazione della brassica ed i rimanenti 45 kg prima della coltivazione del tabacco. Nel caso dello scenario della coltivazione del tabacco senza ricorso a fumiganti, l'intero quantitativo di 90 kg di fertilizzanti viene invece conferito in un'unica soluzione prima della semina del tabacco. Il processo di produzione di fertilizzante di database utilizzato è stato *RER: Urea, as N, at regional storehouse*. In questo caso il dato di Ecoinvent ha una rappresentatività geografica di carattere europeo (RER) e si riferisce all'anno 1999. Considerando il prodotto in questione e l'andamento recente della sua evoluzione tecnica, si ritiene il dato, seppur riferito a più di 10 anni fa, ancora rappresentativo a livello sia temporale che tecnologico.

Raccolta dei semi di tabacco

Per il processo di raccolta del tabacco è stato scelto il dataset denominato nella banca dati Ecoinvent *CH: Combine harvesting*, che considera l'utilizzo di una

mietitrebbiatrice da grano. Nel progetto Susbiofuel in realtà la pianta di tabacco non viene trebbiata, ma si procede alla raccolta dei semi senza trinciare la pianta. Tuttavia avendo utilizzato in tutto lo studio come criterio di scelta nei datasets delle operazioni colturali il consumo di diesel, la scelta pare opportuna. Il processo di database prevede un consumo di 33,3 kg/ha, mentre l'operazione per il tabacco un consumo di 18 kg/ha di diesel. Dunque il processo è stato incluso nel plan con un fattore pari a 0,56.

Processo di trattamento finale: rimozione dei residui di coltivazione

A fine ciclo di coltivazione il terreno viene dissodato per prepararlo alla coltura successiva e per eliminare i residui di coltivazione. Con un approccio conservativo questo processo è stato interamente allocato alla coltivazione del tabacco e non in parte o del tutto alla coltura successiva. Il processo di Ecoinvent *CH: tillage, harrowing, by rotary harrow* che prevede un consumo di diesel pari a 11,5 kg/ha, viene preso con un fattore pari a 1 perché coerente con i consumi di diesel considerati (12 kg/ha). Il processo come gli altri processi di lavorazione del terreno considera anche la produzione di strutture e mezzi secondo una quota parte allocata in base al consumo considerato.

La figura di seguito costituisce una sintesi di quanto detto precedentemente e rappresenta tutti i processi utilizzati nel software Gabi per realizzare il processo di coltivazione di 1 ettaro di tabacco (2600 kg di semi).

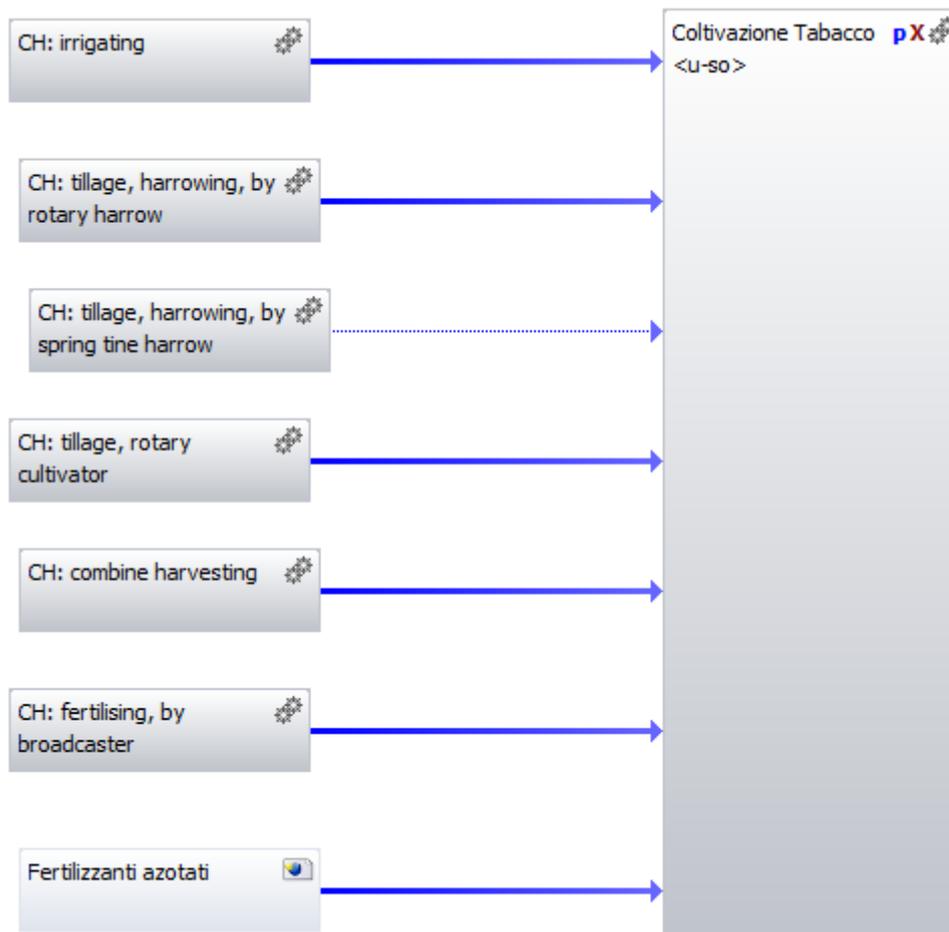


Figura 62: Diagramma di flusso del processo di coltivazione del tabacco

6.2.2.3.3 Trasporto dei semi di tabacco

Per il trasporto dei semi dal luogo di produzione al luogo di spremitura è stato considerato una distanza media di 50 km ed un trasporto su un mezzo Euro 3 da 16-32 tonnellate di stazza. In Figura 63 viene riportato il plan costruito su Gabi riferito alla fase di trasporto.



Figura 63: Diagramma di flusso del processo di trasporto del tabacco

6.2.2.3.4 Spremitura dei semi di tabacco

Il processo di spremitura dei semi considerato nel progetto Susbiofuel è costituito dalla spremitura meccanica che presenta minori rese in olio rispetto alla spremitura chimica con solventi, ma permette di ottenere migliori caratteristiche nutrizionali del pannello e minori costi sia ambientali che economici.

Il progetto è stato modellizzato considerando un consumo elettrico pari a 0,05 kWh/kg di seme. Per il consumo elettrico è stato utilizzato un processo della banca dati Ecoinvent denominato *IT: electricity, low voltage, at grid* che contiene al suo interno il processo di produzione di elettricità secondo il mix energetico italiano ed il processo di distribuzione in rete.

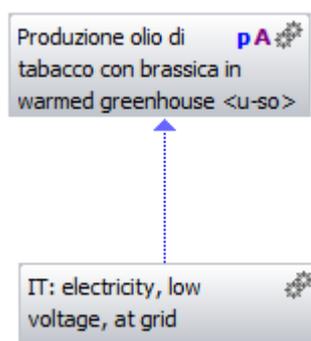


Figura 64: Diagramma di flusso del processo di spremitura dei semi di tabacco

6.2.2.3.5 1 MJ di energia da olio di soia e procedimenti di allocazione.

Come già spiegato nel paragrafo dedicato al campo di applicazione dello studio, l'unità funzionale dello studio è costituita da 1 MJ di energia di olio, in altre parole dal quantitativo di olio (in volume o in massa) che ha un contenuto di energia pari a 1 MJ.

Nel caso del tabacco considerando i parametri raccolti in Tabella 30 si ottiene che 1 MJ di energia è espresso da un quantitativo di olio di soia pari a 0,0265 kg.

PCI	37,7 MJ/kg
Contenuto in olio del seme	41%
Resa di spremitura	80%
Resa totale spremitura	33%

Tabella 30: Proprietà fisiche dell'olio di tabacco e del processo di spremitura utilizzati nell'analisi

6.2.2.3.6 Procedimento di allocazione

Essendo l'obiettivo dello studio quantificare gli impatti generati dalla produzione dell'olio di tabacco e avendo lasciato la produzione di farine destinate all'alimentazione animale al di fuori dei confini del sistema, è necessario il ricorso ad un procedimento di allocazione. Il principio di allocazione utilizzato è stato quello basato sul contenuto energetico dell'olio e del pannello nel rispetto della normativa vigente e utilizzando i dati del progetto Biograce (<http://www.biograce.net/>).

I valori secondo cui sono stati allocati gli impatti sono riportati nella Tabella 31:

Sottosistema	Base di allocazione
Olio di tabacco	61%
Pannello di tabacco	39%

Tabella 31: Fattori numerici utilizzati nel processo di allocazione energetica

Nel rispetto dei tale principio allocativo i valori dei flussi di riferimento in uscita da ognuna delle fasi descritte (crescita in serra, coltivazione tabacco, trasporto tabacco e spremitura tabacco) sono mostrati nella Figura 65:

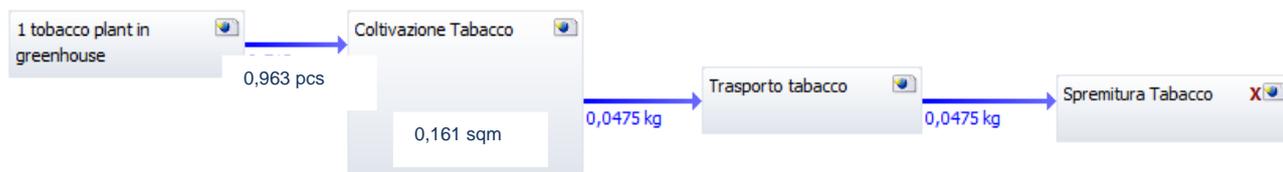


Figura 65: Diagramma di flusso del ciclo di vita della produzione di 1 MJ di energia da olio di tabacco senza ricorso a fumiganti nella fase vegetativa con indicazione dei valori dei flussi di riferimento uscenti da ogni fase

Dunque al fine di produrre il quantitativo di olio di tabacco con un contenuto di energia pari a 1 MJ, sono necessari 0,0475 kg di seme e 0,161 m² di terreno coltivato a tabacco.

6.3 Valutazione degli impatti

La fase di valutazione degli impatti ambientali consiste nella classificazione e caratterizzazione delle emissioni di inquinanti calcolate nella fase di analisi di *Inventario* come previsto dalla ISO 14044. In accordo con quanto definito nei campi dall'applicazione dello studio, la valutazione degli impatti è stata effettuata rispetto alle categorie d'impatto del metodo CML 2001 aggiornato al Novembre 2010 e utilizzando i relativi modelli di caratterizzazione. Ai fini dell'interpretazione, i risultati sono stati anche normalizzati utilizzando il metodo CML 2001 aggiornato al novembre 2010 e riferito all'Europa a 25.

6.3.1 Valutazione degli impatti per gli scenari di produzione di olio di soia analizzati

In questa sezione della valutazione degli impatti dello studio LCA vengono presentati i risultati riferiti agli scenari di produzione di olio di soia di cui si è precedentemente descritto l'inventario. Inizialmente si procede con l'analisi dei risultati sia di caratterizzazione che di normalizzazione del ciclo di vita dell'olio con quantitativo energetico pari ad 1 MJ ottenuto da coltivazione di soia con precessione di brassica. Successivamente si procede con il confronto tra lo scenario che considera la biofumigazione (brassica) e lo scenario che considera la fumigazione chimica (1-3-dicloropropene).

6.3.1.1 Scenario di produzione di olio con contenuto energetico pari a 1 MJ ottenuto da coltivazione della soia con precessione della brassica

Nella tabella che segue sono riportati i risultati di normalizzazione dello scenario di produzione di olio con un contenuto energetico di 1 MJ ottenuto da coltivazione della soia con precessione di brassica per tutte le categorie di impatto considerate dal metodo CML 2001 (Nov. 2010).

Categorie di impatto	
Abiotic Depletion	1,27E-14
Acidification Potential	2,81E-14
Eutrophication Potential	2,10E-14
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	3,74E-14
Global Warming Potential	5,84E-15
Human Toxicity Potential	3,20E-14
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	2,65E-13
Ozone Layer Depletion Potential	2,76E-16
Photochem. Ozone Creation Potential	1,16E-14
Terrestrial Ecotoxicity Potential	6,48E-15

Tabella 32: Risultati per la fase di normalizzazione del ciclo di vita dell'olio di soia con contenuto di 1 MJ di energia ottenuto con precessione delle brassica

Ai fini di una più facile interpretazione le categorie su cui verrà focalizzata l'attenzione vengono ridotte alle 5 indicate in Tabella 35, escludendo dunque la categoria del consumo dello strato di ozono (ODP) in quanto di valore inferiore di almeno 2 ordini di grandezza rispetto a tutte le altre categorie (2,76E-16) e le 4 categorie di tossicità (Freshwater aquatic ecotoxicity potential, human toxicity potential, marine aquatic ecotoxicity potential, terrestrial ecotoxicity potential) in quanto classificate dall'ILCD (JRC, 2010) come categorie i cui risultati scaturiscono da un metodo di valutazione ancora immaturo per fornire risultati affidabili.

Categoria di impatto	
Abiotic Depletion	1,27E-14
Acidification Potential	2,81E-14
Eutrophication Potential	2,10E-14
Global Warming Potential	5,84E-15
Photochem. Ozone Creation	1,16E-14

Tabella 33: Risultati per la fase di normalizzazione (senza ODP e le 4 categorie di tossicità) del ciclo di vita dell'olio di soia con contenuto di 1 MJ di energia ottenuto con precessione delle brassica

Il grafico di Figura 66 mostra come delle 5 categorie analizzate in normalizzazione gli impatti più considerevoli si registrino per il potenziale di acidificazione e per l'eutrofizzazione. Da notare come invece la categoria che esprime il potenziale di riscaldamento globale, che di fatto costituisce il dato su cui prestare maggiore attenzione ai fini della conformità con la normativa RED, sia quella con il minor valore in fase di normalizzazione.

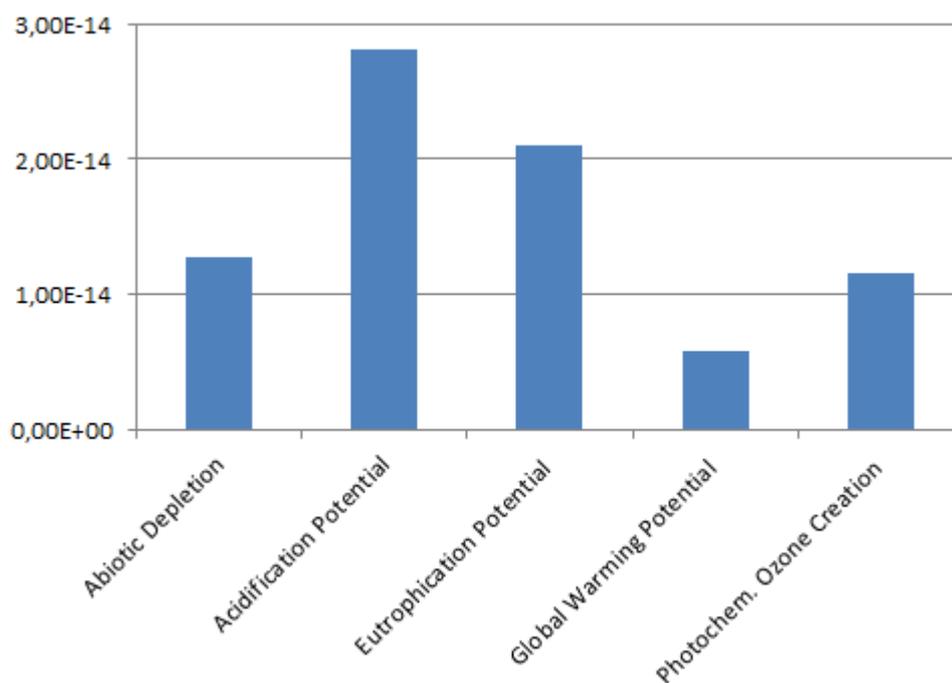


Figura 66: Grafico dei risultati di normalizzazione

Pur con tutte le cautele legate all'incertezza che introduce il processo di normalizzazione sui risultati dell'LCA, questo risultato conferma gli aspetti di incompletezza della normativa evidenziate nei precedenti capitoli. Gli impatti sul potere acidificante (solitamente legato al consumo di carburante degli automezzi per le lavorazioni del terreno) e l'effetto di eutrofizzazione prodotto dall'utilizzo di fertilizzanti azotati sono voci di impatto che hanno un peso considerevole nei risultati di uno studio LCA di processi che coinvolgono una fase agronomica nel loro ciclo di vita. A ciò si aggiungono tutte le considerazioni fatte precedentemente sugli impatti sull'uso del suolo che la normativa considera con un approccio troppo semplificato e che verranno discussi più avanti, non essendo prevista una categoria di impatto per il Land use nel metodo CML 2001 utilizzato.

Nella tabella seguente sono riportati i risultati per la fase di caratterizzazione di cui la Tabella 35 mostra i contributi percentuali delle varie fasi del ciclo di vita.

Categoria di impatto	Valore
Abiotic Depletion [kg Sb-Equiv.]	7,68E-08
Acidification Potential [kg SO2-Equiv.]	0,000473469
Eutrophication Potential [kg Phosphate-Equiv.]	0,000388111
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. [kg DCB-Equiv.]	0,007814969

Global Warming Potential [kg CO2-Equiv.]	0,030431434
Human Toxicity Potential [kg DCB-Equiv.]	0,015992134
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. [kg DCB-Equiv.]	11,80785897
Ozone Layer Depletion Potential [kg R11-Equiv.]	2,81E-09
Photochem. Ozone Creation Potential [kg Ethene-Equiv.]	2,00E-05
Terrestrial Ecotoxicity Potential [kg DCB-Equiv.]	0,000751206

Tabella 34: Risultati della fase di caratterizzazione

La fase agronomica, che nello specifico caso di questo scenario prevede sia la coltivazione della soia che della brassica in precessione ammonta a più del 90% per tutte le categorie di impatto del metodo considerato. Gli impatti della fase di spremitura e trasporto se sommati superano il 10% del totale solo nel caso dell'ecotossicità marina (Marine aquatic ecotoxicity potential) e dunque nel prosieguo dell'analisi seguendo le indicazioni della normativa ISO verrà dato maggior spazio all'interpretazione dei risultati della fase agricola del processo. D'altra parte il processo di spremitura è stato costruito considerando il solo consumo energetico legato alla fase di pressatura meccanica dei semi mentre alla voce trasporti sono stati conteggiati solo i trasporti dal campo all'impianto di spremitura pur considerando un valore medio di 50 km decisamente cautelativo.

Categorie di impatto		Totale soia	Coltivazione	Brassica	Spremitura	Trasporto
Abiotic Depletion	%	100	53	42	3	2
Acidification Potential	%	100	52	46	2	1
Eutrophication Potential	%	100	53	46	1	< 1
Freshwater Aquatic Ecotox.Pot.	%	100	66	29	4	1
Global Warming Potential	%	100	51	42	6	2
Human Toxicity Potential	%	100	45	51	4	< 1
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	%	100	55	34	11	1
Ozone Layer Depletion Potential	%	100	52	40	6	3
Photochem. Ozone Creation Pot.	%	100	46	49	3	2
Terrestrial Ecotoxicity Potential	%	100	37	59	4	< 1

Tabella 35: Risultati della fase di caratterizzazione con contributi percentuali delle varie fasi del ciclo di vita

Confermando l'approccio proposto per la valutazione dei risultati in normalizzazione, il focus sulla fase di caratterizzazione verrà riservata alla 5 categorie che si ritiene offrano risultati più affidabili e peraltro di maggiore interesse nel campo dei processi agronomici (che come visto hanno un peso

determinante sul totale degli impatti dell'intero ciclo di vita): global warming potential, acidification potential, eutrophication potential, abiotic depletion e photochemical ozone creation potential.

Di seguito viene offerto un dettaglio dei risultati di caratterizzazione per le 5 categorie per cui si è scelto di effettuare un approfondimento che riporta i contributi in percentuale della varie fasi alla composizione dell'impatto totale per ognuna delle categorie e una figura che esprima graficamente tali dati con un'indicazione del valore totale di impatto per quella specifica categoria.

Categorie di impatto		Totale soia	Coltivazione	Brassica	Spremitura	Trasporto
Global Warming Potential	%	100	51	42	6	2

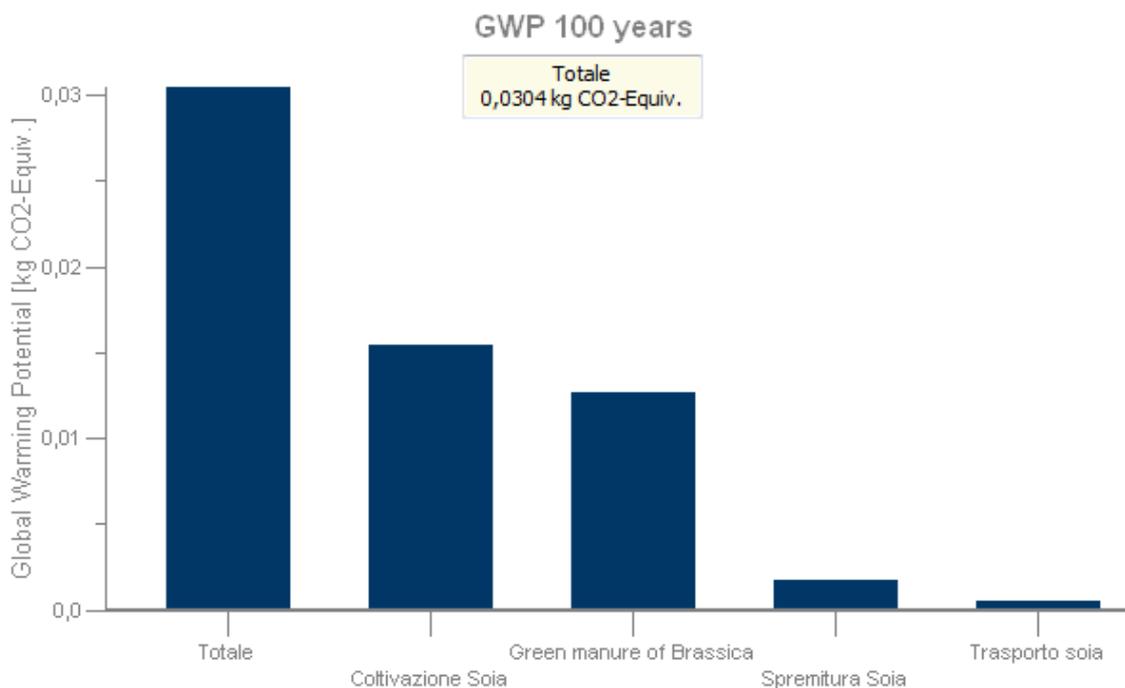


Figura 67: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria del Global warming potential

Categorie di impatto		Totale soia	Coltivazione	Brassica	Spremitura	Trasporto
Acidification Potential	%	100	52	46	2	1

