

Integrazione degli strumenti cartografici e inventariali a supporto della pianificazione e gestione delle risorse forestali

Piermaria Corona

Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse, Università della Tuscia, Viterbo.

Negli ultimi anni si registra un crescente interesse per una migliore conoscenza quantitativa e qualitativa degli ecosistemi forestali: le esigenze conoscitive sono condizionate dal contesto globale, in relazione alla conservazione della biodiversità, alla possibilità di modificare la quantità di carbonio presente nell'atmosfera, ecc., ma ciò ha riflessi anche sulle applicazioni a livello locale, quali quelle direttamente connesse alla pianificazione e alla gestione delle risorse forestali.

Il progresso tecnologico ha reso disponibili sofisticati strumenti di rilevamento territoriale e ambientale che consentono di acquisire informazioni significative con sufficiente accuratezza in tempi relativamente brevi e, parallelamente, gli sviluppi metodologici garantiscono la possibilità di elaborare e gestire tali informazioni in modo sempre più efficiente (KÖHL ET AL., 2006). Di prioritaria importanza a fini pianificatori e gestionali è la compatibilità tra analisi inventariali e dati ottenibili da cartografia tematica. Di fatto, ai fini della programmazione politica e della pianificazione gestionale il flusso permanente di dati inventariali diventa particolarmente efficace qualora sia possibile una agevole identificazione spaziale delle informazioni, soprattutto se questa identificazione permette di collegarsi alla cartografia tematica. In questa prospettiva, il presente lavoro ha lo scopo di delineare le principali potenzialità operative di integrazione tra dati inventariali e cartografici e offrire elementi di riflessione in merito, a supporto della pianificazione e gestione delle risorse forestali.

Rappresentazione cartografica delle coperture forestali

La rappresentazione cartografica delle coperture forestali a supporto delle applicazioni gestionali è realizzata a una scala di lavoro in genere pari a 1:10.000 (unità minima mappabile pari a 0.5 ha), e quindi è necessaria la disponibilità di immagini telerilevate ad alta risoluzione spaziale.

Fino a tempi recenti le fotoaeree hanno rappresentato il riferimento operativo primario. Negli ultimi anni si è passati da immagini in formato analogico a immagini in formato digitale, cioè dal fotomosaico al "tappeto" di pixel, con vantaggi non solo in fase di acquisizione ma anche e soprattutto di gestione ed elaborazione dei dati.

Un esempio significativo è rappresentato dalla camera metrica digitale ADS40, con sensori CCD lineari, pancromatici e multispettrali, a elevata capacità radiometrica e accuratezza geometrica submetrica in relazione alle normali quote di volo aereo; le aree rilevate sono registrate contemporaneamente (coregistrazione) nelle bande del pancromatico, colore (RGB) e dell'infrarosso vicino; inoltre, i sensori pancromatici e quelli della banda del visibile sono disposti sul piano focale in modo da registrare lo stesso punto secondo tre distinti angoli di osservazione (forward, nadir, backward) rispetto alla direzione di volo, garantendo la possibilità di una visione triscopica degli elementi territoriali.

Risoluzioni geometriche submetriche possono essere raggiunte anche con sensori multispettrali montati su piattaforme aree leggere (a es. Sky Arrow), come nel caso del sistema ASPIS (PAPALE E BARBATI, 2005), basato su 4 sensori CCD che acquisisce immagini digitali multispettrali attraverso filtri interferenziali intercambiabili e selezionabili in volo. Un tipico impiego è, a esempio, il rilevamento del perimetro di aree percorse da incen-

dio nei casi in cui la scarsa accessibilità, l'eccessiva ampiezza dell'area bruciata o la sua configurazione a macchia di leopardo (*patchy fires* con interclusione e giustapposizione di zone bruciate e non bruciate) non consenta un agevole rilevamento a terra con GPS.

Nel caso del monitoraggio multitemporale di territori vasti l'acquisizione da piattaforme aeree è in genere meno efficiente (in termini di rapporto tra qualità dell'informazione acquisita e costi totali) rispetto a quella da immagini satellitari. Per la realizzazione di cartografie a grande scala (1:5.000, 1:10.000) sono indicati i dati satellitari a risoluzione metrica o submetrica nella banda pancromatica (Formosat, IKONOS, QuickBird, OrbView-3), mentre per scale di medio dettaglio (1:25.000, 1:50.000) il dato Spot5 rappresenta attualmente il miglior compromesso in termini di rapporto qualità-costi. Di tutto interesse sono le potenzialità operative del sensore WorldView, evoluzione di QuickBird, con risoluzione spaziale di 50 cm nel pancromatico e 2 m nel multispettrale e che, oltre alle bande spettrali del rosso, del blu, del verde, dell'infrarosso vicino e del pancromatico, rileva anche in altre quattro bande (coastal, giallo, rosso lontano, infrarosso vicino 2): l'incrementata suddivisione spettrale consente una migliore analisi dello stato della vegetazione (a es. contenuto idrico) e del terreno.

