

ALLEGATO 1

Indagine conoscitiva sulla produzione di biomassa legnosa dei boschi di querce caducifoglie: caso studio in aree significative della Provincia di Siena

A cura di

Raffaello Giannini, Davide Travaglini, Leone Ammannati, Livio Bianchi,
Annamaria Proietti.

Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e
Forestali (DEISTAF)
Università degli Studi di Firenze

“Progetto MODERNO”

MOdello di Distretto Energetico Rurale inNOvativo

POR FESR 2007 - 2013 ATTIVITA' 1.1 LINEE D'INTERVENTO A E B
BANDO REGIONALE 2008 PER IL SOSTEGNO A PROGETTI DI RICERCA
CONGIUNTI TRA
GRUPPI DI IMPRESE E ORGANISMI DI RICERCA IN MATERIA
DI AMBIENTE, TRASPORTI, LOGISTICA, INFOMOBILITA' ED ENERGIA

Indice

1 Premessa

2 Materiali e metodi

2.1 Area di studio

2.2 Dati

2.3 Fasi operative

2.3.1 Cartografia forestale

2.3.2 Rilievi a terra

2.3.3 Compartimentazione forestale

2.3.4 Stima della densità della rete viaria

2.3.5 Stima della provvigione reale

2.3.5.1 Il metodo k -NN

2.3.5.2 Scelta della migliore configurazione k -NN

2.3.6 Stima della biomassa disponibile

2.3.6.1 Scenari gestionali

2.3.6.2 Prelievi

3 Risultati

3.1 Categorie e tipi forestali

3.2 Incrementi e relazioni tra età e volume

3.3 Densità della rete viaria

3.4 Provvigione reale

3.5 Disponibilità della biomassa forestale

4 Discussione e conclusioni

Bibliografia

Fonti di informazione

1 Premessa

Nell'ambito delle attività previste dalla Tematica "Misure e stime del combustibile ligno-cellulosico ottenibile dalle utilizzazioni forestali e dal recupero di residui agricoli dell'Obiettivo operativo 1 "Stima delle potenzialità delle aree rurali della Toscana in termini di produzione di combustibile ligno-cellulosico da utilizzazioni forestali e dal recupero dei residui colturali e georeferenziazione", è stato condotto un caso di studio nel settore settentrionale della Provincia di Siena con l'obiettivo di fornire stime georeferenziate della disponibilità di biomassa legnosa per il periodo 2011-2030. I risultati prodotti forniscono una stima della biomassa potenzialmente ottenibile dai boschi di querce caducifoglie ripartita in legna da ardere e in residui delle utilizzazioni forestali.

La scelta del tipo di soprassuolo forestale è stata determinata: i) dalla estensione e rappresentatività che i querceti a foglia caduca rivestono nell'ambito territoriale e, ii) dalla caratterizzazione strutturale di questi designata da forme di governo destinate in netta prevalenza alla produzione di legna da ardere (usi energetici diretti e da trasformazione).

In Provincia di Siena, così come nelle altre regioni italiane, la legna da ardere è l'assortimento principale prodotto dalla gestione dei boschi di quercia. I residui delle utilizzazioni forestali (ramaglia con diametro inferiore a 3-5 cm) spesso non trovano collocazione nel mercato e sono lasciati in foresta per proteggere il terreno dall'erosione e arricchire il suolo di elementi nutritivi. Tuttavia, negli ultimi anni l'utilizzo dei residui forestali è stato rivalutato in relazione alla possibilità di produrre cippato da immettere nelle filiere bosco-legno-energia.

È importante ricordare che la disponibilità delle biomasse forestali dipende da numerosi fattori. Fra di essi assumono particolare rilevanza l'autoecologia della specie, la fertilità della stazione, la struttura del soprassuolo quale risultato delle vicende storiche e delle utilizzazioni del passato, l'accessibilità al soprassuolo in relazione alla pendenza del terreno ed alla viabilità esistente, la normativa vigente in materia forestale, i regimi di tutela del territorio connessi alla presenza di aree protette ed alla protezione del terreno dal dissesto idrogeologico, le condizioni locali del mercato del legno.

In questo caso di studio la disponibilità di biomassa forestale è stata stimata tenendo conto dei seguenti fattori: le tipologie strutturali (ceduo, ceduo composto, fustaia) che contraddistinguono i boschi di quercia in Provincia di Siena; la densità della rete viaria; la normativa prevista dal Regolamento Forestale della Regione Toscana.

Inoltre sono stati esaminati due distinti scenari di gestione forestale: il primo è uno scenario di tipo prevalentemente produttivo che contempla il massimo prelievo previsto per le tipologie forestali presenti; il secondo, viceversa, è uno scenario di tipo protettivo/conservativo che applica dei fattori di riduzione ai prelievi forestali per la presenza di elementi di criticità come ad esempio la pendenza dei terreni o quello, già indicato, relativo a specifici vincoli di protezione ambientale (parchi, riserve).

2 Materiali e metodi

2.1 Area di studio

L'area di studio è situata nei comuni di Asciano, Castellina in Chianti, Casole d'Elsa, Castelnuovo Berardenga, Chiusdino, Gaiole in Chianti, Monteriggioni, Monteroni d'Arbia, Monticiano, Radda in Chianti, Radicondoli, Rapolano Terme e Siena. L'area copre una superficie complessiva di 164.121 ettari, che corrisponde al 43% del territorio provinciale (Fig. 1).

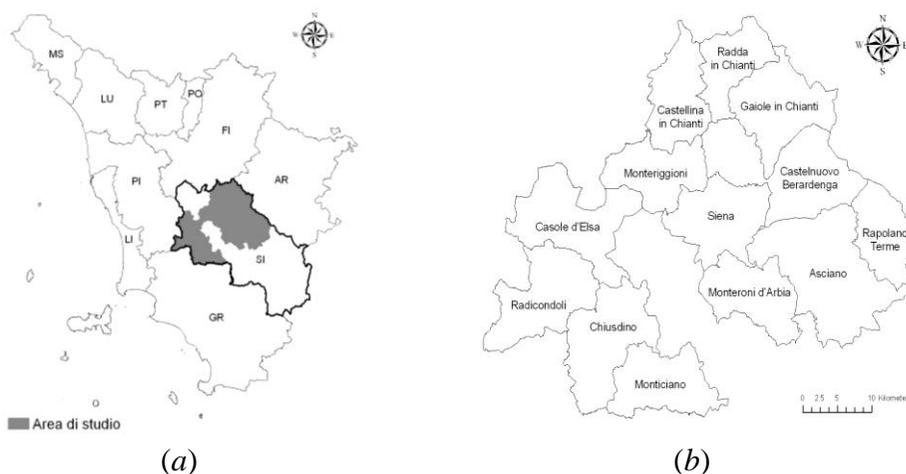


Figura 1. Localizzazione dell'area di studio in Provincia di Siena (a) e comuni inclusi nell'area (b).

Secondo l'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC, 2008), in Provincia di Siena i boschi a rovere, roverella e farnia occupano una superficie di 32.518 ettari mentre le cerrete si estendono su di una superficie di 58.533 ettari.

2.2 Dati

I lavoro è stato sviluppato a partire da una serie di strati informativi georeferenziati già disponibili per il territorio oggetto di studio. In particolare sono stati utilizzati i seguenti dati:

- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10.000;
- Ortofoto digitali a colori in scala 1:10.000 dell'anno 2007;
- Dati dell'Inventario Forestale della Regione Toscana;
- Carta di uso del suolo della Provincia di Siena in scala 1:10.000;

- Scena satellitare multispettrale Landsat 5 TM del 10/07/2010 (pat 192 row 030) con risoluzione spaziale di 30 m.

Le sezioni CTR, le ortofoto digitali e i dati dell'Inventario Forestale della Regione Toscana sono stati gentilmente concessi ai fini del Progetto Moderno dalla Regione Toscana – Sistema Informativo per il Governo del Territorio e dell'Ambiente. La carta di uso del suolo della Provincia di Siena è stata cortesemente messa a disposizione dal Consorzio LaMMA. La scena satellitare Landsat è stata acquisita dall'archivio on line dello U.S. Geological Survey (USGS).

