

Classificazioni delle superfici coltivate a pioppo mediante immagini satellitari ad elevata risoluzione spaziale

Grignetti A*, Coaloa D, Niccolini G

C.R.A. - Unità di Ricerca per le Produzioni Legnose Fuori Foresta, strada per Frassineto 35, I-15033 Casale Monferrato (AL, Italy) - *Corresponding Author: Alessandra Grignetti (alessandra.grignetti@entecra.it).

Abstract: *Classification of poplar stand areas by high-resolution satellite images.* This work concerns the classification of different crown cover classes of Poplar stands, using high spatial resolution images (Ikonos and Quickbird satellites), in order to provide poplar monitoring. The test sites are two agricultural areas, located in the alluvial plain of northern Italy, close to Alessandria. In order to enhance spectral differences among classes, textural and high-pass filters were applied and vegetation indices (ratio, difference and normalized difference) were processed. Images were then classified by means of an object-oriented approach which include a segmentation process followed by the application of a Standard Nearest Neighbor classifier on different data sets of spectral images (mean and standard deviation images) and shape indices (shape, compactness). The data sets were defined using the Feature Space Optimization tool available in the Definiens®Developer7 software. From a set of attributes, this tool selects the best combination that produces the largest separability among the classes. The shape of the polygons matched the agricultural plots and the classification results were compared with the reference map defined by means of aerial photo interpretation and ground surveys. New poplar classes were defined in order to improve classification results. The accuracy values obtained were satisfactory (close to 73% for Ikonos and 82% for Quickbird images) and they constitute a basis for automated recognition of poplar plantations and for updating poplar stands assessments.

Keywords: Satellite images, Very high spatial resolution, Object-oriented classification, Vegetation indices, Shape indices, Poplar cultivation

Received: Feb 03, 2009; Accepted: Jun 09, 2009

Citation: Grignetti A, Coaloa D, Niccolini G, 2009. Classificazioni delle superfici coltivate a pioppo mediante immagini satellitari ad elevata risoluzione spaziale. *Forest@* 6: 299-311 [online: 2009-09-18] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>.

Introduzione e scopo

La pioppicoltura in Italia, anche se ha subito nell'ultimo trentennio (1970-2000) una progressiva diminuzione della superficie coltivata pari al 42%, rappresenta ancora una realtà economica di grande rilievo in numerose regioni settentrionali, soprattutto in Lombardia e Piemonte dove è concentrato il 64% della pioppicoltura nazionale (Nervo & Radice Foscati 2006, Coaloa 2007a). Anche queste regioni, la cui vocazione pioppicola è salda, hanno registrato un sensibile calo di superficie. In particolare, in Piemonte si è verificata la più forte diminuzione della pioppicoltura (-60%) in quanto maggiormente si è sentita l'influenza e la competizione delle colture cerealicole in presenza di una forte frammentazione fondiaria.

In altre regioni (Toscana, Lazio, Campania e Calabria) sono riscontrabili modeste superfici pioppicole nelle zone di pianura e di fondovalle collinare, dove vengono prodotte discrete quantità di legname di qualità, destinato soprattutto alle industrie locali dello sfogliato per imballaggio leggero (Coaloa 2007b).

Così come avviene per la selvicoltura, anche per la pioppicoltura sono importanti gli studi inventariali, al fine di offrire strumenti utili per una razionale pianificazione territoriale. La pioppicoltura occupa infatti una posizione rilevante nel sistema legno nazionale e rappresenta la fonte di approvvigionamento più importante per le industrie di prima trasformazione. L'interesse economico del legno di pioppo guida quindi le finalità degli inventari che, oltre a

fornire le stime delle superfici coltivate complessive, devono provvedere alla valutazione della disponibilità annuale di legno per l'industria che deve pianificare gli investimenti. Il modello colturale ampiamente adottato per il pioppo nella pianura padano-veneta permette di ottenere, con turni di 10 anni, circa 200 m³ per ettaro di legno di ottima qualità destinato all'industria del pannello di compensato. La maturità commerciale della pianta di pioppo avviene generalmente al raggiungimento del diametro del fusto pari a circa 30 cm (misura a 1.30 m di altezza) e comunque non prima dei 6-7 anni dall'impianto. Di conseguenza gli inventari devono produrre dettagliate stime delle superfici occupate dai pioppeti prossimi a maturità per fornire informazioni sulla disponibilità di legno pronto per l'utilizzazione immediata e per i futuri 3 anni (Chiarabaglio & Coaloa 2002, Coaloa 1999).

Con l'utilizzo prima di aerofotografie (Cellerino & Lapietra 1977) e in seguito di immagini satellitari (Lapietra & Megier 1977) si compresero, a partire dagli anni '70, le potenzialità dei dati telerilevati per il calcolo delle risorse legnose a grande scala. Il telerilevamento è infatti un supporto molto utile per il monitoraggio annuale delle risorse forestali e dell'arboricoltura da legno (Lamonaca 2006, Meng 2006) e la possibilità di acquisire dati multitemporali è indispensabile negli aggiornamenti statistici che esigono tempi ravvicinati in funzione dei turni di coltivazione e delle repentine variazioni delle superfici coltivate che caratterizzano la pioppicoltura italiana.

L'individuazione degli impianti arborei si presenta tuttavia difficoltosa nel caso in cui vengano utilizzate immagini con basse risoluzioni spaziali, che non consentono di riconoscere la caratteristica struttura regolare degli impianti, oppure nel caso in cui vengano applicate tecniche di classificazione *per pixel* a dati ad elevata risoluzione spaziale, che generano immagini disomogenee con il caratteristico aspetto "sale e pepe" (Chen et al. 2005, Franklin et al. 2001). Lo sviluppo delle recenti tecniche fondate su una logica per oggetti permette di superare tali difficoltà. I nuovi metodi di classificazione non utilizzano più l'informazione spettrale dei singoli pixel ma quella derivata da gruppi omogenei di pixel, che costituiscono l'unità di base delle successive analisi (Baatz & Schäpe 2000) e restituiscono un'immagine classificata di tipo vettoriale, con caratteristiche molto simili a quelle di una carta derivata dalla fotointerpretazione manuale (Chirici et al. 2003) potendo associare ad ogni oggetto un'informazione tematica. Le immagini di nuova generazione quindi, per il loro dettaglio

spaziale, hanno potenzialità molto ampie nel campo della pianificazione territoriale, ma l'aumento della complessità spettrale richiede nuove procedure interpretative (Chubey et al. 2006). Nel caso dell'arboricoltura da legno, i dati satellitari di ultima generazione permettono il riconoscimento di piantagioni di pioppo anche di modeste dimensioni, ma è necessario individuare appropriati parametri spettrali e spaziali per distinguerli in funzione alla copertura della chioma e dell'anno di impianto.

