

IL CONTRIBUTO DELLE COLTURE DEDICATE AL SETTORE DELLE AGROENERGIE IN TOSCANA: SVILUPPO DI UN MODELLO PREVISIONALE SU BASE GIS ⁽¹⁾

(*) Scuola Superiore S. Anna, Pisa, Istituto di Scienze della Vita.

(**) Dipartimento di Agronomia e Gestione dell'Agroecosistema, Università di Pisa.

(***) CRIBE - Centro Ricerche Interuniversitario sulle Biomasse da Energia, Pisa.

La metodologia adottata, basata sullo sviluppo di un geodatabase di tipo vettoriale, opportunamente supportato da un software dedicato alla gestione (PostgreSQL), ha consentito di sviluppare un modello dinamico e versatile in grado di interrogare simultaneamente più strati informativi secondo criteri e regole definite dall'utente e di elaborare il risultato rispetto ad unità territoriali di dettaglio minimo.

Il modello consente di definire scenari differenti in virtù: i) dei fattori che incidono sulla adattabilità delle diverse specie alle condizioni pedoclimatiche del territorio; ii) delle classi di uso del suolo che si ipotizza di convertire alla produzione di colture dedicate; iii) della quota parte di superficie che si intende destinare alla loro produzione.

Lo scenario proposto, elaborato considerando le effettive possibilità di inserimento delle colture da energia nel contesto agricolo regionale, prevede una distinzione tra specie da biomassa e specie per la produzione di bio-carburanti; alle prime si è ipotizzato di destinare circa il 10% delle superfici potenzialmente convertibili (seminativi in asciutto con pendenze inferiori al 15%), mentre alle seconde è stato assegnato il 20% della restante superficie.

I risultati mostrano differenze sensibili nella distribuzione delle specie considerate nei diversi areali della Toscana, in conseguenza del loro livello di adattabilità, evidenziando anche la possibilità di coprire le superfici potenzialmente convertibili con opportune combinazioni di colture. Le specie che sembrano presentare le maggiori prospettive di diffusione sono state la canna, fra le specie ligno-cellulosiche, e il girasole e la colza, fra le colture destinate alla produzione di biocarburanti di prima generazione.

Le produzioni di energia ottenibili sulla base dello scenario ipotizzato evidenziano come, anche attraverso il recupero dei molti ettari usciti recentemente dall'utilizzo agricolo, potrebbe essere possibile ridurre la dipendenza della regione dalle importazioni di energia elettrica e soddisfare buona parte degli obiettivi previsti dal PIER (Piano di Indirizzo Energetico Regionale) riguardo all'installazione di nuovi impianti alimentati a biomasse entro il 2020.

Parole chiave: vocazionalità del territorio; colture ligno-cellulosiche; colture da biocarburanti; GIS; PIER (Piano di Indirizzo Energetico Regionale).

Key words: land suitability; lignocellulosic energy crops; biofuel crops; GIS; regional energy plan.

Citazione - RAGAGLINI G., VILLANI R., SILVESTRI N., BONARI E., 2011 – *Il contributo delle colture dedicate al settore delle agroenergie in Toscana: sviluppo di un modello previsionale su base GIS*. L'Italia Forestale e Montana, 66 (4): 267-282. doi: 10.4129/ifm.2011.4.02

1. INTRODUZIONE

L'entrata in vigore della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (PARLAMENTO EUROPEO e CONSIGLIO DELL'UNIONE EUROPEA, 2009),

potrà determinare condizioni favorevoli alla conversione di porzioni più o meno significative della superficie agricola utilizzata (SAU) alla coltivazione di colture da energia.

La diminuzione di redditività delle colture agrarie più tradizionali, i recenti indirizzi della PAC rivolti a favorire una scelta delle specie da coltivare "svincolata" dagli aiuti e guidata solo dal mercato (disaccoppiamento), la tendenza alla sostanziale riduzione dei sussidi diretti erogati dall'UE ai produttori, hanno aperto pro-

¹ Lavoro svolto nell'ambito del progetto MIUR PRIN 2007 "Distretti energetici agroforestali sostenibili" (Coordinatore nazionale: S. Nocentini).

spettive, sino a poco tempo fa, insospettabili per il settore delle agroenergie.

Inoltre le documentate variazioni della composizione media dell'atmosfera ed i rapidi cambiamenti climatici che ne conseguono spingono, al di là della effettiva disponibilità di combustibili fossili, alla verifica delle possibilità offerte dall'utilizzo di produzioni vegetali a scopi energetici (LEFÈVRE, 2010).

È evidente come, fra le opzioni a disposizione dell'agricoltore, la decisione di impegnarsi nella coltivazione di colture dedicate alla produzione di energia (sia che si tratti di biomasse destinate alla combustione diretta, sia di materiale utilizzato per la produzione di biocarburanti) costituisca una scelta più complessa rispetto, ad esempio, all'utilizzo dei residui di raccolta o all'impiego dei reflui zootecnici. La modifica degli ordinamenti produttivi dell'azienda comporta infatti implicazioni agronomiche, aziendali ed economico-sociali difficili da prevedere, rendendo necessario affrontare, con la massima attenzione, le molteplici conseguenze che un tale processo di riconversione produttiva possa provocare sia a livello locale che a scala territoriale.

Cionondimeno il presupposto indispensabile all'avvio di tale trasformazione è la valutazione del potenziale contributo energetico che potrà arrivare dall'introduzione di tali specie, quantificabile solo attraverso una stima della loro diffusione e della loro produttività.

In questa logica, l'analisi del livello di vocazionalità del territorio alla coltivazione di specie dedicate (AYLOTT *et al.*, 2008; BECCALI *et al.*, 2009; LOVETT *et al.*, 2009; SCHNEIDER, 2001; RAGAGLINI *et al.*, 2008; RAGAGLINI *et al.*, 2009; FIORESE e GUARISO, 2010; RAGAGLINI *et al.*, 2010; GRASSANO *et al.*, 2011) e/o all'utilizzo a fini energetici delle produzioni forestali (BERNETTI e FAGARAZZI, 2003; CHIRICI *et al.*, 2006; DRIGO *et al.*, 2007; SALVATI *et al.*, 2007), è stato oggetto di un crescente interesse in ambito scientifico, sia italiano che internazionale, come dimostrano i numerosi contributi prodotti in questo settore.

La determinazione dell'attitudine del territorio alla coltivazione di una specie è stata affrontata, sin dalle sue prime applicazioni quali la *land capability* e la *land suitability* (KLINGE-

BIEL e MONTGOMERY, 1961; FAO, 1976; FAO, 1983), comparando la natura dei fattori climatici, pedologici e topografici che caratterizzano l'areale, con le esigenze attribuibili alla singola coltura e valutandone il livello di compatibilità conseguente. In considerazione però della novità rappresentata da alcune specie, pressoché sconosciute alla maggioranza degli agricoltori, e comunque della tradizionale ritrosia degli stessi ad operare cambiamenti degli ordinamenti colturali adottati, è stato necessario introdurre adeguati fattori di riduzione riguardo all'incidenza delle superfici effettivamente disponibili, in tempi brevi, alla conversione delle produzioni.

L'obiettivo del lavoro è quindi quello di operare una prima analisi orientativa delle reali potenzialità che le colture da energia possono rivestire in Toscana, considerando un novero relativamente ampio di specie che ha incluso, oltre a quelle da biomassa ligno-cellulosica, come il pioppo (*Populus* spp.), la canna comune (*Arundo donax* L.), il miscanto (*Mischantus x giganteus* Greef et Deuter) e il cardo (*Cynara cardunculus* L.), anche alcune colture amidacee e/o oleaginose come il mais (*Zea mays* L.), il sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), il girasole (*Helianthus annuus* L.) e la colza (*Brassica napus* L.), più note agli agricoltori in virtù della loro originaria destinazione alimentare, ma comunque passibili di una significativa utilizzazione in chiave energetica (biocarburanti). In questo modo si è inteso esplorare il ventaglio pressoché completo delle possibili "colture dedicate", valutando anche la potenziale diffusione di specie meno conosciute e/o, per il momento, meno "promettenti".