2.3 Fasi operative

La metodologia utilizzata per effettuare la stima spazializzata della disponibilità di biomasse forestali ha previsto le seguenti fasi operative (Nocentini et al., 2011):

1. Produzione di una cartografia forestale;
2. Rilievi a terra;
3. Compartimentazione forestale;
4. Stima della densità della rete viaria;
5. Stima della provvigione reale;
6. Stima della biomassa disponibile.

2.3.1 Cartografia forestale

In questa fase di lavoro è stata prodotta una carta in scala 1:10.000 dei boschi a prevalenza di querce caducifoglie. La carta è stata realizzata per fotointerpretazione a video di ortofoto digitali a colori utilizzando come riferimento il limite bosco non bosco estratto dalla Carta di uso del suolo della Provincia di Siena. Inoltre, come supporto alla fotointerpretazione sono stati utilizzati i seguenti strati informativi: una immagine in falso colore con risoluzione spaziale di 30 m prodotta dalla combinazione delle bande multispettrali TM4, TM3, TM2 del satellite Landsat 5 TM; un modello digitale del terreno (DEM) e una carta delle pendenze con risoluzione spaziale di 5 m realizzati a partire dalle curve di livello estratte dalla Carta Tecnica Regionale; l'uso del suolo estratto dall'Inventario Forestale della Regione Toscana.

L'unità minima cartografabile per le aree bosco segue le definizioni riportate dalla L.R. 21 marzo 2000, n. 39: superfici coperte da vegetazione arborea forestale spontanea o d'origine artificiale di estensione non inferiore ai 2000 metri quadrati e di larghezza maggiore di 20 metri con una copertura del suolo pari ad almeno il 20%.

I boschi a prevalenza di querce caducifoglie sono stati distinti dalle altre formazioni forestali e sono stati classificati secondo il sistema di classificazione in tipi forestali della Regione Toscana (Tab. 1).

Categoria forestale	Tipo forestale
Cerreta	Cerreta acidofila submediterranea ad eriche
Cerreta	Cerreta mesofila collinare
Cerreta	Cerreta mesoxerofila
Querceto di Roverella	Querceto acidofilo di Roverella a Cerro
Querceto di Roverella	Querceto mesofilo di Roverella e Cerro
Querceto di Roverella	Querceto mesotermofilo di Roverella
Querceto di Roverella	Querceto termofilo di Rov. con Leccio e Cerro

Tabella 1: Sistema di classificazione dei boschi a prevalenza di querce caducifoglie.

2.3.2 Rilievi a terra

In mancanza di informazioni aggiornate e spazialmente definite della provvigione legnosa dei querceti caducifogli della Provincia di Siena è stato necessario condurre un rilievo a terra di questo parametro forestale.

A questo scopo è stato ritenuto sufficiente il rilievo di circa 100 aree di saggio. Le aree sono state distribuite sul territorio d'indagine con un sistema di campionamento sistematico non allineato. È stata utilizzata una maglia di celle quadrate di 5 km di lato; la maglia è stata sovrapposta alla carta forestale e all'interno di ciascuna cella è stato posizionato un punto casuale nel bosco di querce caducifoglie incluso nella cella. Complessivamente il numero di aree di saggio così individuate è risultato pari a 92 (Fig. 2).

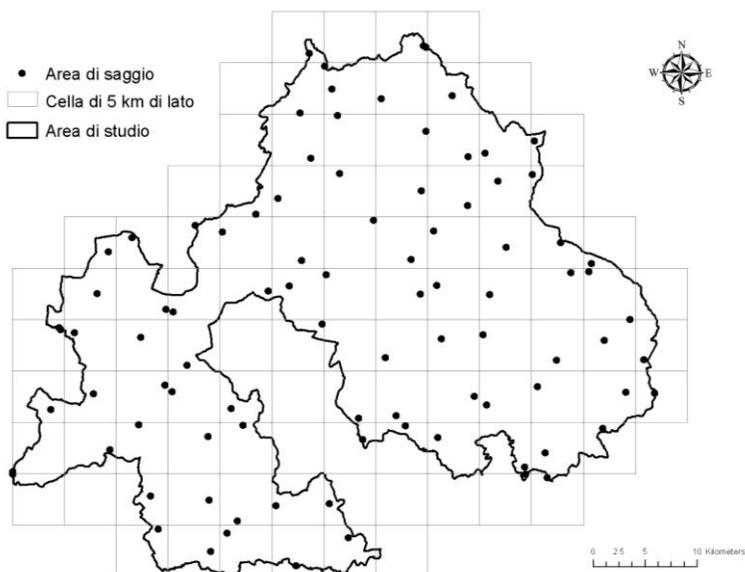


Figura 2: Localizzazione delle aree di saggio.

Il rilievo delle aree di saggio è stato condotto tra il 2010 e il 2011. La posizione a terra delle aree è stata raggiunta utilizzando un GPS GeoXT serie 2008; la coordinata effettiva dell'area è stata registrata con GPS. In ciascuna area è stata stimata l'area basimetrica a ettaro con relascopio a specchi di Bitterlich; nella maggioranza dei casi è stata utilizzata la banda del 2; solo nel caso di soprassuoli relativamente giovani è stata utilizzata la banda dell'1. Inoltre è stata misurata l'altezza con ipsometro elettronico vertex IV dei 6 alberi più alti tra quelli inclusi nella prova di numerazione angolare ed è stata effettuata la stima dell'età del bosco. Dove possibile, l'età è stata determinata sulla base di informazioni locali, negli altri casi è stata stimata a vista. Le aree di saggio sono state classificate in tipi forestali sulla base del sistema di classificazione utilizzato per elaborare la carta forestale (Tab. 1). Inoltre, le aree sono state classificate in funzione delle seguenti tipologie strutturali: ceduo matricinato, ceduo composto, fustaia.

I dati di altezza sono stati utilizzati per determinare il valore dell'altezza dominante in ciascuna area. In seguito, i dati di area basimetrica e di altezza dominante sono stati utilizzati per determinare la provvigione unitaria (m^3ha^{-1}) di ciascuna area di saggio utilizzando le tavole di popolamento della Regione Emilia Romagna (2000):

$$V = 9,820968 + 0,360449 * GH$$

per le cerrete

$$V = 8,753238 + 0,3786404 * GH$$

per i boschi di roverella

dove, V = volume in m^3ha^{-1} ; G = area basimetrica in m^2ha^{-1} ; H = altezza dominante in m.

A partire dai dati di età e di volume rilevati nelle aree di saggio è stato calcolato l'incremento medio annuo ($m^3ha^{-1}anno$) dei boschi di cerro e dei querceti di roverella distinti per tipologia strutturale. Inoltre, per ciascuna tipologia strutturale è stata individuata una relazione lineare tra età e volume. Tale relazione è stata utilizzata per stimare l'età dei soprassuoli in funzione della provvigione reale e per stimare il volume delle matricine rilasciate dopo le utilizzazioni forestali.

2.3.3 Compartimentazione forestale

La pianificazione forestale prevede la suddivisione del territorio boscato in "unità di riferimento" per la gestione e la programmazione temporale e spaziale degli interventi colturali. La suddivisione della foresta in unità di riferimento viene realizzata a scala aziendale e/o comprensoriale all'interno del piano di gestione forestale ed è riportata su un'apposita cartografia in scala 1:5.000 – 1:10.000.

Nei casi in cui è richiesta la stima della disponibilità potenziale delle biomasse forestali su aree vaste, spesso accade che la carta della compartimentazione non sia disponibile per il territorio investigato, o lo sia solo su alcune parti. In questi casi è possibile effettuare una simulazione della compartimentazione forestale sulla base di un processo di segmentazione di immagini telerilevate multispettrali. Il risultato della segmentazione è la suddivisione della superficie forestale in oggetti o poligoni che corrispondono ad unità distinte e spettralmente omogenee (Chirici et al., 2003; Chirici e Corona, 2006).