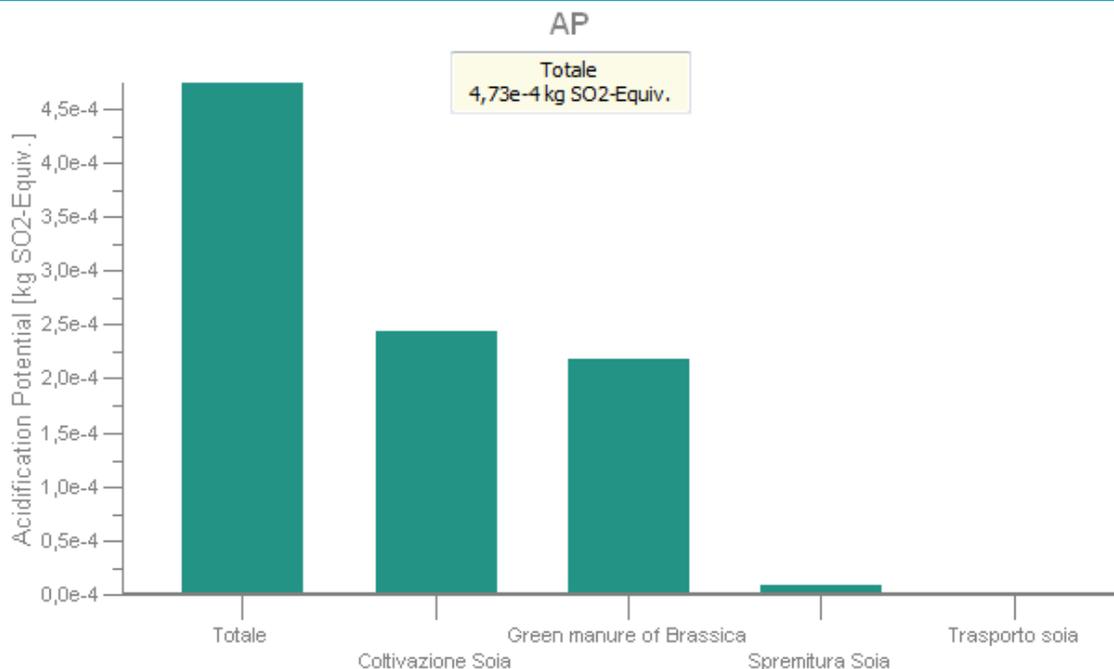


Figura 68: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria dell'Acidification potential

Categorie di impatto		Totale soia	Coltivazione	Brassica	Spremitura	Trasporto
Eutrophication Potential	%	100	53	46	1	< 1

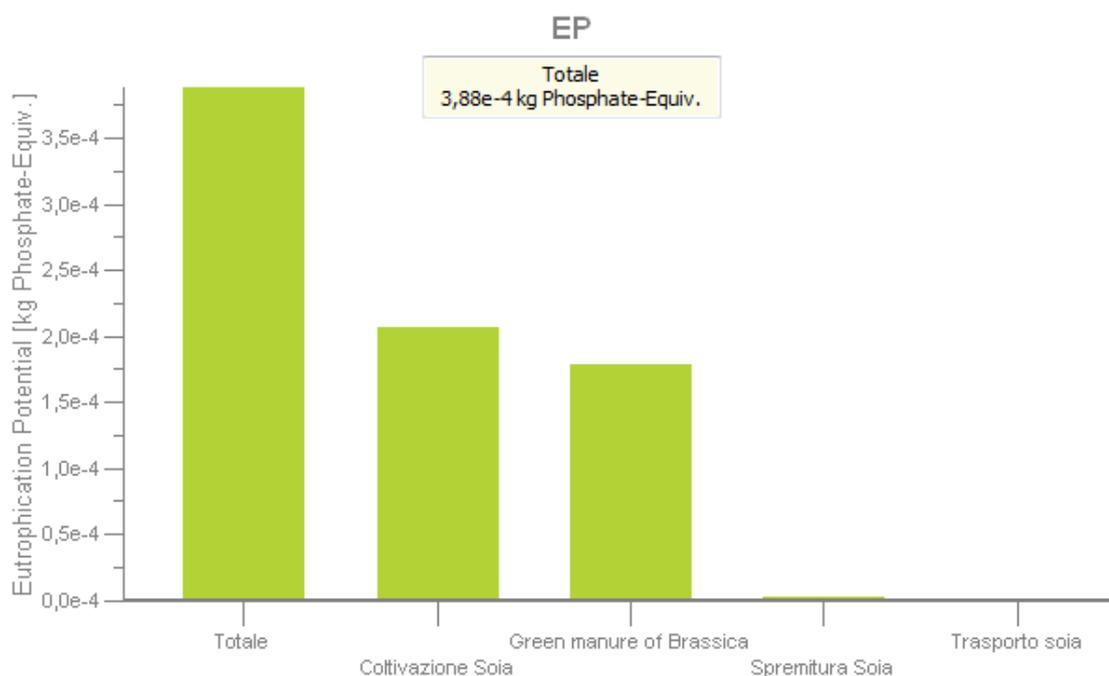


Figura 69: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria dello Eutrophication potential

Categorie di impatto		Totale soia	Coltivazione	Brassica	Spremitura	Trasporto
Abiotic Depletion	%	100	53	42	3	2

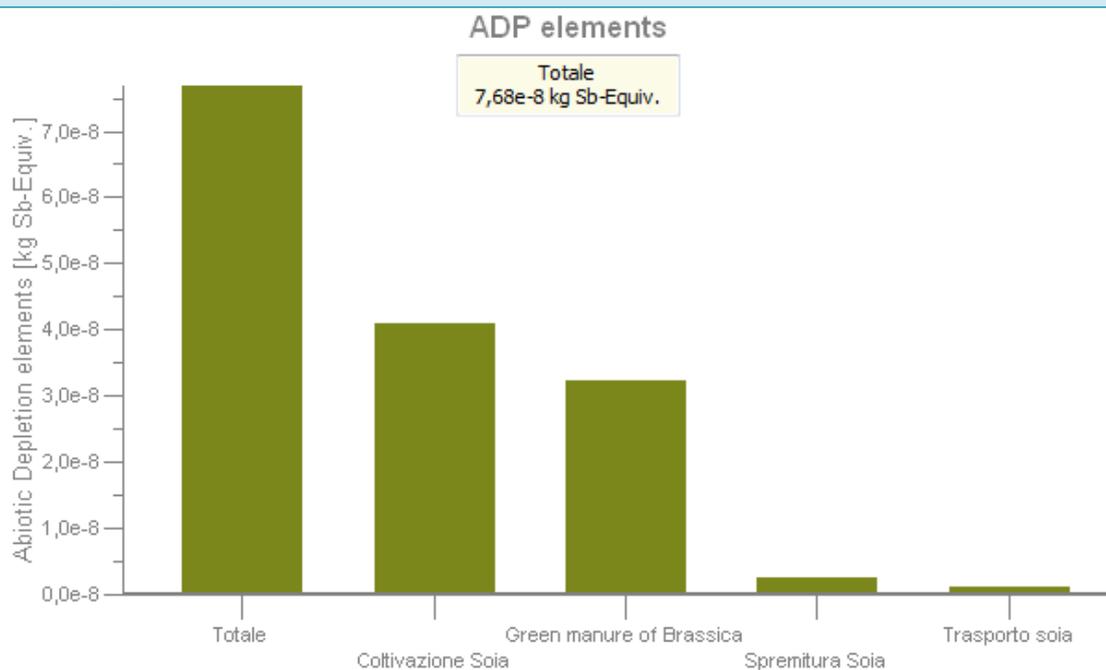


Figura 70: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria dell'Abiotic depletion potential

Categorie di impatto		Totale soia	Coltivazione	Brassica	Spremitura	Trasporto
Photochem. Ozone Creation Pot.	%	100	46	49	3	2

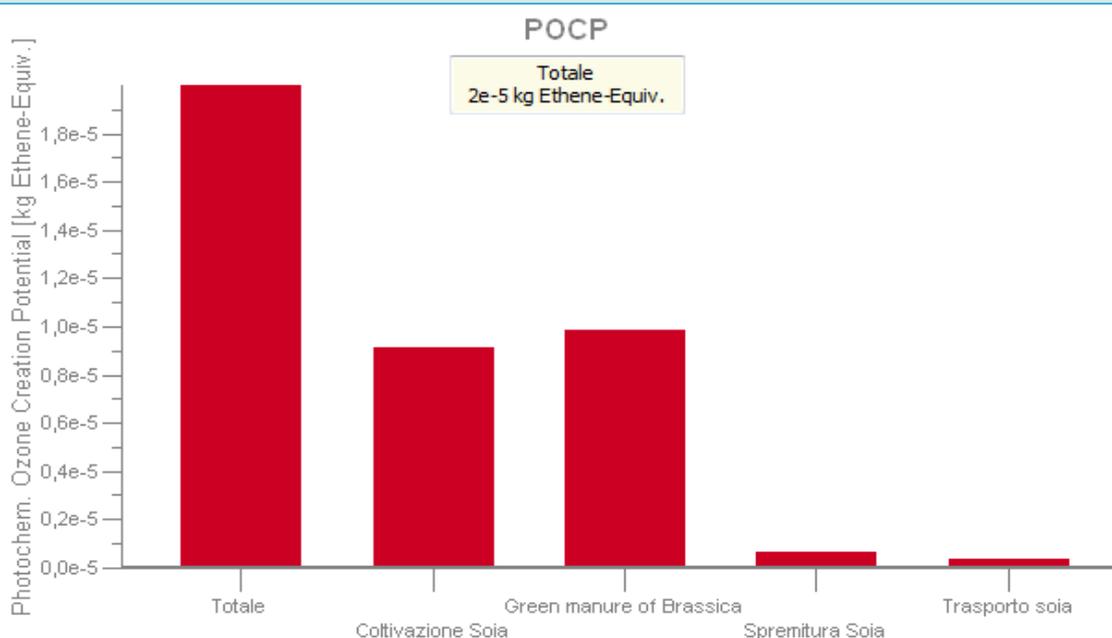


Figura 71: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria del Photochemical ozone creation potential

Dai risultati appena presentati emerge che per tutte le categorie di impatto, eccetto per il potenziale di creazione di ozono fotochimico (in rosso), la fase di coltivazione della soia risulta la più impattante, seppur superando di poco la fase di coltivazione della brassica. Un ulteriore focus, presentato di seguito, sui processi di coltivazione di brassica e soia aiuterà a spiegare le cause di tali risultati. Per ora ci si limita invece a spiegare il perché per il photochemical ozone creation potential sia la fase di coltivazione della brassica ad essere la più impattante. Un'analisi approfondita dei risultati per questa categoria di impatto mostra che per modellizzare lo sfalcio della brassica è stato utilizzato un processo del database Econinvent che presenta delle elevatissime emissioni di incombusti dalla macchina agricola utilizzata. Se confrontato con altri processi di lavorazione del terreno il processo *Mowing, by rotor mower CH* di Econinvent considera valori di incombusti anche 10 volte superiori. La presenza tra tali incombusti di elevati valori di monossido di carbonio (a causa della natura radicale del composto) spiega l'elevato potere di formazione di ozono fotochimico.

Le tre figure che seguono mostrano il dettaglio per il plan di coltivazione della soia per le categorie di impatto del Global warming potential, dell'Acidification potential e dello Eutrophication potential.

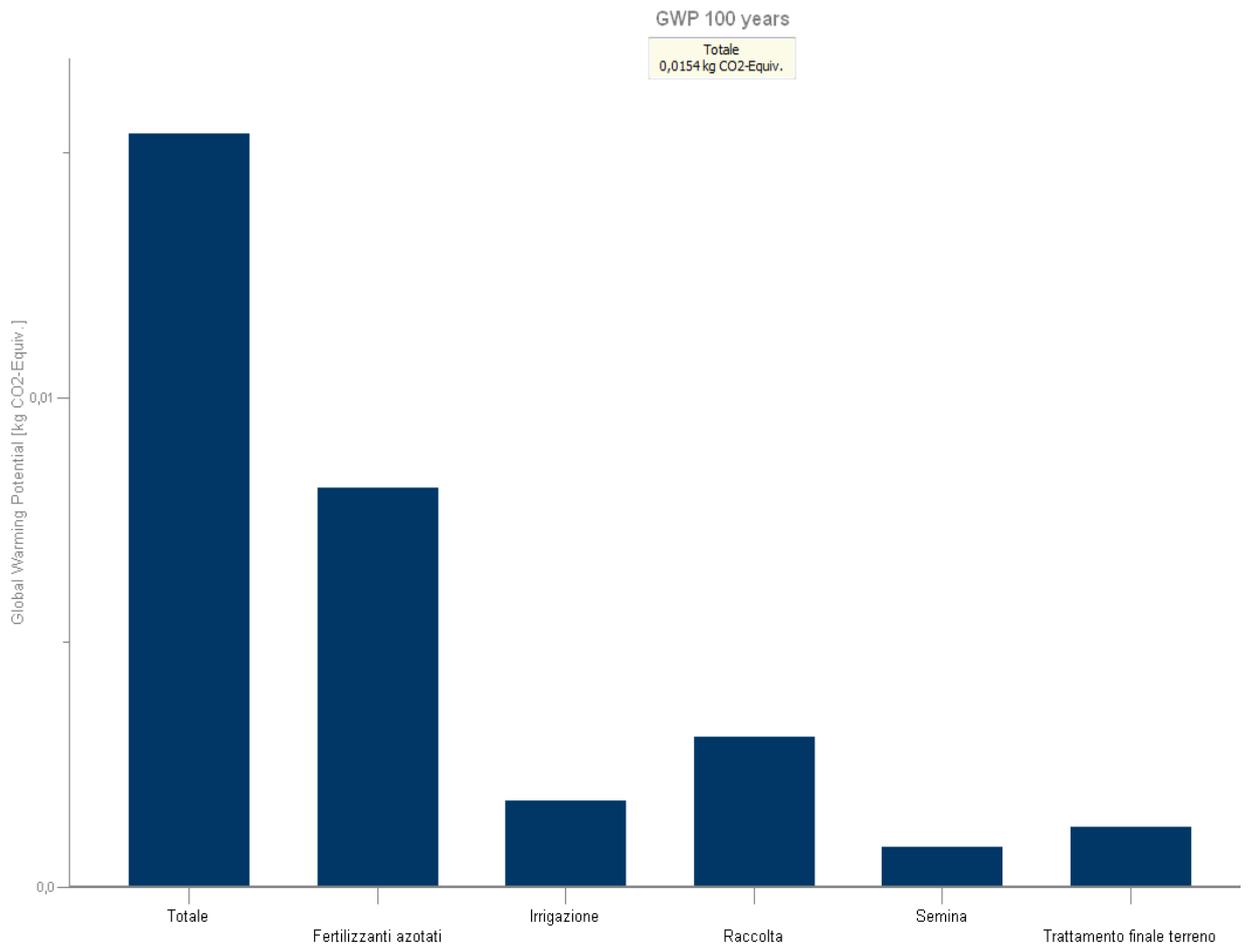


Figura 72: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria del Global warming potential per la fase di coltivazione della soia

Si è scelto di concentrare l'attenzione su queste tre categorie di impatto perché il Global warming è certamente di interesse in quanto richiesto dalla normativa, l'Acidification potential come già visto in normalizzazione rappresenta la categoria più impattata dal ciclo di vita e il potenziale di eutrofizzazione rappresenta una categoria sensibile nelle valutazioni ambientali di sistemi che coinvolgono processi agronomici.

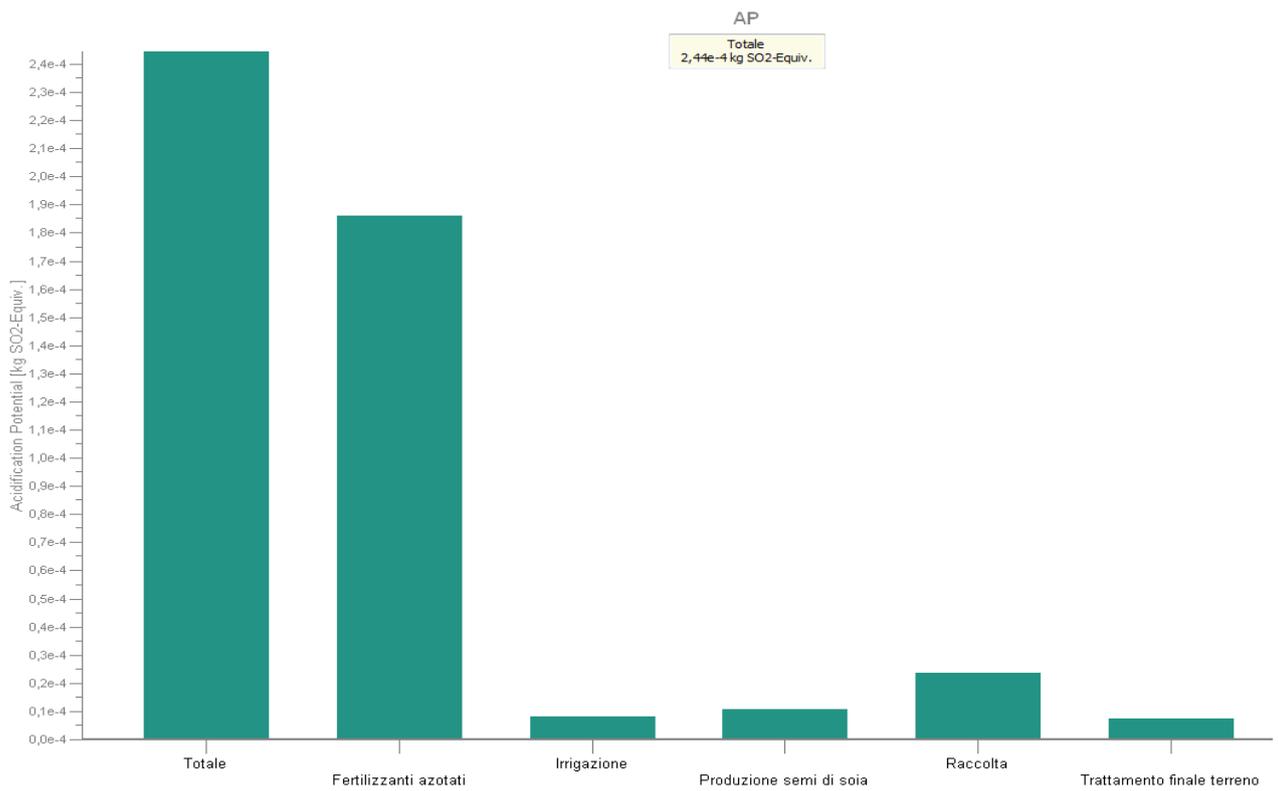


Figura 73: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria dell'Acidification potential per la fase di coltivazione della soia

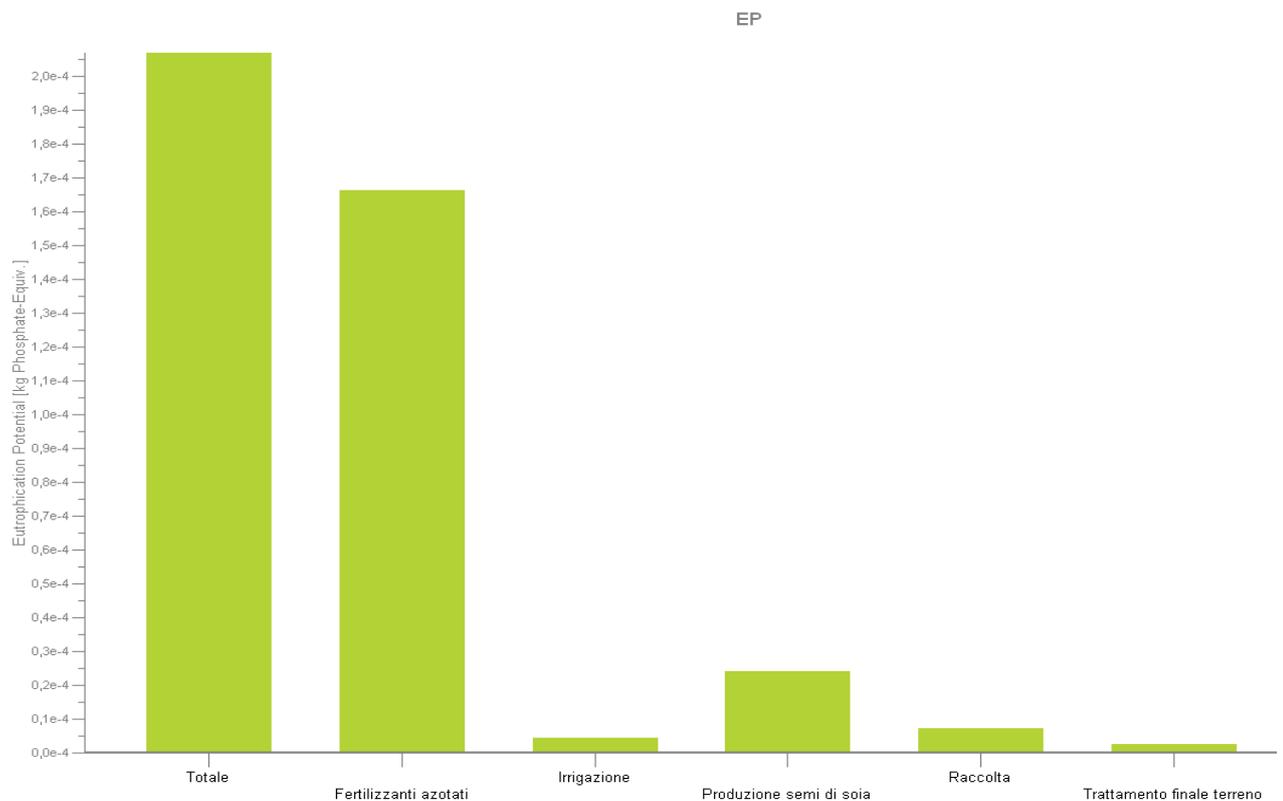


Figura 74: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria dello Eutrophication potential per la fase di coltivazione della soia

Il dato che emerge prepotentemente è il contributo dominante del processo di produzione ed uso (spandimento) dei fertilizzanti azotati per tutte e tre le categorie di impatto suddette. Il contributo della fertilizzazione presenta un alto potere di eutrofizzazione (più dell'80% del totale del processo di coltivazione della soia), mentre ha un contributo più modesto (ma pur sempre dominante) nell'emissione di gas climalteranti (circa 50%) dato che gran parte del rimanente 50% di emissioni è imputabile ai processi di combustione che si verificano nei motori endotermici delle macchine utilizzate per le lavorazioni agricole.

Al pari del processo di coltivazione della soia viene offerto un dettaglio della coltivazione della brassica per le 3 categorie di impatto del Global warming, dell'Acidification potential e dello Eutrophication rispettivamente nelle Figure 75,76, e 77 che seguono. Le considerazioni appena fatte per la soia risultano assolutamente valide anche per la brassica.