2. MATERIALE E METODI

2.1. Il metodo

L'intero processo di individuazione, all'interno del territorio regionale, delle aree occupabili dalle colture da energia (Figura 1) è suddivisibile in tre fasi: la prima relativa alla selezione delle superfici potenzialmente convertibili (SPC), la seconda riguardante l'attribuzione di tali superfici alla/e specie più idonee alle condizioni pedo-climatiche rilevate e la

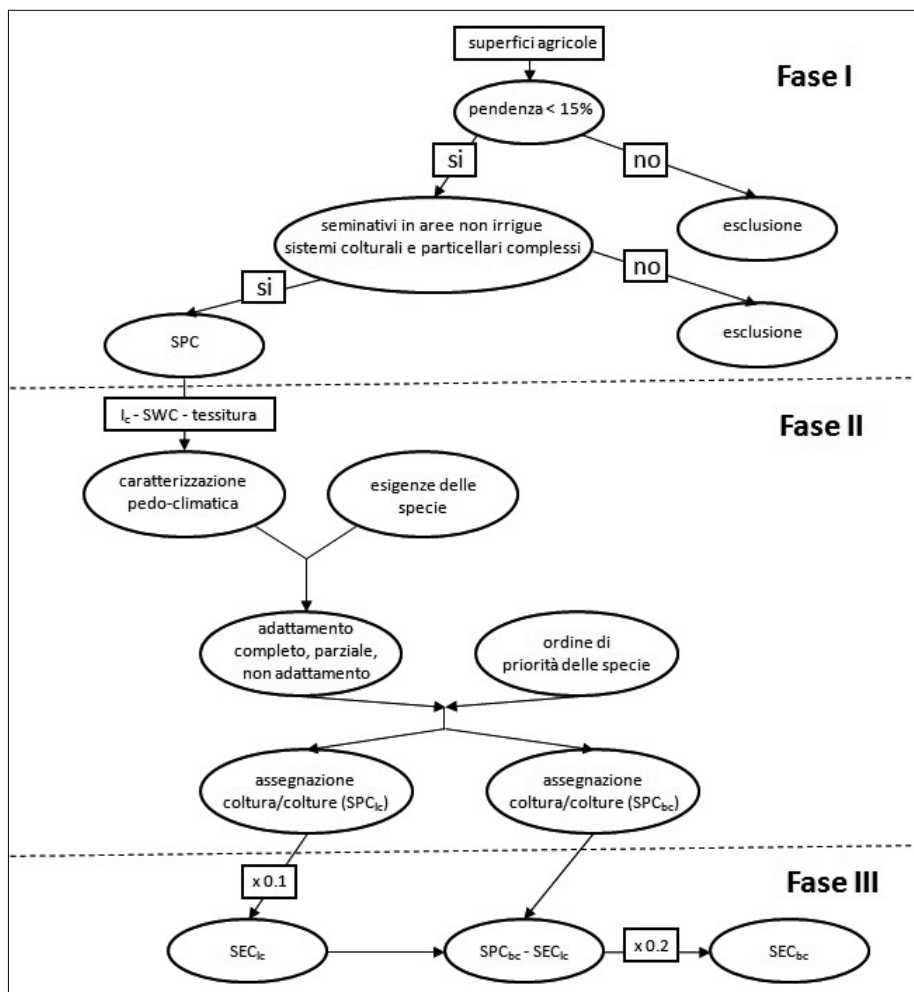


Figura 1 – Schema concettuale della metodologia adottata (SPC = superficie potenzialmente convertibile, I_c = indice di deficit idrico potenziale, SWC = capacità di ritenzione idrica del terreno, SPC_{lc} = superficie potenzialmente convertibile a colture ligno-cellulosiche, SPC_{bc} = superficie potenzialmente convertibile a colture da bio-carburanti, SEC_{lc} = superficie effettivamente convertibile a colture ligno-cellulosiche, SEC_{bc} = superficie effettivamente convertibile a colture da bio-carburanti).

terza inerente la stima delle superfici effettivamente convertibili alla loro coltivazione (SEC).

Per quanto riguarda i criteri adottati per valutare l’“idoneità” del territorio agricolo toscano ad ospitare le colture da energia menzionate in precedenza, si è fatto riferimento a cinque strati informativi (SI) disponibili per tutto il comprensorio di studio e classificabili come “condizionali”: pendenza e uso del suolo; e “vocazionali”: deficit idrico potenziale, capacità di ritenzione idrica e tessitura dei terreni.

Nella prima fase (di selezione) si è provveduto ad escludere le porzioni di superficie agri-

cola che non possedevano i pre-requisiti indispensabili per ipotizzarne una riconversione produttiva (SI “condizionali”). In particolare una prima selezione è stata operata procedendo all’esclusione di tutte le aree caratterizzate da una pendenza superiore al 15%; oltre questo limite infatti non si è ritenuto possibile ipotizzare una adeguata trafficabilità delle macchine (spesso anche piuttosto pesanti), che renderebbe di fatto impraticabile la completa meccanizzazione delle operazioni colturali. La seconda limitazione ha invece riguardato la decisione di includere come idonee, fra tutte le

possibili categorie di utilizzazione agricola del suolo, le sole aree classificate come seminativi non irrigui. Tale scelta è giustificata da tre ordini di motivi: i) la convinzione che molto difficilmente gli agricoltori decideranno di riconvertire le aree potenzialmente più produttive delle proprie aziende; ii) l'assunto che non è da considerare ecologicamente proponibile l'utilizzo di una risorsa preziosa come l'acqua per la coltivazione di specie non destinate all'alimentazione umana; iii) la riflessione che l'eventuale conversione di altre categorie di SAU (come quella delle colture legnose e/o delle foraggere permanenti) richiederebbe tempi troppo lunghi di realizzazione, pena la rinuncia al completo sfruttamento dei significativi investimenti già effettuati dall'azienda.

Si è deciso però di includere oltre ai poligoni catalogati dal Corine Land-Cover come "seminativi in aree non irrigue" (codice 2.1.1) anche quelli classificati come "sistemi colturali e particellari complessi" (codice 2.4.2), identificabili con aree ad agricoltura mista e parzialmente produttiva, costituitisi anche in conseguenza della rinuncia alla coltivazione specializzata di vaste aree del territorio regionale, come documentato in seguito (Figura 2).

La seconda fase (di attribuzione) è consistita nella: i) caratterizzazione delle aree che avevano superato la prima fase di selezione (SPC) sulla base dei rimanenti SI da considerare determinanti nel modulare la potenziale diffusione delle diverse specie (SI "vocazionali"); ii) successiva classificazione delle aree in termini di idoneità alla coltivazione delle singole colture sulla base delle esigenze pedo-climatiche loro attribuite.

Per quanto riguarda la valutazione del deficit idrico potenziale (I_c) si è fatto riferimento a quanto proposto da THORNTHWAITE (1948):

$$I_c = \frac{\sum_{j=1}^n P - \sum_{j=m}^n ET_0}{\sum_{i=m}^n ET_0}$$

dove: P = precipitazioni, ET_0 = evapotraspirazione potenziale, m = il giorno dell'anno in cui la temperatura media di dieci giorni consecutivi risulta uguale o maggiore alla temperatura base assunta pari a 10°C.

Secondo questa modalità di calcolo il deficit idrico risulta parzialmente sottostimato in quanto mentre il conteggio delle precipitazioni inizia dal primo giorno dell'anno (1° gennaio),

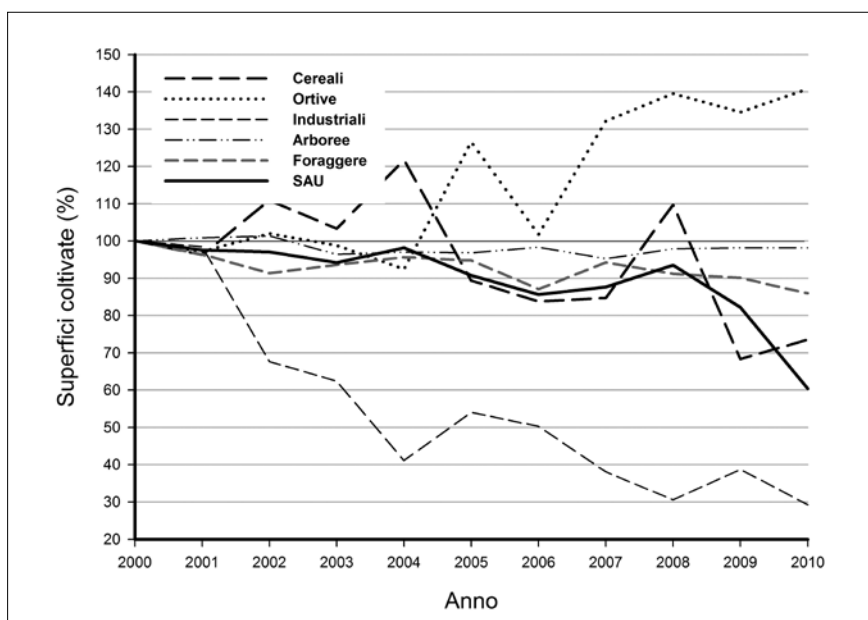


Figura 2 – Andamento percentuale delle superfici coltivate in Toscana facendo pari a 100 i valori relativi all'anno 2000.

quello dell'evapotraspirazione comincia solo a partire dalla ripresa vegetativa delle colture, consentendo di accumulare anche le precipitazioni che precedono l'effettiva ripresa (o inizio) delle funzionalità della pianta e che quindi potrebbero non essere effettivamente utilizzate dalla coltura.