Nel caso di studio qui presentato le superfici boscate incluse nella cartografia forestale sono state suddivise in unità di riferimento attraverso la segmentazione delle bande multispettrali del satellite Landsat 5 TM (ad eccezione della banda 6). In particolare, è stato utilizzato un fattore di scala pari a 7 per generare oggetti di superficie non superiore a 20 ettari; per quanto riguarda l'omogeneità degli oggetti segmentati è stato assegnato un peso maggiore alla omogeneità spettrale (0,9) rispetto alla forma (0,1) degli oggetti generati.

Il limite massimo di superficie delle unità di riferimento è stato fissato pari a 20 ettari sulla base del limite massimo imposto dal Regolamento Forestale della Regione Toscana per le tagliate nei boschi cedui (Art. 20 del Reg.For. n. 48/R).

I limiti delle unità di riferimento così ottenuti sono stati incrociati con i limiti amministrativi comunali. Inoltre, le unità di riferimento sono state incrociate con la carta forestale e con i dati dell'Inventario Forestale della Regione Toscana. Ciascuna unità è stata così classificata in funzione del comune amministrativo di appartenenza, della categoria e tipologia forestale (Tab. 1) e della tipologia strutturale prevalente (ceduo, ceduo composto e fustaia).

2.3.4 Stima della densità della rete viaria

La viabilità incide direttamente sulla reale disponibilità delle biomasse forestali. Le strade forestali agevolano l'accesso al bosco degli operai e delle attrezzature impiegate nel lavoro. Inoltre, la viabilità permette di trasportare il legname utilizzato. Di conseguenza i boschi nei quali si vuole operare devono essere serviti da strade. In linea teorica sono considerati accessibili o ben serviti da strade i boschi dotati di densità minime della rete viabile principale (strade) compresa tra 20 e 25 mha⁻¹ su terreni poco inclinati, e tra 30 e 35 mha⁻¹ su terreni ripidi (Hippoliti e Piegai, 2000).

La densità della rete viabile nell'area di studio è stata valutata utilizzando la viabilità estratta dalle carte tecniche regionali. In particolare sono state utilizzate le strade asfaltate (codice 101) e le strade non asfaltate/campestri (codice 102).

2.3.5 Stima della provvigione reale

La stima spazializzata del volume presente in bosco alla data di esecuzione dei rilievi a terra è stata effettuata combinando i dati rilevati nelle aree di saggio con i dati telerilevati dal satellite Landsat 5 TM. Il metodo di stima utilizzato è il *k-Nearest Neighbors* (*k*-NN).

2.3.5.1 Il metodo *k*-NN

Il metodo *k-Nearest Neighbors* (*k*-NN) permette di stimare, in modo non parametrico, il valore di una variabile *Y* per gli *N* elementi di una popolazione per i quali sia noto il valore vero di variabili ausiliarie (ancillari) correlate con *Y*, posto che per un campione di *n* elementi sia noto anche il valore vero di *Y* (Tomppo, 1991).

In genere la popolazione è costituita dai pixel di un'immagine telerilevata multispettrale, la variabile *Y* è misurata a terra in corrispondenza degli *n* pixel del campione (detto *reference set*) e per tutti gli *N* pixel sono noti i valori di variabili ausiliarie rappresentate dai *digital number* (DN) delle singole bande spettrali, da indici ottenuti dalla combinazione di queste ultime e da altre

eventuali informazioni correlate con i valori di Y (a es., quota, esposizione ecc.).

Il valore incognito \tilde{y}_j della variabile Y per ciascun j -esimo pixel dell'insieme $N-n$ (detto *target set*) può essere stimato come media pesata dei valori di Y misurati in corrispondenza dei k pixels del *reference set* più vicini al j -esimo pixel nello spazio multidimensionale definito dalle variabili ancillari:

$$\tilde{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^k w_{ij} y_i}{\sum_{i=1}^k w_{ij}}$$

dove il peso w può essere posto pari a $1/k$ (in questo caso il valore \tilde{y}_j è pari alla media aritmetica dei valori di Y misurati nei k pixels del *reference set* più vicini al j -esimo pixel) o, come avviene più frequentemente, può essere calcolato in modo inversamente proporzionale alla distanza multidimensionale tra il j -esimo pixel e ciascuno dei k pixel del *reference set* a esso più vicini.

La distanza multidimensionale è misurata nello spazio definito dalle variabili ancillari considerate e può essere calcolata attraverso diversi tipi di misure, la più semplice delle quali è la distanza euclidea (De Maesschalck et al., 2000).

Attraverso una stratificazione per mezzo di informazioni ancillari è possibile limitare la ricerca dei k pixel più vicini ai quei pixel del *reference set* che presentano determinati requisiti (ad es., differenza di quota rispetto al j -esimo pixel non superiore a una determinata soglia).

La scelta delle variabili ancillari, del tipo di distanza multidimensionale e di k è in genere condotta empiricamente attraverso una procedura *Leave-One-Out* (LOO) di valutazione dell'accuratezza delle stime prodotte (Franco-Lopez et al., 2001). Questo tipo di procedura prevede la stima mediante k -NN del valore della variabile Y per ciascun i -esimo pixel del *reference set*, con l'accortezza di escludere, ai fini della stima stessa, il valore vero y_i corrispondente a quel pixel: si ottengono così n valori stimati \tilde{y}_i che confrontati con i corrispondenti valori veri y_i permettono di valutare l'accuratezza delle stime prodotte. Sulla base dei risultati della procedura LOO viene definita la configurazione dell'algoritmo k -NN (in termini di variabili ancillari considerate, tipo di distanza multidimensionale, valore di k) che può fornire, nel caso indagato, le stime più accurate e che quindi viene applicata per la stima di \tilde{y}_j sui pixel del *target set*.

2.3.5.2 Scelta della migliore configurazione k -NN

Sono state utilizzate come variabili ancillari tutte le bande multispettrali del satellite Landsat 5 TM a eccezione della banda 6; inoltre, per valutare le prestazioni di stima dovute all'impiego di differenti *set* di variabili ancillari sono state eseguite le seguenti elaborazioni dei dati telerilevati: le bande satellitari sono state filtrate con filtri passa-basso e a ciascun pixel dell'immagine è stato attribuito un valore di DN pari al valore medio dei DN dei pixels inclusi all'interno di finestre mobili di dimensione 3x3 e 5x5; le bande multispettrali Landsat sono state sottoposte ad un'analisi delle componenti principali (PCA) per estrarre la prima componente (PCA1); le bande Landsat del rosso (TM3) e dell'infrarosso vicino (TM4, TM5) sono state combinate per calcolare l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e l'indice IRI (*Infrared index*):

$$NDVI = \frac{(TM4 - TM3)}{(TM4 + TM3)} \qquad IRI = \frac{(TM4 - TM5)}{(TM4 + TM5)}$$

La scelta delle variabili maggiormente correlate con i valori di provvigione misurati nelle aree di saggio è stata effettuata con un'analisi stepwise (Chirici et al., 2008) di regressione lineare multipla (probabilità di inclusione $F=0,05$; probabilità di esclusione $F=0,1$). Le variabili che sono risultate maggiormente correlate con i valori di provvigione sono state l'indice IRI e la PCA1 calcolate sulle bande satellitari multispettrali precedentemente filtrate con filtro 3x3.

Le variabili così selezionate sono state utilizzate nella procedura LOO per testare diverse configurazioni dell'algoritmo di stima k -NN. Le configurazioni messe a confronto prevedono l'impiego di valori di k compresi tra 1 e 20 e 3 diversi metodi di calcolo della distanza multidimensionale: ED – distanza euclidea (De Maesschalck et al., 2000), MD – distanza di Mahalanobis (Holmstrom et al., 2001), FD – distanza di Mahalanobis modificata con pesi fuzzy (Chirici et al., 2008).

La migliore configurazione k -NN è stata infine utilizzata per effettuare la stima della provvigione reale nei pixels bosco del *target set*. Il valore totale della provvigione reale nell'area di studio è stato calcolato applicando gli stimatori descritti da Corona (2010). Infine, le stime per pixel sono state incrociate con i confini delle unità di riferimento ottenute dalla compartimentazione forestale e per ciascuna unità è stata calcolata la provvigione legnosa come media delle stime k -NN dei pixels inclusi nell'unità stessa.