In tale ambito si indirizza l'obiettivo di questo lavoro, volto quindi al riconoscimento di impianti di pioppo alle varie classi di età con immagini ad elevata risoluzione spaziale mediante tecniche di classificazione *object-oriented*, al fine di mettere a punto un sistema di monitoraggio a basso costo e attuabile in tempi brevi per poter seguire le rapide variazioni che interessano le superfici occupate da pioppo.

Area di studio

Lo studio è stato effettuato in due aree particolarmente vocate alla pioppicoltura e localizzate in Piemonte (Fig. 1), in provincia di Alessandria, nei comuni di Valenza (superficie 2.165 ha) e Casale Monferrato (superficie 6.450 ha).

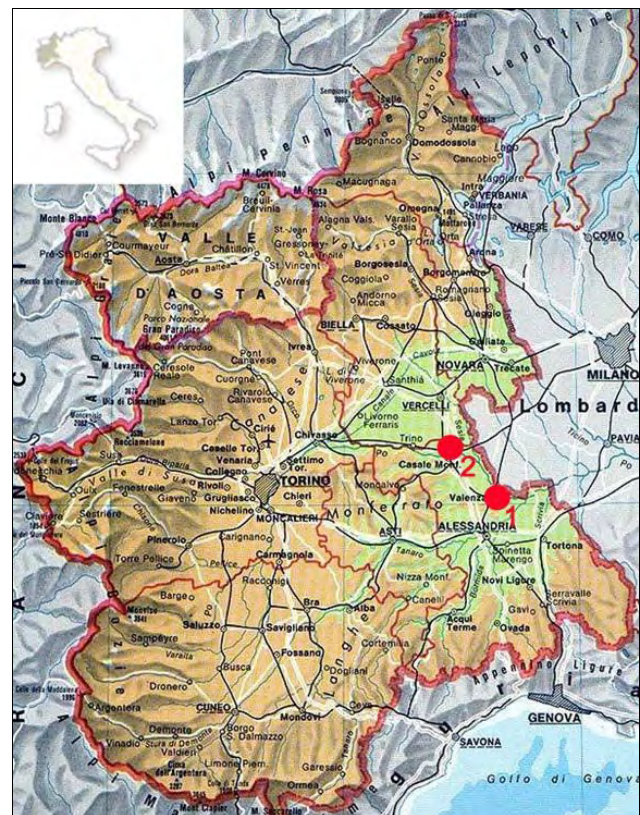


Fig. 1 - Area di studio: (1) comune di Valenza; (2) comune di Casale Monferrato.

Le aree di studio, situate in pianura, sono caratterizzate dalla presenza di ampie coltivazioni agricole quali cereali (grano, mais, orzo, riso), colture industriali (barbabietola da zucchero, girasole, soia, colza) ed estese superfici destinate all'arboricoltura da legno quali pioppeti e altre latifoglie di pregio. Sono presenti inoltre residue formazioni di bosco naturale costituite prevalentemente da salicacee, distribuite principalmente lungo gli alvei dei fiumi Po e Sesia e da boschetti di invasione con specie alloctone (*Robinia pseudoacacia*).

Modello colturale del pioppo

Gli appezzamenti di pioppo sono costituiti da piante coetanee disposte in sestri d'impianto con spaziature di 6x5 m o 6x6 m, che determinano una densità di circa 300 piante per ettaro. Grazie ai modelli di classificazione del grado di copertura delle chiome, sviluppati per precedenti inventari mediante le tradizionali tecniche di fotointerpretazione su fotografie aeree (Lapietra et al. 1980), sono state definite quattro classi di copertura percentuale (Tab. 1) rilevata alle normali spaziature adottate nella Pianura

Tab. 1 - Classi di copertura e di età degli impianti secondo il modello fotografico.

Classi	Copertura (%)	Età
Classe 1	<5	1
Classe 2	5-25	2-3
Classe 3	25-75	4-5-6
Classe 4	75-100	≥7

padana (circa 30 m²/pianta) e ben correlate con l'età delle piantagioni (Coaloa & Chiarabaglio 1998). Nella prima classe di età, corrispondente al 1° anno di impianto, il grado di copertura della chioma risulta mediamente essere inferiore al 5% (pari a 1-2 m² di chioma ogni 30 m² di terreno), mentre nella seconda classe (relativa al 2°-3° anno di età) la percentuale di copertura della chioma raggiunge il 25%. La classe 3 (4°-6° anno) comprende un intervallo di copertura percentuale molto ampio, dal 25% al 75%, mentre il grado di copertura maggiore del 75% viene raggiunto in classe 4 (dopo il 7° anno) in condizioni stazionali favorevoli (Fig. 2). L'altezza media delle piante è di 5 metri nel 1° anno di impianto (altezza degli asto-



Pioppeto di 1 anno



Pioppeto di 3 anni



Pioppeto di 5 anni



Pioppeto di 8 anni

Fig. 2 - Fotografie a terra di impianti di pioppo di diversa età.