La possibilità di poter trattenere le riserve d'acqua che si formano nella prima parte dell'anno (o altre che si formassero anche successivamente quando $I_c > 0$) è valutata invece dalla capacità di ritenzione idrica del terreno (SWC) stimata a partire dalla sua profondità, oltre che dai valori assunti dalle costanti idrologiche:

$$SWC = (fc - wp) \cdot D$$

dove fc = capacità di campo espressa in v/v, wp = punto di appassimento espresso in v/v, D = profondità del terreno.

Infine, essendo gli aspetti idrici già considerati nel precedente SI, la tessitura dei terreni costituisce un fattore di preferenza solo di tipo meccanico in relazione all'ottenimento di un adeguato investimento delle colture (a causa delle difficoltà di emergenza/attecchimento) e/o alla resistenza opposta al pieno sviluppo degli apparati radicali. Tali inconvenienti possono infatti determinare fallanze non trascurabili nei casi in cui l'impianto sia effettuato tramite la messa a dimora di talee e/o di rizomi compromettendo l'efficacia di un'operazione particolarmente costosa nel computo delle spese colturali.

Per quanto riguarda le esigenze attribuibili alle colture queste sono state valutate sulla base dei risultati di ricerche pluriennali svolte in diverse condizioni pedo-colturali presso il Centro Interdipartimentale di Ricerche Agro-Ambientali "E. Avanzi" dell'Università di Pisa (ERCOLI *et al.*, 1999; GUIDI *et al.*, 2008; PISTOCCHI *et al.*, 2009; ANGELINI *et al.*, 2009a; ANGELINI *et al.*, 2009b; NASSI O DI NASSO *et al.*, 2010) e della bibliografia di settore (AA.VV., 2004; MANTINEO *et al.*, 2009). Si è proceduto quindi ad esplicitare, rispetto a tutte le possibili combinazioni dei tre SI "vocazionali" (deficit idrico potenziale, capacità di ritenzione idrica e tessitura dei terreni), le condizioni di completo adattamento (CA), di parziale adattamento di lieve (PA_1) o grave (PA_2) entità, o di non adattamento (NA) alla coltivazione per ciascuna delle specie considerate (Tabella 1).

L'attribuzione degli ettari di SPC alla coltivazione delle singole colture è stata effettuata secondo le seguenti regole di assegnazione: i) in condizioni di completo adattamento (CA) di una coltura si procede all'introduzione della/e specie caratterizzata dai livelli quali-quantitativi di produzione più elevati, secondo l'ordine di priorità riportato in Tabella 2; ii) in condizioni di parziale adattamento lieve (PA_1) la superficie attribuita alla coltura viene ridotta del 50% a favore della specie che occupa lo stesso ordine di priorità (se presente) o quello immediatamente successivo, andando a costituire una classe mista di coltivazione per quell'areale; il processo è reiterabile nel caso che le condizioni di parziale adattamento lieve interessino anche la/e successiva/e specie da introdurre; iii) in condizioni di parziale adattamento grave (PA_2) la superficie attribuita alla coltura viene ridotta del 75% a favore della specie che occupa lo stesso ordine di priorità (se presente) o quello immediatamente successivo; anche in questo caso il processo è reiterabile; iii) in condizioni di non adattamento (NA) non viene assegnata a tale specie alcuna superficie di coltivazione.

Infine la terza fase (di stima), introdotta per considerare le difficoltà di operare significativi cambiamenti degli ordinamenti colturali all'interno delle aziende agricole, definisce l'effettivo tasso di conversione alla coltivazione di colture da energia che è lecito attendersi. Nello scenario proposto si è assunto che l'estensione delle superfici effettivamente convertibili alla coltivazione di ogni specie ligno-cellulosica (SEC_c) dovesse essere stimata come pari al 10% delle rispettive aree potenzialmente convertibili ($SEC_c = SPC_{lc} \times 0,1$). Tale percentuale è pari all'incidenza occupata in passato dal *set-aside* obbligatorio e dunque potrebbe rappresentare la quota parte che l'agricoltore è disposto a mettere in gioco senza eccessive preoccupazioni.

Per quanto riguarda invece le colture da biocarburanti, la stima della superficie effettivamente convertibile (SEC_{bc}) è stata considerata pari al 20% del valore ottenuto dalla differenza fra le superfici potenzialmente convertibili e le superfici effettivamente convertibili a colture ligno-cellulosiche [$SEC_{bc} = (SPC_{bc} - SEC_c) \times 0,2$].

Tabella 1 – Condizioni di adattabilità (CA = completo adattamento, PA₁ = parziale adattamento di lieve entità, PA₂ = parziale adattamento di grave entità e NA = non adattamento) delle colture rispetto agli strati informativi considerati: I_c (deficit idrico potenziale), SWC (capacità di ritenzione idrica dei suoli e tessitura (1 = argilloso/argilloso, limo-argilloso/argilloso; 2 = limo argilloso/limo-argilloso, argilloso/sabbio-argilloso; 3 = argilloso/franco, limo-argilloso/limoso-franco, limoso-franco/limoso; 4 = limoso-franco / limoso-franco, limoso-franco/franco, franco/sabbioso-franco, sabbioso-franco/sabbioso).

I _c	SWC	Tessitura	Pioppo	Miscanto	Canna	Cardo	Mais	Sorgo	Girasole	Colza	
> 0	>250 mm	1	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	
		2	CA	CA	CA	CA	CA	PA ₁	CA	CA	
		3	PA ₁	PA ₁	CA	CA	CA	NA	PA ₁	CA	
		4	NA	NA	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	
	150-250 mm	1	CA	CA	CA	CA	CA	PA ₁	CA	CA	CA
		2	CA	CA	CA	CA	CA	PA ₂	CA	CA	CA
		3	PA ₁	PA ₁	CA	CA	CA	NA	PA ₁	CA	CA
		4	NA	NA	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
	< 150 mm	1	PA ₁	CA	CA	CA	CA	NA	PA ₁	CA	CA
		2	PA ₁	CA	CA	CA	CA	NA	PA ₁	CA	CA
		3	PA ₂	PA ₁	CA	CA	CA	NA	PA ₂	CA	CA
		4	NA	NA	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
0 ÷ - 0,4	>250 mm	1	CA	CA	CA	CA	PA ₁	CA	CA	CA	
		2	CA	CA	CA	CA	PA ₂	CA	CA	CA	
		3	PA ₁	PA ₁	CA	CA	NA	PA ₁	CA	CA	
		4	NA	NA	CA	CA	NA	NA	NA	PA ₁	
	150-250 mm	1	PA ₁	CA	CA	CA	CA	NA	PA ₁	CA	CA
		2	PA ₁	CA	CA	CA	CA	NA	PA ₁	CA	CA
		3	PA ₂	PA ₁	CA	CA	CA	NA	PA ₂	CA	CA
		4	NA	NA	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	
	< 150 mm	1	NA	PA ₁	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		2	NA	PA ₁	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		3	NA	PA ₂	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		4	NA	NA	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₂	
< - 0,4	>250 mm	1	PA ₁	CA	CA	CA	NA	PA ₁	CA	CA	
		2	PA ₁	CA	CA	CA	NA	PA ₁	CA	CA	
		3	PA ₂	PA ₁	CA	CA	NA	PA ₂	CA	CA	
		4	NA	NA	CA	CA	NA	NA	NA	PA ₁	
	150-250 mm	1	NA	PA ₁	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		2	NA	PA ₁	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		3	NA	PA ₂	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		4	NA	NA	CA	CA	CA	NA	NA	PA ₂	
	< 150 mm	1	NA	NA	PA ₁	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		2	NA	NA	PA ₁	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		3	NA	NA	PA ₁	CA	CA	NA	NA	PA ₁	CA
		4	NA	NA	PA ₁	CA	CA	NA	NA	PA ₂	

Tale ipotesi appare ragionevole se si considera l'entità delle superfici uscite di produzione nel corso dell'ultimo decennio (2000-2010) per le quali sarebbe ipotizzabile un rapido recupero produttivo (ISTAT, 2011): la SAU infatti ha descritto un trend costantemente decrescente in buona parte attribuibile proprio alla drastica contrazione (-70%) del comparto delle colture industriali (Figura 2).