2.3.6 Stima della biomassa disponibile

La stima della disponibilità della biomassa forestale è stata effettuata con riferimento al ventennio 2011-2030. Il periodo di 20 anni è stato assunto sia come il tempo minimo di durata di un impianto a biomasse forestali, sia perché può rappresentare l'età di utilizzazione (turno) del più probabile, e forse preferibile, modello colturale (ceduo matricinato) per una gestione di questa tipologia di soprassuolo forestale, con funzione prevalente produttiva di biomassa ligno-cellulosica per energia.

La distribuzione spaziale delle utilizzazioni forestali è stata simulata a scala comunale con metodo planimetrico particellare sulla base della compartimentazione forestale. La distribuzione temporale delle utilizzazioni è stata simulata sulla base dell'età dei soprassuoli forestali stimata in funzione della relazione tra età e volume individuata sulle aree di saggio. La provvigione legnosa all'anno taglio è stata calcolata sommando alla provvigione reale l'incremento medio stimato sulle aree di saggio.

2.3.6.1 Scenari gestionali

Sono stati esaminati due scenari di gestione forestale.

Nel primo scenario (scenario A), si è fatto riferimento ad una gestione forestale orientata prioritariamente alla produzione legnosa. In questo caso la funzione protettiva della copertura del bosco nei confronti dell'erosione del suolo viene considerata di livello inferiore. Inoltre, si sono accettati di possibile applicazione i modelli colturali oggi diffusi, ceduo matricinato, ceduo composto e fustaia, indipendentemente dal regime di tutela presente sul territorio. In pratica, nello scenario A, non viene fatta alcuna distinzione tra i sistemi di gestione forestale applicati dentro e fuori le aree protette.

Viceversa, nel secondo scenario (scenario B), si è fatto riferimento ad una gestione forestale attenta alle esigenze di protezione e di conservazione dell'ambiente forestale e del territorio. In particolare, si è tenuto conto dell'importanza di lasciare in foresta i residui delle utilizzazioni forestali per proteggere il terreno dall'erosione idrogeologica e per contenere le perdite nei cicli geo-ecologici. A tale proposito sono stati applicati i coefficienti di prelievo dei residui forestali proposti dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA, 2006), differenziati in funzione della pendenza del terreno (Tab. 2). Si sono considerati poi, indirizzi gestionali differenziati in relazione alla presenza di aree protette (Riserve Naturali Statali, Riserve Naturali Regionali, SIC): i) il ceduo matricinato e il ceduo composto sono previsti esclusivamente per i boschi situati fuori dalle aree protette, ii) il ceduo

matricinato e il ceduo composto all'interno di aree protette sono destinati all'avviamento a fustaia, iii) la fustaia è prevista per i boschi dentro e fuori le aree protette.

Indipendentemente dallo scenario gestionale, per i cedui di età superiore a 50 anni è stato considerato l'avviamento a fustaia ai sensi del Regolamento Forestale della Regione Toscana.

Pendenza del terreno	Prelievo (%)
<5°	75
5-10°	50
10°-25°	15
>25°	0

Tabella 2: Prelievi (in %) dei residui delle utilizzazioni forestali in funzione della pendenza del terreno (EEA, 2006).

2.3.6.2 Prelievi

Il prelievo di massa legnosa è stato quantificato in relazione ai seguenti scenari di utilizzazione:

- per i cedui matricinati di età inferiore ai 50 anni è stato definito un turno minimo di 20 anni; con l'utilizzazione viene prelevata tutta la massa ad eccezione di quella delle matricine stimata sulla base dei dati rilevati nelle aree di saggio;
- per i cedui matricinati in avviamento a fustaia è stato definito un periodo di attesa (30-50 anni) durante il quale non si prevedono utilizzazioni forestali;
- per i cedui composti è stato definito un turno minimo del ceduo di 20 anni; con l'utilizzazione viene prelevata tutta la massa ad eccezione della massa della componente a fustaia stimata sulla base dei dati rilevati nelle aree di saggio;
- nei cedui composti in avviamento a fustaia sono stati applicati diradamenti dal basso di grado moderato prelevando il 12-15% della massa presente all'anno dell'utilizzazione;
- nelle fustaie, considerata l'età relativamente giovane che questi boschi hanno all'interno dell'area di studio (< 85 anni all'età del taglio), sono stati applicati diradamenti dal basso di grado moderato prelevando il 10-12% della massa presente.

Nel caso delle fustaie e dei cedui in avviamento a fustaia è stata considerata la possibilità di ripetere un secondo diradamento, dello stesso tipo e con la

stessa intensità, a distanza di 10 anni dal primo durante il ventennio 2011-2030.

La massa così ottenuta è stata ripartita in legna da ardere e in residui delle utilizzazioni forestali utilizzando la seguente ripartimentazione assortimentale (Bernetti e Fagarazzi, 2003): 77% legna da ardere; 23% residui. Nel caso dello scenario B, la quota di biomassa dendrometrica che rimane in foresta è stata quantificata sulla base dei valori percentuali riportati in Tab. 1.2.

Infine, la massa (M) in metri cubi prelevata con le utilizzazioni forestali è stata trasformata in tonnellate di biomassa (B) al 20% di umidità applicando i coefficienti di espansione della biomassa (*Biomass expansion factors*, BEF) e i fattori di densità basale (*Wood Basic Density*, WBD) differenziati per specie (APAT, 2007), riportati in Tab.3:

$$B = M \times BEF \times WBD$$

Specie	BEF	WBD
Cerro	1.23	0.69
Roverella	1.39	0.65

Tabella 3: Coefficiente di espansione della biomassa (*Biomass expansion factors*, BEF) e i fattore di densità basale (*Wood Basic Density*, WBD) delle specie esaminate.

3 Risultati

3.1 Categorie e tipi forestali

La superficie complessiva dei boschi di querce caducifoglie è risultata di 50.329 ettari, pari al 31% dell'area di studio. La ripartizione in categorie e tipi forestali è riportata in Tab. 4. La distribuzione spaziale delle cerrete e dei querceti di roverella è riportata in Fig. 3.

L'accuratezza tematica della cartografia (*overall accuracy*) a livello di categoria forestale, valutata con una matrice di classificazione degli errori, calcolata sulla base della classificazione attribuita alle 92 aree di saggio visitate a terra, è risultata soddisfacente (88%). Come atteso l'accuratezza della cartografia a livello di tipo forestale è risultata sensibilmente inferiore (70%).

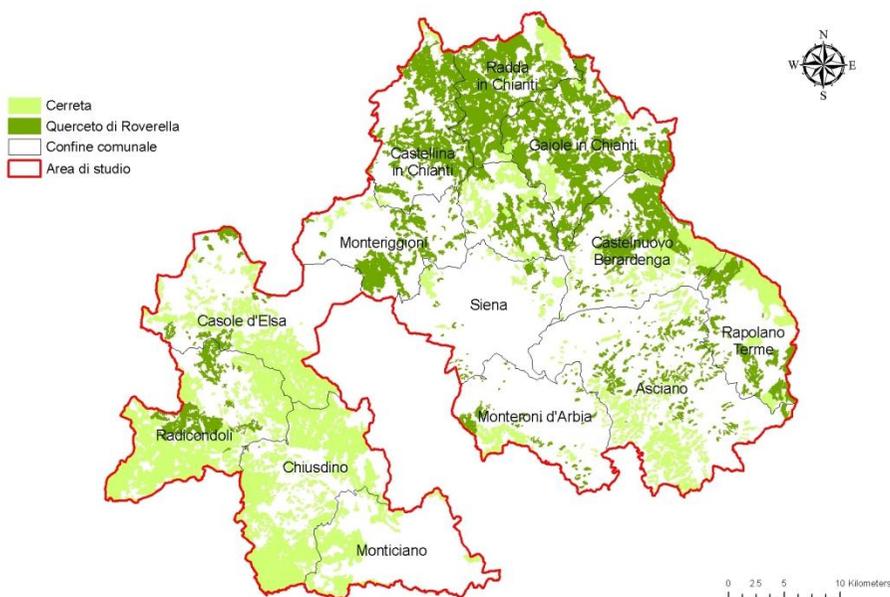


Figura 3: Distribuzione delle cerrete e dei querceti di roverella nell'area di studio.