A livello professionale la procedura comunemente adottata per la mappatura delle coperture forestali è l'interpretazione manuale a video: immagini in pancromatico e/o a colori naturali o a falso colore (eventualmente fuse con la banda pancromatica) vengono utilizzate come base per la digitalizzazione degli oggetti vettoriali (poligoni) ai quali il fotointerprete associa l'informazione tematica desiderata. La procedura è ovviamente condizionata da un certo grado di soggettività, sia per quanto riguarda la classificazione tematica dei poligoni delineati sia per quanto riguarda la delineazione dei poligoni stessi.

Per superare questo limite sono stati sviluppati metodi automatici (unsupervised) e semiautomatici (supervised) di classificazione delle immagini telerilevate multispettrali, nel tentativo di ottenere prodotti più oggettivi, in tempi più brevi e a costi più contenuti. I metodi supervised si basano sull'acquisizione di un certo numero di pixel di training per ciascuna classe del sistema di nomenclatura adottato con la verifica a terra della classe in cui ricadono, in modo da creare una firma spettrale per ogni classe considerata. La riflettanza multispettrale (distribuzione dei valori di digital number nelle bande spettrali) dei pixel da classificare viene poi confrontata con le firme spettrali elaborate e ciascun pixel incognito viene attribuito alla classe tematica con firma più

simile a tale riflettanza. I metodi unsupervised non richiedono la fase di acquisizione dei pixel di training: la classificazione è basata sul raggruppamento dei pixel in base alla similarità della loro riflettanza multispettrale (cluster analysis) e le classi identificate vengono etichettate direttamente dall'operatore. Nel caso di immagini satellitari a risoluzione metrica e submetrica anche questi metodi sono caratterizzati da vari limiti (per maggiori dettagli, vd. CHIRICI E CORONA, 2006) e negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche di classificazione alternative, quali quelle cosiddette object-oriented. A differenza dei sopra menzionati metodi pixel-oriented, che classificano separatamente ciascun pixel dell'immagine, con l'approccio object-oriented ciò che viene classificato sono i poligoni generati attraverso un preventivo processo di segmentazione delle immagini stesse. Il vantaggio risiede nel maggior contenuto informativo associabile ai poligoni rispetto a quello associabile ai singoli pixel dell'immagine, riguardante a esempio posizione, geometria e forma dei poligoni stessi oltre ai valori spettrali dei pixel in essi inclusi. Il processo di segmentazione delle immagini può essere realizzato automaticamente in modo oggettivamente replicabile e più veloce della digitalizzazione manuale. Il risultato della classificazione è di natura vettoriale, in contrapposizione a quello raster derivante dall'approccio per pixel: il prodotto quindi è più vicino alle aspettative degli utenti finali e ai canoni rappresentativi della cartografia tematica ottenuta per interpretazione manuale.

Una frontiera di attuale interesse per le molteplici potenzialità a supporto della pianificazione e gestione delle risorse forestali a scala locale è infine quella dei dati laser (Lidar - light detection and ranging) rilevati da piattaforme aereotrasportate: consentendo misure ipsometriche e della ampiezza e profondità delle chiome, questo tipo di dati può essere efficacemente impiegato per la rappresentazione strutturale e la stima della biomassa dei soprassuoli forestali: questo aspetto è oggetto di sperimentazioni volte a mettere a punto protocolli di rilevamento affidabili da un punto di vista operativo e a rendere compatibili i costi complessivi, ancora relativamente alti per le applicazioni forestali (CORONA E FATTORINI, 2008).

Inventari forestali

Un inventario forestale si configura come la descrizione statistica di attributi quantitativi e qualitativi che caratterizzano le risorse forestali di un dato territorio. In particolare, l'inventario forestale consiste nel

rilevamento campionario delle cenosi forestali e dei sistemi naturali o seminaturali ad esse dinamicamente collegati, a livello di popolazioni, habitat, tipi forestali, ecosistemi e paesaggio, generalmente inquadrati nel contesto di una data unità amministrativa o politica (comprensorio, regione, nazione, ecc.).