La distinzione operata tra le due filiere produttive, al di là delle differenti possibilità di valorizzazione dal punto di vista energetico, deriva principalmente da considerazioni di carattere agronomico. Infatti, nonostante una resa energetica ad ettaro nettamente superiore, per le colture da biomassa è stato ipotizzato un tasso di inserimento più contenuto rispetto a quello attribuito alle colture da biocarburanti,

Tabella 2 – Ordine di assegnazione delle colture (a parità di condizioni di adattamento) e caratteristiche qualitative quantitative delle diverse produzioni utilizzate nel calcolo dell’energia prodotta.

Coltura	Ordine	Resa areica ¹	Resa in biocarburanti ²	Contenuto energetico ³
Pioppo	I	15,00	-	20,0
Canna	II	24,00	-	18,0
Miscanto	II	21,00	-	17,0
Cardo	III	12,00	-	14,0
Mais	I	6,00	0,24	27,0
Sorgo	I	5,90	0,24	27,0
Girasole	II	2,65	0,42	37,2
Colza	III	1,70	0,45	37,2

¹ Media dell’intero territorio regionale espressa in t ha⁻¹ di sostanza secca (AA.VV., 2009).

² Resa percentuale in bioetanolo (mais e sorgo) e biodiesel (girasole e colza) delle produzioni granellari (AA.VV., 2009).

³ Espresso in GJ t⁻¹ di sostanza secca (AA.VV., 2009).

in considerazione sia della poliannualità della coltivazione, che vincolerebbe le superfici per almeno 10-12 anni, sia degli elevati costi di impianto, che possono essere sostenuti solo da imprenditori abituati a logiche di programmazione di lungo periodo, o grazie alla disponibilità di adeguati incentivi economici.

2.2. Le fonti dei dati e la loro elaborazione

Il modello proposto si basa sulla implementazione di un geodatabase in formato vettoriale realizzato attraverso l’utilizzo del software GIS Arcmap ESRI ver. 9.2. Le operazioni di selezione delle aree potenzialmente convertibili (SI “condizionali”) e di caratterizzazione del territorio (SI “vocazionali”), nonché quelle di assegnazione delle superfici alla coltivazione delle diverse colture, sono state formalizzate tramite funzioni in linguaggio SQL, facendo ricorso al software-database PostgreSQL ver. 8.4.

Le fonti di dati utilizzate per l’acquisizione degli SI sono state rispettivamente:

- per le pendenze, il DEM regionale con passo a 75 m;
- per l’uso del suolo, il Corine Land Cover (2010);
- per i dati climatici, la serie storica venticinquennale (1986-2009) della rete di 113 stazioni meteorologiche gestite dal Servizio Agrometeorologico dell’ARSIA (<http://agrometeo.arsia.toscana.it>);
- per i dati di tessitura, profondità e contenuto in sostanza organica dei suoli, le Carte

dei Suoli della Regione Toscana (1:250.000) prodotte dal LAMMA (<http://sit.lamma.rete.toscana.it/websuoli/>).

Le costanti idrologiche dei suoli sono state determinate a partire dal dato di tessitura e di contenuto in sostanza organica utilizzando adeguate funzioni *pedotransfert* (SALTER e WILLIAMS, 1965; MCBRATNEY *et al.*, 2002). L’I_c è stato calcolato per le singole stazioni meteorologiche a partire dai dati giornalieri mediati sull’intero periodo di osservazione ed è stato quindi interpolato spazialmente tramite il ricorso a tecniche di *kriging* ordinario, con modello esponenziale anisotropico, al fine di creare una copertura omogenea per l’intero territorio regionale con risoluzione pari ad 1 km.

Infine allo scopo di pervenire ad una stima, seppure largamente approssimativa, del possibile contributo energetico derivante dalla conversione delle superfici agricole così come ipotizzata (SEC_{lc} e SEC_{bc}), sono stati utilizzati i coefficienti di calcolo riportati nella Tabella 2, desunti sulla base delle esperienze condotte presso il Centro Interdipartimentale di Ricerche Agro-Ambientali “E. Avanzi” dell’Università di Pisa e della bibliografia già citata.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Il deficit idrico potenziale

L’adozione di un modello di tipo geostatistico ha permesso di ottimizzare il processo di

interpolazione eliminando gli *outlayer* presenti, cioè escludendo le stazioni che risultavano più rappresentative di condizioni climatiche a carattere locale piuttosto che di andamenti distribuiti su porzioni ampie di territorio. La riduzione del numero delle stazioni da 113 a 107 ha consentito quindi di realizzare una mappa di I_c (Figura 3) molto più fedele, come confermano le risultanze dell'analisi della semivarianza e dalla *cross validation* (Tabella 3).

3.2. Le superfici potenzialmente convertibili (SPC)

Le aree potenzialmente convertibili presenti all'interno del territorio regionale assommano complessivamente a 647550 ha.

La SPC è stata catalogata in termini di deficit idrico potenziale in nove classi (Tabella 4) che variano in ordine decrescente da iperumido ($I_c > 1,0$) ad arido ($I_c < -0,4$). Prevalgono nettamente le condizioni di minore disponibilità idrica con oltre il 70% delle superfici ricadenti nelle classi arido-semiarido, mentre solo il 20% delle aree è classificabile come sub-umido; decisamente meno rappresentate le altre tipologie di I_c .

Riguardo alla capacità di ritenzione idrica sono state individuate sette classi (Tabella 4) che variano in ordine decrescente da molto elevata ($SWC > 300$ mm) a molto bassa ($SWC < 50$ mm). La netta maggioranza della SPC ricade nelle classi centrali: SWC moderatamente

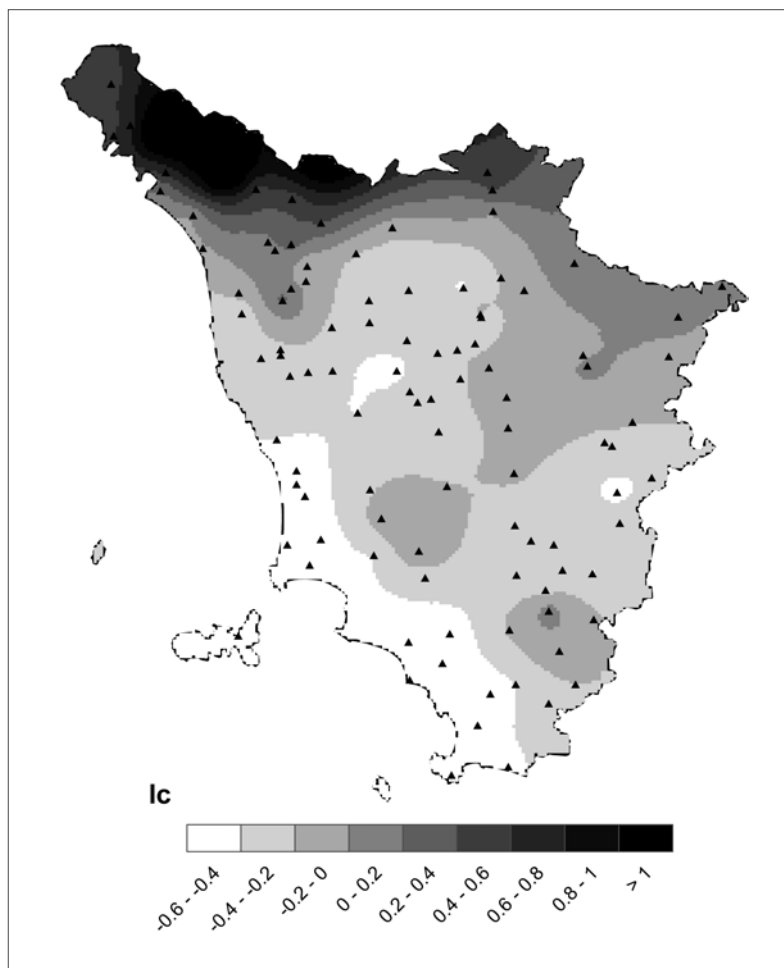


Figura 3 – Interpolazione spaziale per la Toscana dell'indice di deficit idrico potenziale (I_c) dopo l'ottimizzazione: 107 stazioni meteorologiche rimaste (triangoli nella figura).