3.2 Incrementi e relazioni tra età e volume

L'incremento medio annuo calcolato per le cerrete e per i querceti di roverella in funzione della tipologia strutturale, è riportato nelle Tab.5 e Tab.6.

Nel caso delle cerrete è stata individuata una buona relazione tra età e volume per tutte le tipologie strutturali (Tab.7). Nel caso dei querceti di roverella, la relazione tra età e volume è risultata più bassa (Tab.8).

Il valore dell'intercetta della retta di regressione è stato utilizzato per stimare il volume delle matricine dopo le utilizzazioni forestali.

3.3 Densità della rete viaria

La distribuzione della rete viaria nell'area di studio è riportata in Fig. 4. La densità delle strade asfaltate, non asfaltate e campestri è risultata di 25 mha^{-1} . Tale valore indica una buona presenza di strade ai fini delle utilizzazioni forestali.

Categoria/Tipo forestale	Ettari
Cerreta acidofila submediterranea ad eriche	13.394,0
Cerreta mesofila collinare	9.120,0
Cerreta mesoxerofila	5.019,2
Totale	27.533,2
Querceto acidofilo di Roverella a Cerro	2.059,5
Querceto mesofilo di Roverella e Cerro	9.491,1
Querceto mesotermofilo di Roverella	4.228,6
Querceto termofilo di Roverella con Leccio e Cerro	7.016,9
Totale	22.796,1
Totale	50.329,3

Tabella 4: Superficie in ettari delle categorie e dei i tipi forestali.

Categoria forestale	Tipo strutturale	Im
Cerreta	Ceduo matricinato	5,9
Cerreta	Ceduo composto	7,0
Cerreta	Fustaia	4,8

Tabella 5: Incremento medio annuo (Im, $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{anno}$) delle cerrete distinto per tipologia strutturale.

Categoria forestale	Tipo strutturale	Im
Querceto di Roverella	Ceduo matricinato	5,4
Querceto di Roverella	Ceduo composto	5,5
Querceto di Roverella	Fustaia	3,6

Tabella 6: Incremento medio annuo (Im, $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{anno}$) del querceto di roverella distinto per tipologia strutturale.

Categoria forestale	Tipo strutturale	R ²	Vm
Cerreta	Ceduo matricinato	0,54	59,3
Cerreta	Ceduo composto	0,60	61,0
Cerreta	Fustaia	0,56	-

Tabella 7: Coefficiente di determinazione (R²) della relazione lineare tra età e volume delle cerrete e volume (m³ha⁻¹) delle matricine (Vm) dopo il taglio.

Categoria forestale	Tipo strutturale	R ²	Vm
Querceto di Roverella	Ceduo matricinato	0,50	23,8
Querceto di Roverella	Ceduo composto	>0,1	83,0
Querceto di Roverella	Fustaia	>0,1	-

Tabella 8: Coefficiente di determinazione (R²) della relazione lineare tra età e volume dei querceti di roverella e volume (m³ha⁻¹) delle matricine (Vm) dopo il taglio.

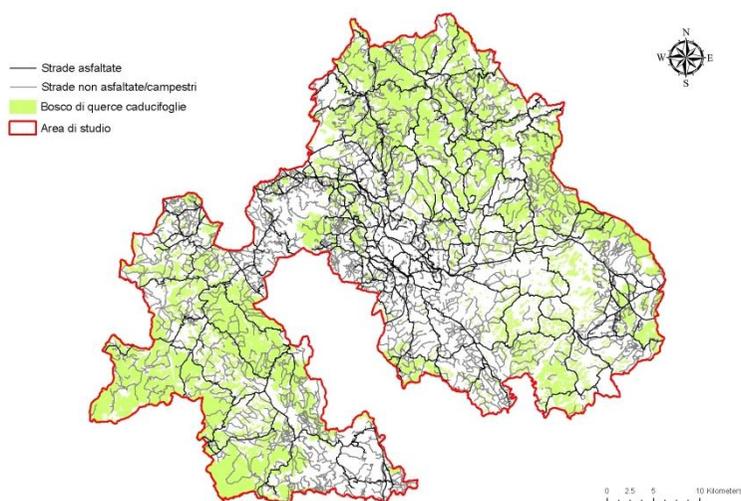


Figura 4: Distribuzione della rete viaria nell'area di studio.

3.4 Provvigione reale

La migliore configurazione dell'algoritmo k -NN, valutata con procedura LOO, è risultata la seguente: utilizzo dell'indice IRI e della PCA1 come variabili ausiliarie calcolate sulle bande satellitari multispettrali filtrate con filtro passa basso 3×3 ; utilizzo della distanza Euclidea come metodo di calcolo della distanza multidimensionale; $k=4$ (Fig. 5). Con questo tipo di configurazione, le stime di provvigione a livello di pixel sono caratterizzate da un errore quadratico medio relativo (Frazakas et al., 1999) del 45%. Errori simili sono stati ottenuti in altri studi condotti in Italia (Chirici et al., 2008; Lasserre et al., 2011).

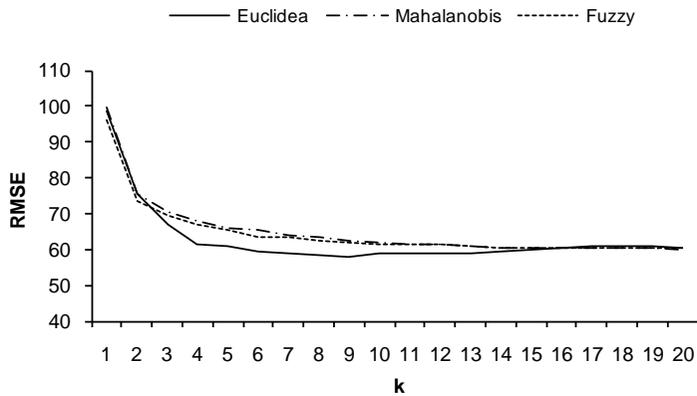


Figura 5: Risultati del Leave One Out ottenuti con l'indice IRI e la PCA1 calcolate sulle bande satellitari filtrate con filtro 3x3.

La migliore configurazione k -NN è stata applicata per ottenere la stima spazializzata della provvigione reale (m^3ha^{-1}) a livello di pixel all'anno 2010 (Fig. 6). Il volume medio misurato a terra nelle aree di saggio è risultato di $136 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, con un minimo di $18 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ e un massimo di $285 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$. Il volume medio stimato con k -NN sui pixel del *target set* è risultato di $152 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, con un minimo di $66 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ e un massimo di $221 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$. La stima del valore totale della provvigione (Corona, 2010) calcolata con riferimento all'anno 2010 è risultata di $7.628.207,7 \text{ m}^3$; l'errore standard di stima è risultato del 3,9%. La ripartizione della provvigione totale nei comuni oggetto di studio è riporta in Fig. 1.7.

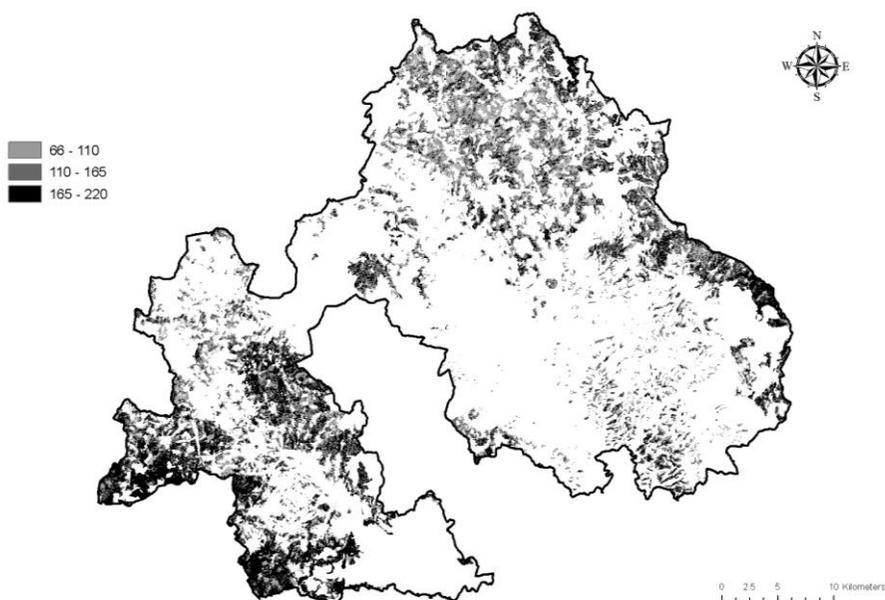


Figura 6: Stima per pixel della provvigione reale (m^3ha^{-1}) all'anno 2010.