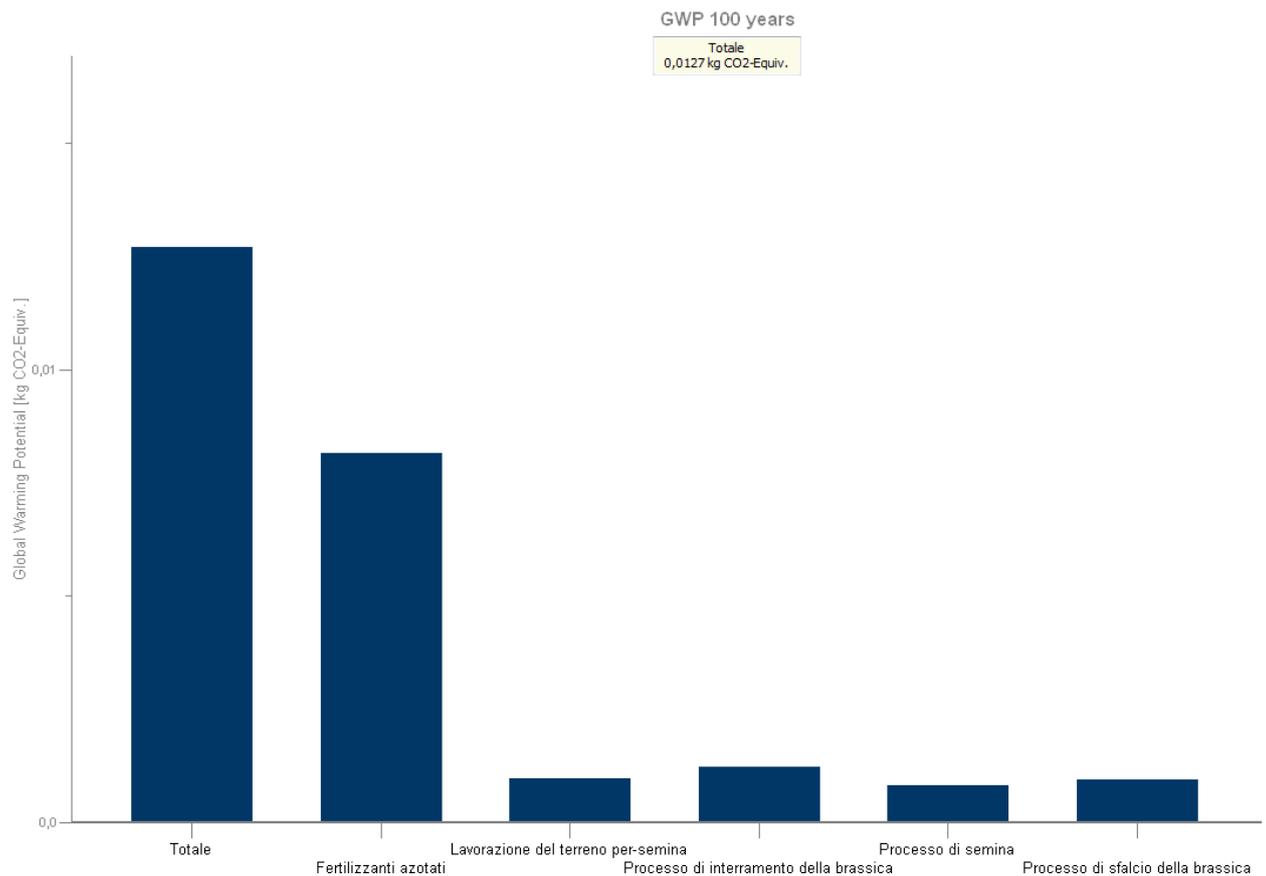


Figura 75: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria del Global warming potential per la fase di coltivazione della brassica

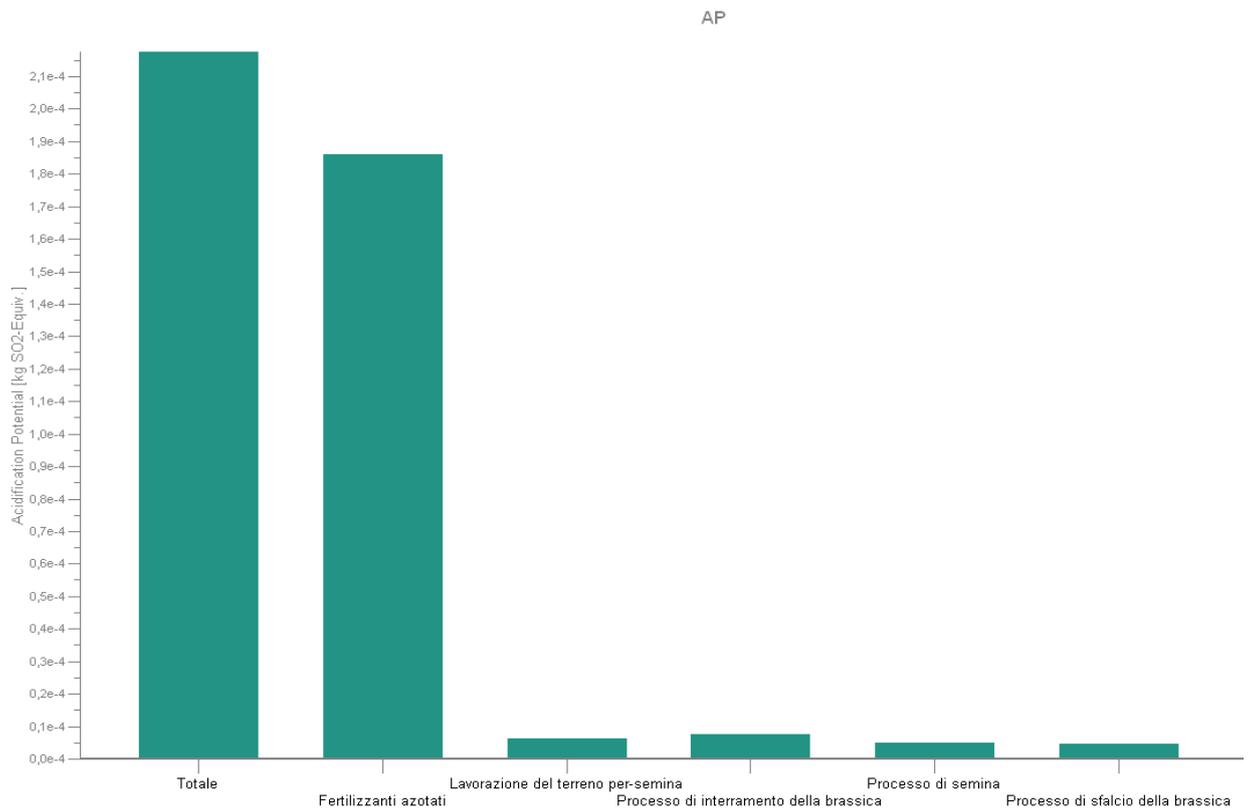


Figura 76: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione dell'Acidification potential per la brassica

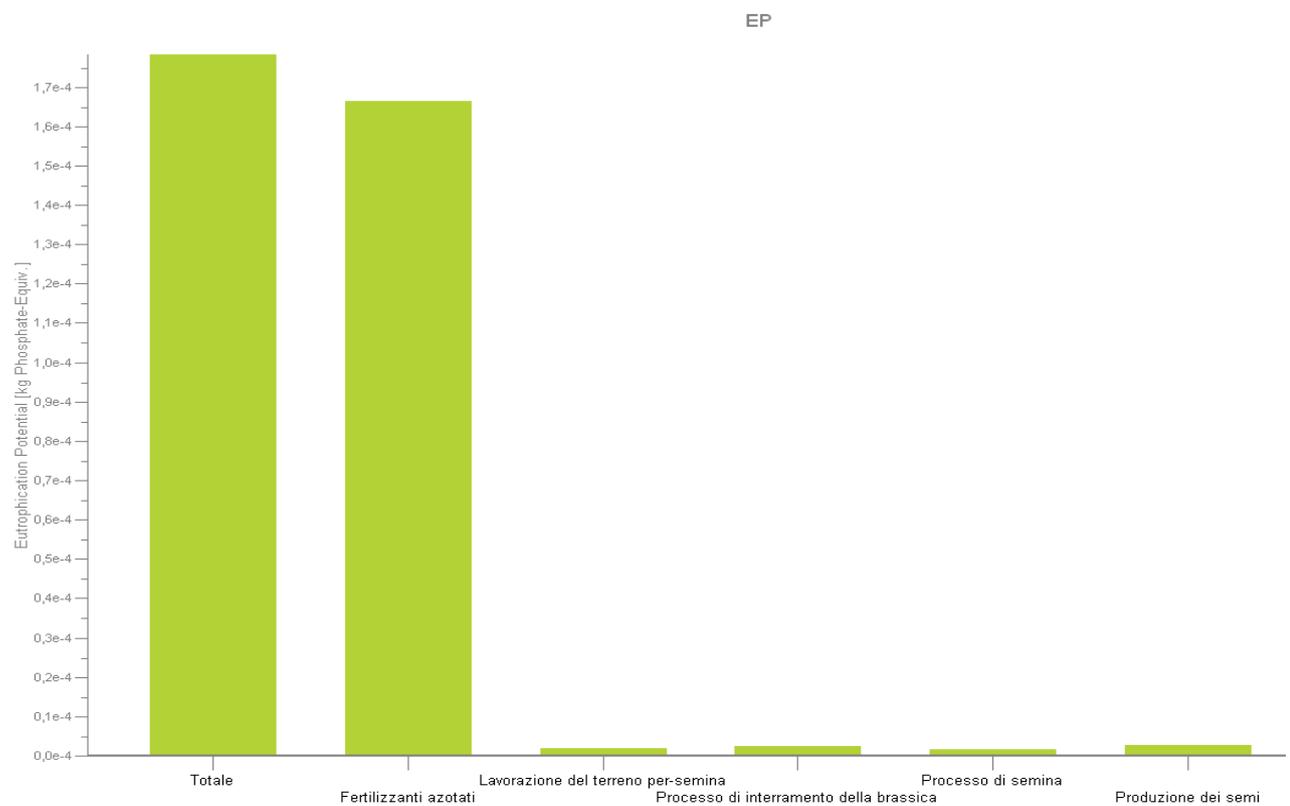


Figura 77: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione della categoria dello Eutrophication potential per la fase di coltivazione della brassica

Dato il contributo dominante del processo di produzione e uso dei fertilizzanti azotati, viene proposto un doveroso approfondimento su tale processo. Il processo denominato *Fertilizzanti azotati* è costituito da due sottoprocessi:

- uno di produzione del fertilizzante (*RER: urea, as Nm at regional storehouse*)
- uno che considera le emissioni in aria ed in acqua dei composti dell'azoto che vengono prodotti dopo lo spandimento sul suolo del fertilizzante per interazione con le 3 matrici ambientali (aria, acqua, suolo).

In Figura 78 vengono riportati i fattori di ripartizione nelle diverse matrici e secondo differenti composti dell'azoto al terreni attraverso il processo di fertilizzazione (Fantin V., 2011), (IPCC, 2006).

Parametro			
Parametro	Formula	/	Valore
N			1
NO3	$NO3_N * (62/14)$		1,33
N2O	$N2O_N * (44/28)$		0,0157
N2O_ind	$N2O_N_ind * (44/28)$		0,00369
N2O_N	$N * 0,01$		0,01
N2O_N_ind	$(N2O_N * 0,01) + (NO3_N * 0,0075)$		0,00235
NH3	$NH3_N * (17/14)$		0,121
NH3_N	$N * 0,1$		0,1
NO3_N	$N * 0,3$		0,3

Figura 78: dettaglio dei fattori di ripartizione utilizzati dal modello che valuta le emissioni dirette in aria ed in acqua dell'azoto fornito al terreno tramite fertilizzazione

Mentre in Figura 79 vengono elencati i flussi di output in aria ed in acqua conseguenti al processo di spandimento.

Outputs					
Parametro	Flusso	Quantità	Ammontare	Fattore	Unità
N	Fertilizzanti Azotati [mineral fer	Mass	1	1	kg
NH3	Ammonia [Inorganic emissions to air]	Mass	0,121	1	kg
NO3	Nitrate [Inorganic emissions to fresh v	Mass	1,33	1	kg
N2O_ind	Nitrous oxide (Indirect emissions) [Ino	Mass	0,00369	1	kg
N2O	Nitrous oxide (laughing gas) [Inorgani	Mass	0,0157	1	kg

Figura 79: Valori di emissioni in aria ed in acqua dei composti generati a partire dall'azoto fornito al terreno tramite fertilizzazione

L'elevata ripartizione dell'azoto in ingresso nella fase acquosa spiega il consistente contributo della fertilizzazione al processo di eutrofizzazione. La

Figura 80 mostra le emissioni di gas serra ripartite in emissioni dirette relative al processo di spandimento in campo ed emissioni del processo di produzione dei fertilizzanti. Il contributo più importante è determinato dalle interazioni del fertilizzante con le matrici ambientali dopo lo spandimento.



Figura 80: Emissioni di gas serra del processo di fertilizzazione: emissioni dirette (a sx) ed emissioni relative alla fase di produzione dei fertilizzanti (a dx)

Un discorso diverso va fatto per gli effetti del processo di fertilizzazione sui fenomeni di eccessiva presenza di nutrienti in ambiente acquatico. Il contributo a tale fenomeno è dato per la quasi totalità dall'interazione del fertilizzante con aria, acqua e suolo dopo lo spandimento e può essere considerato pressochè trascurabile il contributo della produzione del fertilizzante azotato all'impatto totale generato (Figura 81).

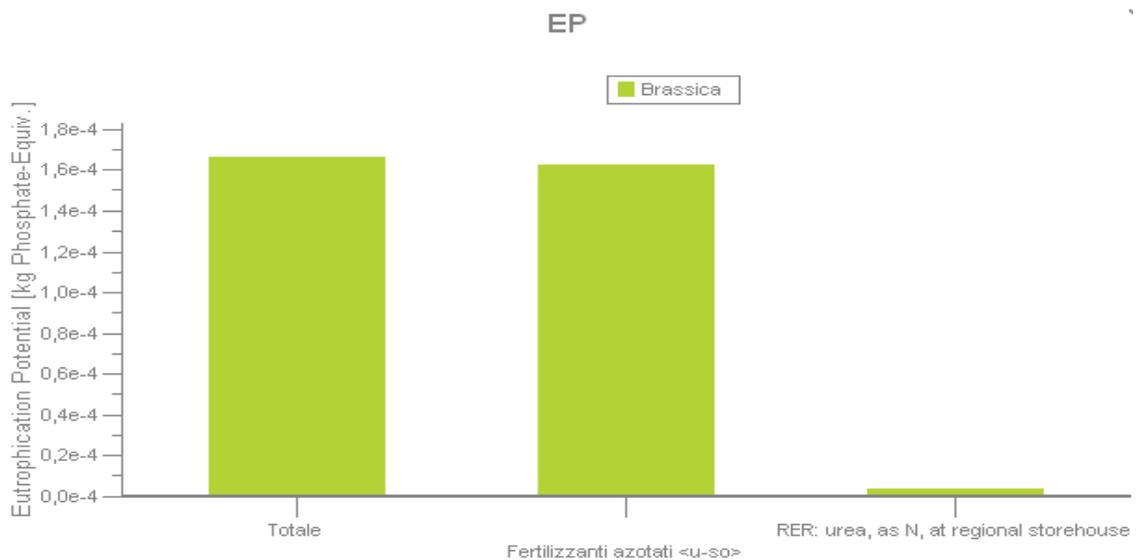


Figura 81: Eutrofizzazione generata dal processo di fertilizzazione: emissioni dirette (a sx) ed emissioni relative alla fase di produzione dei fertilizzanti (a dx)

6.3.1.2 Confronto tra lo scenario di coltivazione della soia con precessione di brassica con lo scenario di coltivazione della soia che fa ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente

In questo paragrafo i risultati dello scenario di produzione di olio vegetale ottenuto dalla coltivazione di soia che fa ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente vengono presentati, discussi e confrontati con quelli dello scenario di coltivazione della soia con precessione di brassica precedentemente esposti. Nella tabella sottostante vengono riportati i contributi per ognuna delle categorie di impatto del metodo CML 2001 di tutte le fasi che compongono il ciclo di vita dello scenario sotto analisi. Anche in questo caso la fase di coltivazione è responsabile per almeno il 90% degli impatti totali per tutte le categorie considerate.

Categorie di impatto	%	Totale	Coltivazione	Spremitura	Trasporto
Abiotic Depletion	%	100	95	3	2
Acidification Potential	%	100	98	2	1
Eutrophication Potential	%	100	99	1	< 1
Freshwater Aquatic Ecotox.Pot.	%	100	95	5	1
Global Warming Potential	%	100	92	7	2
Human Toxicity Potential	%	100	94	6	1
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	%	100	87	12	1
Ozone Layer Depletion Potential	%	100	90	7	3
Photochem. Ozone Creation Pot.	%	100	92	5	3
Terrestrial Ecotoxicity Potential	%	100	91	8	< 1

Tabella 36: Risultati di caratterizzazione con contributi percentuali delle varie fasi del ciclo di vita dello scenario di produzione di olio di soia con contenuto energetico pari a 1 MJ ottenuto facendo ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente

Coerentemente con l'approccio usato nella valutazione degli impatti dello scenario precedente, l'analisi dettagliata dei risultati viene ridotta alle 5 categorie elencate nella Tabella 37.

Categorie di impatto	%	Coltivazione soia	Fertilizzanti	Irrigazione	Mancozeb	Raccolta	Tratt. finale
Abiotic Depletion	%	88	30	11	28	14	5
Acidification	%	95	80	2	7	5	2
Eutrophication	%	93	88	1	1	2	1
Global Warming	%	93	66	7	3	12	5
Phot. Ozone Creation	%	80	15	12	12	31	10

Tabella 37: Dettaglio dei contributi percentuali degli impatti in fase di caratterizzazione del processo di coltivazione della soia

Anche nello scenario in questione gli impatti prodotti dal processo di fertilizzazione sono quelli più elevati fatta eccezione per l'indicatore che misura la creazione di ozono fotochimico che prevede un contributo maggiore da parte delle lavorazioni del terreno, come descritto nel precedente paragrafo.

La vera differenza tra questo scenario e quello che considera la precessione della brassica è il ricorso all'1-3-dicloropropene come fumigante di origine chimica per contrastare l'infestazione da nematodi del terreno. Il processo di database utilizzato (Ecoinvent) per modellizzare il ricorso a tale diserbante chimico genera impatti soprattutto nella categoria del consumo delle risorse (Abiotic depletion), mentre il suo contributo all'eutrofizzazione e al riscaldamento globale risulta trascurabile. Anche indagando più a fondo e considerando il contributo di tale processo nelle varie categoria di tossicità, che solitamente risultano sensibili alla presenza di pesticidi e diserbanti, gli impatti arrivano al massimo al 10% del totale per la categoria del Marine aquatic ecotoxicity. Questo da un lato sottolinea il peso dell'uso dei fertilizzanti (precedentemente discusso) e delle lavorazioni del terreno, ma dall'altro pone degli interrogativi sulla corretta caratterizzazione dei flussi di output di questo pesticida considerando gli allarmi posti dalla comunità scientifica internazionale sugli effetti che questi hanno sulla salute e l'ambiente, anche considerando i veti posti dalla legislazione al riguardo Direttiva 91/414/CEE e Decisione 2011/36/UE). Attenendosi allo stato dell'arte in LCA al riguardo (dataset *Mancozeb, at regional storehouse RER*) i risultati sono quelli descritti, tuttavia in virtù di quanto presentato nell'introduzione, c'è il rischio concreto di una sottostima degli effetti sulla salute e sull'ambiente dell'1-3-dicloropropene di difficile quantificazione. In questa sede dato che si sta valutando la sostenibilità ambientale di un sistema alternativo a quello che prevede il ricorso al Mancozeb, la possibilità di assegnare minore impatto a quest'ultimo scenario pone i risultati dello studio in un ambito conservativo, approccio che permette di valutare l'alternativa proposta con maggiori cautele.

Fatta questa breve premessa, di seguito vengono proposti i risultati riferiti a quelle che sono state le categorie di impatto oggetto dell'approfondimento nella descrizione dello scenario precedente (per le motivazioni di questa scelta vedi paragrafo 6.3.1.1): viene offerto dunque un dettaglio grafico dei risultati del

confronto tra lo scenario della coltivazione della soia con precessione di brassica e dello scenario che prevede il ricorso al fumigante chimico nell'ordine per la categoria del Global warming, dell'Acidification potential e dello Eutropication potential.

I risultati mostrano un sostanziale equilibrio tra i due scenari ed assegnare un giudizio di preferenza per l'uno o per l'altro scenario quando il divario nei risultati è così modesto è rischioso anche in considerazione delle incertezze che la metodologia LCA prevede in virtù del ricorso a processi di database la cui precisione è sempre di difficile valutazione. Analizzando i dati per come vengono proposti dal software GaBi, lo scenario che prevede la precessione della brassica conta maggiori emissioni di CO₂ lungo l'intero ciclo di vita.

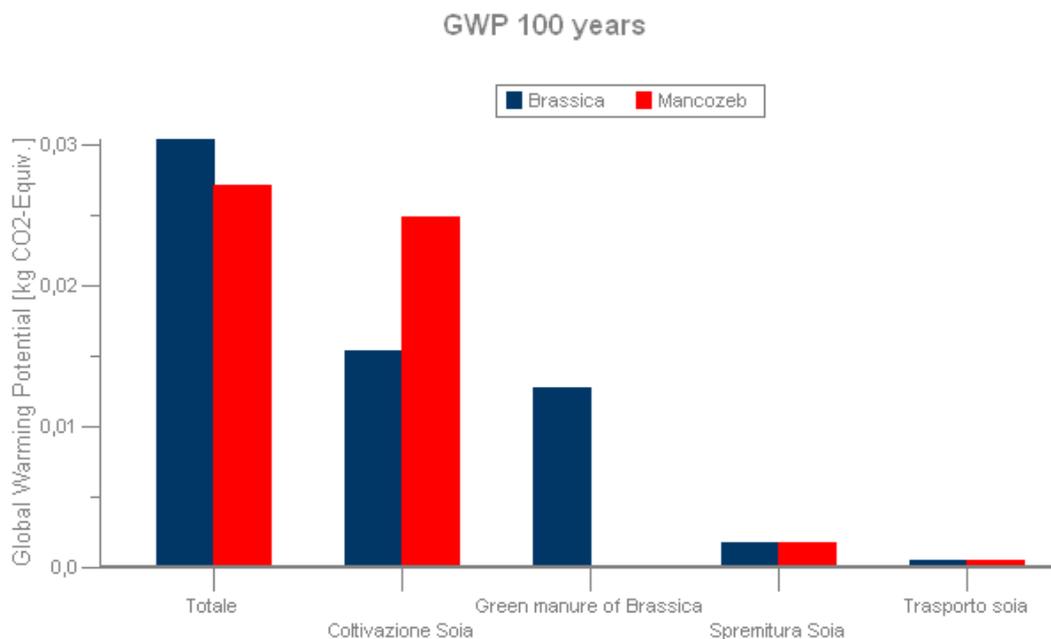


Figura 82: Confronto dei risultati di caratterizzazione per la categoria del GWP tra lo scenario di coltivazione della soia con precessione di brassica e lo scenario che fa ricorso ad un fumigante sintetizzato chimicamente

Sostanziale equilibrio invece (con impatti leggermente maggiori per lo scenario che ricorre alla brassica), nel potere di eutrofizzazione imputabile ai due scenari: risultato prevedibile questo, dato il ricorso agli stessi quantitativi di fertilizzanti.