Tabella 3 – Risultati dei test di analisi della semivarianza e della *cross-validation* per il *dataset* originario (Base), costituito da 113 stazioni e quello ottimizzato (107 stazioni); il *Nugget* esprime la variabilità osservata, ma non spiegabile in termini geostatistici; il *Partial Sill* descrive la quota di variabilità dipendente dallo spazio; il *Sill* è la somma delle due componenti della variabilità precedentemente descritte. Adottando un modello di tipo anisotropico la variabilità spaziale tra le stazioni varia a seconda delle direzioni per cui: *Direction* è la direzione in cui si osserva il *range* di variabilità maggiore (*Major Range*) in contrapposizione ortogonale al *Minor Range*. La *cross-validation* è stata condotta attraverso analisi della regressione lineare tra valori misurati e valori stimati dal modello in corrispondenza delle stesse stazioni: *Mean error* è l'errore medio osservato; RMSE è l'errore quadratico medio; R² descrive il grado di correlazione.

Dataset	N	Semivariogramma							Cross-validation		
		Nugget	Partial Sill	Sill Sill	Nugget/ Sill	Major Range (m)	Minor (°)	Direction error	Mean Range (m)	RMSE	R ²
Base	113	0,23	0,52	0,75	0,31	206.504	160.827	40,4	-0,0037	0,65	0,34
Ottimizzato	107	0	0,26	0,26	0	206.913	197.182	65,3	-0,00035	0,18	0,81

Tabella 4 – Classificazione in termini assoluti (ha) e relativi (%) della superficie potenzialmente convertibile (SPC) in classi di intensità per i tre strati informativi considerati: I_c (deficit idrico potenziale), SWC (capacità di ritenzione idrica dei suoli e tessitura).

I _c	Descrizione	SPC (ha)	SPC (%)
> 1,0	iperumido (A)	1895	0,3
0,8 ÷ 1,0	umido (B1)	1678	0,3
0,6 ÷ 0,8	umido (B2)	2798	0,4
0,4 ÷ 0,6	umido (B3)	1649	0,3
0,2 ÷ 0,4	umido (B4)	665	0,1
0,0 ÷ 0,2	subumido (C1)	129965	20,1
-0,2 ÷ 0,0	subumido-secco (C2)	33171	5,1
-0,4 ÷ -0,2	semiarido (D)	340410	52,6
< -0,4	arido (E)	135320	20,9
	<i>SPC totale</i>	<i>647550</i>	<i>100,0</i>
SWC (mm)	Descrizione	SPC (ha)	SPC (%)
> 300	molto elevata	39647	6,1
250 ÷ 300	elevata	65335	10,1
200 ÷ 250	moderatamente elevata	158058	24,4
150 ÷ 200	intermedia	120828	18,7
100 ÷ 150	moderatamente bassa	198367	30,6
50 ÷ 100	bassa	55768	8,6
< 50	molto bassa	9547	1,5
	<i>SPC totale</i>	<i>647550</i>	<i>100,0</i>
Tessitura	Descrizione	SPC (ha)	SPC (%)
-	no data	17	0,0
CL ÷ CL	argilloso / argilloso	118978	18,4
SiCL ÷ CL	limo-argilloso / argilloso	38024	5,9
SiCL ÷ SiCL	limo argilloso / limo-argilloso	182899	28,2
CL ÷ SCL	argilloso / sabbio-argilloso	16172	2,5
CL ÷ L	argilloso / franco	43827	6,8
SiCL ÷ SiL	limo-argilloso / limoso-franco	42442	6,6
SiL ÷ Si	limoso-franco / limoso	3729	0,6
SiL ÷ SiL	limoso-franco / limoso-franco	40909	6,3
SiL ÷ L	limoso-franco / franco	67195	10,4
L ÷ SL	franco / sabbioso-franco	76372	11,8
SL ÷ S	sabbioso-franco / sabbioso	16987	2,6
	<i>SPC totale</i>	<i>647550</i>	<i>100,0</i>

elevata (24%), intermedia (19%) e moderatamente bassa (31%), mentre progressivamente meno frequenti risultano le categorie più estreme.

Relativamente alla tessitura dei terreni sono state rilevate 12 tipologie diverse (Tabella 4), ordinate secondo caratteristiche di “pesantezza” decrescenti a partire dalla grana argillosa/argillosa fino alla grana franco-sabbiosa/sabbiosa. La distribuzione superficiale delle classi tessiturali presenta un andamento bimodale con un picco relativo al gruppo dei terreni argillosi e limo-argillosi (pari ad oltre il 50% della SPC) e un altro, di minore entità, costituito dai terreni franchi (equivalenti a poco più del 20% della SPC).

Complessivamente le superfici potenzialmente convertibili sono caratterizzate in buona parte da moderate condizioni di deficit idrico estivo semiarido, con terreni dotati di medie capacità di ritenzione idrica e a tessitura prevalentemente pesante. Si tratta dunque di aree non particolarmente vocate alla coltivazione di specie esigenti dal punto di vista idrico, ma più adatte ad accogliere specie rustiche e senza problemi di emergenza e/o di messa a dimora. Naturalmente all'interno della SPC individuata si trovano anche piccoli areali caratterizzati da condizioni pedo-climatiche più favorevoli dove però la competizione esercitata dalle colture alimentari sarà maggiore e le effettive possibilità di conversione saranno legate a fattori di natura socio-economica (organizzazione della filiera di

produzione, età del capo-azienda, andamento dei mercati delle colture *food*, ecc.).

3.3. Le superfici effettivamente convertibili (SEC)

Coerentemente con gli scenari proposti la stima delle SEC_{lc} e delle SEC_{bc} della Toscana è risultata rispettivamente pari a circa 65000 ha e 115000 ha; gli ettari disponibili per la coltivazione di specie da destinare ad una delle due filiere di produzione agroenergetica risulterebbero pari rispettivamente a circa il 6 e all'11% del territorio agricolo regionale rilevato nel 2006 secondo la classificazione Corine Land-Cover, assommando assieme ad oltre 180000 ha (Tabella 5).

Disaggregando i dati di cui sopra a livello provinciale, si nota come, in termini assoluti, siano soprattutto le province di Grosseto (SEC_{lc} = 16446 e SEC_{bc} = 29603 ha), Siena (SEC_{lc} = 13803 e SEC_{bc} = 24845 ha) e Pisa (SEC_{lc} = 10269 e SEC_{bc} = 18484 ha) quelle maggiormente interessate a possibili processi di riconversione agroenergetica, mentre all'opposto le province di Prato (SEC_{lc} = 536 e SEC_{bc} = 965 ha) e Massa-Carrara (SEC_{lc} = 480 e SEC_{bc} = 865 ha) sembrano essere quelle meno coinvolte.

Se invece si esamina l'incidenza percentuale della SEC_{lc} e della SEC_{bc} sul territorio agricolo, le variazioni in termini relativi risultano decisamente più contenute con le sole province di Livorno (SEC_{lc} = 8,0% e SEC_{bc} = 14,4%) e di Massa-Carrara (SEC_{lc} = 2,5% e SEC_{bc} = 4,5%)

Tabella 5 – Entità del territorio agricolo (TA) così come rilevato dal Corine Land-Cover (2010), della superficie effettivamente convertibile a colture ligno-cellulosiche (SEC_{lc}) e da bio-carburanti (SEC_{bc}) in termini assoluti (ha) e relativi rispetto al TA (%), rapporto fra le superfici classificate come “seminativi in aree non irrigue” (codice 211) e “sistemi colturali e particellari complessi” (codice 244), per ciascuna delle province della Toscana.

Provincia	TA (ha)	SEC _{lc} (ha)	SEC _{bc} (ha)	SEC _{lc} (%)	SEC _{bc} (%)	211/244
Arezzo	132822	7827	14089	5,9	10,6	2,1
Grosseto	239601	16446	29603	6,9	12,4	4,7
Prato	10148	536	965	5,3	9,5	4,4
Siena	209621	13803	24845	6,6	11,9	4,1
Lucca	40985	2013	3624	4,9	8,8	0,6
Livorno	54639	4370	7867	8,0	14,4	2,9
Firenze	153171	7243	13038	4,7	8,5	1,5
Pistoia	30972	1765	3177	5,7	10,3	1,9
Pisa	140390	10269	18484	7,3	13,2	4,7
Massa-Carrara	19308	480	865	2,5	4,5	0,3
<i>Totale</i>	<i>1031656</i>	<i>64753</i>	<i>116556</i>	<i>6,3</i>	<i>11,3</i>	<i>3,2</i>

che si differenziano, in eccesso e in difetto, rispetto a quanto rilevato per le altre province.