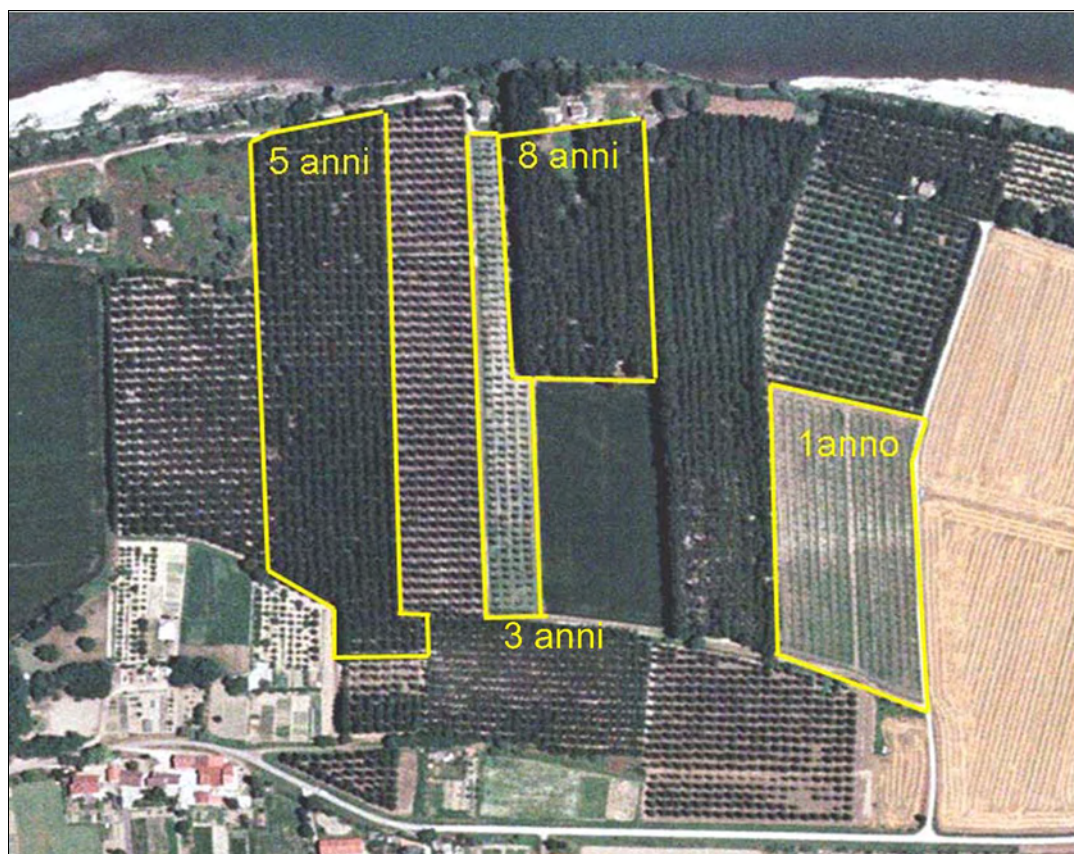


Fig. 3 - Impianti di pioppo di diversa età individuati sull'ortofoto Volo TerraItaly2000 (giugno 1999).

ni) fino a raggiungere un massimo di 25 metri a fine turno (mediamente di 10-11 anni). Durante il turno non vengono effettuati diradamenti.

In Fig. 3 è riportato un esempio di fotointerpretazione delle piantagioni a pioppo suddivise in classi di copertura ed età secondo il modello fotografico. Sull'ortofoto digitale (volo TerraItaly2000 - CGR Parma) sono stati individuati i limiti di pioppeti di classe di età paragonabili a quelli descritti in Fig. 2. Come si può osservare, i pioppeti al primo anno di impianto, caratterizzati dalla scarsa copertura delle chiome, si distinguono chiaramente per la disposizione regolare delle piante, struttura resa ancora più evidente nei pioppeti di 3 anni. I pioppeti di 5 e 8 anni sono invece poco differenziati nell'ortofoto, anche se nelle fotografie a terra (Fig. 2) sono evidenti le differenze nel grado di copertura delle chiome.

Materiali e metodi

Per la realizzazione del lavoro sono state acquisite due immagini satellitari ad alta risoluzione, un'immagine multispettrale IKONOS relativa al giugno 2000, in modalità *pansharpened* (1 m di risoluzione del pixel), e un'immagine QUICKBIRD di giugno 2006 in mo-

dalità multispettrale (2.4 m di risoluzione del pixel). L'immagine IKONOS è stata utilizzata per il riconoscimento dei pioppeti nel territorio di Valenza, mentre l'immagine QUICKBIRD per quelli presenti nell'area di Casale Monferrato. Per la produzione di mappe utilizzate come dati di verità a terra sono state utilizzate ortofoto a colori del volo TerraItaly2000 (CGR Parma) realizzati nel giugno 1999 (1 m di risoluzione dell'immagine).

Metodi di trattamento immagini

L'elaborazione delle immagini ha previsto una fase di pre-trattamento ed una fase di classificazione e valutazione dell'accuratezza delle immagini classificate.

Nella prima fase, sia all'immagine IKONOS che QUICKBIRD, entrambe georiferite nel sistema UTM WGS84 (RMSE minore di 1 pixel), sono stati applicati filtri passa-alto (3x3 kernel) sulla banda del NIR (banda 4), al fine di eliminare le basse frequenze ed enfatizzare il contrasto spettrale tra le particelle agricole, e filtri tessiturali (3x3 kernel) basati sulla matrice di covarianza (Gomasca 2004). Sono stati elaborati diversi indici di vegetazione (IV) quali semplici

Tab. 2 - Descrizione delle classi di copertura del suolo e relative sottoclassi.

Classi di copertura del suolo	Descrizione	Sottoclassi
Formazioni boschive	Formazioni naturali arboree a salice e pioppo, boschetti di invasione con specie alloctone e aree con vegetazione arbustiva	-
Pioppeti	Impianti specializzati di pioppo per la produzione legnosa nelle diverse classi di copertura	Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4
Conifere	Impianti di aghifoglie	-
Aree agricole	Coltivi a ciclo annuo anche in rotazione, sottoposti a regime di produzione o a riposo	Seminativi a rotazione Risaie Mais
Aree urbane	Superfici occupate da infrastrutture permanenti	Aree urbanizzate dense Aree urbanizzate sparse Rete viaria
Acqua	Corsi d'acqua principali e loro alvei ordinari, laghi, canali artificiali	-
Suolo nudo	Superfici prive di coperture vegetali permanenti, in prossimità delle rive dei corsi d'acqua	-

rapporti di bande (RVI), differenza tra bande (DVI) e l'indice di differenza normalizzata NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) definito come $(\text{banda4} - \text{banda3}) / (\text{banda4} + \text{banda3})$ (Rouse et al. 1973).

Le immagini sono state classificate secondo le classi di copertura e uso del suolo descritte in Tab. 2, applicando la classificazione di tipo *object-oriented*.

Le tecniche di tipo *object-oriented* prevedono, come prima fase, la creazione di una scala gerarchica di oggetti ottenuta attraverso la produzione di più livelli di segmentazione. L'algoritmo di segmentazione si basa su una tecnica di *region merging* che partendo dai singoli pixel dell'immagine unisce successivamente regioni adiacenti in funzione delle proprietà spettrali e spaziali, definite sulla base di criteri di eterogeneità ed omogeneità che gli oggetti devono soddisfare (Baatz et al. 2003). Tali criteri sono identificati nel *software* tramite i parametri di *color*, *shape* e *scale*. La procedura tende a minimizzare l'eterogeneità spettrale (parametro *color*) di ciascun poligono derivata dai valori di *digital number* dei pixel inclusi e l'eterogeneità geometrica (parametro *shape*) derivata dalla forma dei poligoni creati (Chirici et al. 2003). Il parametro *scale* è un valore che permette di calibrare la grandezza dei poligoni che vengono creati durante la segmentazione. La corretta impostazione del processo di segmentazione risulta fondamentale per il successo della classificazione poiché, se i parametri vengono definiti in maniera inadeguata, la segmen-

tazione può portare ad una eccessiva frammentazione o ad un accorpamento di poligoni appartenenti a diverse classi di copertura del suolo (Giannetti & Canavesio 2004). Sono state effettuate numerose prove di segmentazione variando la combinazione dei parametri, al fine di ottenere livelli gerarchici di poligoni coerenti con la parcellizzazione agricola del territorio e, allo stesso tempo, sufficientemente dettagliati per differenziare gli impianti di pioppo in base al loro grado di copertura (Coaloe et al. 2006).