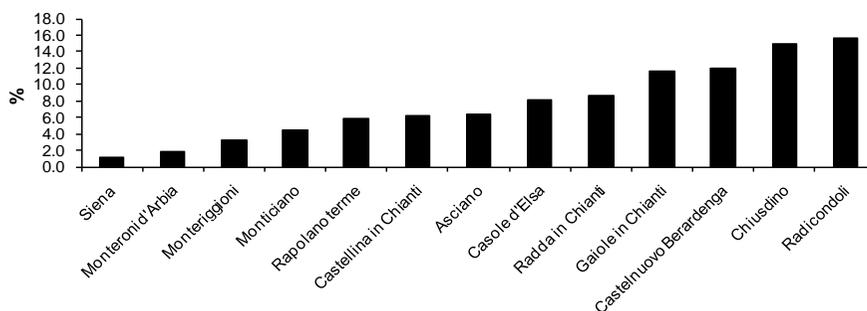


Figura 7: Provvigione totale ($7.628.207,7 \text{ m}^3$) all'anno 2010 ripartita nei comuni dell'area di studio.

3.5 Disponibilità della biomassa forestale

Nel caso dello scenario A, la stima della biomassa forestale potenzialmente disponibile nell'area di studio nel periodo 2011-2030 è risultata pari a 6.217.149 tonnellate.

Nel caso dello scenario B la biomassa disponibile si riduce del 30% rispetto alla biomassa stimata con lo scenario A. In particolare, la disponibilità di legna da ardere si riduce del 14% mentre quella dei residui forestali dell'82%.

Le stime delle disponibilità annue di biomassa a livello di area di studio e comunale sono riportate rispettivamente nella Fig. 8 e nella Fig. 9.

La Fig. 10 e la Fig. 11 mostrano, rispettivamente, le stime di biomassa ottenute a livello comunale e nelle unità di compartimentazione forestale considerando lo scenario gestionale B.

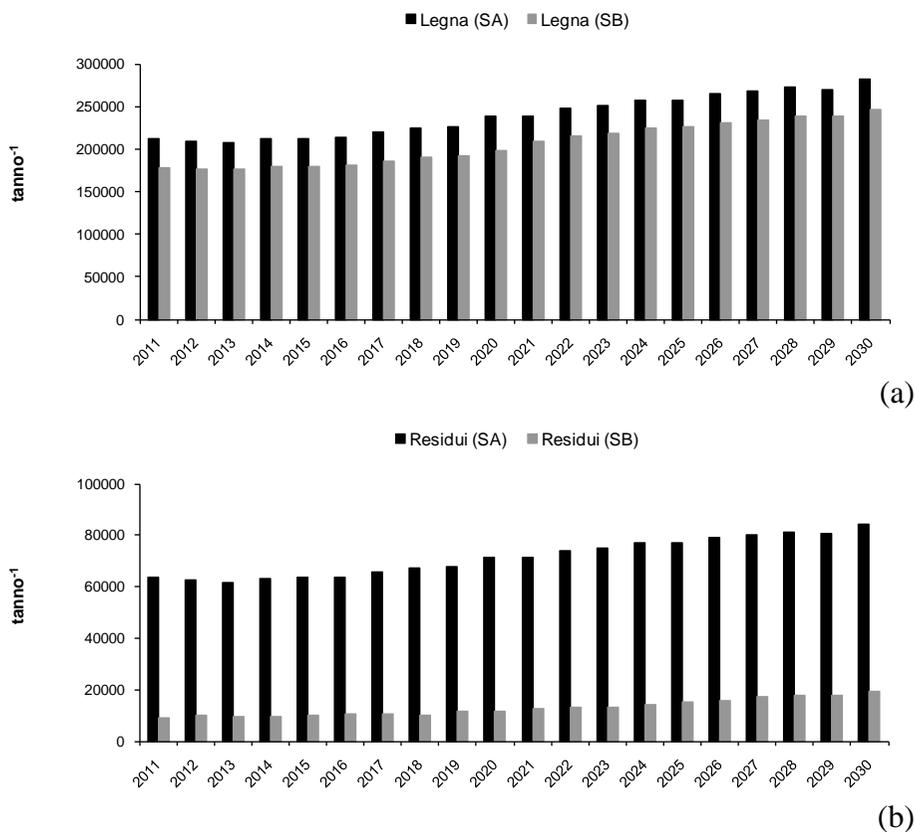
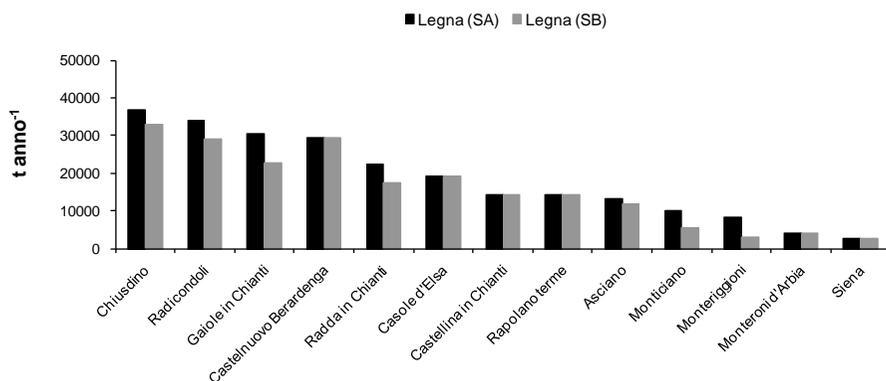
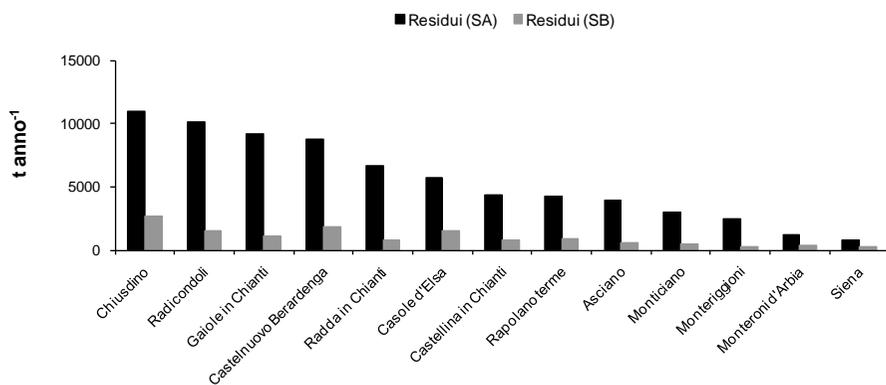


Figura 8: Stima della disponibilità annua di biomassa forestale (in tonnellate) distinta in legna da ardere (a) e in residui delle utilizzazioni forestali (b) secondo due scenari gestionali: scenario A (SA), scenario B (SB).