Interessante sembra anche valutare la diversa provenienza delle SEC; tali superfici infatti sono costituite in netta prevalenza da aree classificate come seminativi non irrigui (codice 211) rispetto ai sistemi colturali e particellari complessi (codice 244), come accade per le province di Grosseto, Prato, Pisa e Siena ($211/244 > 4$). In altri casi invece si evidenzia l'esistenza di un rapporto più equilibrato fra le due classi fotointerpretate ($1 < 211/244 < 2$), fino addirittura ad arrivare ad un'inversione della loro importanza relativa ($211/244 < 1$), come rilevato per le province di Lucca e Massa-Carrara. In questi casi con tutta probabilità, la conversione alle agroenergie non toglierebbe spazio alle colture tradizionali, quanto piuttosto a categorie di uso promiscuo del suolo il cui sfruttamento in chiave economica appare decisamente più incerto.

Per quanto riguarda invece la diffusione delle singole colture all'interno del comparto delle ligno-cellulosiche (Tabella 6) è la canna che, grazie alle sue doti di adattabilità, sembra presentare le maggiori possibilità di espansione del proprio areale di coltivazione, avvicinandosi teoricamente ai 40000 ha. Significativo si dimostra anche il risultato fatto segnare dal pioppo che, occupando il primo posto nelle priorità di assegnazione, arriva a superare i 15000 ha coltivati. Decisamente meno consistenti appaiono invece le prospettive riguardanti le altre specie considerate; miscanto e cardo infatti si mantengono rispettivamente al di sotto degli 8000 e dei 3000 ha di SEC_{1c} .

Relativamente alla distribuzione geografica invece (Figura 4), la coltivazione del pioppo risulterebbe concentrata soprattutto nelle zone di pianura e nei fondo-valle, mentre le aree pedecollinari, caratterizzate da suoli prevalentemente argillosi o franco-argillosi, sembrano risultare più adatte alla coltivazione della canna e/o del miscanto. Il cardo invece, sempre in combinazione con la canna, si colloca principalmente nelle aree penalizzate da minori disponibilità idriche, sia per i ridotti apporti naturali che per le limitate capacità di immagazzinamento di acqua nel terreno.

Nell'ambito delle specie da biocarburanti (Tabella 7) è preponderante l'incidenza (75%) delle colture da biodiesel sulla SEC_{bc} ; girasole e colza arriverebbero ad occupare oltre 40000 ha ciascuna, grazie soprattutto alle ridotte esigenze pedo-climatiche che presentano rispetto alle colture da bioetanolo. Da non trascurare comunque i possibili margini di espansione dell'areale di coltivazione del sorgo in grado di oltrepassare i 20000 ha, mentre il mais si confermerebbe coltura poco idonea a valorizzare gli ambienti asciutti, rimanendo al di sotto dei 7000 ha di superficie assegnata nonostante l'elevato ordine di priorità posseduto.

Geograficamente (Figura 5), se si escludono alcune aree di pianura poste nella porzione centro-settentrionale della regione e caratterizzate da un clima più umido, dove è ipotizzabile l'introduzione del mais e/o della combinazione mais/sorgo, l'insieme delle aree pedocollinari e delle aree costiere del centro-sud risulterebbe colonizzato dai binomi colturali

Tabella 6 – Superfici effettivamente convertibili assegnate alle diverse colture ligno-cellulosiche per ciascuna delle province della Toscana.

Provincia	pioppo (ha)	canna (ha)	miscanto (ha)	cardo (ha)
Arezzo	2732	4164	932	0
Grosseto	1804	11315	1306	2021
Prato	134	379	22	0
Siena	2715	9175	1887	25
Lucca	1421	387	206	0
Livorno	576	2782	591	422
Firenze	1722	4527	831	164
Pistoia	1459	258	48	0
Pisa	3014	5547	1485	223
Massa-Carrara	338	89	53	0
<i>Totale</i>	<i>15915</i>	<i>38622</i>	<i>7361</i>	<i>2855</i>

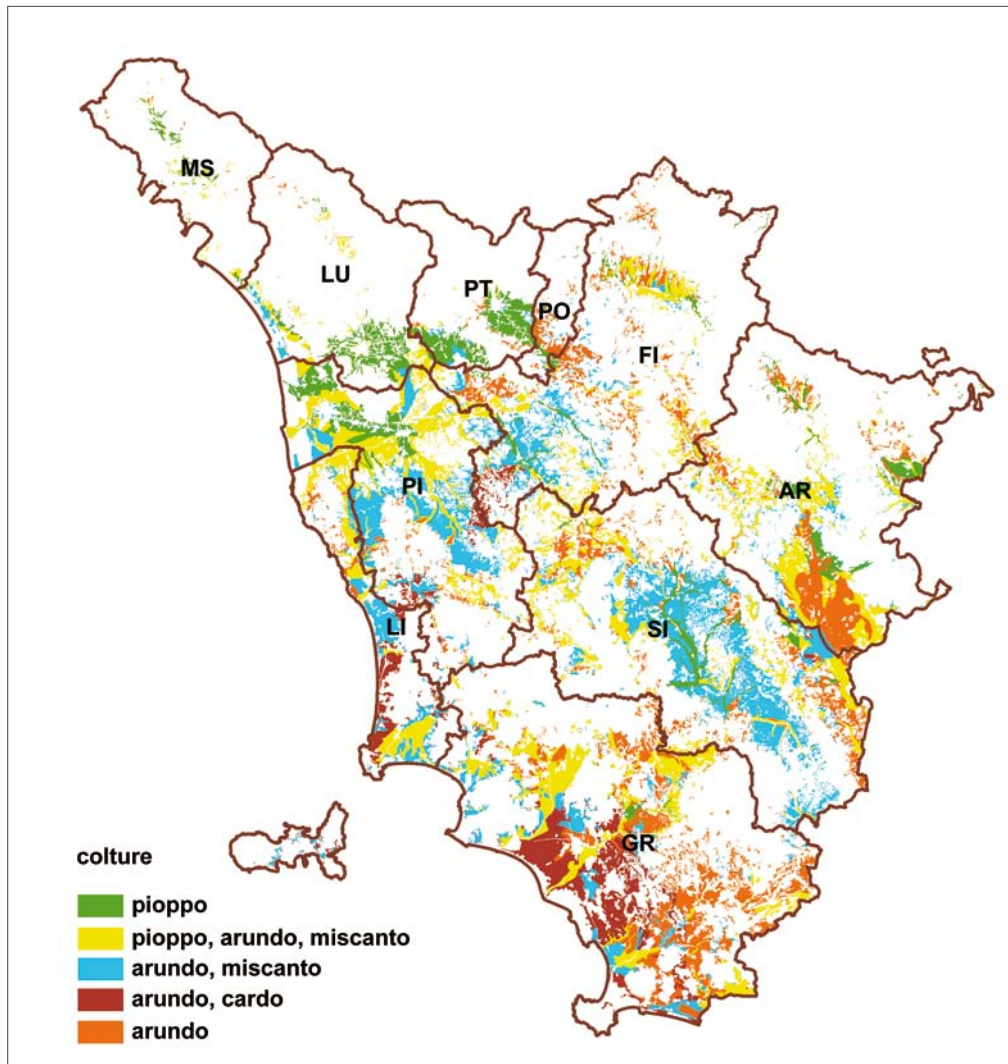


Figura 4 – Distribuzione delle superfici assegnate alle diverse colture ligno-cellulosiche (da sole o in combinazione) per il territorio della Toscana.

Tabella 7 – Superfici effettivamente convertibili assegnate alle diverse colture da bio-carburanti per ciascuna delle province della Toscana.

Provincia	mais (ha)	sorgo (ha)	girasole (ha)	colza (ha)
Arezzo	1060	3858	5555	3617
Grosseto	137	3110	11496	14860
Prato	109	132	369	355
Siena	568	4320	8099	11859
Lucca	1612	946	808	259
Livorno	2	1035	3891	2939
Firenze	678	2421	5162	4777
Pistoia	1255	1371	271	280
Pisa	1240	4185	6809	6249
Massa-Carrara	289	319	223	33
<i>Totale</i>	6950	21697	42681	45228