Il livello finale di segmentazione ritenuto adeguato agli scopi della ricerca è stato ottenuto applicando, per l'area di Valenza, i parametri di *scale* pari a 68, e di *color* e *shape* rispettivamente pari a 0.9 e 0.5. Per la segmentazione dell'immagine QUICKBIRD di Casale Monferrato i parametri considerati ottimali sono stati *scale*=63, *color*=0.3 e *shape*=0.7.

I poligoni ottenuti dalla segmentazione sono stati classificati utilizzando l'algoritmo *Standard Nearest Neighbor* (Chirici & Corona 2006). Poiché il *set* di dati impiegato per il processo di classificazione comprende numerose immagini, si è deciso di adottare e valutare il processo automatico di ottimizzazione *Feature Space Optimization* (FSO), implementato nel *software* DEFINIENS DEVELOPERS7 creato da Definiens Imaging GmbH (München, Germany). Tale processo individua la migliore combinazione di immagini che meglio contribuisce a differenziare le classi di interesse, mediante il calcolo della distanza tra le classi

Tab. 3 - Descrizione dei tre casi di classificazione con le immagini utilizzate per l'area di Valenza.

Casi	Set di immagini iniziali	FSO	Set finale
1° caso 15 immagini	Medie: bande 1 - 4, DVI31, DVI32, DVI41, DVI43, RVI3/1, RVI3/2, RVI4/1, RVI4/3, PCA1, PCA2, PCA3	-	-
2° caso 38 immagini	Medie e dev.stand.: bande 1 - 4, DVI31, DVI32, DVI41, DVI43, RVI3/1, RVI3/2, RVI4/1, RVI4/3, PCA1, PCA2, PCA3. Indici di forma: area, den- sity, border lenght, main direction, shape in- dex, border index, asymmetry, compactness	13 immagini	Medie di banda 4, RVI4/3, PCA1; dev.stand di banda4, ban- da3, DVI31, RVI43, PCA1; area, main direction, asymmetry, border length e density
3° caso 22 immagini	Medie e dev.stand.: banda 4, DVI41, DVI32, DVI31, RVI4/3, RVI41, PCA1. Indici di forma: area, density, border lenght, main direction, shape index, border index, asymmetry, com- pactness	12 immagini	Medie di banda 4, RVI4/3, PCA1; dev.stand di banda 4, DVI31, RVI43, PCA1; area, main di- rection, asymmetry, border length e density

all'interno dello spazio di attributi (immagini) inizialmente definito (Baatz et al. 2003). Nel presente lavoro, il *set* di dati iniziale è composto sia dalle immagini calcolate sui parametri statistici (media e deviazione standard dei poligoni calcolata in ciascuna banda multispettrale) sia da quelle riferite a parametri geometrici legati alla forma e dimensione dei poligoni generati (estensione, rapporto tra lunghezza e larghezza, indice di forma, compattezza).

Le prove di FSO sono state differenziate in base al tipo di immagine satellitare e in base alle caratteristiche del territorio analizzato.

Per Valenza, la procedura di classificazione è stata applicata valutando tre diversi casi, distinti sulla base del numero di immagini come descritto in Tab. 3. Nel primo caso (1° caso) è stato utilizzato un *dataset* di 15 immagini senza indici di forma, mentre negli altri due casi (2° e 3° caso), a partire da *dataset* iniziali diversi, si è proceduto alla selezione delle immagini mediante la procedura FSO. L'ottimizzazione ha fornito un *set* finale di immagini molto simile, che differisce unicamente per la presenza o assenza dell'immagine relativa alla deviazione standard di ban-

da 3 tra il secondo e terzo caso (Tab. 3). Per Casale Monferrato, la classificazione è stata effettuata utilizzando un *dataset* di 12 immagini selezionate in base al processo di ottimizzazione FSO comprendente bande relative ai parametri spettrali (medie della banda3, banda 4, NDVI, filtro passa-alto 4; deviazione standard della banda4, NDVI, filtro passa-alto 4) ed altre relative ai parametri di forma (*area, main direction, asymmetry, width*).

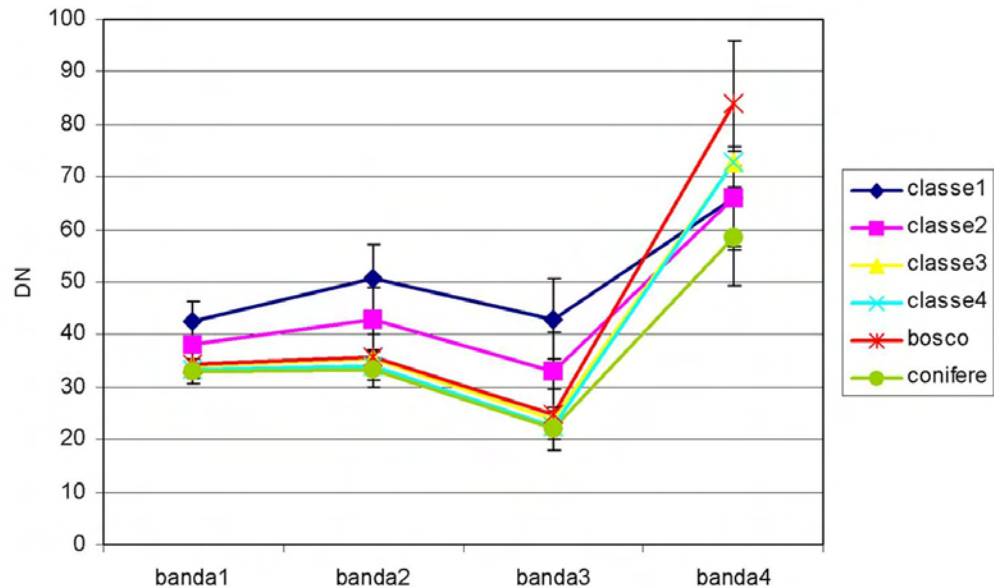
Tutte le classificazioni sono state verificate mediante il calcolo delle matrici di errore (Congalton 1991) utilizzando, come dato di verità a terra, le immagini ottenute dalla fotointerpretazione dell'ortofoto volo TerraItaly2000, sia per l'area di Valenza che per quella di Casale Monferrato. Inoltre per l'area di Casale Monferrato, tutti gli impianti individuati mediante fotointerpretazione sono stati controllati in campo ed è stata aggiornata la classe di età e di copertura delle chiome all'anno 2006. In Tab. 4 sono riportate le superfici dei pioppeti individuati sulla base della fotointerpretazione secondo le classi di copertura e di età, per le due aree di studio. Oltre al valore di accuratezza globale, dalla matrice di errore è possibile

calcolare per le singole classi l'errore di commissione, che indica la percentuale di pixel erroneamente inclusi in quanto appartenenti a classi diversi, e l'errore di omissione che indica la percentuale di pixel erroneamente esclusi. Parametri complementari agli errori sono Accuratezza Utente (*User's Accuracy - UA*) e Accu-

Tab. 4 - Superfici dei pioppeti, espresse in ha e in %, secondo classi di copertura e di età individuati in base alla fotointerpretazione per l'area di Valenza e di Casale Monferrato.