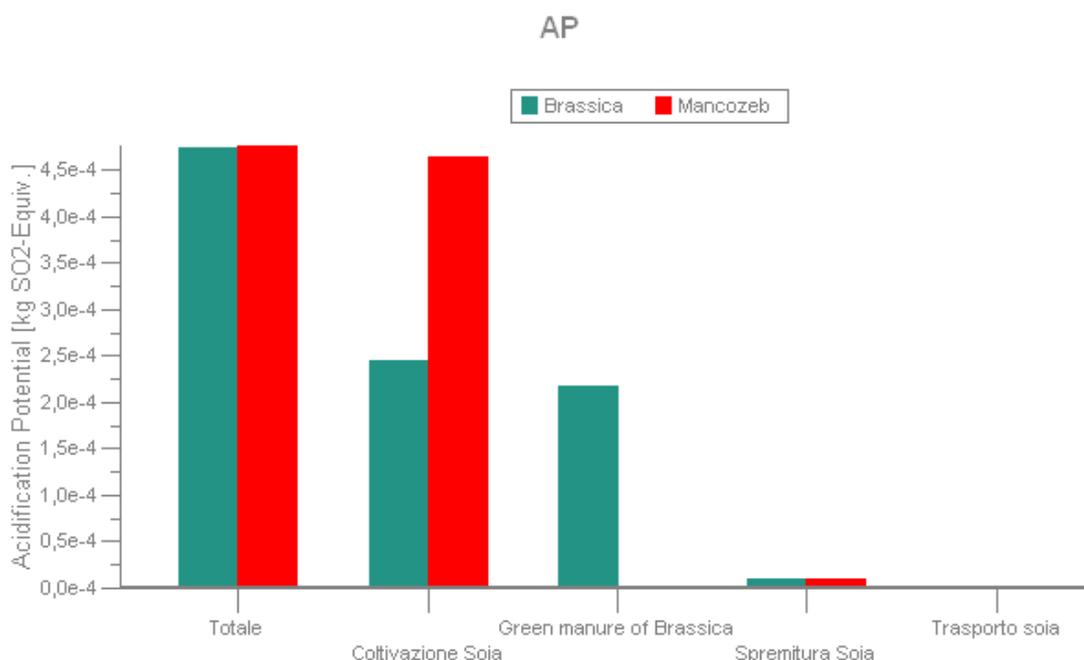


Figura 83: Confronto dei risultati di caratterizzazione per la categoria del Acidification potential tra lo scenario di coltivazione della soia con precessione di brassica e lo scenario che fa ricorso ad un fumigante sintetizzato chimicamente

Equilibrio nei risultati anche del potenziale di acidificazione, ma in questo caso il valore di impatto leggermente superiore è quello dello scenario che fa ricorso al fumigante di sintetizzazione chimica. A fare da ago della bilancia è proprio la produzione del Mancozeb (Figura 85), con un contributo maggiore del 5% che risulta essere il secondo per ordine di importanza seppur molto inferiore rispetto al contributo all'impatto apportato dal processo di produzione ed uso dei fertilizzanti chimici, di poco inferiore all'80% (per approfondimenti al riguardo vedere paragrafo precedente).

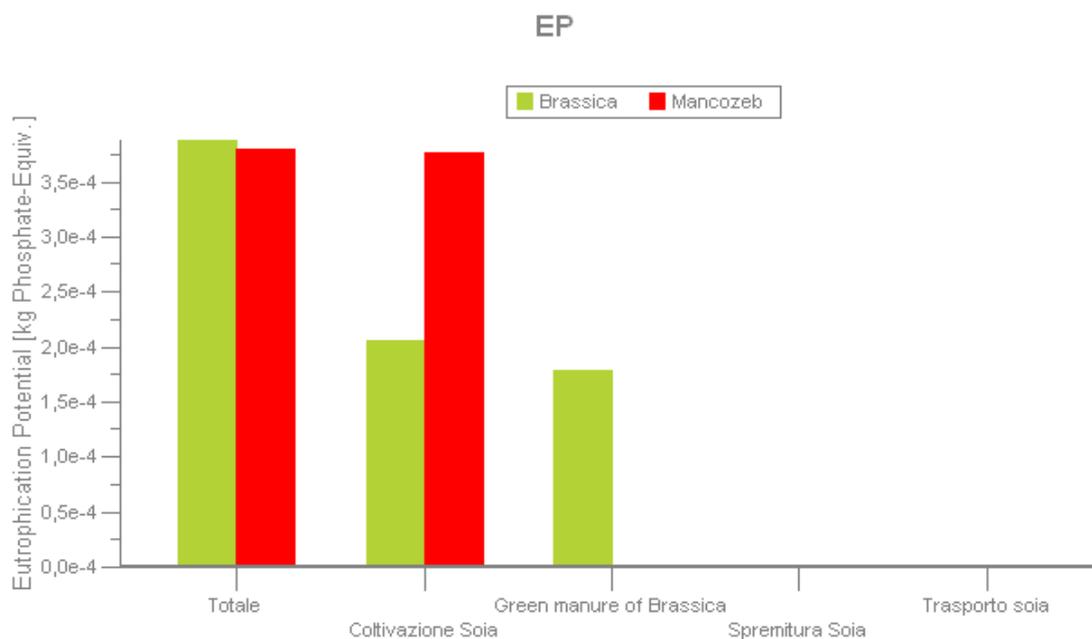


Figura 84: Confronto dei risultati di caratterizzazione per la categoria dello Eutrophication potential tra lo scenario di coltivazione della soia con precessione di brassica e lo scenario che fa ricorso ad un fumigante sintetizzato chimicamente

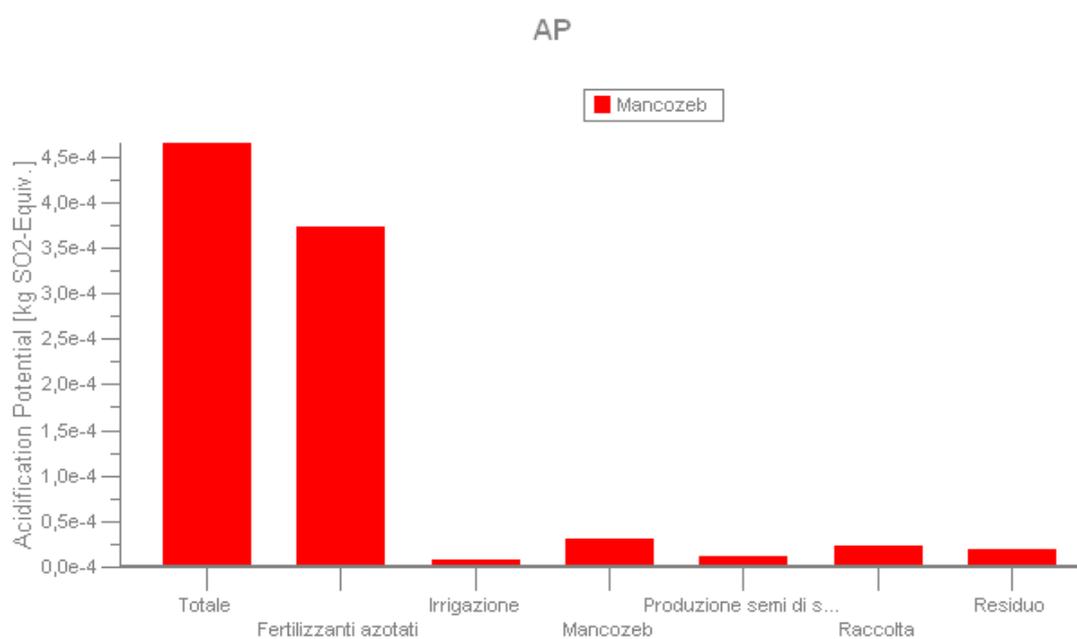


Figura 85: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per la categoria dell'Acidification potential per il processo di coltivazione della soia dello scenario che prevede il ricorso al fumigante di natura chimica

6.3.2 Valutazione degli impatti per gli scenari di produzione di olio di tabacco analizzati

In questa sezione della valutazione degli impatti dello studio LCA vengono presentati i risultati riferiti agli scenari di produzione di olio di tabacco di cui si è precedentemente descritto l'inventario. Inizialmente si procede con l'analisi dei risultati sia di caratterizzazione che di normalizzazione del ciclo di vita dell'olio con quantitativo energetico pari ad 1 MJ ottenuto da coltivazione di tabacco con precessione di brassica. Successivamente, dopo aver presentato brevemente i risultati di normalizzazione per tutti gli scenari di produzione dell'olio di tabacco, si procede con il confronto tra lo scenario che considera la biofumigazione (brassica) e lo scenario che considera la fumigazione chimica (1-3-dicloropropene). Un ulteriore confronto viene effettuato tra lo scenario che prevede la nascita e lo sviluppo nelle prime fasi in serra del tabacco e lo scenario che prevede la semina diretta in campo del tabacco tramite un supporto spugnoso contenente elementi nutritivi e disinfestanti (descritto brevemente in fase di inventario nel capitolo precedente).

6.3.2.1 Scenario di produzione di olio con contenuto energetico pari a 1 MJ ottenuto da coltivazione di tabacco con precessione della brassica

Nella tabella che segue sono riportati i risultati di normalizzazione dello scenario di produzione di olio con un contenuto energetico di 1 MJ ottenuto da coltivazione del tabacco con precessione di brassica, per tutte le categorie di impatto considerate dal metodo CML 2001 (Nov. 2010).

Categorie di impatto	Valore
Abiotic Depletion	1,35E-14
Acidification Potential	2,57E-14
Eutrophication Potential	1,43E-14
Freshwater Ecotoxicity Pot.	3,34E-14
Global Warming Potential	7,03E-15
Human Toxicity Potential	3,69E-14
Marine Ecotoxicity Pot.	3,85E-13
Ozone Layer Depletion	3,60E-16
Photochem. Ozone Creation	1,82E-14
Terrestrial Ecotoxicity Potential	6,15E-15

Tabella 38: Risultati di normalizzazione per lo scenario di produzione di olio di contenuto energetico pari ad 1 MJ ottenuto da coltivazione di tabacco con precessione della brassica

Ai fini di una più facile interpretazione le categorie su cui verrà focalizzata l'attenzione vengono ridotte alle 5 indicate in Tabella 39, escludendo dunque la categoria del consumo dello strato di ozono in quanto di valore inferiore di almeno 2 ordini di grandezza rispetto a tutte le altre categorie ($3,60E-16$) e le 4 categorie di tossicità (Freshwater aquatic ecotoxicity potential, human toxicity potential, marine aquatic ecotoxicity potential, terrestrec ecotoxicity potential) in quanto classificate dall'ILCD (JRC, 2010) come categorie i cui risultati scaturiscono da un metodo di valutazione ancora immaturo per fornire risultati affidabili.

Categoria di impatto	Valore
Abiotic Depletion	1,35E-14
Acidification Potential	2,57E-14
Eutrophication Potential	1,43E-14
Global Warming Potential	7,03E-15
Photochem. Ozone Creation	1,82E-14

Tabella 39: Risultati di normalizzazione senza le categoria dell'ODP e delle 4 categorie di tossicità per lo scenario di produzione di olio di contenuto energetico pari ad 1 MJ ottenuto da coltivazione di tabacco con precessione della brassica

Il grafico dei suddetti risultati di normalizzazione hanno un andamento molto simile allo scenario della soia con precessione di brassica. Anche in questo caso la categoria più impattata dal ciclo di vita sotto analisi è l'Acidification potential. Parallelamente a quanto già visto per la soia, il GWP (global warming potential) contribuisce con meno del 15% al totale degli impatti prodotti dalle cinque categorie su cui si sta focalizzando l'attenzione.

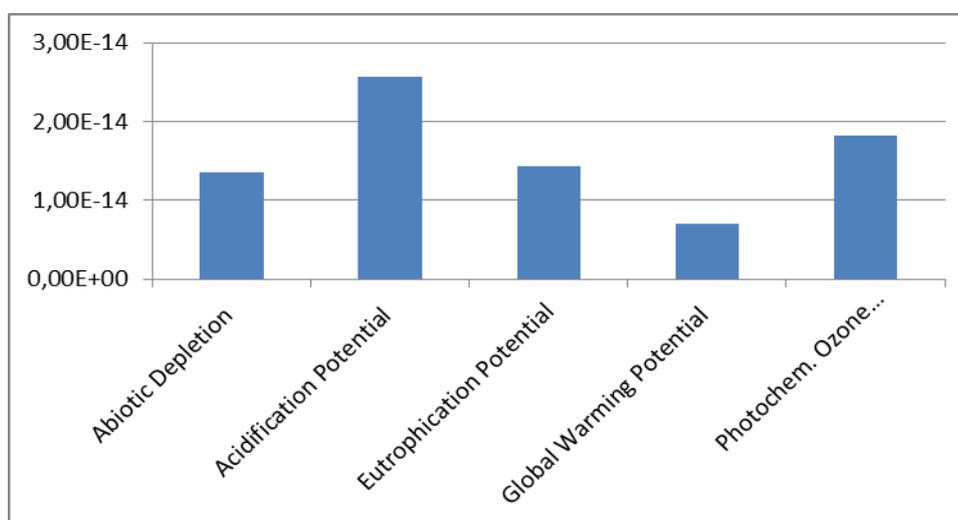


Tabella 40: Grafico dei risultati di normalizzazione

Volendo entrare nel dettaglio dei risultati ai fini di valutazione più approfondita degli stessi si riportano i risultati della fase di caratterizzazione. Per completezza in tabella è possibile consultare i valori ottenuti per tutte le categorie di impatto previste dal metodo CML 2001.

Categorie di impatto	Valore
Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]	8,16E-08
Acidification Potential (AP) [kg SO2-Equiv.]	0,000433
Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	0,000264
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]	0,006985
Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.]	0,036622
Human Toxicity Potential (HTP inf.) [kg DCB-Equiv.]	0,018468
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]	17,14428
Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]	3,67E-09
Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]	3,16E-05
Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP inf.) [kg DCB-Equiv.]	0,000713

Tabella 41: Risultati di caratterizzazione per lo scenario di produzione di olio di contenuto energetico pari ad 1 MJ ottenuto da coltivazione di tabacco con precessione della brassica

Nell Tabella 42 sono stati riportati i contributi in percentuale di ogni fase del ciclo di vita al valore totale di impatto per ognuna delle categorie considerate. La fase agricola del processo, data dalle fasi di coltivazione della brassica e del tabacco (crescita in serra + fase vegetativa in campo aperto), genera più del 90% degli impatti totali per tutte le categorie.

Categorie di impatto	Totale	Serra	Brassica	Tabacco	Spremitura	Trasporto
Abiotic Depletion	100%	14	24	59	3	1
Acidification Potential	100%	30	30	38	2	< 1
Eutrophication Potential	100%	13	40	46	1	< 1
Freshwater Ecotoxicity Pot.	100%	11	19	65	4	< 1
Global Warming Potential	100%	33	21	41	4	1
Human Toxicity Potential	100%	9	26	62	3	< 1
Marine Ecotoxicity Pot.	100%	12	14	67	6	1
Ozone Layer Depletion	100%	41	18	36	4	2
Photochem. Ozone Creation	100%	48	19	30	2	1
Terrestrial Ecotoxicity Pot.	100%	4	37	55	4	< 1

Tabella 42: Risultati di caratterizzazione con i contributi percentuali delle varie fasi del ciclo di vita per ognuna delle categorie di impatto considerate dal metodo CML 2001

Risultato prevedibile data l'importanza dei processi agronomici nei cicli di vita dei biocarburanti in generale e ancor più in questo specifico caso che prevede la produzione di olio vegetale in cui la fase di trasformazione si riduce ad una semplice spremitura meccanica. Va detto infatti che nel caso di produzione di biodiesel, l'olio vegetale deve subire un processo di transesterificazione a cui di solito segue una fase di distillazione, la somma dei quali contribuisce dal 50-80% degli impatti, ad esempio per quanto concerne le emissioni di CO₂, a seconda delle materie prime utilizzate e dei sistemi di trasformazione. Nel caso dell'olio vegetale, la netta predominanza della fase agronomica nel generare impatti ambientali giustifica il focus che verrà offerto più avanti sulla coltivazione del tabacco (per un approfondimento sulla coltivazione della brassica, vedere paragrafo precedente).

Di seguito viene offerto un dettaglio dei risultati di caratterizzazione dell'intero ciclo di vita dello scenario analizzato, per le 5 categorie per cui si è scelto di effettuare l'approfondimento. Per ogni categoria di impatto sono stati riportati i contributi in percentuale della varie fasi alla composizione dell'impatto totale e una figura che esprima graficamente tali dati con un'indicazione del valore totale di impatto per quella specifica categoria.

Categorie di impatto	Totale	Serra	Brassica	Tabacco	Spremitura	Trasporto
Global Warming Potential	100%	33	21	41	4	1

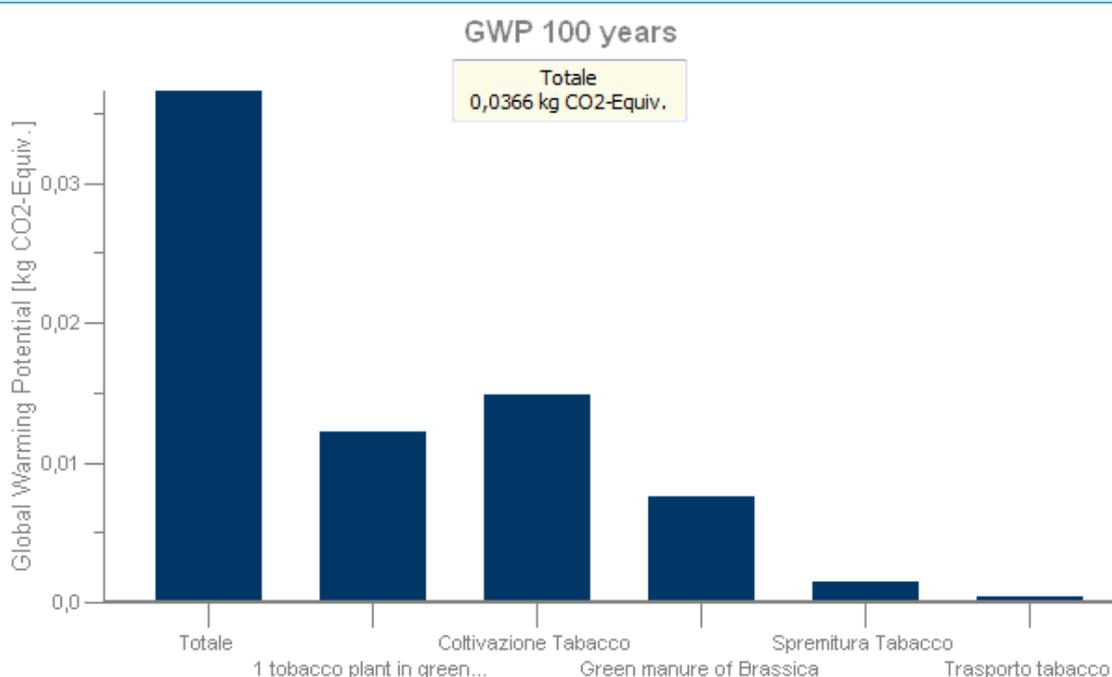


Figura 86: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il Global warming potential

Categorie di impatto	Totale	Serra	Brassica	Tabacco	Spremitura	Trasporto
Acidification Potential	100%	30	30	38	2	< 1

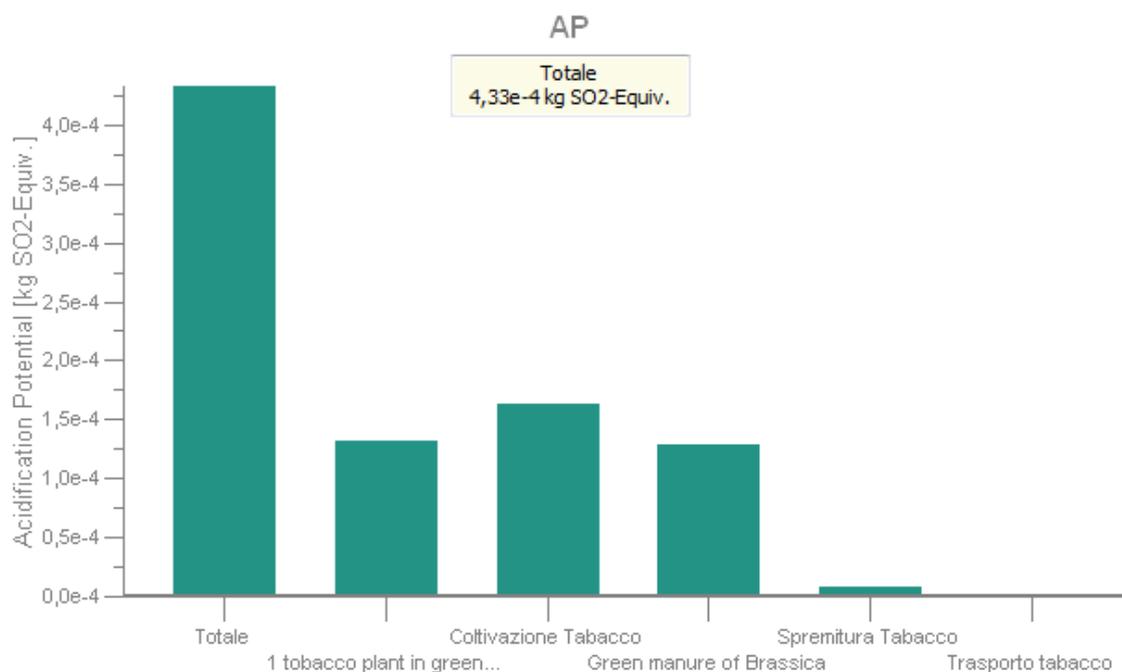


Figura 87: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per l'Acidification potential

Categorie di impatto	Totale	Serra	Brassica	Tabacco	Spremitura	Trasporto
Eutrophication Potential	100%	13	40	46	1	< 1

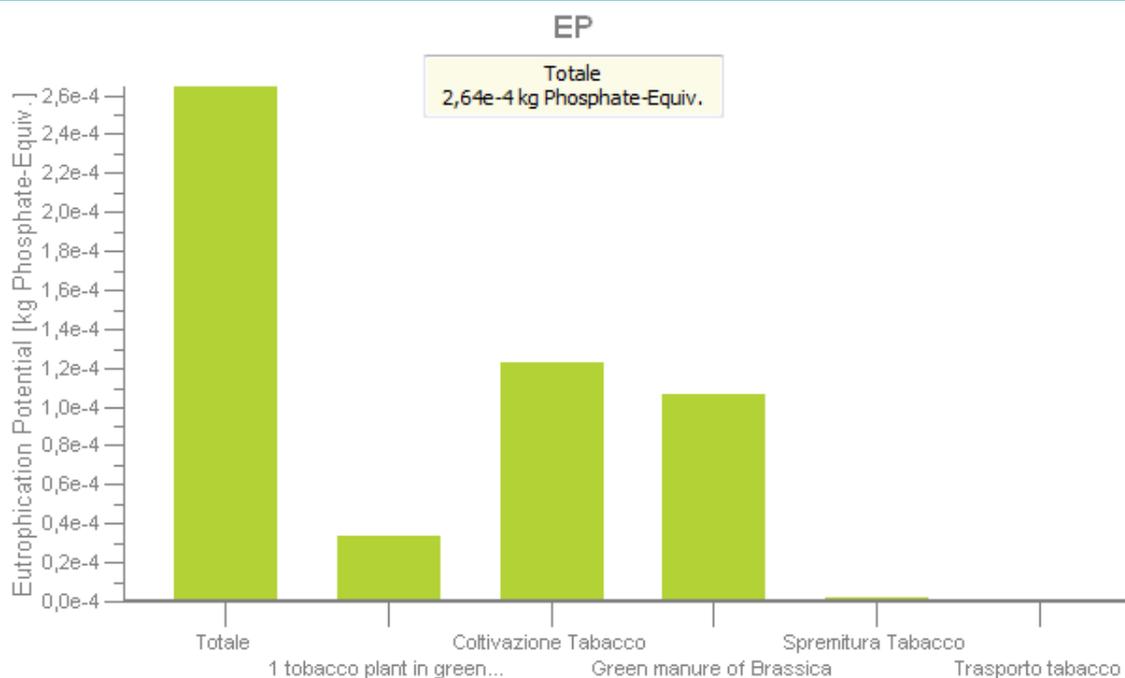


Figura 88: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per lo Eutrophication potential

Categorie di impatto	Totale	Serra	Brassica	Tabacco	Spremitura	Trasporto
Abiotic Depletion	100%	14	24	59	3	1