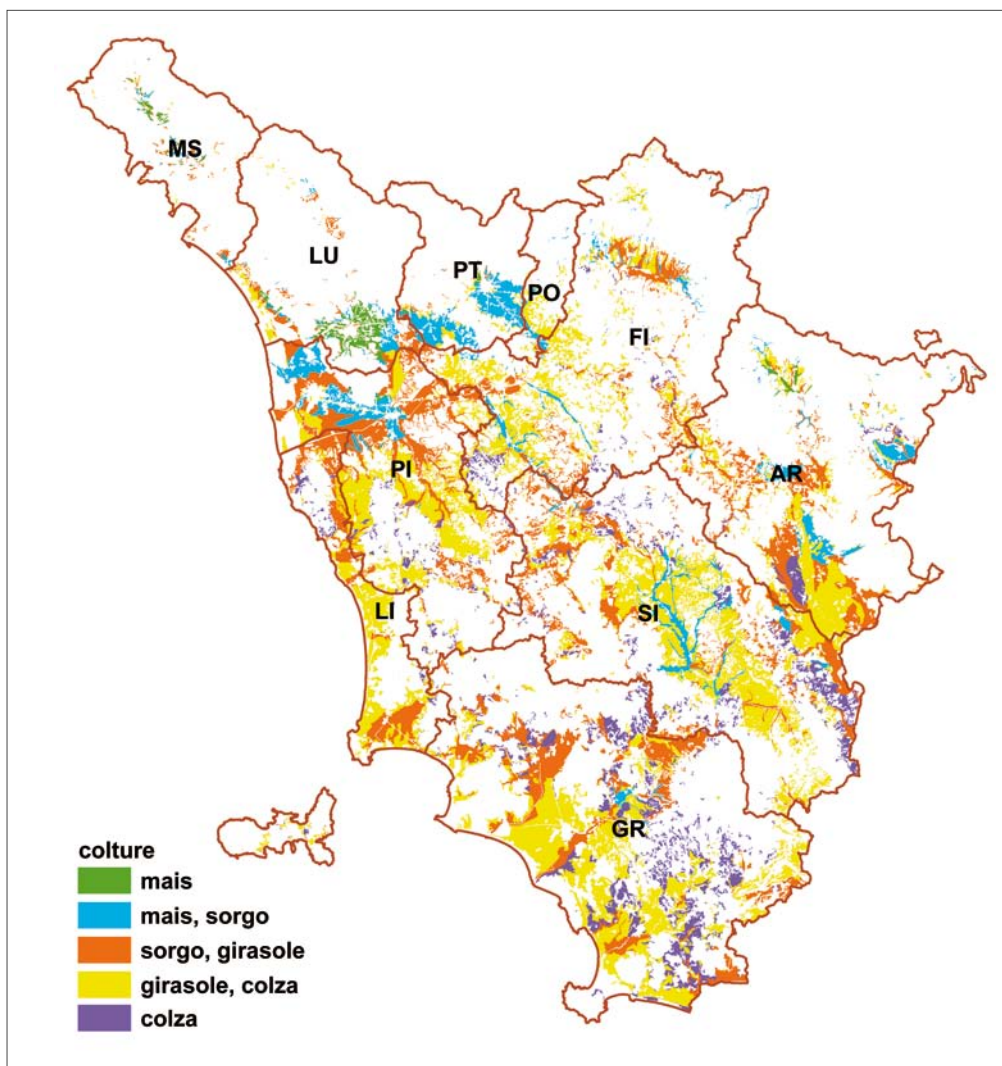


Figura 5 – Distribuzione delle superfici assegnate alle diverse colture da bio-carburanti (da sole o in combinazione) per il territorio della Toscana.

sorgo/girasole e girasole/colza (con prevalenza della prima combinazione nelle aree che beneficiano di una pur minima disponibilità di acqua nel periodo estivo). Infine la colza sembra rappresentare la sola alternativa possibile negli areali più limitanti, grazie all'assoluta indifferenza alle condizioni di rifornimento idrico (avendo un ciclo autunno-vernino) e alla buona adattabilità anche a terreni decisamente argillosi.

3.4. La produzione di energia

La stima della produzione di energia è frutto di un insieme di assunzioni semplificative necessarie al calcolo di un valore finale in grado di consentire una valutazione del contributo energetico derivante dalla destinazione delle SEC alla coltivazione delle colture assegnate.

In seguito allo scenario proposto la trasformazione delle biomasse prodotte (1,3 milioni di t anno⁻¹), risulterebbe pari ad oltre 29 milioni di GJ anno⁻¹ primari; quella derivante invece

dall'impiego dei biocarburanti (circa 40000 t anno⁻¹ di bioetanolo e 82000 t anno⁻¹ di biodiesel) assommerebbe a poco più di 4 milioni di GJ anno⁻¹ primari. Tali valori confermano la netta superiorità in termini di produttività energetica da parte delle colture ligno-cellulosiche che fanno segnare rendimenti ettariali circa 10 volte superiori a quelli attribuibili alle colture da biocarburanti.

Per quanto riguarda l'utilizzo delle biomasse, ipotizzando la conversione in un impianto di cogenerazione di taglia inferiore al MW (con rendimento elettrico pari a 0.16 e rendimento termico pari a 0.64), si otterrebbero dalle produzioni pari a circa 750 GWh elettrici e circa 3050 GWh termici all'anno. Nel primo caso la quota prodotta costituisce una piccola parte dell'energia elettrica annualmente consumata in Toscana (21400 GWh elettrici nel 2003), ma rappresenta una frazione significativa (circa il 30%) dell'energia elettrica annualmente importata dalla regione (2687 GWh sempre nel 2003). Quello che più conta è che ipotizzando un funzionamento di tali impianti pari a 8000 ore annue, si riuscirebbero ad installare potenze pari a 96 MW elettrici e a 383 MW termici corrispondenti rispettivamente al 96 e al 64% di quelli previsti dal PIER per l'anno 2020 (REGIONE TOSCANA, 2008).

Riguardo ai biocarburanti invece la produzione di bioetanolo e di biodiesel coprirebbe rispettivamente circa il 3 e 4% del contenuto energetico della benzina e del gasolio venduti in Toscana nell'anno 2009; è interessante notare che il biodiesel prodotto da colture dedicate potrebbe comunque costituire circa l'80% delle vendite registrate nel solo settore agricolo (MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO, 2011).

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo sviluppo di modelli geografici integrati è parte fondamentale dei processi di pianificazione del territorio su vasta scala. Nel caso delle colture da energia tale tipo di approccio è decisivo non solo ai fini della determinazione dei possibili areali di coltivazione, ma anche per

l'elaborazione di scenari di produzione finalizzati alla stima del potenziale agro-energetico dei possibili bacini di approvvigionamento.

La possibilità di elaborare molteplici scenari da un lato favorisce la calibrazione del modello e lo studio della sua sensibilità in merito ai diversi parametri, dall'altro agevola l'interpretazione dei risultati in relazione ai criteri ed alle regole adottate e permette il confronto tra ipotesi alternative di sfruttamento del territorio per la produzione di colture da energia.

I dati relativi all'andamento della SAU regionale nell'ultimo decennio evidenziano l'esistenza di ampi margini per l'inserimento delle colture da energia, ma il successo di un tale processo di riconversione produttiva dipende in larga parte proprio dalla oculatezza delle scelte fatte in termini di localizzazione delle aree interessate.

Dai risultati ottenuti emerge l'importanza del contributo energetico che la coltivazione di specie ligno-cellulosiche, anche su solo un 10% della SPC, potrebbe garantire in termini di potenze installabili, senza contare le possibilità offerte dall'integrazione, nell'ambito delle filiere legno-energia, con le biomasse di derivazione forestale, o recuperabili dalle operazioni di potatura ed espianco di vigneti ed oliveti. Inoltre il carattere poliennale, la lunghezza dei cicli vegetativi e il basso fabbisogno di input chimici rendono le colture da biomassa sicuramente più interessanti, non solo per gli effetti mitigativi sui cambiamenti climatici in corso, ma anche per il contenimento dell'erosione, della lisciviazione dell'azoto e per il mantenimento della fertilità del suolo.

Nel caso delle colture da biocarburanti liquidi si è invece proposto uno sfruttamento più intenso delle superfici agricole potenzialmente destinabili alla loro coltivazione, in considerazione della tradizionale presenza che tali specie vantano negli ordinamenti colturali della Toscana e del fatto che le produzioni ottenute possono comunque essere destinate anche alla filiera alimentare. D'altra parte però tali colture presentano una resa energetica notevolmente inferiore alle colture lignocellulosiche, senza considerare i costi, sempre in termini energetici, relativi alle fasi di coltivazione e successiva

lavorazione per l'ottenimento del carburante, che incidono fortemente sul bilancio complessivo della filiera.

SUMMARY

Contribution of energy crops to the bioenergy sector in Tuscany: development of a GIS-based forecasting model

The adopted methodology, based on the development of a vector geodatabase integrated with a database management system (PostgreSQL), allowed to produce a dynamic and versatile simulation model. The modelling tool developed is capable of providing results with high spatial definition (intersection of vector layers) by defining several information layers at a time, following criteria and rules set by the user.

The model allows to evaluate different scenarios by defining: i) factors affecting crop adaptability to soil and climate conditions; ii) land use categories hypothetically involved in energy crops cultivation; iii) proportion of the available land area hypothetically involved.