Classi di copertura	Età	Valenza ha	Valenza %	Casale Monf. ha	Casale Monf.%
Classe 1 (<5%)	1	31.65	8.9	53.52	6.6
Classe 2 (5 - 25%)	2-3	50.66	14.3	91.57	11.3
Classe 3 (25 - 75 %)	4-5-6	81.45	23.0	109.67	13.6
Classe 4 (75 - 100 %)	≥7	190.20	53.7	553.07	68.5
Totale		353.92	100	808.83	100

Fig. 4 - Firme spettrali delle diverse classi di copertura dei pioppeti, del bosco e degli impianti di conifere nelle bande IKONOS (± 1 dev.-st.) relativa all'area di studio di Valenza.



ratezza Produttore (*Producer's Accuracy - PA*). La prima indica la probabilità che ad un pixel dell'immagine assegnato ad una data classe corrisponda effettivamente quella classe al suolo, mentre il secondo parametro misura la probabilità che i pixel di riferimento siano classificati correttamente. Infine è stato calcolato il coefficiente *K* che tende a sottrarre alla stima dell'accuratezza il valore legato al contributo dovuto all'accordo casuale tra classificazione e mappa di riferimento (Brivio et al. 2006).

Risultati e discussione

L'analisi delle firme spettrali delle classi di copertura del suolo individuate e la valutazione dell'accuratezza delle classificazioni sono state condotte in modo indipendente nelle due aree di studio e pertanto si riportano separatamente i risultati e la discussione per ciascuna area.

Area di Valenza: immagine IKONOS

In Fig. 4 sono riportate le firme spettrali e in Fig. 5 i valori degli indici di vegetazione per le classi di copertura relative sia ai pioppeti, che agli impianti a conifere e alle formazioni boschive, al fine di valutare le differenze spettrali significative tra tali tipologie e definire quindi quale tra gli indici elaborati contribuisca maggiormente alla loro identificazione.

La Fig. 4 mostra sia nel visibile (banda 2 e banda 3) che nell'infrarosso (banda 4) una elevata sovrapposizione di valori spettrali tra le classi considerate. Le maggiori differenze sono rilevabili nel visibile per i pioppeti di classe 1 e classe 2 (cop. 5-25%) in quanto caratterizzati da elevati valori di riflettanza dovuti alla predominante risposta spettrale del suolo. Nell'infrarosso si distinguono invece le classi relative al bosco e agli impianti di conifere, caratterizzati rispettivamente da alti e bassi valori di riflettanza. Analiz-

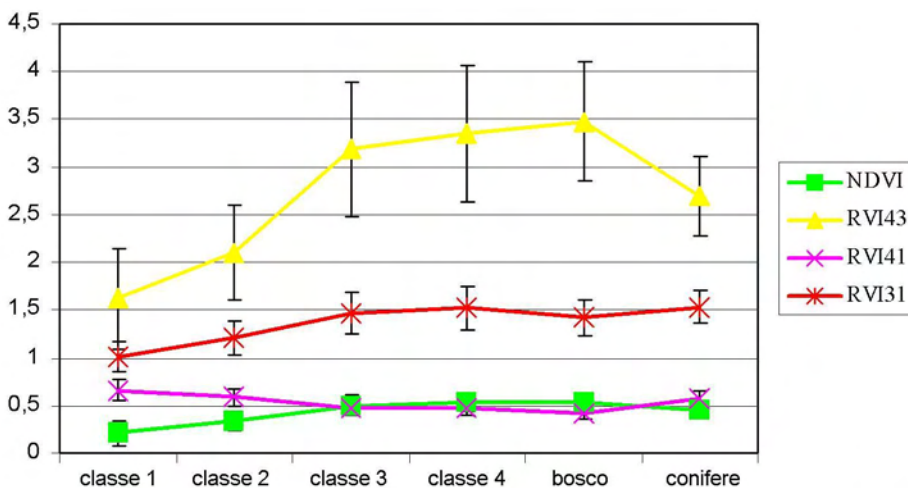


Fig. 5 - Andamento dei valori degli indici spettrali di vegetazione (± 1 dev.st.) per i pioppeti, per il bosco e per gli impianti di conifere. RVI43: rapporto tra banda 3 e banda 4; RVI41: rapporto tra banda 4 e banda 1; RVI31: rapporto tra banda 3 e banda 1; NDVI: indice di differenza normalizzata (banda4 - banda3 / banda4 + banda3).

Tab. 5 - Variabili biotiche e abiotiche che condizionano la risposta spettrale delle piantagioni a pioppo.

Variabili biotiche	Variabili abiotiche
Attacchi parassitari alle foglie	Trattamenti colturali
Mortalità	Eventi meteorici (vento, esondazioni)
	Fertilità del terreno

zando l'andamento degli indici spettrali (Fig. 5) si evidenzia che il rapporto di bande 4 e 3 (RV43) è quello maggiormente discriminante tra i pioppeti di classi 2 e quelli di classe 3, mentre si sovrappongono i valori relativi ai pioppeti di classe 3 e di classe 4. Anche l'indice RVI31 (rapporto di banda 3 e banda 1) discrimina tra i pioppeti di classe 2 e classe 3, pur essendo presente una certa sovrapposizione, mentre

non sono indicativi gli indici NDVI e RVI41 (rapporto di banda 4 e banda 1). Questa analisi preliminare mette in luce le problematiche che si riscontrano nel riconoscimento dei pioppeti secondo le diverse classi di copertura mediante la risposta spettrale acquisita dalle immagini da satellite.