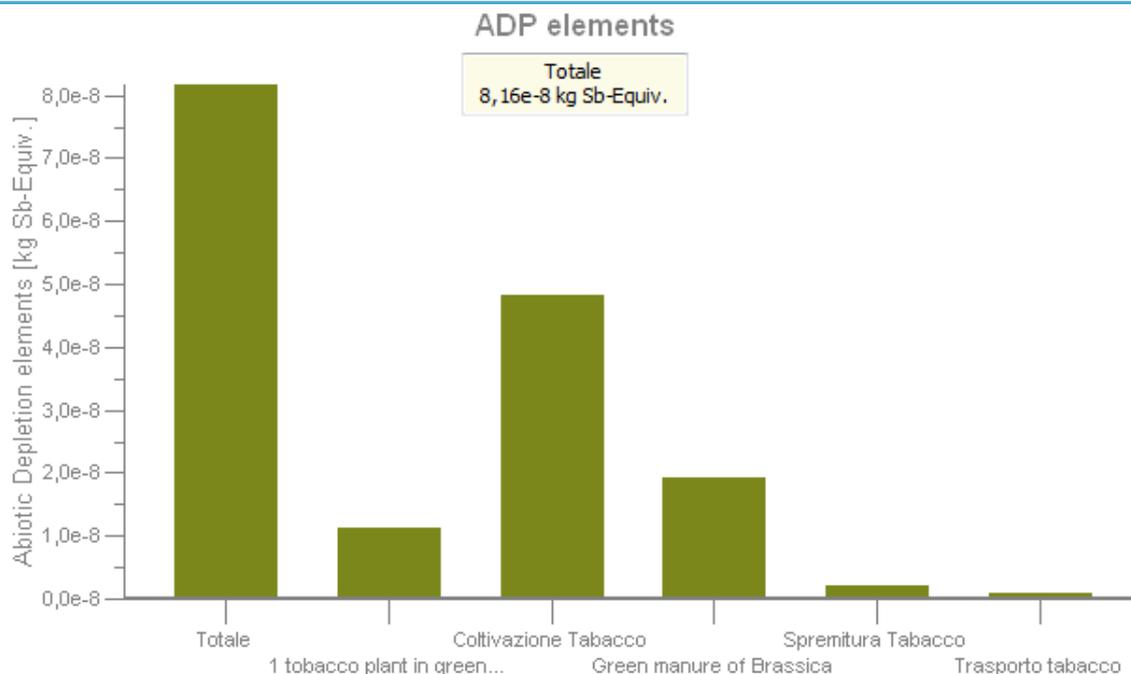


Figura 89: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per l'Abiotic depletion potential

Categorie di impatto	Totale	Serra	Brassica	Tabacco	Spremitura	Trasporto
Photochem. Ozone Creation	100%	48	19	30	2	1

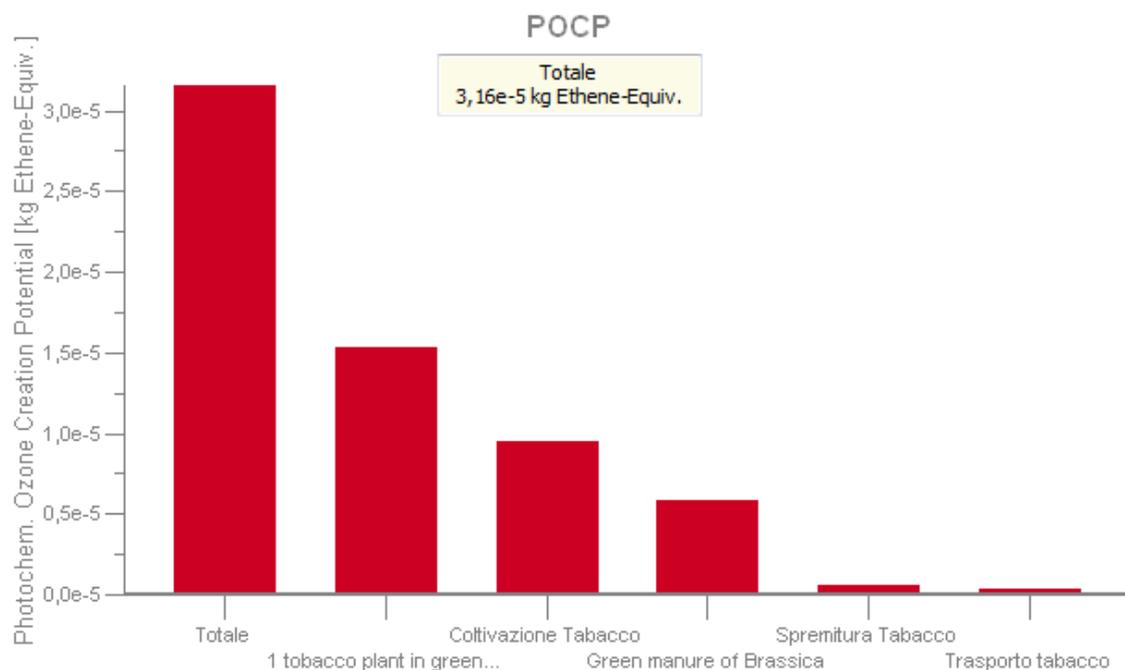


Figura 90: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il Photochemical ozone creation potential

Dai risultati appena proposti emerge certamente l'importante contributo dato dalla fase di coltivazione del tabacco agli impatti totali generati dall'intero ciclo di vita. Nel caso del consumo delle risorse abiotiche il contributo arriva fino al 60% del totale, principalmente a causa del consumo di carburante per le lavorazioni del terreno (in particolare l'irrigazione) e in relazione al consumo di risorse per la produzione dei fertilizzanti. Fatta eccezione per la categoria di creazione di ozono fotochimico, a cui contribuisce per circa il 50% del totale la fase di crescita in serra delle piantine di tabacco, la fase di coltivazione in campo è la fase più impattante per tutte le altre categorie di impatto.

Nella categoria di creazione di ozono fotochimico, invece, il principale contributo è legato alla crescita in serra riscaldata delle piantine di tabacco. La causa della pressochè totalità di tale impatto è imputabile al consumo di diesel per la produzione di calore nella serra. Inoltre il contributo della lavorazione del tabacco a tale impatto non è così importante come lo era stato nel caso del ciclo di vita della soia, perché tra le lavorazioni non è presente lo sfalcio (per il tabacco si procede alla raccolta del seme senza trinciare la pianta) e dunque non si è fatto ricorso al processo di database denominato *Mowing, by rotor mower CH* che presentando un elevato valore di incombusti (ed in particolare di monossido di carbonio) giustificava un così alto potere di creazione di ozono fotochimico (per maggiori dettagli vedere i risultati del ciclo di vita della soia).

Nella figura sottostante è riportato un dettaglio degli impatti del processo di crescita in serra delle piantine di tabacco per le categorie del Global warming potential (GWP) e della creazione dell'ozono fotochimico (POCP): il contributo del consumo di diesel è dominante in entrambi i casi. Se tale evidenza è appena stata spiegata per il POCP, per il Global warming questo dato è, in parte, anche spiegabile dal fatto che per il processo di fertilizzazione in serra non sono state considerate le emissioni dirette (legate soprattutto alla generazione di N_2O) date dall'interazione dell'N contenuto nei fertilizzanti con le matrici ambientali (Fantin V., 2011), (IPCC, 2006).

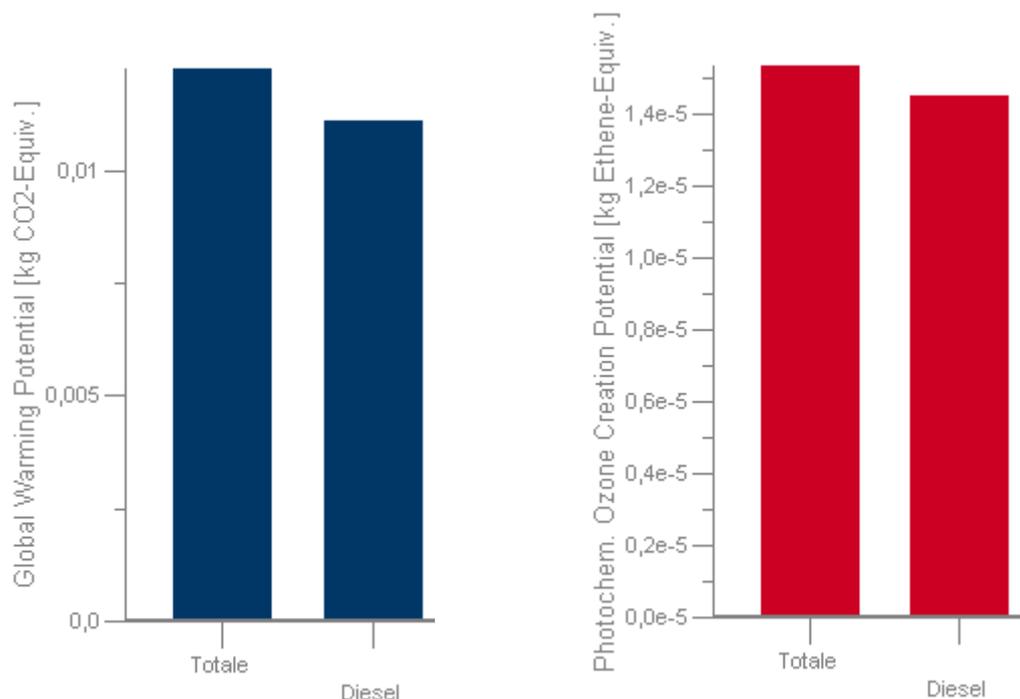


Figura 91: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per le categorie del GWP (sx) e del POCP (dx) per il processo di pre-coltivazione in serra riscaldata delle piantine di tabacco (contributo del processo di produzione del diesel sul valore totale di impatto per il processo *Serra riscaldata*)

In virtù di quanto detto, nelle figure che seguono viene offerto un dettaglio degli impatti della fase di coltivazione del tabacco in campo aperto, essendo stata individuata come la fase più impattante dell'intero ciclo di vita.

Il dato che emerge, analizzando i grafici, è il contributo determinante dato dal processo di irrigazione per tutte quelle categorie di impatto che vengono fortemente influenzate dal consumo di carburanti fossili (il processo di irrigazione prevede il ricorso ad un sistema di pompaggio molto energivoro). Questo risultato era atteso in considerazione dell'elevato quantitativo di acqua che la coltura del tabacco necessita nella sua fase vegetativa: 2400 m³ per ettaro, 6 volte maggiore se confrontato con il fabbisogno della soia (400 m³/ha).

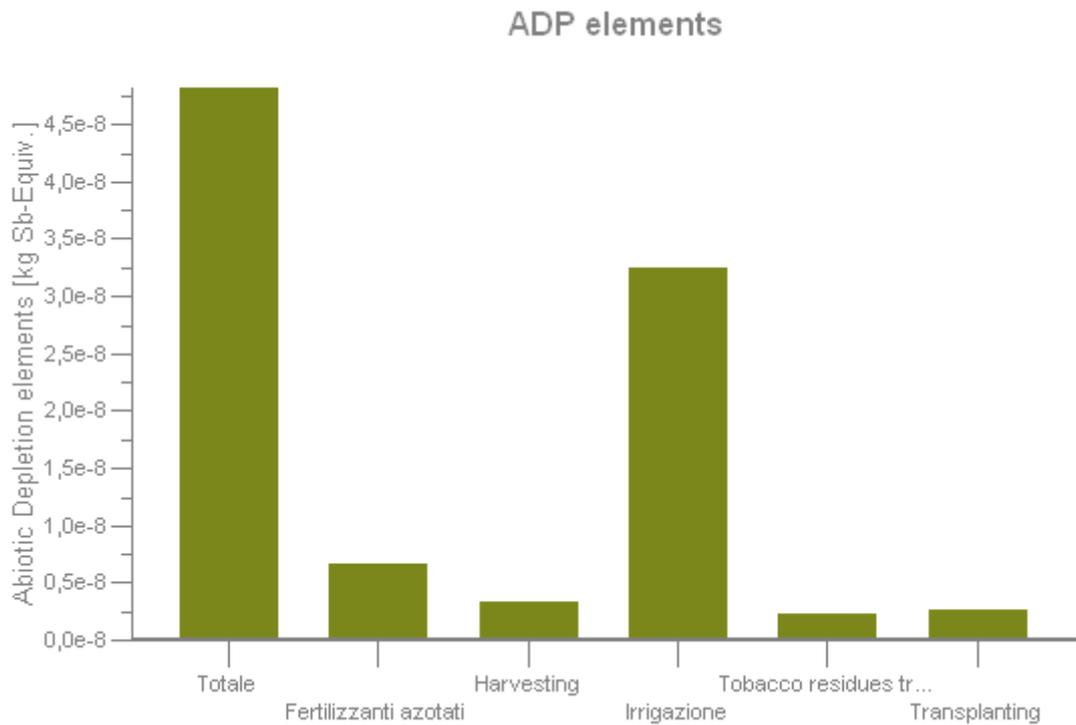


Figura 92: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria dell'Abiotic depletion potential

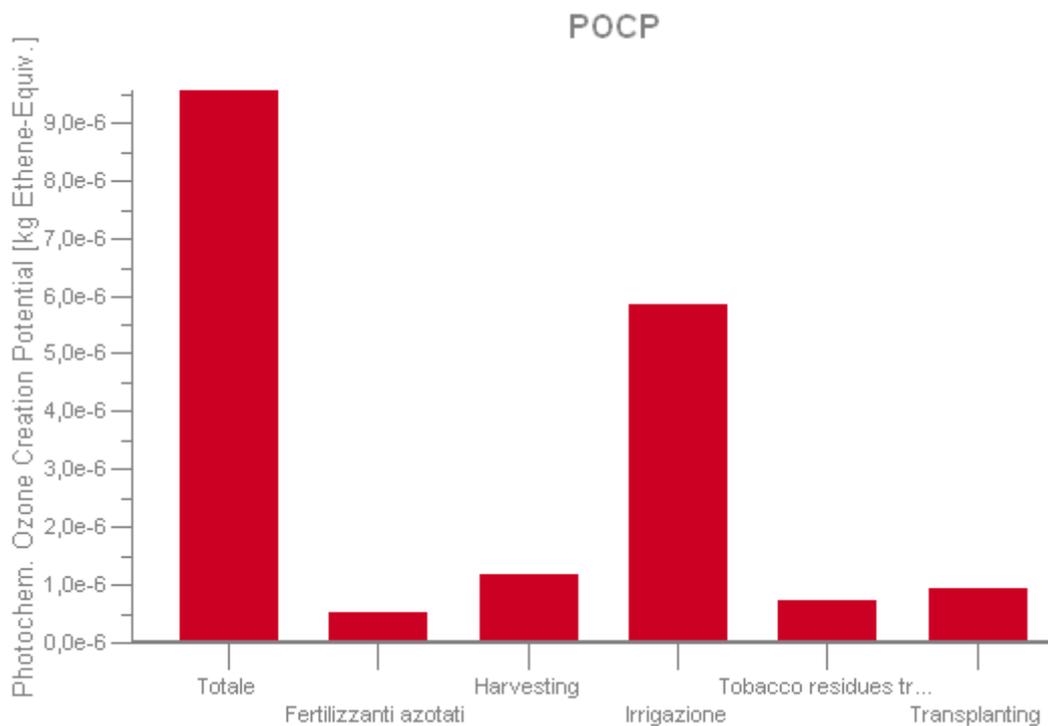


Figura 93: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria del Photochemical ozone creation potential

I grafici per il POCP e per il consumo di risorse abiotiche mostrano come per queste categorie il contributo al valore totale dell'impatto da parte del processo di irrigazione sia superiore al 50%. Per il GWP risulta importante anche il contributo dato dalla produzione, e soprattutto dallo spandimento, dei fertilizzanti azotati (emissioni dirette).

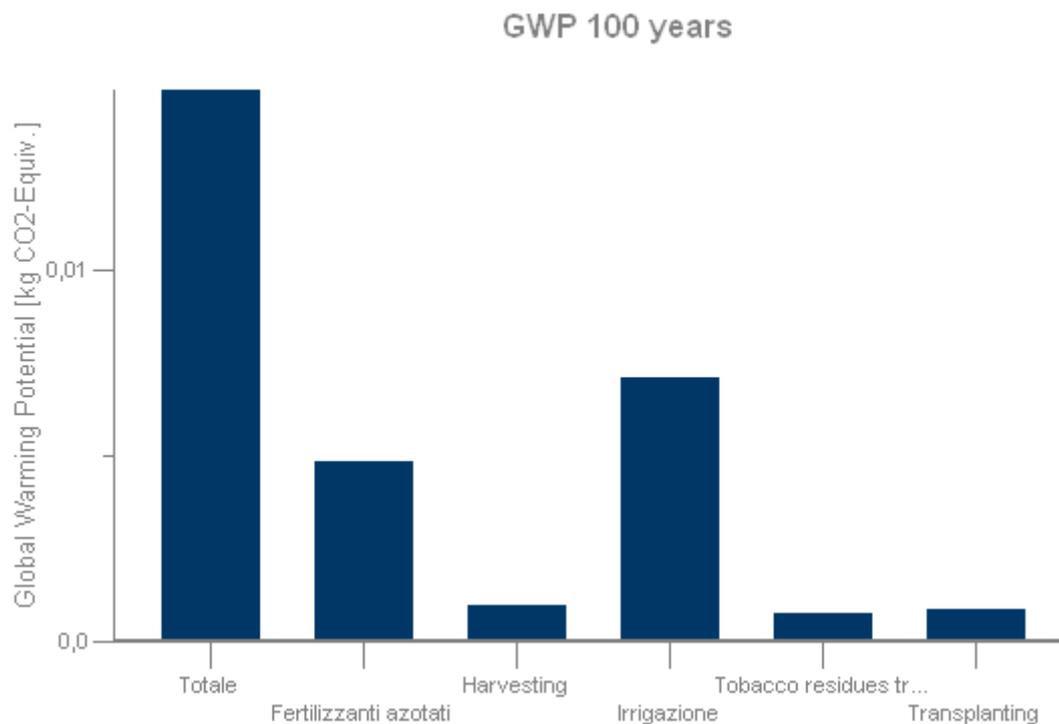


Figura 94: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria del Global warming potential

Nelle categorie che considerano il potere di acidificazione (AP) e quello di eutrofizzazione (EP) il processo che gioca il ruolo di maggiore contribuente per la fase di coltivazione del tabacco è quello della fertilizzazione. Se però nel caso dell'AP ad essere causa di un impatto così consistente è il processo stesso di produzione dei fertilizzanti, nel caso dell'EP sono le emissioni dirette in acqua ad innescare il processo di eccessiva produzione di nutrienti.

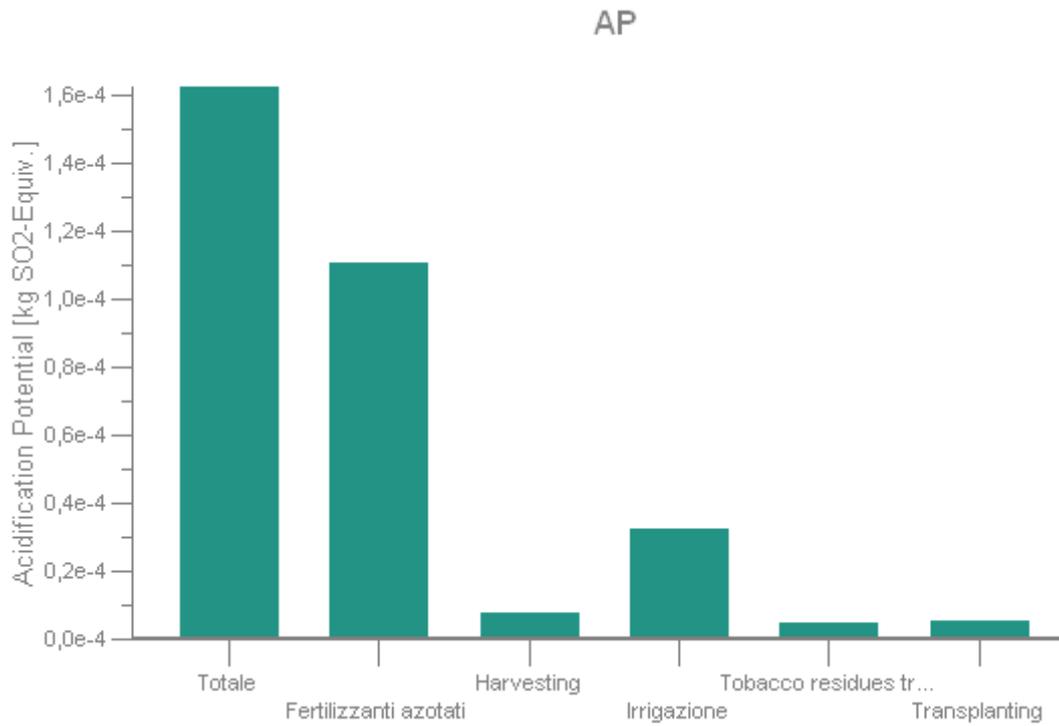


Figura 95: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria dell'Acidification potential

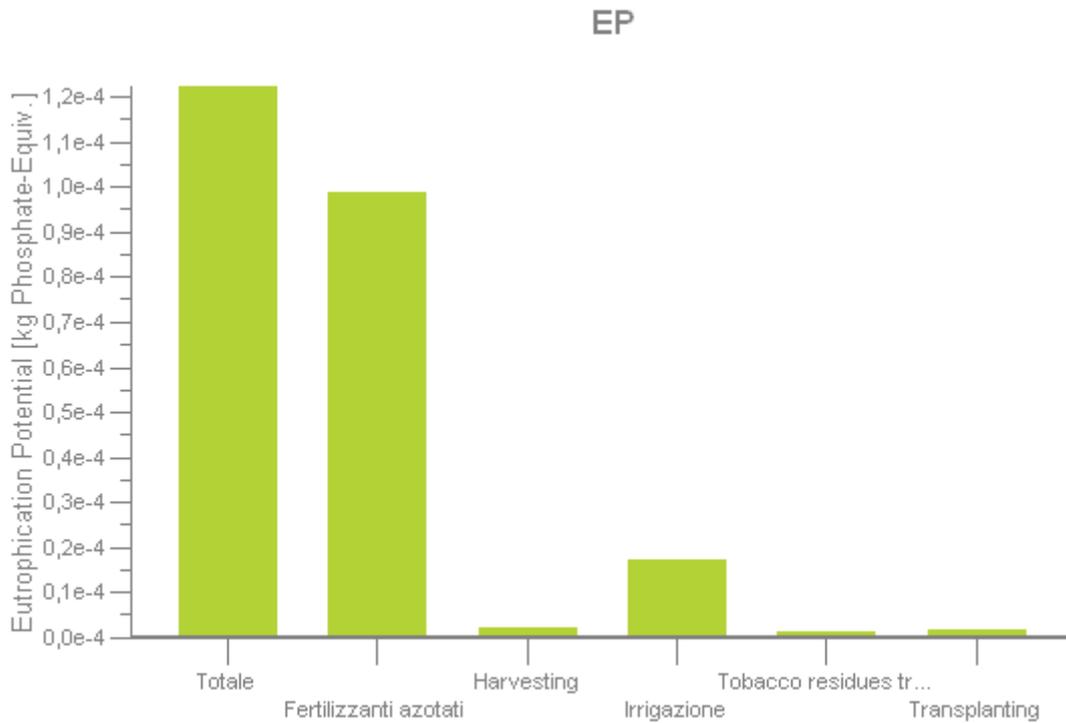


Figura 96: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione per il processo di coltivazione del tabacco per la categoria dello Eutrophication potential

6.3.2.2 Confronto tra lo scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica con lo scenario di coltivazione del tabacco che fa ricorso a fumiganti sintetizzati chimicamente

Di seguito i risultati dello scenario descritto nel paragrafo precedente vengono confrontati con lo scenario di coltivazione che ricorre a fumiganti sintetizzati chimicamente per combattere l'infestazione da nematodi.