Ai molteplici tipi di inventari forestali sono associate differenti modalità di configurazione e implementazione (BIANCHIO E TOSI, 1995). Vi è comunque un carattere metodologico comune, che riguarda la loro validità e correttezza sotto il profilo statistico: la localizzazione delle unità di sondaggio avviene su basi oggettive mediante rigorose regole di selezione probabilistica, cosicché è possibile ottenere una stima delle incertezze che accompagnano le informazioni prodotte (OLSEN E SCHREUDER 1997; CORONA E TABACCHI, 2001).

Relazioni tra inventari e cartografia forestale

Elemento chiave dei sistemi di monitoraggio forestale è la capacità di integrare fonti informative tra loro diverse. In particolare, le relazioni tra inventari e cartografia forestale possono essere inquadrare nella prospettiva di:

- utilizzo della cartografia tematica per la stratificazione del campione inventariale, al fine di aumentare, a parità di altre condizioni, la precisione delle stime ritraibili;
- accoppiamento di variabili ancillari, prevalentemente ottenute da telerilevamento e i cui valori sono noti in continuo per l'intero territorio oggetto di interesse, ai dati inventariali al fine di produrre cartografie tematiche, con particolare riferimento alla mappatura di attributi quantitativi;
- accoppiamento di variabili ancillari, prevalentemente ottenute da telerilevamento e i cui valori sono noti in continuo per l'intero territorio oggetto di interesse, ai dati inventariali al fine di incrementare la precisione delle stime, con particolare riferimento a situazioni in cui la numerosità campionaria è relativamente limitata;
- utilizzo di dati inventariali come informazioni a priori ai fini di classificazioni tematiche;
- utilizzo di dati inventariali per la correzione statistica delle stime di superficie ottenute da cartografia.

Utilizzo della cartografia tematica per la stratificazione del campione inventariale

Uno degli schemi di rilevamento campionario maggiormente impiegati nell'inventariazione delle ri-

sorse forestali è rappresentato dal campionamento stratificato: esso consiste nella suddivisione del territorio oggetto di interesse in porzioni omogenee, dette strati, e nell'estrazione di unità di sondaggio indipendentemente in ciascun strato. Se gli strati sono configurati in modo tale che la variabilità intrastrato degli attributi oggetto di inventario è minore rispetto alla variabilità tra gli strati, con questo schema di campionamento è possibile, a parità di costi, ottenere una precisione di stima significativamente maggiore rispetto a un campionamento semplice.

La suddivisione in strati può essere derivata direttamente da una carta tematica, dove gli strati sono rappresentati dalle classi tematiche o da gruppi di classi tematicamente affini. La procedura fa riferimento a una stratificazione per poligoni e prevede le seguenti fasi: (1) calcolo della proporzione relativa dell'area di ciascun singolo strato rispetto all'intero territorio cartografato; (2) assegnazione di un dato numero di unità di sondaggio a ciascun strato, in genere proporzionalmente alla superficie complessiva dello strato così come misurata sulla cartografia; (3) localizzazione delle unità di sondaggio indipendentemente in ciascun strato, secondo modalità casuale o sistematica; (4) stima per ciascun singolo strato dei parametri statistici (in genere, media e valore totale e loro varianze) degli attributi oggetto di interesse; (5) aggregazione delle stime ottenute per ciascun singolo strato al fine di ottenere la stima a livello di intero territorio. Per dettagli sulla procedura e sugli stimatori si rimanda a (CORONA 2000).

Accoppiamento di variabili ancillari a dati inventariali per la spazializzazione di attributi quantitativi

Lo studio delle relazioni tra informazioni spettrali acquisite da sensori trasportati da piattaforme aeree o satellitari e gli attributi biometrici della vegetazione forestale (provvidone legnosa, biomassa, incremento annuale di volume legnoso, ecc.) ha acquisito negli ultimi anni particolare rilevanza: avendo a disposizione strumenti quali immagini digitali multispettrali e inventari basati su unità di sondaggio a terra è possibile procedere alla estensione (spazializzazione) dei valori inventariali all'intera superficie territoriale di ciascuna classe tematica di copertura forestale, potendo così ottenere una rappresentazione cartografica in continuo degli attributi di interesse.