Oltre ai problemi legati ai diversi gradi di copertura delle chiome, intervengono anche numerosi fattori biotici e abiotici che inducono ulteriori variazioni nella risposta spettrale delle particelle (Tab. 5). Come si può vedere nell'immagine a falsi colori IKONOS (Fig. 6), sebbene sia possibile differenziare le diverse classi di pioppeti sulla base delle classi di copertura e della spaziatura del sesto d'impianto, all'interno delle singole particelle è chiaramente visibile una elevata variabilità spettrale dovuta a diverse cause. Ad esempio nei pioppeti giovani (classe 1 e 2) la variabi-

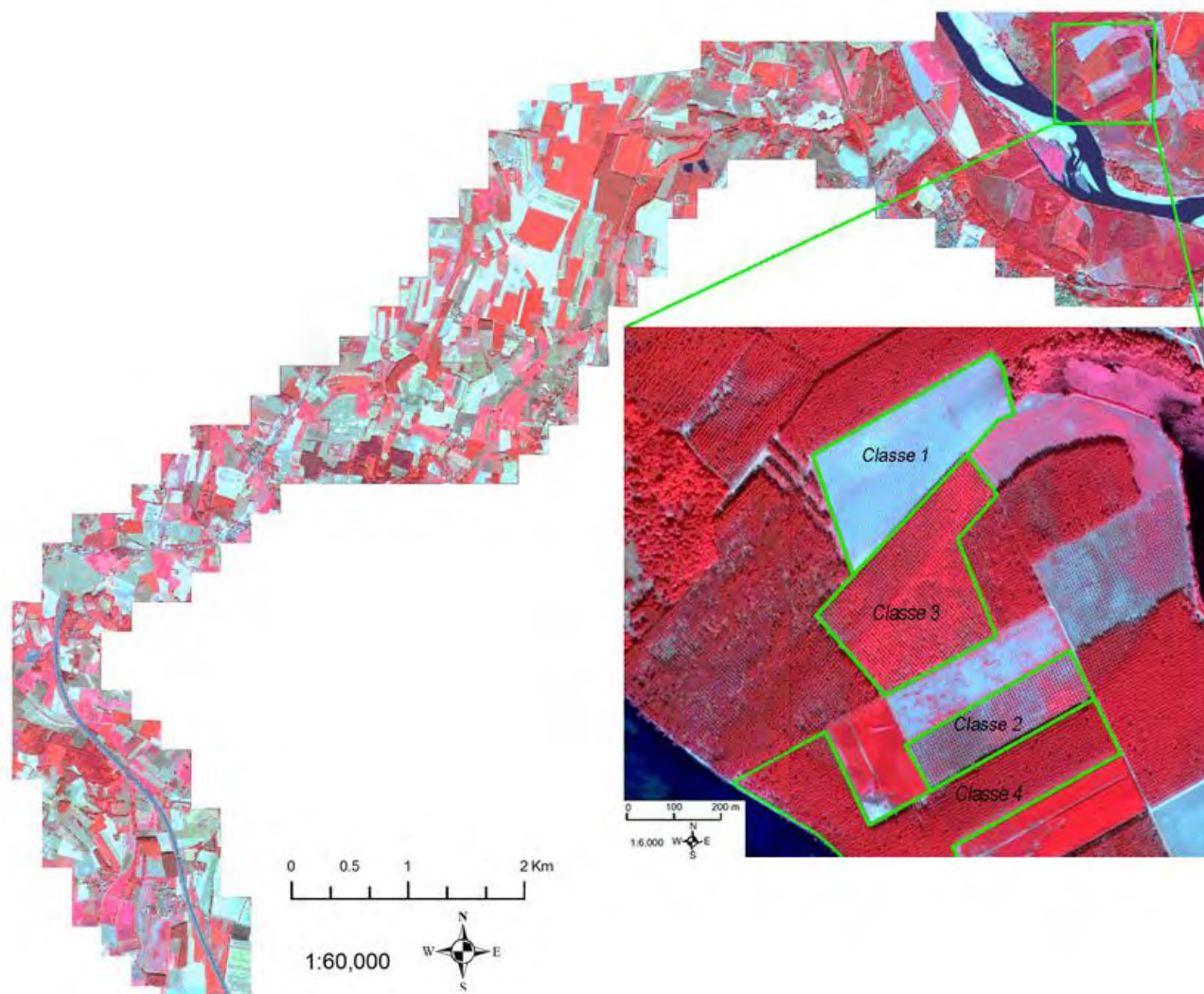


Fig. 6 - Immagine IKONOS (anno 2000) a falsi colori di tutta l'area di studio e un riquadro su cui sono riportate le classi di età dei pioppeti (area di studio di Valenza).

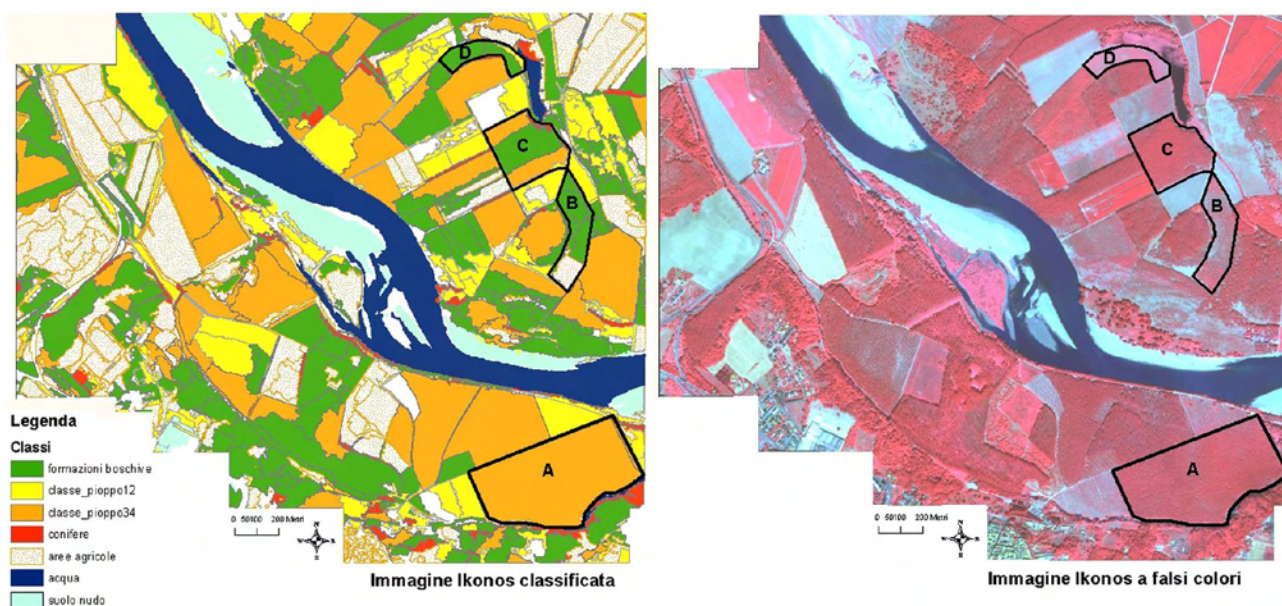


Fig. 7 - Confronto tra l'immagine IKONOS a falsi colori (anno 2000) e il risultato della classificazione *object-oriented* (area di studio di Valenza).

lità è in relazione a fattori abiotici, come il tipo di intervento colturale che determina la presenza o assenza dello strato erbaceo, mentre nei pioppeti in maturazione (classe 3 e 4) tale variabilità può essere connessa a variabili biotiche, quali mortalità che creano buchi nella copertura delle chiome e a variabili abiotiche, come la fertilità del suolo che induce un diverso grado di sviluppo delle chiome delle singole piante.