In una logica di completezza, la tabella sottostante riporta i risultati di caratterizzazione di tutti gli scenari per il tabacco presentati nell'inventario del capitolo precedente espressi in termini percentuali prendendo come riferimento lo scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica e semina in serra riscaldata.

Categoria di impatto	B+S	B-S	M+S	M-S	NF
Abiotic Depletion	100%	89	102	90	128
Acidification Potential	100%	71	100	71	146
Eutrophication Potential	100%	88	98	86	149
Global Warming Potential	100%	69	94	63	140

Tabella 43: Confronto dei risultati di caratterizzazione di tutti gli scenari di coltivazione del tabacco descritti nell'analisi di inventario rispetto allo scenario descritto nel precedente paragrafo che prevede la precessione della brassica (valori espressi in percentuale, fatto 100 il valore di impatto dello scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica.)

In cui:

B+S = scenario con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra riscaldata

B-S = scenario con precessione di brassica senza pre-coltivazione in serra

M+S = scenario senza precessione di brassica con fumigante chimico e pre-coltivazione in serra riscaldata

M-S = scenario senza precessione di brassica con fumigante chimico senza pre-coltivazione in serra

NF = scenario senza ricorso a sistema di fumigazione con pre-coltivazione in serra riscaldata

Lo scenario che non fa ricorso ad alcun tipo di fumigante (NF) a causa delle scarse rese in seme legate all'azione negativa esercitata dall'infestazione dei nematodi, presenta dei valori di impatto sensibilmente più alti dello scenario di

riferimento (B+S). Minore è invece il gap tra lo scenario con precessione di brassica e quello che fa ricorso all'1-3-dicloropentene. Quest'ultimo presenta impatti tendenzialmente simili o leggermente inferiori (-2% nella categoria dello Eutrophication potential, -6% nel Global warming potential) allo scenario considerato come riferimento. In Tabella 44 i risultati di normalizzazione dei 2 scenari in questione, di cui è offerto un dettaglio in Tabella 45 e nel relativo grafico in Figura 97.

Categorie di impatto	Brassica+serra	Fumigante+serra
Abiotic Depletion	1,35E-14	1,37E-14
Acidification Potential	2,57E-14	2,58E-14
Eutrophication Potential	1,43E-14	1,40E-14
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	3,34E-14	3,04E-14
Global Warming Potential	7,03E-15	6,62E-15
Human Toxicity Potential	3,69E-14	3,00E-14
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	3,85E-13	3,71E-13
Ozone Layer Depletion Potential	3,60E-16	3,32E-16
Photochem. Ozone Creation Pot.	1,82E-14	1,57E-14
Terrestrial Ecotoxicity Potential	6,15E-15	4,15E-15

Tabella 44: Confronto dei risultati di normalizzazione

Categorie di impatto	Brassica + serra	Fumigante + serra
Abiotic Depletion	1,35E-14	1,37E-14
Acidification Potential	2,57E-14	2,58E-14
Eutrophication Potential	1,43E-14	1,40E-14
Global Warming Potential	7,03E-15	6,62E-15

Tabella 45: Confronto dei risultati di normalizzazione senza la categoria dell'Ozone layer depletion e le quattro categorie di tossicità previste dal metodo CML 2001

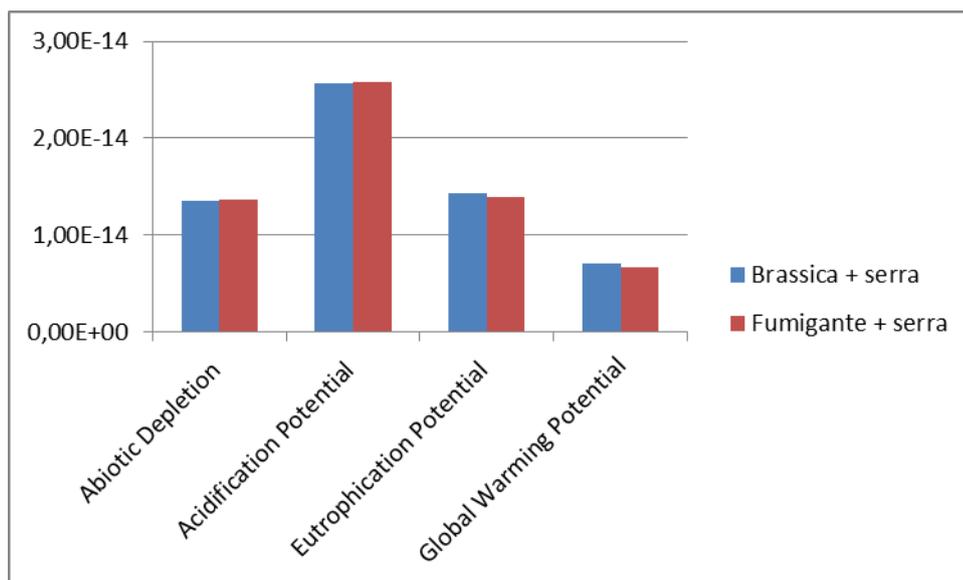


Figura 97: Grafico dei risultati di normalizzazione senza la categoria dell'Ozone layer depletion e le quattro categorie di tossicità previste dal metodo CML 2001

In Figura 98 si propone un dettaglio del confronto degli impatti sull'effetto serra (GWP) dei due cicli di vita (tabacco+brassica in blu e tabacco+fumigante chimico in verde). Gli impatti totali sono molto simili ed il leggero valore di impatto più alto per il sistema che prevede la precessione della brassica alla coltivazione del tabacco è dato proprio dagli impatti generati dalla coltivazione della specie da sovescio.

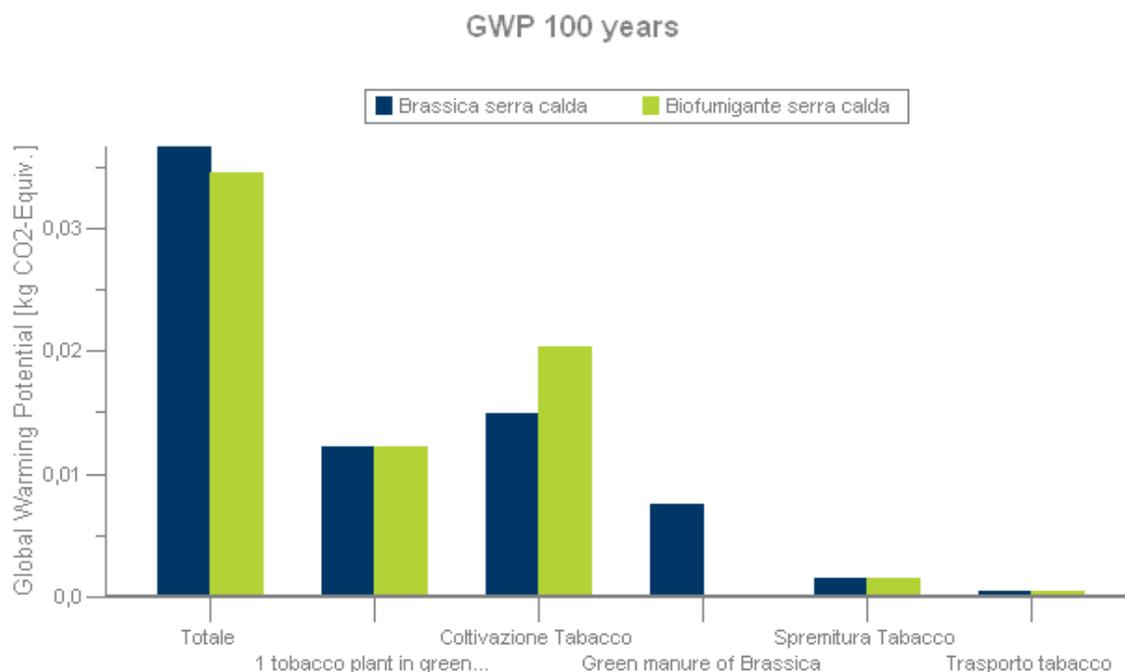


Figura 98: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione del confronto tra lo scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica e lo scenario che prevede il ricorso al fumigante sintetizzato chimicamente per la categoria del GWP

Anche nel caso dello Eutrophication potential è possibile riscontrare la stessa distribuzione degli impatti visti nel caso del GWP. Il sostanziale equilibrio tra i due scenari analizzati è spiegabile nel caso del potenziale di eutrofizzazione, poiché risultano identici il tipo e la quantità di fertilizzanti (come già visto, principale fonte di impatto per questa categoria) utilizzati nei due casi, anche se diversamente distribuiti (inventario paragrafo 6.2.2).

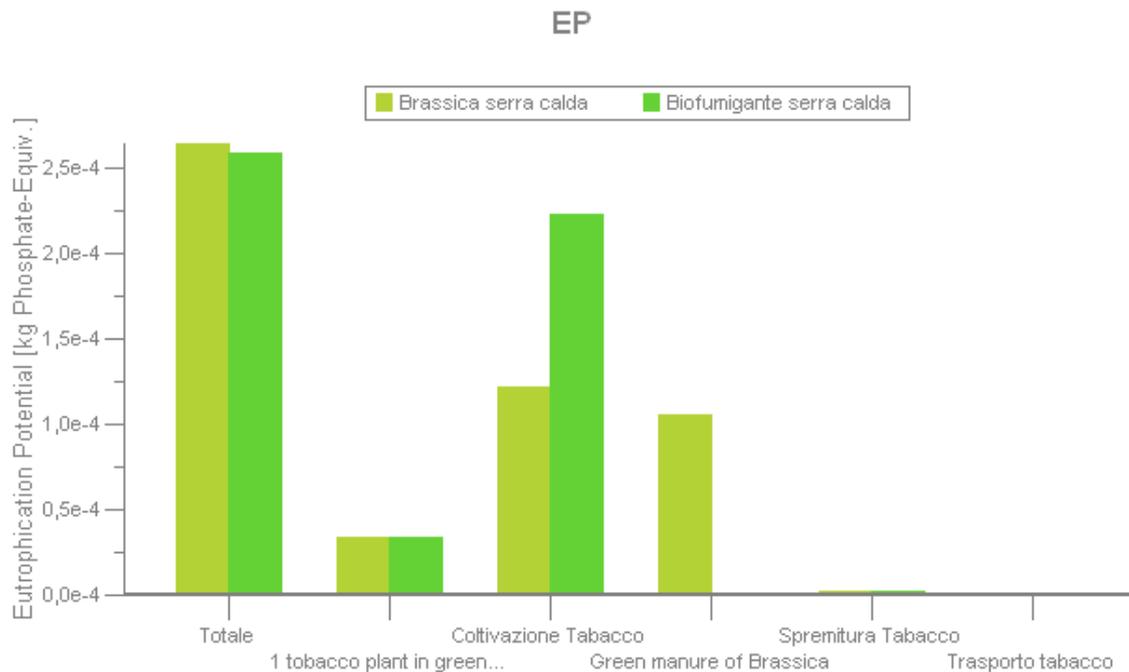


Figura 99: Dettaglio dei risultati di caratterizzazione del confronto tra lo scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica e lo scenario che prevede il ricorso al fumigante sintetizzato chimicamente per la categoria dell'EP

Contrariamente a quanto visto nel dettaglio offerto dai 2 grafici precedenti, le differenze nei valori di impatto si fanno marcate se si confrontano gli scenari che prevedono la semina in serra del tabacco con gli scenari che considerano la semina diretta del tabacco in campo aperto sui supporti spugnosi biodegradabili. Nella tabella sottostante i risultati della fase di normalizzazione per entrambi gli scenari oggetto di analisi.

Categorie di impatto	Brassica + serra	Brassica senza serra
Abiotic Depletion	1,35E-14	1,20E-14
Acidification Potential	2,57E-14	1,82E-14
Eutrophication Potential	1,43E-14	1,26E-14
Freshwater Ecotoxicity Pot.	3,34E-14	3,10E-14
Global Warming Potential	7,03E-15	4,84E-15
Human Toxicity Potential	3,69E-14	3,45E-14
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	3,85E-13	3,56E-13
Ozone Layer Depletion Potential	3,60E-16	2,18E-16
Photochem. Ozone Creation Pot.	1,82E-14	9,57E-15
Terrestrial Ecotoxicity Potential	6,15E-15	5,97E-15

Tabella 46: Risultati della fase di normalizzazione

Nella Figura 100 un dettaglio dei risultati per alcune categorie di impatto, con le riduzioni percentuali ottenibili nello scenario che prevede l'utilizzo di un substrato biodegradabile per effettuare l'operazione di semina diretta in campo.

Categorie di impatto	Precessione brassica + serra	Precessione brassica senza serra
Abiotic Depletion	1,35E-14	-12%
Acidification Potential	2,57E-14	-30%
Eutrophication Potential	1,43E-14	-12%
Global Warming Potential	7,03E-15	-31%

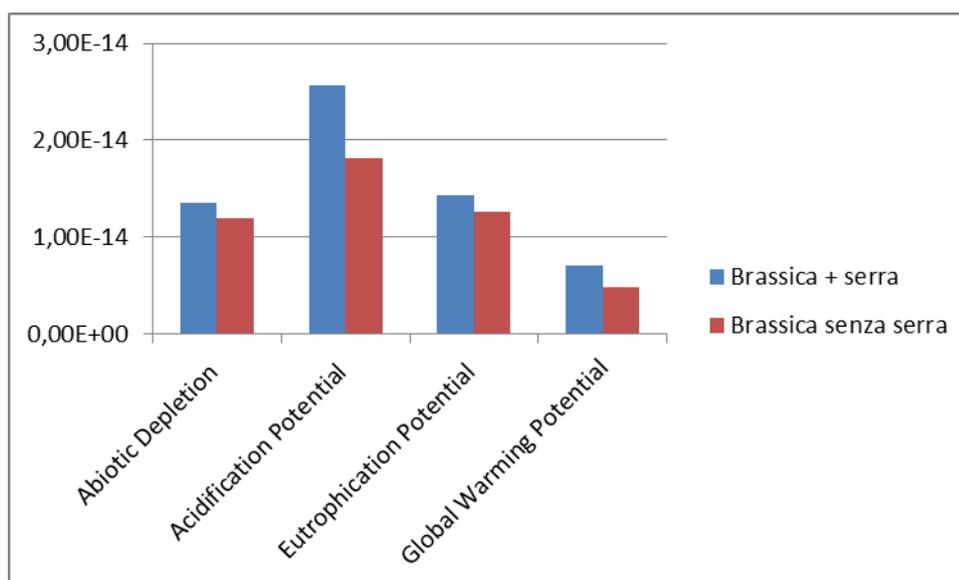


Figura 100: Risultati di normalizzazione con indicazione delle riduzioni percentuali dei valori di impatto ottenibili nello scenario che non prevede la serra riscaldata per le piantine di tabacco

Il dettaglio evidenzia come le categorie di impatto, in cui si registra un maggior divario nei valori a vantaggio dello scenario senza serra riscaldata, sono l'Acidification potential ed il Global warming potential. In entrambe le categorie la differenza nei risultati tra i due scenari confrontati è effetto della combustione del diesel per il riscaldamento della serra. Va ricordato che di fatto il modello che non prevede il ricorso alla serra per la fase pre-impianto in campo aperto del tabacco considera gli stessi flussi in input di quello che si è considerato come scenario di riferimento, fatta eccezione per il diesel necessario per il riscaldamento. Dunque i risultati vanno presi solo come indicativi, dato che non è stata considerata la produzione del substrato spugnoso di supporto al seme di tabacco nelle prime fasi di vita. Essendo un progetto ancora in fase prototipale i dati di produzione da utilizzare in input non sono stati riportati nel report del progetto Susbiofuel e dunque non è stato possibile includere nell'inventario tale supporto. La semplificazione effettuata riguarda solo la produzione delle materie prime biodegradabili dato che i pesticidi e i fertilizzanti necessari a proteggere il seme e la piantina di tabacco nelle prime fasi di vita sono stati inclusi nell'analisi. Inoltre non aver considerato il fine vita delle materie prime utilizzate, non costituisce una semplificazione poiché trattandosi di materie biodegradabili non è necessario nessun processo di smaltimento, ma anzi queste costituiscono materiale nutritivo per il terreno essendo oggetto di decomposizione da parte dei microrganismi del suolo.

6.3.3 Confronto tra gli impatti del ciclo di vita di 1 MJ prodotto da olio di soia e il ciclo di vita di 1 MJ prodotto da olio di tabacco e

Nella Tabella 47 sono riportati i risultati di normalizzazione per le principali categorie di impatto considerate finora del ciclo di vita di produzione di olio con contenuto energetico di 1 MJ sia per la soia che per il tabacco entrambi per lo scenario che prevede il sovescio della brassica in precessione. Il confronto per le due colture viene effettuato solo per questo scenario di coltivazione (sovescio) dato che tutto il progetto Susbiofuel è volto a validare dal punto di vista tecnico, economico ed ambientale tale tipo di approccio nella lotta

all'infestazione da nematodi per la coltivazione di piante oleaginose in terreni considerati marginali.

Categorie di impatto	Soia	Tabacco
Abiotic Depletion	1,27E-14	1,35E-14
Eutrophication Potential	2,10E-14	1,43E-14
Acidification Potential	2,81E-14	2,57E-14
Global Warming Potential	5,84E-15	7,03E-15
Photochem. Ozone Creation	1,16E-14	1,82E-14

Tabella 47: Risultati di normalizzazione per il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica della soia e per il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra del tabacco

Il grafico sottostante e la Tabella 48 semplificano la lettura e l'interpretazione dei dati. Risulta evidente come nella categoria maggiormente influenzata dall'utilizzo di pesticidi (Eutrophication potential, Figura 102), la soia mostri impatti maggiori, mentre nelle categorie maggiormente influenzate dagli effetti dell'uso di combustibili fossili (Global warming potential e Photochemical ozone creation potential) il tabacco risulta avere impatti maggiori della soia principalmente in relazione al consumo di diesel necessario al riscaldamento della serra.

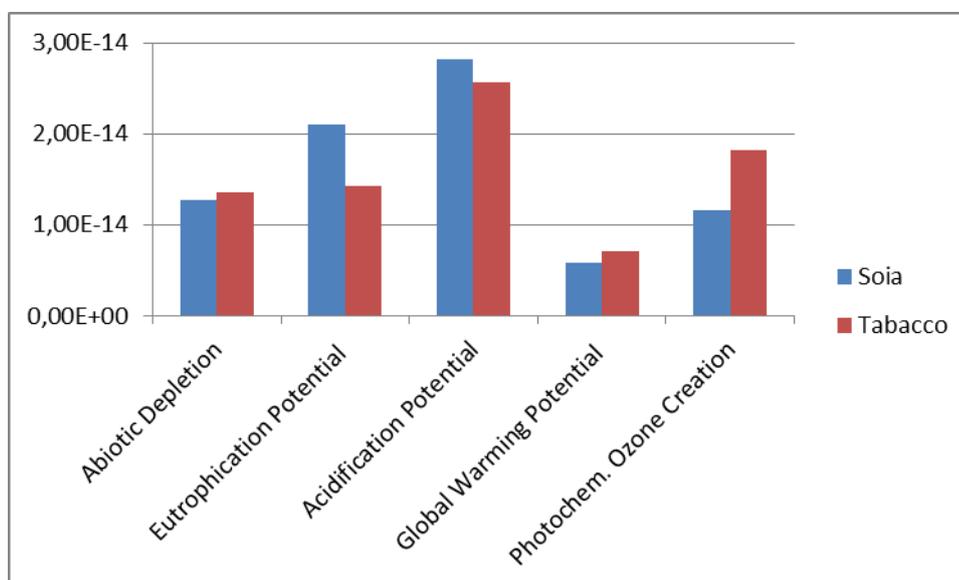


Figura 101: Grafico dei risultati di normalizzazione per il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica della soia e per il ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra del tabacco

Categorie di impatto	Soia	Tabacco
Abiotic Depletion	94%	100%
Eutrophication Potential	147%	100%
Acidification Potential	109%	100%
Global Warming Potential	83%	100%
Photochem. Ozone Creation	63%	100%

Tabella 48: Confronto dei valori di impatto in fase di normalizzazione del ciclo di vita della soia con il ciclo di vita del tabacco (fatto 100 il valore di impatto del ciclo di vita del tabacco per ognuna delle categorie considerate)

La minore resa in olio della soia fa sì che per produrre il quantitativo di seme sufficiente per generare 1 MJ di energia (unità funzionale) sia necessaria una maggiore superficie coltivata e dunque un maggior quantitativo di fertilizzanti che conduce ai risultati di impatto per la categoria dello Eutrophication potential di cui la Figura 102 offre un dettaglio.

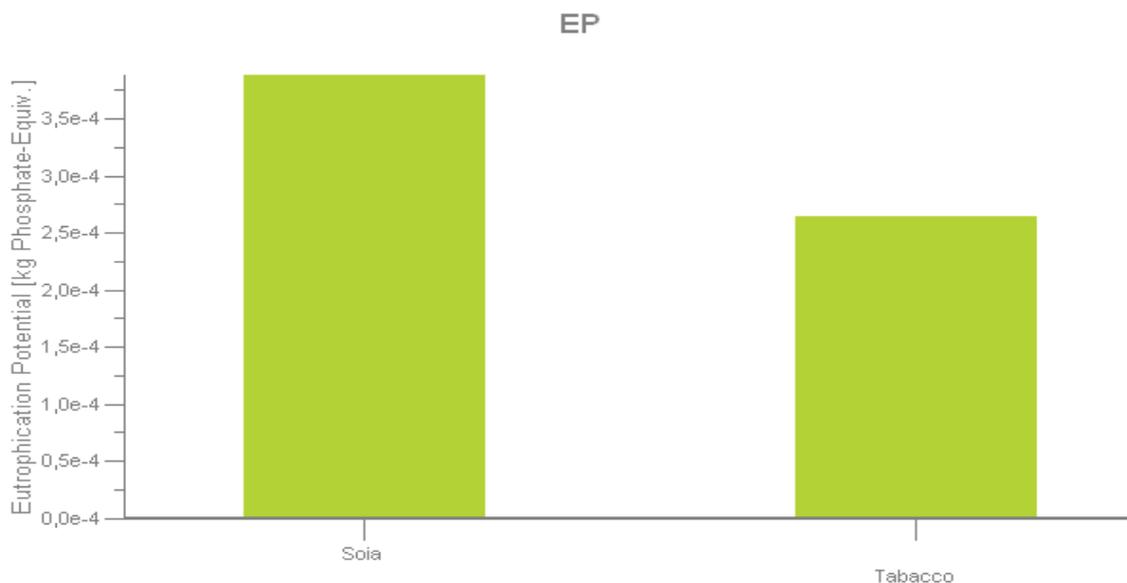


Figura 102: Risultati di caratterizzazione per la categoria dell'EP del ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica della soia e del ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra del tabacco

6.3.3.1 Le emissioni di CO₂ del ciclo di vita della produzione di olio con contenuto energetico di 1 MJ da olio di soia e di tabacco: il confronto con i valori stabiliti dalla 28/2009/CE

I valori di impatto per la categoria del Global warming potential di cui si dà un dettaglio in Figura 103 oltre ad essere di interesse in termini di confronto tra le due colture hanno anche importanza in termini normativi.