A tal fine, il territorio considerato viene assimilato a una matrice di celle elementari (pixel) di dimen-

sione unitaria pari alla risoluzione geometrica della immagine telerilevata. La variabile oggetto di interesse Y è misurata a terra sulle unità di sondaggio inventariali; gli n pixel corrispondenti a queste unità costituiscono il cosiddetto *reference set*; per tutti gli N pixel della matrice sono inoltre noti i valori di variabili ancillari (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 Y (a es. quota, esposizione, tipo di suolo, precipitazioni, ecc.).

Gli algoritmi di spazializzazione operano secondo approcci correlativi, di tipo parametrico o non parametrico, che consentono di predire, in base ai valori delle variabili telerilevate sull'intera superficie, il valore dell'attributo oggetto di interesse nei pixel in corrispondenza dei quali non si hanno unità di sondaggio a terra.

Un approccio non-parametrico molto utilizzato è k-Nearest Neighbors (kNN) le cui applicazioni operative sono consolidate e mature anche a livello professionale forestale. Il valore incognito della variabile Y per ciascun j -esimo pixel è 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:

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

dove y_i è il valore di Y misurato a terra in corrispondenza dell' i -esimo pixel del *reference set*. Il peso w può essere posto pari a $1/k$ (in questo caso il valore predetto è pari alla media aritmetica dei valori di Y misurati nei k pixel 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, mediante metriche quali la distanza euclidea o quella di Mahalanobis. All'aumentare di k l'accuratezza della stima dei valori predetti per i singoli pixel tende in genere ad aumentare; con valori alti di k si tende, però, a ottenere una variabilità nei valori predetti minore di quella reale, a causa dell'effetto di livellamento prodotto dalla ponderazione. 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), che prevede la stima mediante kNN del valore della variabile Y per ciascun i -esimo pixel del *reference set* (con l'ovvia accortezza di escludere, ai fini della stima stessa, il valore vero y_i corrispondente a quel pixel): si ottengono così n valori predetti che confrontati con i corrispondenti valori veri permettono di valutare l'accuratezza delle stime prodotte. Sulla base dei risultati della procedura LOO viene empiricamente identificata la configurazione dell'algoritmo kNN (in termini di variabili ancillari considerate, tipo di distanza multidimensionale, valore di k) che fornisce, nel caso indagato, le stime più accurate.

Per quanto riguarda gli approcci parametrici, quello più utilizzato è la regressione generalizzata (GREG). In questo caso la stima del valore di Y per ciascun pixel avviene tramite la regressione istituita tra Y e le variabili ancillari utilizzando i valori del *reference set*. Il modello di riferimento è in genere lineare multiplo del tipo

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_q X_q$$

dove $X_1 \dots X_q$ sono le variabili ancillari.

A parità di altre condizioni, questa procedura è in genere più efficace di quella kNN, ma richiede non solamente che siano soddisfatti gli assunti alla base della regressione lineare multipla (Corona, 1995) ma anche che siano imposti vincoli alle predizioni per evitare che siano predetti valori di Y al di fuori del possibile campo di variazione (a es. valori negativi).

Accoppiamento di variabili ancillari a dati inventariali ai fini del miglioramento delle stime inventariali

Questo aspetto è complementare a quanto indicato nel paragrafo precedente ed è importante soprattutto in riferimento a indagini caratterizzate da numerosità campionaria relativamente limitata. L'utilizzo di informazioni ottenute da variabili ancillari i cui valori siano correlati a quelli dell'attributo Y oggetto di interesse consente, a parità di altre condizioni, di procedere alla stima dei parametri statistici di tale attributo in modo più efficiente rispetto a una stima che non ne tenga conto.

Nel caso di stime assistite da modello, quali sono quelle kNN o quelle GREG, se la dislocazione del *reference set* S (campione inventariale) è realizzata mediante uno schema casuale o sistematico semplice, il totale di un dato attributo sull'intero territorio oggetto di inventario può essere stimato in modo approssimativamente non distorto (Baffetta et al.,

2009) pari a

$$\hat{T}_{ass} = \sum_{j=1}^N \tilde{y}_j + \frac{N}{n} \sum_{j \in S} e_j$$

dove: \tilde{y}_j = valore di Y predetto dal modello in corrispondenza del j -esimo pixel; $e_j = y_j - \tilde{y}_j$.