In base a tali considerazioni è stato deciso di unificare per le successive elaborazioni i pioppeti di classi di età non discriminabili, creando la classe_pioppo12 (unione di classe1 e classe2) e la classe_pioppo34 (unione classe3 e classe4).

I poligoni ottenuti dal processo di segmentazione presentano una dimensione e una struttura conforme alla realtà territoriale, soprattutto grazie all'utilizzo di filtri che hanno caratterizzato in maniera ottimale i confini geometrici delle piantagioni a pioppo.

Per ciascuna classificazione condotta in base ai tre casi descritti in Tab. 3, sono stati estratti i valori di accuratezza totali e i coefficienti *K* dalle matrici degli errori calcolate confrontando le immagini ottenute con la fotointerpretazione (Tab. 6). Si osserva che il valore di accuratezza più elevato è stato conseguito nella classificazione descritta nel 1° caso (74% e coeff. *K* pari a 0.6), mentre valori più bassi si sono ottenuti nelle classificazioni relative al 2° e 3° caso, per le quali era stata applicata la procedura FSO. Tale risultato può essere dovuto sia alla tipologia di calcolo

dell'ottimizzazione delle classi che si basa sulla media della distanza minima (Leduc 2004) che dall'uso di immagini relative ai parametri geometrici che possono aver indotto maggiori confusioni tra le classi di interesse e ridotto quindi l'accuratezza delle classificazioni.

In Fig. 7 sono messi a confronto, a titolo di esempio, alcuni impianti di pioppo visibili sull'immagine IKONOS a falsi colori e i corrispondenti poligoni classificati (1° caso). Con la lettera A è evidenziato un poligono correttamente classificato come pioppeto maturo, con la lettera C è visibile un poligono di impianto maturo di pioppo (classe_pioppo34) in parte erroneamente classificato come bosco. Le lettere B e D invece mostrano alcuni errori di classificazione intercorsi tra bosco e pioppeti giovani (classe_pioppo12), dovuti probabilmente alla presenza negli impianti di una elevata copertura erbacea che genera valori radiometrici elevati molto simili a quelli registrati nelle formazioni boschive.

Tab. 6 - Valori di accuratezza totale (%) e coefficiente *K* per i tre casi di classificazioni condotte sull'immagine IKONOS (anno 2000) nel territorio di Valenza.

Caso	Accuratezza totale (%)	Coefficiente <i>K</i>
1° caso	74	0.60
2° caso	69	0.49
3° caso	68	0.49

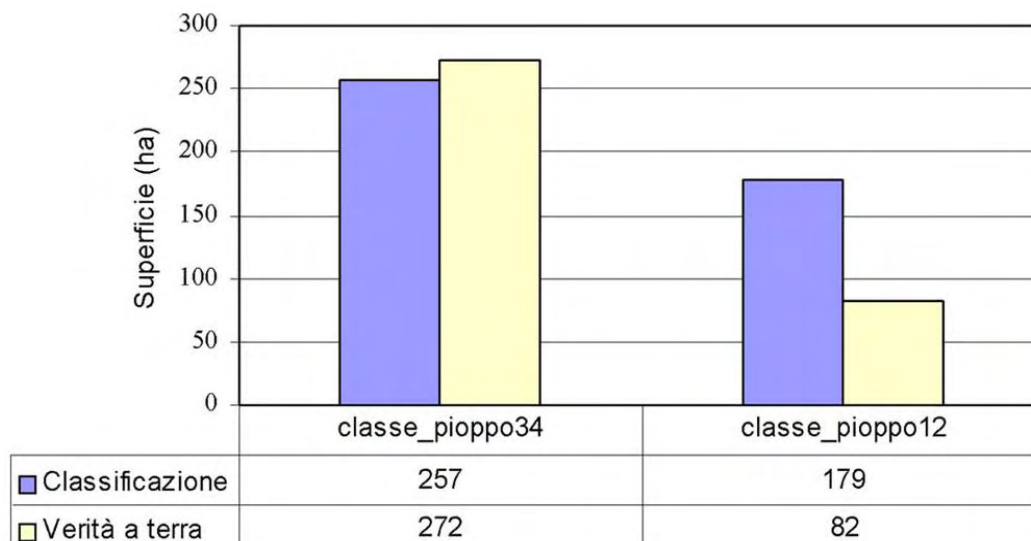


Fig. 8 - Superfici (ha) suddivise per classi di copertura dei pioppeti derivati da classificazione *object-oriented* dell'immagine IKONOS (anno 2000) e da dati di verità a terra derivati dalla fortointerpretazione dell'ortofoto (volo TerraItaly2000) nell'area di studio di Valenza.

In Fig. 8 sono riportate per i pioppeti giovani e maturi i valori della superficie (ha) derivati dalla fotointerpretazione (verità a terra) e quelli ottenuti dalla classificazione *object-oriented* (1° caso). Si può notare che, mentre per i pioppeti giovani (classe_pioppo12) le superfici ottenute dalla classificazione sono molto più elevate di quelle dedotte dalla verità a terra, le aree classificate come pioppeti maturi (classe_pioppo34) presentano superfici che si attestano su valori prossimi alla verità a terra con uno scostamento percentuale pari a - 5.5%.

Casale Monferrato: QUICKBIRD a 2.4 m/px

Per il territorio di Casale, sono state considerate le stesse classi di copertura del suolo individuate nell'area di Valenza, ad eccezione degli impianti di conifere in quanto non presenti nell'immagine satellitare. Come descritto precedentemente per l'area di Valenza, la classificazione dei pioppeti è stata finalizzata alla classe_pioppo12 e classe_pioppo34. Gli impianti di pioppo, individuati sull'ortofoto digitale,

Tab. 7 - Descrizione delle classi di copertura e di età dei pioppeti secondo la nuova ripartizione nel territorio di Casale Monferrato utilizzate per la classificazione *object-oriented*.