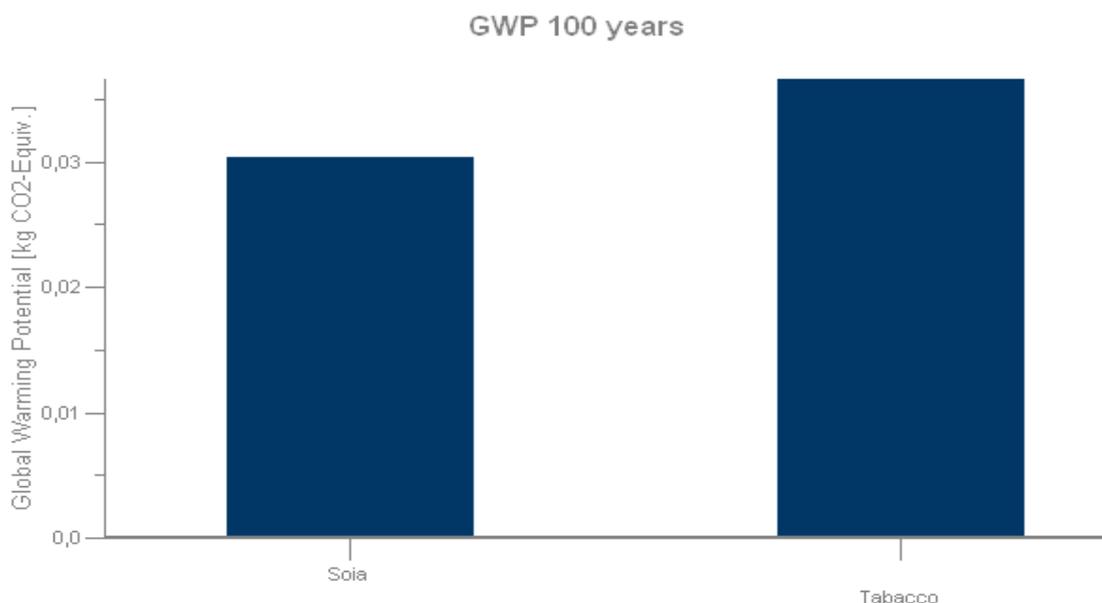


Figura 103: Risultati di caratterizzazione per la categoria del GWP del ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica della soia e del ciclo di vita di coltivazione con precessione di brassica e pre-coltivazione in serra del tabacco

Infatti la Direttiva Europea 2009/28/CE stabilisce l'accettabilità di un determinato biocombustibile in termini di emissioni di CO₂ risparmiate rispetto al corrispondente fossile. La normativa stabilisce che i biocombustibili devono garantire un risparmio del 35% delle emissioni di CO₂ equivalente (calcolati secondo le modalità stabilite dalla normativa stessa) rispetto al corrispondente fossile (benzina o gasolio). Dal 2017 tale risparmio dovrà raggiungere almeno il 50% mentre dal 1 gennaio 2018 in poi il taglio delle emissioni dovrà essere pari al 60% per tutti i biocombustibili prodotti in stabilimenti che aprono i battenti dopo il 1 gennaio 2017.

Per quanto riguarda gli oli vegetali il combustibile fossile di paragone è il diesel per cui la normativa prevede i seguenti valori di riferimento:

- 83,8 gCO₂eq/MJ in caso di utilizzo in mezzi di trasporto
- 91 gCO₂eq/MJ nel caso in cui i bioliquidi vengano utilizzati per la produzione di elettricità
- 77 gCO₂eq/MJ nel caso siano utilizzati per la produzione di calore (tale valore sale a 85 gCO₂eq/MJ in caso di impianti cogenerativi)

I risultati ottenuti dall'analisi LCA condotta secondo le indicazioni della normativa 2009/28/CE vigente) indicano i seguenti valori di emissione di CO₂:

- Soia: 30,4 gCO₂eq/MJ
- Tabacco: 36,6 gCO₂eq/MJ

quantità che risultano essere assolutamente in linea anche con i dati proposti dal progetto Biograce (<http://www.biograce.net/>) che si è proposto di calcolare le emissioni di CO₂ per diversi tipi di biocombustibili (olio vegetale, biodiesel, bioetanolo) ottenuti da differenti materie prime. Per la categoria degli oli vegetali l'unico feedstock indagato è stato quello del colza: il totale delle emissioni del ciclo di vita è risultato essere pari a 36 gCO₂eq/MJ, il che avvalorava i risultati ottenuti dall'analisi LCA appena descritta.

Valutando i risultati in riferimento alla Direttiva 2009/28/CE anche calcolando le riduzioni rispetto al riferimento più sfavorevole (uso dell'olio vegetale per la produzione di calore, 77 gCO₂eq/MJ), i risparmi di CO₂ ammontano al:

- 60,5% per la soia
- 52,5% per il tabacco

abbondantemente sopra il 35% stabilito dalla normativa e nei limiti anche per quanto riguarda i limiti dal 1 gennaio 2017 al 1 gennaio 2018. Per quanto riguarda i limiti in vigore dal 1 gennaio 2018 che prevedono un risparmio di almeno il 60% delle emissioni di CO₂ rispetto al corrispondente combustibile fossile, la soia rientra nei limiti mentre il tabacco necessiterebbe di un taglio delle emissioni che permettesse di ridurre di un ulteriore 7,5% le emissioni in caso di utilizzo per la produzione di calore e del 3,8% in caso di utilizzo in autotrazione. In caso di utilizzo dell'olio di tabacco per la produzione di elettricità il valore di emissione sarebbe al limite con il valore previsto dalla normativa, permettendo un risparmio del 59,8% delle emissioni. Inoltre va sottolineato che il calcolo degli impatti per il ciclo di vita del tabacco è stato condotto utilizzando i dati sperimentali ottenuti dalla coltivazione di tabacco da foglia adattato alla produzione di seme, ma sono già in fase di

sperimentazione in campo specie di tabacco selezionate per ottimizzare la produzione in olio che avendo rese anche superiori a 5 t/ha permetterebbero un'ulteriore riduzione delle emissioni di CO₂ per unità di energia (1MJ).

7. APPROFONDIMENTO SUL LAND USE IMPACT

Dallo studio LCA presentato nel capitolo precedente emergono, tra gli altri, certamente 2 risultati:

- la fase del ciclo di vita responsabile dei maggiori impatti è quella agricola sia per la soia che per il tabacco in tutti gli scenari considerati
- la metodologia LCA e nello specifico il metodo CML 2001 aggiornato al novembre 2010 non riescono a cogliere e a quantificare negli indicatori analizzati le differenze (se non in termini di rese diverse nella produzione del seme) tra gli scenari che prevedono il sovescio della brassica a scopi biofumiganti e non prevedono un ricorso sistemi di fumigazione

Dunque il metodo utilizzato per la valutazione degli impatti premia lo scenario che prevede il sovescio della brassica grazie al fatto che maggiori rese implicano minori impatti per produrre la stessa unità funzionale di prodotto, tuttavia i risultati ottenuti forniscono una fotografia parziale del sistema non includendo una categoria di impatto per l'uso del suolo, aspetto di centrale importanza nelle valutazioni ambientali in cui la fase agricola gioca un ruolo importante nella composizione degli impatti ambientali.

A testimonianza del fatto che in realtà esistono differenze tra il sistema che prevede il sovescio ed lo scenario che non ricorre a sistemi di fumigazione, ci sono i risultati delle prove condotte nel contesto del protocollo del progetto Susbiofuel che riportano le differenze ottenute nei due casi suddetti per la coltivazione del tabacco nei 2 campi prova di Altedo (BO) e Zapponeta (FG).

Indicatore	Campo: Altedo		Campo: Zapponeta	
	SI brassica	No brassica	SI brassica	No brassica
Altezza piante (m)	1,82	1,18	1,78	1,2
Biomassa prodotta (kg/4m ²)	16,27	9,45	9,14	5,25
Nematodi (n° larve/250 cm ³)	16	41	1	4
Sostanza organica (% in vol.)	1,15	0,83	1,3	0,6

Tabella 49: Risultati delle analisi sul terreno effettuate su parcelle con e senza precessione di brassica

Come è riportato in tabella, tra le altre, sono state condotte anche analisi sul contenuto di sostanza organica nel terreno. Tali dati potrebbero teoricamente essere utilizzati come dati di input nell'indicatore dell'impatto sull'uso del suolo proposto da Milà i Canals descritto nel capitolo 3. Tuttavia l'accumulo di sostanza organica nel terreno avviene in tempi molto lunghi ed è riconosciuto come un indicatore degli effetti virtuosi di una pratica agricola sul lungo periodo (Fliebach A., 2007), anche perché per considerare i dati statisticamente validi sarebbero necessarie campagne di misurazione da condurre per almeno 5-10 anni data la grande influenza delle condizioni climatiche sul processo di accumulo e la variabilità di queste da un anno all'altro (contrapposta ad una sostanziale stabilità nel lungo periodo). Dunque una sola campagna di misurazioni, a valle di un processo di 3 anni di sperimentazione non può fornire dati affidabili su cui costruire un indicatore della qualità del suolo. Rimane il fatto indiscutibile che tali risultati costituiscono comunque un'indicazione di un andamento tendenziale che conferma le esperienze sul sovescio condotte in altri progetti sperimentali (Florentin M., 2011).

Di seguito vengono riportati i risultati di 3 diversi metodi per la valutazione del land use per valutare le differenze in termini di impatto ambientale sul suolo per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica e lo scenario che non prevede ricorso ad un fumigante che contrasti l'infestazione da nematodi del terreno: l'indicatore *Natural land transformation* contenuto nel metodo di valutazione degli impatti in LCA noto come ReCiPe (<http://www.lcia-recipe.net>), il metodo proposto dall'*Allegato alla Decisione del 10 giugno 2010* della Commissione Europea (descritto nel paragrafo 2.4.2) ed infine l'indicatore proposto dalla Ministero per l'Agricoltura degli Stati Uniti d'America (USDA, 2008), il *Soil Conditioning Index* (descritto nel capitolo *Materiali e metodi* di questa tesi).

Risultati dell'indicatore Natural land transformation del metodo ReCiPe

Nell'intento di considerare l'impatto sull'uso del suolo del progetto Susubiofuel sono stati mandati al processo di valutazione utilizzando un metodo diverso dal CML 2001, i modelli costruiti nel software GaBi per lo scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica e lo scenario alternativo di coltivazione

del tabacco senza azioni di contrasto all'infestazione da nematodi. Il metodo individuato è stato il ReCiPe (<http://www.lcia-recipe.net>) che prevede tra le altre una categoria che misura gli impatti sul suolo considerando le trasformazioni permanenti causate da un determinato processo o ciclo di vita (*Natural land transformation [m²]*). Poiché l'interpretazione dei risultati per le altre categorie di impatto con il metodo ReCiPe esula dai propositi di questa tesi, si riporta solo il grafico dei risultati della categoria del Natural land transformation.

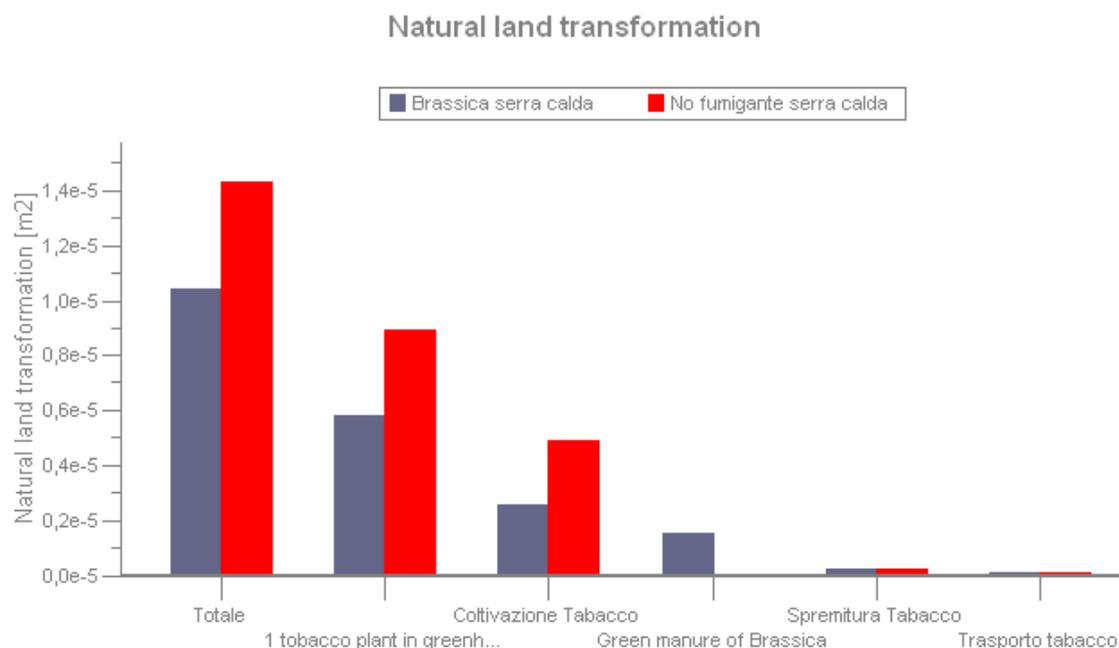


Figura 104: Risultati per la categoria di impatto *Natural land transformation* del metodo ReCiPe per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio di brassica (blu) e lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a strumenti di lotta all'infestazione da nematodi (rosso)

Il grafico evidenzia un minore impatto per lo scenario che prevede il ricorso al sovescio della brassica e questo potrebbe essere in linea con i risultati delle analisi condotte sul terreno dal protocollo del progetto Susbiofuel. Tuttavia una più approfondita analisi evidenzia come il valore di impatto dello scenario che non prevede un sistema di fumigazione (colonna di destra dell'istogramma, in rosso) sia maggiore di circa il 35% (36,7% in meno per la precisione) del valore di impatto dello scenario che prevede biofumigazione, dato questo assolutamente in linea con la differenza di resa tra i due scenari che ammonta appunto al 35% in favore dello scenario che ricorre al sovescio per contrastare l'infestazione da nematodi.

Infatti la pressochè totalità degli impatti che contribuiscono alla definizione del valore totale del Natural land transformation del metodo ReCiPe per entrambi

gli scenari analizzati sono imputabili da un al processo di produzione del diesel per il riscaldamento della serra e l'alimentazione delle macchine agricole e dall'altro al processo di produzione dei fertilizzanti evidenziando come gli aspetti di trasformazione del suolo tenuti in conto dall'indicatore in questione nello specifico caso in analisi siano quelli legati alla realizzazione di impianti industriali.

In definitiva il maggiore impatto dello scenario che non fa ricorso ad un fumigante per contrastare l'infestazione da nematodi è legato semplicemente alla inferiore resa in seme che si riflette in una maggiore superficie agricola da lavorare per produrre lo stesso quantitativo di olio stabilito dall'unità funzionale scelta nell'analisi LCA (quantitativo d'olio con un contenuto energetico pari ad 1 MJ). Il metodo ReCiPe considera solo le trasformazioni del suolo espresse in m² e di conseguenza l'impatto maggiore è dato dai danni arrecati al sistema terreno dalle attività dell'industria petrolchimica per la produzione del diesel e dei fertilizzanti consumati durante l'intero ciclo di vita. Dunque le differenze negli effetti legati ai diversi sistemi di management del suolo all'interno dello stesso contesto d'uso, come possono essere i due protocolli di coltivazione del tabacco considerati, non riescono ad essere conteggiate da tale indicatore.

Risultati del metodo proposto dalla Decisione del 10 giugno 2010 della Commissione Europea

Anche applicando la metodologia proposta nell'Allegato della Decisione della Commissione Europea del 10 giugno 2010 per il calcolo dello stock di carbonio descritta nel capitolo 2 non risultano sostanziali differenze tra i due scenari di coltivazione del tabacco.

La normativa prevede come già visto il ricorso alla seguente formula per il calcolo del contenuto di carbonio organico:

$$CS = (SOC + C_{VEG}) \times A$$

in cui:

A= area considerata

Mentre SOC e C_{VEG} sono già stati definiti nel paragrafo 2.4.2.

Tutti i fattori che compongono le formule per il calcolo di SOC e C_{VEG} sono desumibili da tabelle contenute nell'allegato stesso della Decisione. Considerando i valori riferiti alle colture annuali (tabella denominata nell'Allegato Cropland), il valore di C_{VEG} risulta pari a 0.

Il calcolo di:

$$SOC \text{ (t/ha)} = SOC_{ST} \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_I$$

nei due casi di coltivazione di tabacco con precessione di brassica e di coltivazione di tabacco con ricorso a fumiganti chimici viene condotto utilizzando gli stessi fattori, dato che SOC_{ST} , F_{LU} , F_{MG} , F_I risultano dipendenti da tipo di terreno, clima, tipo di uso del suolo (che risultano gli stessi in entrambi i casi), management (*Reduced tillage*, in entrambi i casi) e fertilizzazione (*Medium* in entrambi i casi). Dunque in definitiva risulta che sia per il caso di coltivazione di tabacco con precessione di brassica che per il caso di coltivazione di tabacco con ricorso a fumiganti di tipo chimico il valore di SOC è dato da:

$$SOC \text{ (t/ha)} = 34 * (0,69 * 1,08 * 1) = 25,3$$

Dunque ricorrendo al metodo proposto dalla normativa europea sui biocarburanti non è possibile fare una distinzione 2 sistemi di coltivazione analizzati. Certamente i valori tabulati nell'Allegato alla Decisione costituiscono uno strumento utile nel caso in cui si voglia valutare lo stock di carbonio tra 2 situazioni che prevedono sistemi di management molto differenti o nel caso in cui si voglia avere un'indicazione di quanto carbonio viene stoccato annualmente da un sistema di coltivazione rispetto ad una situazione di riferimento, tuttavia nello specifico caso oggetto del nostro studio il metodo proposto non permette di apprezzare differenze tra i due scenari indagati.

Risultati ottenuti utilizzando l'indicatore Soil Conditioning Index (SCI)

Di seguito verranno proposti i risultati del confronto tra lo scenario di coltivazione del tabacco con precessione di brassica e lo scenario che non fa

ricorso a fumiganti per contrastare l'infestazione da nematodi nel terreno, utilizzando il *Soil Conditioning Index* descritto nel capitolo X. Si procede descrivendo i dati in ingresso introdotti nel modello ed i risultati dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica in precessione.

Come già detto il modello dello SCI contiene dati climatici per il solo territorio statunitense. Facendo riferimento alla classificazione dei climi di Köppen (Peel M.C., 2007) e al fatto che una coltura cresciuta su terreni con identica composizione e soggetta ad agenti climatici simili risponda in maniere simili (EPPO, 2010), si è scelto come sito di crescita della coltura nel modello la città californiana di Santa Rosa (<http://www.usclimatedata.com>) che presenta dati climatici del tutto simili a quelli registrati per la città di Bologna (ISTAT, 2009), presa a riferimento per il sito di sperimentazione di Altedo in provincia di Ferrara. L'altro dato richiesto in ingresso nel modulo A del software per il calcolo dello SCI è il tipo di suolo. I campionamenti effettuati sul campo prova di Altedo nel contesto del progetto Susbiofuel hanno evidenziato un contenuto di sabbia variabile tra il 67% e l'84% che permette di definire il terreno sabbioso secondo la classificazione AASHTO dei terreni.

A. Site Information			
Location code:	5685	City:	SANTA ROSA -Irr
Soil:	sand		1,6 SOM Modifier
Maintenance Amount:	5893	lbs./ac expressed as a "Residue Equivalent Value" (REV)	

Figura 105: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica

Nella sezione C del software per il calcolo dello SCI è possibile scegliere le coltivazioni che compongono la rotazione colturale sotto analisi ed indicare le rese libbre/acre ed eventuali quantitativi di biomassa aggiunta (ad esempio tramite sovescio) o rimossa dal terreno.

Essendo il tabacco contenuto nel database del software tabacco da foglia il dato di resa da inserire è quello di biomassa per acre. Il dato della sperimentazione del progetto Susbiofuel indica una resa di 49,3 kg/10 m² che

corrispondono a circa 44100 lbs/ac (libbre per acre). La resa della brassica è invece pari a 25 kg/10 m² che corrispondono a circa 22480 lbs/ac.

C. Organic Material (OM)													
Be sure to select a city, or the OM table cannot complete calculations.													
Crop #	Crop	Yield per acre	Harv Unit/Ac	Wt Harv Unit (lbs)	Res: Yield Ratio	Res Prod	Root Mass Adjust	Biomass Prod.	Biomass Added (+) or Removed (-) lbs/ac dry matter	Total Biomass	Crop Group	REY Conv	REY lbs/ac
138	Mustard, fall	22480	lbs	1	1,18	26520	1,07	28341		28341	E	1,06	30092
223	Tobacco, flue cured	44100	lbs	1	0,31	13671	2,92	39921	15740	55661	B	1,01	56224

Figura 106: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica

Il valore di biomassa aggiunta tramite sovescio è quello corrispondente al peso della biomassa secca. Dunque ipotizzando l'interramento di tutta la biomassa prodotta nella coltivazione della brassica ed un contenuto in acqua pari al 30% il totale di biomassa aggiunta al terreno tramite sovescio risulta pari a circa 15740 lbs/ac.

Nella sezione D del software, il modello richiede in input le operazioni colturali previste da un particolare piano di coltivazione da scegliere tra quelle proposte da un menù a tendina che fa riferimento ad un database approntato dal Ministero dell'Agricoltura deli USA. Ad ognuna delle operazioni è legato un fattore di disturbo del terreno che influenza l'accumulo di sostanza organica nel terreno. Le operazioni scelte nel software per lo scenario oggetto dell'analisi sono quelle riportate in Figura 107. La Tabella 50 chiarisce a quali lavorazioni individuate già nella fase di inventario dell'LCA (capitolo 6) corrispondano le voci di database selezionate nel software.

D. Field Operations (FO)				Soil Disturbance Rating (SDR)			
(From Operations Tab)							
Op #	Operation Name	# of Trips	SDR	Op #	Operation Name	# of Trips	SDR
69	Harrow, rotary	3	45	58	Fert applic. surface broadcast	2	10
				171	Shredder, rotary, regrow veg	1	3
104	Harvest, tobacco, flue cured	1	1	127	Planter, transplanter, vegetable, no-till	1	6

Figura 107: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica

Operazioni colturali	Processo di database scelto
Aratura pre-semina brassica	Harrow, rotary
Spandimento fertilizzanti brassica	Fert. Application
Sfalcio della brassica	Shredder, rotary, regrow veg
Interramento della brassica	Harrow rotary
Impianto tabacco	Planter, transplanter, vegetable, no till
Spandimento fertilizzanti tabacco	Fert. Application
Raccolta semi di tabacco	Harvest, tabacco, flue cured
Operazione finale di rimozione coltura	Harrow rotary

Tabella 50: Processi di database del modello SCI scelti per modellizzare le lavorazioni del terreno dello scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica

Non essendo presenti in database tutte le specifiche operazioni colturali per le colture di interesse, si è proceduto alla scelta della voce di database che maggiormente approssimasse l'operazione in questione.

Nella sezione E del software per il calcolo dello SCI viene chiesto di introdurre un valore di erosione del suolo in tonnellate/acre/anno. Nel manuale d'uso del software viene consigliato di calcolare tale valore facendo ricorso al modello RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation (Foster G.R., 2001)), tuttavia a causa dei numerosi dati in ingresso non disponibili si è scelto di fare una valutazione di massima dell'erosione annua ricorrendo al modello PSIAC (Tangestani, 2006). Il modello prevede l'individuazione di fattori numerici che concorrono a definire una classe di appartenenza per il terreno analizzato tra le 5 presenti nel modello (paragrafo 4.2.1). In base alla classe assegnata viene offerto un'erosione stimata in m³/ha. Essendo il nostro caso un'analisi di confronto le uniche caratteristiche del terreno che differiscono tra uno scenario e l'altro riguardano la copertura vegetale (che da un contributo al valore totale compreso tra -10 e +10) e l'utilizzo del suolo (anch'esso con un contributo al valore totale compreso tra -10 e +10). Dunque ipotizzando una differenza tra lo scenario con brassica e lo scenario senza ricorso a metodi di fumigazione pari a 20 punti i due scenari ricadono necessariamente in 2 classi diverse di erosione stimata. Si è ipotizzato lo scenario con brassica appartenente alla classe 4 (anche in virtù delle caratteristiche di inclinazione pressochè nulla del sito) e per lo scenario senza brassica si è scelta la classe 3 poiché al massimo

le differenze tra i due scenari potrebbero condurre ad uno scarto di 40 punti tra uno scenario e l'altro, ma in un'ottica cautelativa si è scelto di ipotizzare la differenza in 20 punti e dunque per lo scenario senza sovescio si è ipotizzata l'appartenenza alla classe 3. Per i due scenari si è poi scelto un valore di erosione dato dal valore medio della classe di appartenenza e quindi pari a 1,65 m³/ha per lo scenario con brassica e 3,57 m³/ha per lo scenario che non utilizza sistemi di lotta all'infestazione da nematodi.