La varianza di \hat{T}_{ass} può essere stimata in modo tendenzialmente conservativo pari a

$$\hat{V}(\hat{T}_{ass}) = \frac{N(N-n)}{n(n-1)} \sum_{j \in S} (e_j - \bar{e})^2$$

dove:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{j \in S} e_j$$

Utilizzando solo i dati inventariali del reference set (senza quindi fare conto dei valori predetti mediante le variabili ancillari per i pixel del target set), il totale può essere stimato pari a

$$\hat{T} = \frac{N}{n} \sum_{j \in S} y_j$$

con varianza stimata pari a

$$\hat{V}(\hat{T}) = \frac{N(N-n)}{n(n-1)} \sum_{j \in S} (y_j - \bar{y})^2$$

dove: $\bar{y} = \hat{T} / N$.

Se la relazione tra Y e le variabili ancillari è sufficientemente stretta, la quantità

$$\sum_{j \in S} (e_j - \bar{e})^2$$

è inferiore alla quantità

$$\sum_{j \in S} (y_j - \bar{y})^2$$

e quindi, a parità di altre condizioni, la stima \hat{T}_{ass} è più precisa della stima \hat{T} . In termini relativi, la differenza della precisione tra la stima \hat{T}_{ass} e la stima \hat{T} è tanto maggiore quanto minore è la numerosità del reference set, e la procedura è quindi particolarmente adatta nel caso di una numerosità del campione inventariale relativamente ridotta.

Utilizzo di dati inventariali come informazioni a priori ai fini di classificazioni tematiche

Questo utilizzo è legato alle potenzialità di valorizzazione, ai fini della classificazione tematica di immagini telerilevate, del patrimonio di conoscenze (informazioni *a priori*) circa le modalità di distribuzione delle classi tematiche considerate in relazione alle caratteristiche rilevate in ambito inventariale.

In linea di massima, questo tipo di approccio sottende il seguente percorso operativo: a partire dalla riflettanza multispettrale degli oggetti telerilevati (singoli pixel o poligoni) si formulano, mediante

processo di classificazione radiometrica, ipotesi sulla classe tematica da attribuire a ciascun oggetto; la consistenza di tale ipotesi è espressa quantitativamente dal valore della probabilità con la quale il processo di classificazione la fornisce; ciascuna ipotesi viene quindi vagliata, avvalorata o meno, alla luce di una serie di regole che rappresentano i legami possibili tra le classi tematiche considerate e i fattori condizionanti la loro distribuzione sul territorio; al termine di questo processo, che si svolge all'interno di classificatori basati su algoritmi di tipo probabilistico (di tipo discriminatorio o anche bayesiano), l'ipotesi alla quale corrisponde il più alto valore di probabilità di attribuzione è assegnata all'oggetto in esame. Si ha quindi:

1. classificazione su base radiometrica;
2. definizione delle regole e dei legami con le evidenze descritte quantitativamente sulla base dei dati inventariali;
3. assegnazione delle probabilità.

La potenzialità di questo approccio in cartografia forestale sono tipicamente connesse alla possibilità di evidenziare sulla base dei dati inventariali relazioni quantitative tra la distribuzione spaziale del fenomeno oggetto di mappatura (a es. distribuzione dei tipi forestali) e fattori quali quota, esposizione, condizioni pedoclimatiche, ecc.

Utilizzo di dati inventariali per la correzione delle stime di superficie ottenute da cartografia

Da un punto di vista rigoroso, l'utilizzo diretto di statistiche dedotte da una carta tematica elaborata sulla base di immagini telerilevate rappresenta un approccio rischioso per la stima delle superfici delle singole classi tematiche. In genere, gli errori di interpretazione in continuo delle suddette immagini tendono a essere sistematici e non si ha compensazione tra errori di commistione e errori di omissione (CORONA, 1999).

Può peraltro risultare conveniente cercare di sfruttare il contenuto informativo della cartografia trovando il modo di valutare, da un punto di vista statistico, il grado di precisione delle informazioni fornite. A tal fine, il rilevamento condotto in ambito inventariale, oltre che per la validazione dell'accuratezza tematica della carta, può essere utilizzato per correggere i valori di superficie forniti dalla carta stessa e valutarne l'incertezza statistica. Ovviamente questo approccio presuppone che l'inventario riguardi attributi con contenuto tematico analogo a quello delle classi della carta. A esempio, per correggere la stima

della superficie di un dato tipo forestale rappresentato dalla classe h in una data carta forestale, se \hat{p}_{hm} rappresenta la proporzione di unità di sondaggio inventariali attribuite alla classe h dalla carta e risultate appartenenti al tipo m dai rilievi inventariali rispetto al numero totale n_h di unità di sondaggio attribuite alla classe h con riferimento alla carta, si ha che lo stimatore \hat{A}_m della superficie totale del tipo m può essere definito pari a:

$$\hat{A}_m = \sum_{h=1}^C A_h \hat{p}_{hm}$$

dove: C = numero di classi (= numero di tipi forestali, nell'esempio in questione); A_h = superficie attribuita dalla carta alla classe h .