In the proposed scenario, a realistic introduction rate of lignocellulosic energy crops and biofuel crops within the agricultural context of Tuscany was simulated. In fact, 10% of the allocable area (non-irrigated arable lands with 15% maximum slope) were assigned to lignocellulosic and 20% of the remaining area to biofuel crops.

Results show the differences in terms of crops adaptation to geophysical factors, highlighting the possibility of assigning suitable crops combinations to the different agricultural areas of the region. Our estimations showed that, among the lignocellulosic crops evaluated, giant reed has the largest spreading potential at spatial scale, while among the biofuel crops considered, sunflower and rapeseed were those with the highest expansion potential.

Energy crops production, as estimated according to the described scenario, could reduce Tuscany region's dependence on electricity import, helping to meet PIER (regional energy plan) targets for 2020, in terms of potential energy production from biomass.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV., 2004 – *Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto Bioenergy Farm*. Quaderno ARSIA, 6. ARSIA, Regione Toscana. Tipolito Duemila srl, Campi Bisenzio (FI), 160 p.

AA.VV., 2009 – *Stima della potenzialità produttiva delle agrienergie in Toscana*. Manuale ARSIA, Regione Toscana, Press Service srl, Sesto Fiorentino (FI), 91 p.

ANGELINI L.G., CECCARINI L., NASSI O DI NASSO N., BONARI E., 2009a – *Comparison of Arundo donax L. and Miscanthus x giganteus in a long-term field experiment in Central Italy: analysis of productive characteristics and energy balance*. Biomass and Bioenergy, 33 (4): 635-643. doi:10.1016/j.biombioe.2008.10.005

ANGELINI L.G., CECCARINI L., NASSI O DI NASSO N., BONARI E., 2009b – *Long-term evaluation of biomass production and quality of two cardoon (Cynara cardunculus L.) cultivars for energy use*. Biomass

and Bioenergy, 33 (5): 810-816. doi:10.1016/j.biombioe.2008.12.004

AYLOTT M.J., CASELLA E., TUBBY I., STREET N.R., SMITH P., TAYLOR G., 2008 – *Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK*. New Phytologist, 178 (2): 358-370. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02396.x

BECCALI M., COLUMBA P., D'ALBERTI V., FRANZITTA V., 2009 – *Assessment of bioenergy potential in Sicily: A GIS-based support methodology*. Biomass and Bioenergy, 33 (1): 79-87. doi:10.1016/j.biombioe.2008.04.019

BERNETTI I., FAGARAZZI C., 2003 – *BIOSIT: una metodologia GIS per lo sfruttamento efficiente e sostenibile della "risorsa biomassa" a fini energetici*. 289 p.

CHIRICI G., CORONA P., NOCENTINI S., 2006 – *Mappatura sperimentale dei territori forestali a principale attitudine potenziale produttiva in Italia*. L'Italia Forestale e Montana, 5: 338-352.

DRIGO R., CHIRICI G., LASSERRE B., MARCHETTI M., 2007 – *Analisi su base geografica della domanda e dell'offerta di combustibili legnosi in Italia*. L'Italia Forestale e Montana, 5/6: 304-324.

ERCOLI L., MARIOTTI M., MASONI A., BONARI E., 1999 – *Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of Energy use in crop production of Miscanthus*. Field Crops Research, 63: 3-11. doi:10.1016/S0378-4290(99)00022-2

FAO, 1976 – *A framework for land evaluation*. Soil Bulletin, 32. FAO, Rome.

FAO, 1983 – *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture*. FAO Soils Bulletin, 52. Rome. 237 p.

FIGLIANO G., GUARISO G., 2010 – *A GIS-based approach to evaluate biomass potential from energy crops at regional scale*. Environmental Modelling & Software, 25 (6): 702-711.

GRASSANO N., TEDONE L., VERDINI L., DE MASTRO G., 2011 – *Evaluation of rapeseed cultivation suitability in Apulia with GIS-multicriteria analysis*. Italian Journal of Agronomy, 16 (6): 101-105.

GUIDI W., PICCIONI E., BONARI E., 2008 – *Evapotranspiration and crop coefficient of poplar and willow short-rotation coppice used as vegetation filter*. Bioresource Technology, 99: 4832-4840. doi:10.1016/j.biortech.2007.09.055

ISTAT, 2011 – <http://dati.istat.it/>

KLINGEBIEL A., MONTGOMERY P., 1961 – *Land-capability classification*. Agriculture Handbook 210. Soil Conservation Service, U.S. Dept. of Agriculture. 21 p.

LAMMA – *Progetto Carta dei Suoli in scala 1:250.000 della Regione Toscana*. <http://sit.lamma.rete.toscana.it/websuoli/>

LOVETT A.A., SUNNENBERG G.M., RICHTER G.M., DAILEY A.G., RICHE A.B., KARP A., 2009 – *Land use implications of increased biomass production identified by GIS - based suitability and yield mapping for Miscanthus in England*. Bioenergy Research, 2 (1-2): 17-28. doi:10.1007/s12155-008-9030-x

LEFÈVRE N., 2010 – *Measuring the energy security implications of fossil fuel resource concentration*. Energy Policy, 38 (4): 1635-1644. doi:10.1016/j.enpol.2009.02.003

MANTINEO M., D'AGOSTA G.M., COPANI V., PATANÈ

- C., COSENTINO S.L., 2009 – *Biomass yield and Energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment*. *Field Crops Research*, 114: 204-213. doi:10.1016/j.fcr.2009.07.020
- MCBRATNEY A.B., MINASNY B., CATTLE S.R., VERVOORT R.W., 2002 – *From pedotransfer functions to soil inference systems*. *Geoderma*, 109: 41-73. doi:10.1016/S0016-7061(02)00139-8
- MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO, 2011 – *Statistiche dell'Energia, vendite provinciali dei prodotti petroliferi*. <http://dgerm.sviluppoeconomico.gov.it/dgerm/>
- NASSI O DI NASSO N., GUIDI W., RAGAGLINI G., TOZZINI C., BONARI E., 2010 – *Biomass production and Energy balance of a 12-year old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles*. *GCB Bioenergy*, 2 (2): 89-97.
- PARLAMENTO EUROPEO E CONSIGLIO DELL'UNIONE EUROPEA, 2009 – *Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili*. 2009/28/CE.
- PISTOCCHI C., GUIDI W., PICCIONI E., BONARI E., 2009 – *Water requirements of poplar and willow vegetation filters grown in lysimeter under mediterranean conditions: Results of the second rotation*. *Desalination*, 246 (1-3): 137-146. doi:10.1016/j.desal.2008.03.047
- RAGAGLINI G., VILLANI R., GUIDI W., BONARI E., 2008 – *Bioenergy production assessment at regional level under different scenarios of resources exploitation. Aspects of Applied Biology*. *Biomass and Bioenergy Crops III*, 90: 109-118.
- RAGAGLINI G., VILLANI R., TRIANA F., TOZZINI C., BONARI E., 2009 – *Stima della potenzialità produttiva delle agrienergie in Toscana. I. comparti agricolo e agroindustriale*. *Manuale ARSIA 2009*, Arsia Regione Toscana, p. 11-42.
- RAGAGLINI G., TRIANA F., VILLANI R., BONARI E., 2010 – *Can sunflower provide biofuel for inland demand? An integrated assessment of suitability at regional scale*. *Energy*, 36 (4): 2111-2118. doi:10.1016/j.energy.2010.03.009
- REGIONE TOSCANA, 2008 – *Piano di Indirizzo Energetico Regionale (PIER)*. C.R. 08/07/2008. http://www.regione.toscana.it/regione/multimedia/RT/documents/1199714536712_Piano_indirizzo_energetico_regione_toscana.pdf.
- SALTER P.J., WILLIAMS J.B., 1965 – *The influence of texture on the moisture characteristics of soils. I. A critical comparison for determining the available water capacity and moisture characteristics curve of a soil*. *Journal of Soil Science*, 16: 1-15. doi:10.1111/j.1365-2389.1965.tb01416.x
- SALVATI R., CHIRICI G., CORONA P., 2007 – *Modello di valutazione dell'attitudine fisica del territorio per la realizzazione di impianti cedui da biomassa in Italia*. *L'Italia Forestale e Montana*, 5/6: 399-410. doi:10.4129/IFM.2007.5-6.07
- SCHNEIDER, L.C., KINZIG A.P., LARSON E.D., SOLÓRZANO L.A., 2001 – *Method for spatially explicit calculations of potential biomass yields and assessment of land availability for biomass energy production in Northeastern Brazil*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 84: 207-226. doi:10.1016/S0167-8809(00)00242-5
- THORNTHWAITE C.W., 1948 – *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical Review*, 38 (1): 55-94. doi:10.2307/210739