Il quantitativo di terreno eroso per lo scenario di coltivazione di tabacco con brassica considerando una densità del terreno sabbioso di 1550 kg/ m³ risulta pari a 0,97 in ton/ac/yr. L'inserimento di tale dato in una delle 3 caselle proposte dal software (sheet&rill, wind e irrigation) è assolutamente indifferente e conduce agli stessi risultati.

E. Erosion (ER)			
	Sheet & Rill:	Wind:	Irrigation:
Predicted Erosion:	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,97"/>
Total Avg Annual Erosion:			<input type="text" value="1,0"/>

Figura 108: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica

Dai dati di input appena descritti si ottiene un valore di SCI pari a 3,57 (Figura 109).

F. Soil Conditioning Index	SCI = OM*0.4 + FO*0.40 + ER*0.20
	Soil Conditioning Index = 3,57

Figura 109: Risultato del modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica

Questo valore essendo ampiamente maggiore di 1 indica un'elevata probabilità che il sistema di gestione del terreno indagato conduca ad un sostanziale accumulo di sostanza organica nel terreno.

Di seguito vengono descritti i dati introdotti come input nel modello per il calcolo dello SCI per la valutazione dello scenario che prevede la coltivazione di tabacco che non prevede sistemi di difesa dai nematodi. Per brevità verranno descritti solo le maschere del software in cui sono stati inseriti dati differenti rispetto allo scenario precedentemente descritto e dunque gli aspetti riguardanti le

caratteristiche del sito e le variabili climatiche non verranno presentati poiché identici a quelli già descritti in precedenza.

In figura X il dato di resa in biomassa e non in seme (come spiegato nel precedente scenario) della coltivazione di tabacco senza precessione di brassica. Il dato di resa offerto dalle sperimentazioni del protocollo Susbiofuel risultava pari a 41 kg/10m² che risultano pari a 36900 lbs/ac

C. Organic Material (OM)													
Be sure to select a city, or the OM table cannot complete calculations.													
Crop #	Crop	Yield per acre	Harv Unit/Ac	Wt Harv Unit (lbs)	Res: Yield Ratio	Res Prod	Root Mass Adjust	Biomass Prod.	Biomass Added (-) or Removed (-) lbs/ac dry matter	Total Biomass	Crop Group	REV Conv	REV lbs/ac
223	Tobacco, flue cured	36900	lbs	1	0,31	11439	2,92	33403		33403	B	1,01	33741

Figura 110: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a sistemi di lotta contro l'infestazione da nematodi

Nella sezione D del software (riportata in Figura 111) sono stati inserite le voci di database ritenute adatte a descrivere i processi riportati nella Tabella 51.

D. Field Operations (FO)				Soil Disturbance Rating (SDR)			
(From Operations Tab)							
Op #	Operation Name	# of Trips	SDR	Op #	Operation Name	# of Trips	SDR
69	Harrow, rotary	2	30			1	
		1		58	Fert applic. surface broadcast	1	5
104	Harvest, tobacco, flue cured	1	1	127	Planter, transplanter, vegetable, no-till	1	6

Figura 111: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco con sovescio della brassica

Operazioni culturali	Processo di database scelto
Aratura pre-impianto tabacco	Harrow, rotary
Impianto tabacco	Planter, transplanter, vegetable, no till
Spandimento fertilizzanti tabacco	Fert. Application
Raccolta semi di tabacco	Harvest, tobacco, flue cured
Operazione finale di rimozione coltura	Harrow rotary

Tabella 51: : Processi di database del modello SCI scelti per modellizzare le lavorazioni del terreno dello scenario di coltivazione del tabacco tabacco senza ricorso a sistemi di lotta contro l'infestazione da nematodi

Infine per lo scenario senza ricorso a sistemi di contrasto all'infestazione da nematodi il valore di erosione annua ammonta a 3,57 m³/ha (per dettagli sul

calcolo vedere spiegazione nella descrizione dello scenario precedente) che equivalgono a 2,2 ton/ac/yr

E. Erosion (ER)			
	Sheet & Rill:	Wind:	Irrigation:
Predicted Erosion:	ton/ac/yr	0 ton/ac/yr	2,2 ton/ac/yr
Total Avg Annual Erosion:			2,2 ton/ac/yr
Erosion Subfactor (ER) Table 4:			0,50

Figura 112: Dati in input al modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a sistemi di lotta contro l'infestazione da nematodi

Per lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso neè a sovescio, ne a fumiganti sintetizzati chimicamente, il valore del Soil Conditionign Index risulta pari a 1,35. Questo dato indica una buona probabilità che la sostanza organica nel terreno si accumuli in misura modesta.

F. Soil Conditioning Index	SCI = OM*0.4 + FO*0.40 + ER*0.20
	Soil Conditioning Index = 1,35

Figura 113: Risultato del modello per il calcolo dello SCI per lo scenario di coltivazione del tabacco senza ricorso a sistemi di lotta contro l'infestazione da nematodi

Rispetto allo scenario che prevede il sovescio della brassica a cui era stato assegnato uno SCI pari a 3,57 il valore è molto inferiore e dunque a parità di altre condizioni, i risultati del modello suggeriscono l'implementazione dello scenario che prevede biofumigazione.

Data l'approssimazione con cui sono stati calcolati alcuni dati (erosione, dati climatici) i risultati ottenuti possono essere considerati solo come un'indicazione della bontà di una determinata pratica agronomica rispetto ad un'altra. Inoltre per definizione lo SCI è un indicatore quali-quantitativo costruito con lo scopo di indicare andamenti tendenziali della quantità di sostanza organica in risposta a una specifica pratica agronomica e lo USDA (il Ministero dell'agricoltura americano) suggerisce di utilizzarlo per diversi what-if scenarios a supporto di risultati ottenuti con altri strumenti.

In questo contesto infatti lo SCI deve essere visto come strumento di integrazione all'analisi LCA condotta e alle analisi del terreno effettuate. Inoltre la semplice applicazione dello SCI appena descritta ha avuto l'obiettivo di mostrare come tale strumento necessiti di dati di facile reperibilità e offra in

output dei risultati che almeno in questo caso hanno confermato le indicazioni offerte da altri strumenti di analisi (misure del carbonio organico nel terreno). Inoltre lo SCI ha un carattere previsionale che altri strumenti non hanno (misure a posteriori del carbonio organico nel terreno) e pur offrendo solo un'indicazione quali-quantitativa dell'andamento tendenziale dell'accumulo (o perdita) della sostanza organica nel terreno può essere utilizzato in fase di progettazione di un sistema di management agronomico nella scelta tra due o più alternative. A conferma di ciò numerosi sono stati i tentativi di utilizzarlo come strumento di valutazione o di progettazione soprattutto negli Stati Uniti (Zobeck T., 2007), (Franluebbers A., 2011) essendo i dati climatici riferiti a tale territorio, ma anche in Europa (Custovic H., 2009).

8. CONCLUSIONI

Lo studio proposto in questa tesi di dottorato ha cercato di fornire una valutazione ambientale quanto più completa possibile degli scenari agronomici proposti dal progetto Susbiofuel, nel rispetto del carattere olistico alla base della filosofia del *Life Cycle Assessment*.

I risultati delle analisi LCA condotte hanno confortato dal punto di vista ambientale alcuni dei buoni risultati già messi in luce a livello tecnico e agronomico dal protocollo di sperimentazione del progetto Susbiofuel: da un lato l'efficacia di un sistema alternativo di lotta all'infestazione da nematodi tramite sovescio della brassica e dall'altro la possibilità di produrre tabacco da olio con buone rese sul territorio italiano.

L'analisi LCA ha, infatti, delineato un profilo degli impatti per lo scenario con sovescio della brassica sostanzialmente in linea con lo scenario che fa ricorso all'1-3-Dicloropentene, confermando che la coltivazione in precessione di una coltura a scopo biofumigante, essendo improntata ad un carattere di minima lavorazione, non appesantisce il bilancio del ciclo di vita dell'oleaginosa di maggiori impatti rispetto allo schema di coltivazione tradizionale.

Parallelamente il lavoro di raccolta dati e valutazione degli impatti effettuato sul ciclo di vita del tabacco da olio, oltre alla creazione di un nuovo dataset nel panorama delle valutazioni LCA dei biocombustibili, ha prodotto risultati soddisfacenti dal punto di vista ambientale considerando la piena conformità del quantitativo di emissioni di CO₂ con le indicazioni della normativa RED sia in riferimento alle prescrizioni attuali che ai limiti previsti fino al dicembre 2017.

Oltre a ciò, i risultati hanno evidenziato una volta di più, l'importanza di indagare i processi agronomici nel contesto del processo di produzione di un biocombustibile. La fase agricola ha contribuito, infatti, per circa il 90% per tutte le categorie di impatto in ognuno degli scenari analizzati, sia nel caso della soia che nel caso del tabacco. Inoltre nell'ambito della fase agricola i risultati di normalizzazione più elevati, nel contesto delle categorie di impatto su cui si è focalizzata l'attenzione, sono stati raggiunti nelle categorie del potenziale di acidificazione, del potenziale di eutrofizzazione e del potenziale di creazione di ozono fotochimico. Queste indicazioni hanno confortato l'approccio utilizzato,

volto a non ridurre l'analisi ambientale al conteggio delle sole emissioni di gas climalteranti (*GWP*), aspetto certo di primaria importanza in un processo di produzione di un biocombustibile (anche in un ottica di rispetto della normativa vigente), ma dall'altra parte non l'unico da tenere in conto al fine di non fornire una visione parziale della realtà indagata. Da segnalare in questo senso l'importante contributo delle emissioni dirette dei fertilizzanti azotati al potenziale di eutrofizzazione. L'aver incluso un processo costruito ad hoc sulle indicazioni fornite al riguardo dall'IPCC ha contribuito a fornire un bilancio ancora più accurato ed olistico dell'analisi svolta.

Con lo stesso intento è stato analizzato lo stato dell'arte nell'ambito della categoria di impatto del *Land use* al fine di includere delle considerazioni al riguardo, dato che il metodo di valutazione scelto nello studio LCA (CML 2001) non include un indicatore per questo tipo di effetto ambientale. Il metodo approntato da Milà i Canals, suggerito dall'ILCD per il calcolo del *Land use*, costituisce ad oggi la metodologia più strutturata e solida dal punto di vista scientifico. Tuttavia, nello specifico caso del progetto Susbiofuel, tale approccio è risultato di difficile implementazione a causa della carenza di informazioni affidabili sul contenuto di carbonio organico nel terreno per i differenti scenari analizzati. Date queste premesse, è stata valutata la possibilità di adattare al caso studio oggetto di questa tesi, un indicatore quali-quantitativo di concezione statunitense, il *Soil Conditioning Index* (SCI), al fine delineare un profilo di impatto anche per la categoria dell'uso del suolo e per validare tramite un ulteriore strumento i pochi dati di contenuto di carbonio organico, ottenuti tramite una campagna di misure sul terreno teatro della sperimentazione.

Pur con i limiti propri di un indicatore quali-quantitativo, il modello per il calcolo dello SCI ha confermato il trend di accumulo di sostanza organica nel terreno, rilevato dalle misurazioni in campo per lo scenario che prevede la precessione della brassica alla coltura oleginosa.

L'uso del Soil Conditioning Index per completare i risultati offerti dall'LCA, non si propone con carattere esaustivo nel campo della valutazione del Land use, ma rappresenta di certo un metodo di facile applicazione che permettere di effettuare valutazioni di sostenibilità nella gestione di un suolo all'interno del medesimo contesto d'uso (agricolo).

L'applicazione di tale modello ad un caso italiano può rappresentare lo stimolo per intraprendere ricerche al riguardo, con lo scopo di creare un semplice indicatore, specifico della realtà italiana, che vada oltre l'applicazione nell'ambito dell'LCA e che costituisca uno strumento di supporto alle decisioni in ambito agricolo, considerando l'enorme potenziale di preservazione del territorio, di aiuto alle politiche di riduzione dei gas serra e contrasto ai fenomeni erosivi del terreno che può ricoprire il comparto agricolo.

9. BIBLIOGRAFIA

- Andrianov V., et al. (2009). Tobacco as a production platform for biofuel: overexpression of Arabidopsis DGAT and LEC2 genes increases accumulation and shift composition of lipids in green biomass. *Plant biotechnology journal*, vol.8, pp 1-11.
- ARPAV. (2012). Tratto da http://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/indicatori-ambientali/indicatori_ambientali/geosfera/qualita-dei-suoli/contenuto-di-carbonio-organico-nello-strato-superficiale-di-suolo/view
- Arshad M.A., et al. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7, pp 25-31.
- Azar C. (2005). Emerging scarcities - Bioenergy - food competition in a carbon constrained world. Natural resources and the environment in the new millennium. *John Hopkins University Press*, pp 359-377.
- Baitz M., et al. (1999). *Method to integrate land use in life cycle assessment*. IKP, Stuttgart University.
- Bare, J. (2011). Recommendation for land use impact assessment: first step into framework, theory and implementation. *Clean Technology and Environmental Policy*, 13, pp 7-18.
- Barnabè D., et al. (2012). *Land use change impact of biofuels: a methodology to evaluate biofuel sustainability*. Intech.
- Bianchi C., et al. (2011). *Non edible oils: raw materials for sustainable biodiesel*. Intech.

- Brandao M., et al. (2011). Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: implications for GHG balances and soil quality for use in LCA. *Biomass and Bioenergy*, Vol 35, no 6, pp 2323-2336.
- Brentrup F., et al. (2002). Life Cycle Impact Assessment of Land Use based on the Hemeroby concept. *International Journal of LCA*, 7 (6) pp. 330-348.
- Canestrone R., et al. (2011). *Risultati del progetto: filiere colture oleaginose per la produzione di olio per uso industriale ed energetico*. Regione Emilia-Romagna, CRPV, ENEA.
- Cardone M., et al. (2003). Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization. *Biomass and bioenergy*, Vol.25, Issue 6, pp 623-636.
- Chiavetta, C. (2009). *Applicazione dell'LCA nella valutazione dei benefici ambientali prodotti da tecnologie e processi ecoinnovativi. Il caso studio della nuova macchina K3 di Carpigiani con ciclo frigorifero a CO2*. Tesi di Laurea Specialistica. Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Università di Bologna.
- Commission Decision of 10 June 2010 on guidelines for the calculation of land carbon stocks for the purpose of Annex V to Directive 2009/28/CE
- Commission Decision of 20 September 2007 concerning the non-inclusion of 1,3-dichloropentene in Annex I to Council Directive 91/414/EEC and the withdrawal of authorisations for plant protection containing that substance
- Consoli F., et al. (1993). *Guidelines for Life Cycle Assessment: a code of practice*. Brussels, Belgium: SETAC - Society of environmental toxicology and chemistry.

Curto G., et al. (2006). Brassicacee, un baluardo sotterraneo contro i nematodi. *Agricoltura*, 34 (5), pp 110-112.

Custovic H., et al. (2009). Soil conditioning index as an indicator of the soil organic matter dynamics at the farm Butmir nea Sarajevo.

Directive 2009/28/CE of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003 /30/EC

Ecoinvent. (2007). *Ecoinvent database v. 2.0*. Swiss centre for life cycle inventories.

Edwards, R. (2010). *Indirect land use change from increased biofuels demand. Comparison of models and results for marginal biofuels production from different feedstocks*. JRC - European Commission.

EPPO. (2010). *Comparable climates in a global level*. OEPP/EPPO, Bulletin 40,266-269.

EurObserver. (2010). *Biofuel Barometer*.

Fantin V., et al. (2011). Life Cycle assessment of italian high quality milk production. A comparison with an EPD study. *Journal of cleaner production*, p. 28 (2012), 150-159.

Fliebach A., et al. (2007). Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 118, pp 273-284.

Florentin M., et al. (2011). *Gree manure/cover crops and crop rotation in conservation agriculture on small farms*. Rome: FAO - Plant production and protection division.

Fogher, C. (2008). Sviluppo di un ideotipo di tabacco per la produzione di seme da usare a fini energetici.

Foster G.R., et al. (2001). The design philosophy behind RUSLE": Evolution of an empirical model. *Soil erosion research for the 21th century*, January, pp 95-98.

Franluebbers A., et al. (2011). Soil conditioning index and soil organic carbon in the Midwest and Southeastern United States. *Journal of soil and water conservation*, vol.66, no3.

Fritsche U.R., et al. (2010). *The iLUC Factor as a means to hedge risks og GHG emissions from Indirect Land Use Change*. Darmstad: Oko-Institute.

Giannelos P., et al. (2002). Tobacco seed oil as an alternative diesel fuel: physical and chemical properties. *Industrial crops and products*, vol.16, no.1, pp 1-9.

Guinée J., et al. (2001). *Life Cycle assessment. An operationl guide to the ISO standards*. VROM & CML, Leiden University, The netherlands.

<http://www.biograce.net/>

<http://www.lcia-recipe.net>

<http://www.cml.leiden.edu/>

<http://www.usclimatedata.com/climate.php?location=USCA1027>

- IEA. (2009). *IEA Bioenergy, annual report*.
- IEA. (2010). *IEA Bioenergy, annual report*.
- IEA. (2011). *IEA Bioenergy, annual report*.
- Iodice R., P. M. (2007). *I biocarburanti: le filiere produttive, le tecnologie, i vantaggi ambientali e le prospettive di diffusione*. Progetto Novimpresa.
- IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Agriculture, forestry and other land use, Vol.4*.
- ISO14040. (2006). *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. Geneve, Switzeland: ISO - International organization for standardization .
- ISO14044. (2006). *Environment managment - Life cycle assessment - Requirements and Guidelines*. Geneve, Switzerland: International organization of standardization.
- ISTAT. (2009). *L'andamento meteo-climatico in Italia, anni 2000-2009*. Istituto Nazionale di Statistica.
- JRC. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. European Commission - Joint Reseearch Centre, Insitute for Environment and Sustainability.
- JRC. (2010). *International reference life cycle data system (ILCD) handbook - General guide for life cycle assessment -Detailed guidance*. European Commission - Joint Research Centre (JRC) - Institute for Environment and Sustainability (IES).

- Karlen D.L., et al. (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society*, 61, PP 4-10.
- Lagi M., et al. (2012). *The food crises: the US Drought*.
- McKone T.E., et al. (2011). Grand challenges for life-cycle assessment of biofuels. *Environmental Science and Technology*, 45 (5), pp 1751-1756.
- Milà i Canals L., et al. (2007). Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *International Journal of LCA*, 12 (1), pp 5-15.
- Milà i Canals, et al. (2006). Method for assessing impacts on life support function (LSF) related to the use of fertile land in the life cycle assessment (LCA). *Journal of Cleaner Production*, 15, pp 1426-1440.
- Monaco S., et al. (2008). *Il sovescio: fertilità del suolo e salvaguardia dell'ambiente*. Finanziato dalla Regione Piemonte: Progetto pilota zone vulnerabili da nitrati - azioni divulgative nei territori delle province di Torino e Asti.
- OCCD-FAO. (2010). *OCCD-FAO Outlook 2010-2019*.
- Peel M.C., et al. (2007). Updated world map of the Koppen-geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. SCI*, 11, pp 1633-1644.
- Perez M., et al. (1998). Plant-parasitic nematodes associated with tobacco in the Pinar del Rio Province of Cuba. *Nematropica*, Vol.28, no2.
- Pinna M., et al. (2007). Caratteristiche agronomiche e possibilità do utilizzo do Brassica juncea. . *Bollettino di Agricoltura biologica a cura del C.R.A.B.*, p. 3, pp47-54.

- Searchinger, T. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emission from land-use change. *Science*, 319 (5867), pp 1238-1240.
- Tangestani. (2006). Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran. *Journal of asian earth sciences*, volume 27, issue 5, pp 585-597.
- USDA. http://soils.usda.gov/sqi/concepts/soil_organic_matter/som_sci.html.
- Usta N., et al. (2005). Use of tobacco seed oil methyl ester in a turbocharged indirect injection diesel engine. *Biomass and bioenergy*, Vol. 28, Issue 1, pp 77-86.
- Zeza, A. (2011). *Le politiche per la promozione dell'energia rinnovabile. Stato di applicazione della direttiva europea sui biocarburanti*. Quaderno INEA Dicembre 2011.
- Zobeck T., et al. (2007). Investigation of soil conditioning index values for Southern high Plains agroecosystems. *Journal of soil and water conservation*, vol.62, no6, pp 433-442.

10. Articoli e pubblicazioni scientifiche

Cappellaro F., Bonoli A., Chiavetta C., Pitilino C. *Actions for sustainable towns: an assessment of the experience of the public fountain in San Leo (Italy)* – Accepted at the 8th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems, Dubrovnik, settembre 2013

Bonoli A., Chiavetta C., Rizzo S. *Straw as construction material for sustainable buildings. Life Cycle Assessment of a post-earthquake reconstruction: the case study of a straw bale house in Pescomaggiore (L'Aquila-Italy)* – Accepted at the 8th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems, Dubrovnik, settembre 2013

Chiavetta C., Luciani V., Rem P. *LCA of the MDS technology for electric cables waste recycling* - The 28th International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia PA USA. 2013

Barnabe D, Bucchi R, Rispoli A, Bianchi L, Carvoli G, Pirola C, Boffito D, Chiavetta C, Porta P.L. *Land Use Change Impacts of Biofuels: a methodology to evaluate biofuel sustainability* – INTECH, ISBN 980-953-307-471-4. 2012

Chiavetta C., Tinti F., Bonoli A. *Comparative Life Cycle Assessment of renewable energy systems for heating and cooling* - Procedia Engineering 21 (2011), 591-597.

Bonoli A., Chiavetta C., Bergonzoni M. *Life Cycle Application in Industrial Waste and End-of-life Tyres Use for Thermo Acoustic Panels Production* – Atti convegno Internazionale SARDINIA 2011. Cagliari 2011.

Bonoli A., Chiavetta C., Bergonzoni M. *Construction and Demolition Waste (CDW): Recycling Technologies and Application of Life Cycle Assessment Method in Stabilized Inert Production* – Atti convegno Internazionale SARDINIA 2011. Cagliari 2011.

Cappellaro F., Barberio G., Chiavetta C. *Applicazione del software TESPI per la valutazione di strategie di Eco-design per la macchina K3 di Carpigiani*, Documento ENEA UTVALAMB-P9Q6. 2011

Barberio G., Chiavetta C., Cappellaro F. *Applicazione dell’LCA a supporto dell’eco-progettazione di una nuova macchina Carpigiani per gelato soft e shake*, Documento ENEA UTVALAMB-P9Q6-001. 2010.

Cappellaro F., Barberio G., Chiavetta C. *La metodologia LCA come leva per l’innovazione d’impresa: il caso Carpigiani*. Atti di Ecomondo 2009, pp 902-908 Maggioli Editore, ISBN 978-88-387-5360-1. 2010