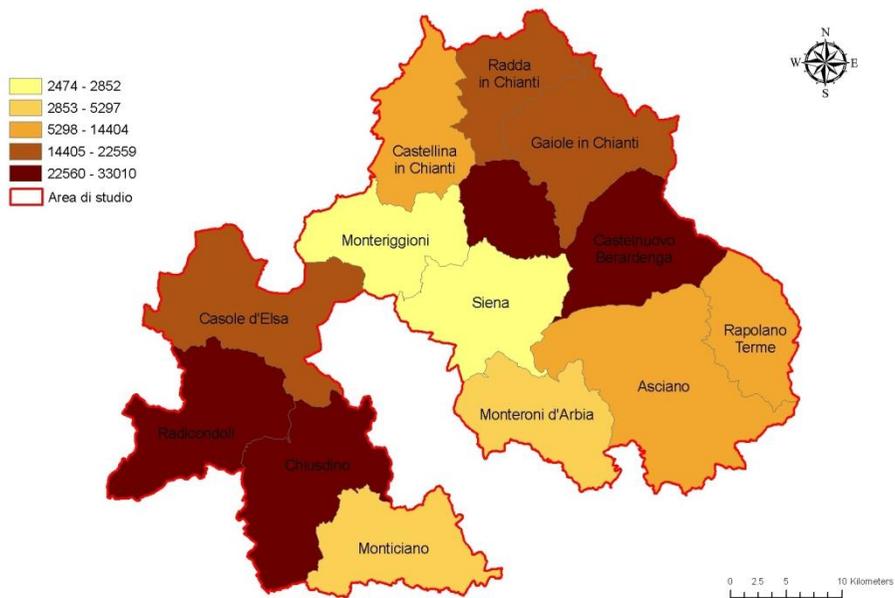


(a)



(b)

Figura 9: Stima per comune della disponibilità annua di biomassa forestale (in tonnellate) distinta in legna da ardere (a) e in residui delle utilizzazioni forestali (b) secondo due scenari gestionali: scenario A (SA), scenario B (SB).

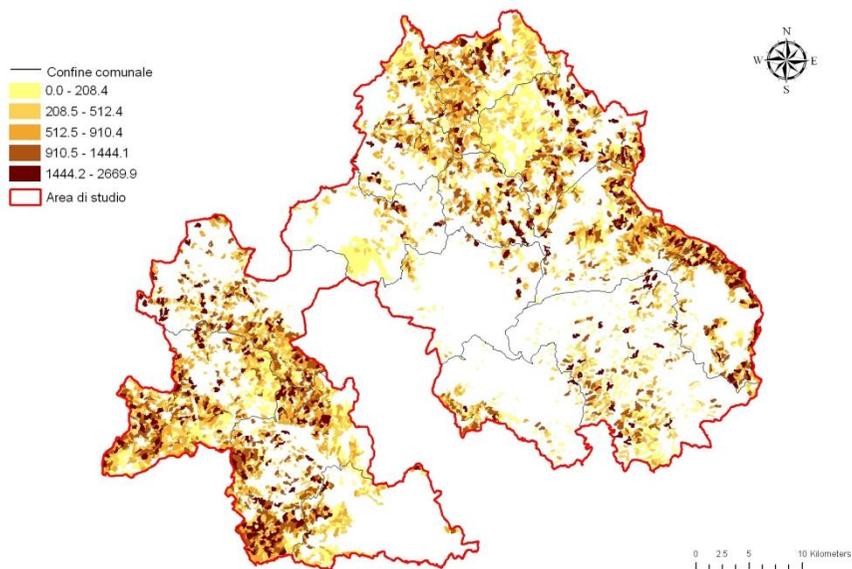


(a)

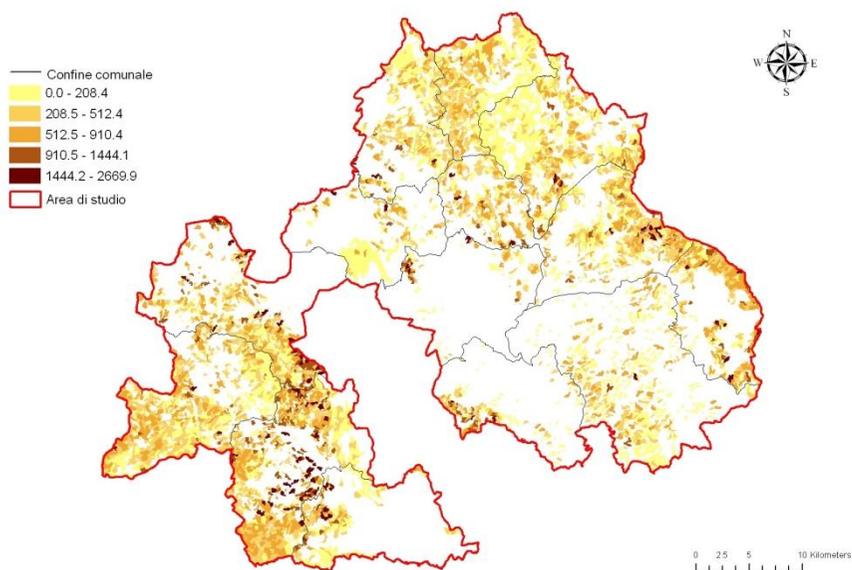


(b)

Figura 10: Scenario B: stima per comune della disponibilità annua di biomassa forestale (in tonnellate) distinta in legna da ardere (a) e in residui delle utilizzazioni forestali (b).



(a)



(b)

Figura 11: Scenario B: stima spazializzata sulle unità della compartimentazione forestale della disponibilità annua di biomassa forestale (in tonnellate) distinta in legna da ardere (a) e in residui delle utilizzazioni forestali (b).

4. Discussione e conclusioni

Lo studio ha evidenziato in primo luogo una discreta produttività dei querceti a foglia caduca presenti nella Provincia di Siena. Si sono riscontrati incrementi medi annui compresi tra 3,3 e 7,0 metri cubi ad ettaro. Le cerrete risultano generalmente più produttive dei soprassuoli dominati dalla roverella di circa il 30%. I cedui, per regimi colturali di 15-25 anni, hanno dimostrato una superiorità del 50-60% in termini ancora di incremento medio, nei confronti delle fustaie le quali, nella fase successiva di maturità, occupano superfici molto ridotte.

La disponibilità di dati del passato sulla produttività di questi boschi è assai scarsa a livello nazionale ed ancor più a livello della Regione Toscana. La letteratura scolastica del secolo scorso ci indica valori incrementali inferiori di circa il 30-40% (Taruffi, 1904; Pavari, 1934; de Philippis, 1955). Un confronto è difficile, ma possiamo indicare, in questo momento, una tendenza generale di aumento della biomassa legnosa dei querceti dovuti a vari fattori, tra i quali il rallentamento delle utilizzazioni e l'aumento dell'età media del soprassuolo, che oggi si pone nel periodo in cui i valori dell'incremento corrente sono massimi.

In relazione allo scopo di questo lavoro, la situazione ai fini della disponibilità di biomassa appare favorevole, e per tale motivo il processo di trasformazione della biomassa legnosa prodotta in foresta in energia, riposa su di una base abbastanza sicura. Del resto non vengono scoperte particolari novità se fino alla metà del secolo scorso il legno e derivati avevano, a livello territoriale, un ruolo essenziale.

Resta aperto comunque il problema della disponibilità effettiva della biomassa forestale per questa destinazione.

E' noto come negli ultimi anni sia sempre più diffuso il riconoscimento delle funzioni multiple delle foreste e sempre più sia documentato come l'efficienza funzionale di queste, e per certi aspetti la loro naturalità, sia elemento insostituibile per la sopravvivenza dell'umanità intera. La presa di coscienza globale da parte di tutti i popoli e il riconoscimento di intenti generali che scaturisce dalla sottoscrizione del Protocollo di Kyoto ne sono la dimostrazione più lampante.

In effetti l'utilizzazione intensiva della biomassa legno anche per scopi energetici crea un forte dualismo, ad esempio, con la funzione di serbatoio di Carbonio che ha la foresta. In questo caso è l'intero ecosistema forestale che deve essere tutelato in quanto nel suolo è riposto il processo più potente di immagazzinamento del Carbonio.

Un recente studio (Schmidt et al., 2011), condotto congiuntamente da un gruppo di ricercatori di 35 Dipartimenti universitari negli Usa, indica che le foreste di 48 Stati americani riescono a catturare il 40% del carbonio emesso dall'impiego di combustibili fossili nell'attività industriale del paese. Questi nuovi dati forniscono una delle valutazioni più accurate eseguite nel settore e valorizzano in modo ancora più incisivo le funzioni delle foreste.