Lo stimatore della varianza di \hat{A}_m è approssimativamente pari a

$$\hat{V}(\hat{A}_m) = \sum_{h=1}^C A_h^2 \frac{\hat{p}_{hm}(1-\hat{p}_{hm})}{n_h}$$

Lo stimatore \hat{A}_m produce risultati analoghi (purché gli errori cartografici di omissione e commissione siano relativamente modesti) ma più precisi del classico stimatore $\hat{A}_m^* = A\hat{p}_m$, dove \hat{p}_m è la proporzione di unità di sondaggio inventariali appartenenti al tipo m rispetto al numero totale di unità inventariali e A è la superficie totale del territorio cartografato/inventariato.

Considerazioni conclusive

Nell'ambito del monitoraggio delle risorse ambientali la integrazione di indagini di vario tipo, attraverso reti di rilevamento multiobiettivo e con più soggetti, istituzionali e non, quali potenziali utenti delle informazioni prodotte, è un tema di crescente attualità: più che la installazione di nuove reti di monitoraggio andrebbe soprattutto favorita l'esplorazione di forme di integrazione di dati da fonti diverse. Anche il supporto degli strumenti cartografici e inventariali alla pianificazione e gestione delle risorse forestali dovrebbe quindi essere inquadrato secondo un approccio multiplo di analisi e verifica in cui la suddetta integrazione abbia un ruolo fondamentale.

In questo contesto si osserva che l'imprescindibile differenza concettuale e metodologica tra informazioni su base inventariale e cartografica viene spesso amplificata dall'adozione di sistemi di legende e classificazione incongrui tra loro: i sistemi di nomenclatura possono invece costituire un momento fondamentale di collegamento e in questa ottica riveste sempre più interesse l'inquadramento nomenclaturale tipologico (*sensu* DEL FAVERO, 2000) quale efficace criterio organizzativo.

Bibliografia

- BAFFETTA F., FATTORINI L., FRANCESCHI S., CORONA P., 2009. *Design-based approach to k-nearest neighbours technique for coupling field and remotely sensed data in forest surveys*. *Remote Sensing of Environment* 113: 463–475.
- BIANCHI M., TOSI V., 1995. *Il rilievo degli ambienti naturali e seminaturali negli inventari forestali a vasta scala*. In: Bagnaresi U., Vianello G. (a cura di), *Copertura forestale e territorio*, Collana Raisa, Franco Angeli, Milano, Italy, pp. 155-195.
- CHIRICI G., CORONA P., 2006. *Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali*. Aracne Editrice, Roma.
- CORONA P., 1995. *Criteri di corroborazione dei modelli di regressione*. *L'Italia Forestale e Montana* 4: 390-403.
- CORONA P., 1999. *Valutazione dell'accuratezza tematica in cartografia forestale*. *L'Italia Forestale e Montana* 3: 153-161
- CORONA P., 2000. *Introduzione al rilevamento campionario delle risorse forestali*. CUSL Editrice, Firenze.
- CORONA P., TABACCHI G., 2001. *Inventariazione delle risorse forestali su ampi territori. Finalità, metodi e prospettive*. *Monti e Boschi* 6: 27-38.
- CORONA P., FATTORINI L., 2008. *Area-based lidar-assisted estimation of forest standing volume*. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 2911–2916.
- DEL FAVERO R. (A CURA DI), 2000. *Biodiversità e indicatori nei tipi forestali del Veneto*. Commissione Europea, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Regione del Veneto, Mestre.
- KÖHL M., MAGNUSSEN S., MARCHETTI S., 2006. *Sampling methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory*. Tropical Forestry Series, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.
- OLSEN A.R., SCHREUDER H.T., 1997. *Perspectives on large-scale natural resource surveys when cause-effect is a potential issue*. *Environmental and Ecological Statistics* 4: 167-180.
- PAPALE D., BARBATI A., 2005. *Supporto informativo del telerilevamento per il monitoraggio e la valutazione funzionale dei rimboschimenti come mezzi di lotta alla desertificazione*. *Geoderma* 25: 31-37.