Tutto ciò per mettere in luce come in un contesto di compromesso, che comunque non può metter in secondo ordine l'estensione della superficie delle foreste e la funzionalità di queste, si debba affrontare, con analisi critica costruttiva, la possibilità di studiare e realizzare filiere bosco-legno-energia che siano sostenibili da un punto di vista ecologico, economico e sociale.

Questo lavoro ha preso in considerazione alcuni aspetti coinvolti nella definizione dei più efficaci percorsi operativi di filiera. Ha inserito e sviluppato, anche se in forma ridotta per limiti di tempi e di mezzi, il concetto di disponibilità della massa legnosa attraverso alcune indagini su alcuni fattori di ostacolo. In particolare si sono considerate le condizioni orografiche delle aree boscate (pendenza dei versanti) e l'intensità della viabilità, elementi strettamente correlati tra sé e con la facilità delle utilizzazioni. Tra l'altro è risultata evidente l'importanza delle tecniche di utilizzazione ed esbosco, che in Toscana sono generalmente antiquate e condotte da imprese a basso tasso di imprenditorialità.

I rilievi hanno poi fornito la distribuzione territoriale della biomassa che esprime anche la fertilità della stazione, ovvero la consistenza del lotto boschivo sull'unità di superficie. Questi elementi correlati con le dimensioni aziendali della proprietà, possono allargare o restringere la reale disponibilità della biomassa.

La metodologia adottata nello studio, che in parte riprende alcuni approcci sviluppati per indagini simili (Lasser et al., 2011; Nocentini et al., 2011), prevede la combinazione di dati inventariali e di dati telerilevati per la stima della provvigione reale, nonché le applicazioni di modellistica spaziale su base GIS, per la stima nel tempo delle disponibilità di biomasse forestali secondo diversi scenari gestionali. Il metodo proposto, che ha fornito risultati molto soddisfacenti anche in relazione a gli scopi previsti dal settore di studio, può essere integrato e ulteriormente migliorato tenendo conto anche di valutazioni puntuali di carattere economico. In riferimento è sentita la necessità di disporre di informazioni dettagliate sui ritmi incrementali delle specie in relazione alla loro autoecologia ed alle caratteristiche ambientali.

Nei confronti dell'intero progetto emergono alcune considerazioni che possono contribuire a fornire aiuto alla individuazione della più efficace fattibilità.

Per quanto attiene la componente della produzione di biomassa in foresta, occorre promuovere la costituzione di filiere corte bosco-legno-energia, ovvero filiere che si basino sull'utilizzo di biomassa prodotta localmente (nell'intorno di 20-25 km dall'impianto) e sull'impiego di impianti di piccola e media potenza. Può essere di interesse al riguardo analizzare l'esperienza svedese nelle filiere corte della produzione di cellulosa la cui efficacia è stata valutata in senso positivo, per il più basso impatto ambientale prodotto da questo tipo di trasformazione industriale e dalle maggiori possibilità offerte per una permanenza nel territorio, anche a presidio dello stesso, della forza lavoro.

È evidente quanto sia importante sviluppare sistemi di valutazione ancora più efficaci della disponibilità di biomasse forestali. I rischi connessi ad una errata valutazione di questa sono: a) realizzare impianti a biomasse che poi sono sottoutilizzati; b) ricorrere all'utilizzo di biomassa che non è prodotta localmente vanificando così la logica della filiera corta; c) utilizzo eccessivo delle risorse forestale.

Ciò comporta l'esigenza di potere disporre di dati aggiornati e attendibili sulla distribuzione e la consistenza delle risorse forestali. In questo senso è importante il contributo che possono dare gli inventari forestali in un contesto spazio/tempo.

Bibliografia

- APAT, 2007. Italian Greenhouse Gas Inventory, 1990-2005. National Inventory Report 2007. APAT, Miscellanea/2007.
- Bernetti, I., Fagarazzi, C., 2003. BIOSIT: una metodologia GIS per lo sfruttamento efficiente e sostenibile della “risorsa biomassa” a fini energetici. DE, DEART, ETA.
- Chirici, G., Barbati, A., Corona, P., Marchetti, M., Travaglini, D., Maselli, F., Bertini, R., 2008. Non-parametric and parametric methods using satellite images for estimating growing stock volume in alpine and Mediterranean forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 112, 2686–2700.
- Chirici, G., Corona, P., 2006. Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali. Aracne Editrice, Roma.
- Chirici, G., Corona, P., Travaglini, D., 2003. Sperimentazione di tecniche di classificazione object-oriented di immagini quickbird a fini forestali. *L'Italia Forestale e Montana* 4, 231-250.
- Corona, P., 2010. Integration of forest mapping and inventory to support forest management. *iForest* 3, 59-64. [online: 2010-05-17] URL: <http://www.sisef.it/iforest/show.php?id=531>.
- De Maesschalck, R., Jouan-Rimbaud, D., Massart, D.L., 2000. The Mahalanobis distance. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 50, 1–18.
- de Philippis, A., 1955. I querceti a foglia caduca. Atti del Congresso Nazionale di Selvicoltura. Accademia Italiana di Scienze Forestali, 133-158. Firenze.
- EEA, 2006. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? European Environmental Agency, 2006. Report 7/2006, p. 67.
- Franco-Lopez, H., Ek, A.R., Bauer, M.E., 2001. Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77, 251-74.
- Fazakas, Z., Nilsson, M., Olsson, H., 1999. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. *Agricultural and Forest Meteorology* 98–99, 417–425.
- Hippoliti G., Piegai F., 2000. La raccolta del legno. Tecniche e sistemi di lavoro. Compagnia delle Foreste, Arezzo, p. 157.
- Holmstrom, H., Nilsson, M., Ståhl, G., 2001. Simultaneous estimations of forest parameters using aerial photograph-interpreted data and the k nearest neighbor method. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16, 67–78.

- INFC, 2008. Le stime di superficie – Risultati per Macroaree e Province. Autori P. Gasparini, L. Di Cosmo, C. Gagliano, G. Mattiuzzo e G. Tabacchi. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAAF – Ispettorato Generale Corpo Forestale dello Stato, CRA-MPF, Trento.
- Lasserre, B., Chirici, G., Chiavetta, U., Garfi, V., Tognetti, R., Drigo, R., DiMartino, P., Marchetti, M., 2011. Assessment of potential bioenergy from coppice forests through the integration of remote sensing and field surveys. *Biomass and Bioenergy* 35, 716-724.
- Nocentini, S., Puletti, N., Travaglini, D., 2011. Pianificazione e uso sostenibile delle risorse forestali nella filiera legno-energia: una proposta metodologica. *L'Italia Forestale e Montana*. In corso di stampa.
- Pavari, A., 1934. Il problema dei querceti in Toscana. *Atti Accademia dei Georgofili*, 31. Firenze.
- Regione Emilia Romagna, 2000. Tavole dendrometriche regionali. Assessorato Agricoltura, Ambiente e Sviluppo Sostenibile. Direzione Generale Programmazione e Pianificazione Urbanistica. Servizio Paesaggio, Parchi e Patrimonio Naturale. Ufficio Risorse Forestali. Centro Stampa della Giunta Regionale Emilia Romagna, p. 82.
- Schmidt, A., Hanson, C., Kathilankal, J., Law, B.E., 2011. Classification and assessment of turbulent fluxes above ecosystems in North-America with self-organizing feature map networks. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 508-520.
- Taruffi, D., 1904. Studi sulla produzione cedua forestale in Toscana. Firenze
- Tomppo, E., 1991. Satellite image-based national forest inventory of Finland. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 28, 419-424.

Fonti d'informazione

Le sezioni CTR, le ortofoto digitali e i dati dell'Inventario Forestale della Regione Toscana sono stati gentilmente concessi dalla Regione Toscana – Sistema Informativo per il Governo del Territorio e dell'Ambiente.

La carta di uso del suolo della Provincia di Siena è stata cortesemente messa a disposizione dal Consorzio LaMMA.

La scena satellitare Landsat 5 TM è stata acquisita dall'archivio on line dello U.S. Geological Survey (USGS).