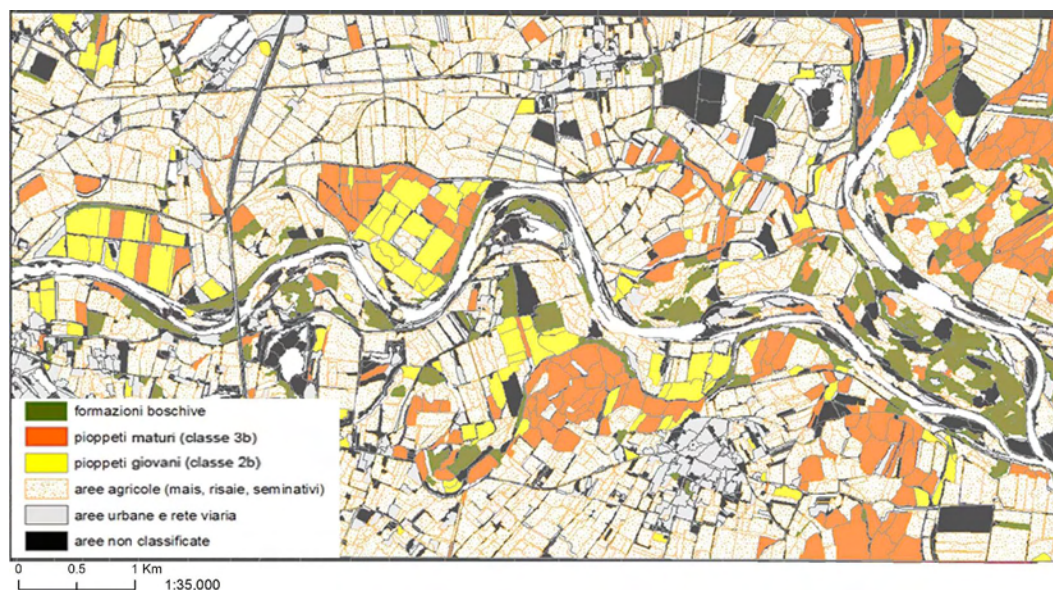
Classi	Copertura (%)	Età
Classe_pioppo1	<5	1
Classe_pioppo2b	5-50	2-3-4
Classe_pioppo3b	50-100	≥5

digitalizzati e verificati direttamente in campo (Tab. 4), coprono una superficie di circa 809 ha di cui circa il 7% appartiene al primo anno di impianto (classe 1), mentre i pioppeti maturi (classe 4) coprono circa il 68 %.

La matrice degli errori calcolata per i pioppeti ha fornito un valore di accuratezza totale pari al 78% con coefficiente K pari a 0.3. I bassi valori di coefficiente K sono dovuti alla presenza di alti errori di commissione ed omissioni soprattutto a carico della classe_pioppo34 poiché l'unione della classe 3 (copertura 25%-75%) con la classe 4 (coperture >75%) comprende un intervallo di coperture arboree (25-90%) molto esteso. Tale classe include intervalli radiometrici troppo ampi (con elevata varianza) facilmente soggetti ad elevati errori di attribuzione nel processo di classificazione. Per ridurre la variabilità statistica dei valori spettrali interni alla classe, si è deciso di suddividere i pioppeti in 3 classi di copertura: la prima (classe_pioppo1b) relativa al 1 anno di impianto con coperture minori del 5%, la seconda (classe_pioppo2b) comprendente pioppeti del 2, 3 e 4 anno e coperture comprese tra 5% e 50%, ed infine la terza (classe_pioppo3b) relativa ai pioppeti dal 5 anno in poi con coperture maggiori del 50% (Tab. 7). I pioppeti giovani sono quelli relativi alla classe_pioppo2b, mentre i pioppeti maturi sono compresi nella classe_pioppo3b; i pioppeti relativi alla classe_pioppo1b non sono stati considerati in fase di classificazione.

In base a tale ripartizione, l'immagine QUICKBIRD è

Fig. 9 - Immagine QUICKBIRD classificata mediante tecnica *object-oriented* relativa all'area di studio di Casale Monferrato (giugno 2006).



stata riclassificata (Fig. 9) ed è stata calcolata la matrice degli errori utilizzando il dato di verità a terra aggiornato sulla base delle nuove classi, le cui superfici sono descritte in Tab. 8. L'accuratezza totale è risultata pari al 82% con un coefficiente K pari a 0.5. In Tab. 9 sono riportati i valori di PA e UA da cui si osserva che mentre i valori di accuratezza produttore sono elevati per entrambe le classi di copertura, i valori di accuratezza utente sono bassi esclusivamente per i pioppeti più giovani (UA pari a 44%). Il basso grado di accuratezza UA e il conseguente elevato errore di commissione (56%) ottenuto per tali pioppeti indica che nel processo di classificazione sono state incluse aree non appartenenti alle parcelle di pioppo portando quindi ad una sovrastima della superficie coperta da tali impianti, così come era avvenuto nella classificazione dell'immagine IKONOS di Valenza. Le piantagioni giovani, caratterizzate da un basso grado di copertura della chioma, vengono confuse nella classificazione con le aree agricole, in particolare con i campi coltivati a mais che per la loro elevata

Tab. 8 - Superfici dei pioppeti, espresse in ha e in %, relative alla mappa di verità a terra e suddivise nelle classi in base alla nuova ripartizione nell'area di Casale Monferrato.

Classi di copertura	Età	Superfici (ha)	Superfici (%)
Classe 1 (<5%)	1	53.52	6.6
Classe 2 (5 - 50%)	2-3-4	118.18	14.6
Classe 3 (50 - 75 %)	5-6	83.06	10.3
Classe 4 (75 - 100 %)	≥7	553.07	68.5
Totale	-	808.83	100

biomassa nel mese di luglio presentano valori radiometrici molto simili a quelli dei pioppeti. Negli impianti maturi i valori di UA e PA sono entrambi molto elevati (rispettivamente 81% e 97%), indicando una buona correlazione tra dati classificati e dati di verità a terra. L'errore di commissione è molto basso (circa 3%) mentre l'errore di omissione non raggiunge il 20%.

Confrontando le superfici dei pioppeti derivati dalla mappa di verità a terra con quelle derivate dalla classificazione *object-oriented* (Fig. 10) si rileva che per i pioppeti giovani (classe_pioppo2b) le superfici classificate presentano una sovrastima pari al 130%, mentre per i pioppeti maturi (classe_pioppo3b) i valori derivati dalla classificazione sono molto simili, con scostamenti percentuali pari a -10%.

Conclusioni

Le tecniche di classificazione *object-oriented* adottate in questo studio confermano l'efficacia del processo di segmentazione delle particelle pioppicose in un

Tab. 9 - Valori percentuali di Accuratezza Produttore (PA) e Utente (UA) e gli errori di omissione (EO) e commissione (EC) per i pioppeti giovani (classe_pioppo2b) e maturi (classe_pioppo3b). La classe_pioppo1b non è stata inclusa nella classificazione.

Pioppeti	PA	UA	EO	EC
Pioppeti giovani (classe_pioppo2b)	86.3	43.9	13.6	56.1
Pioppeti maturi (classe_pioppo3b)	80.6	97.1	19.4	2.9

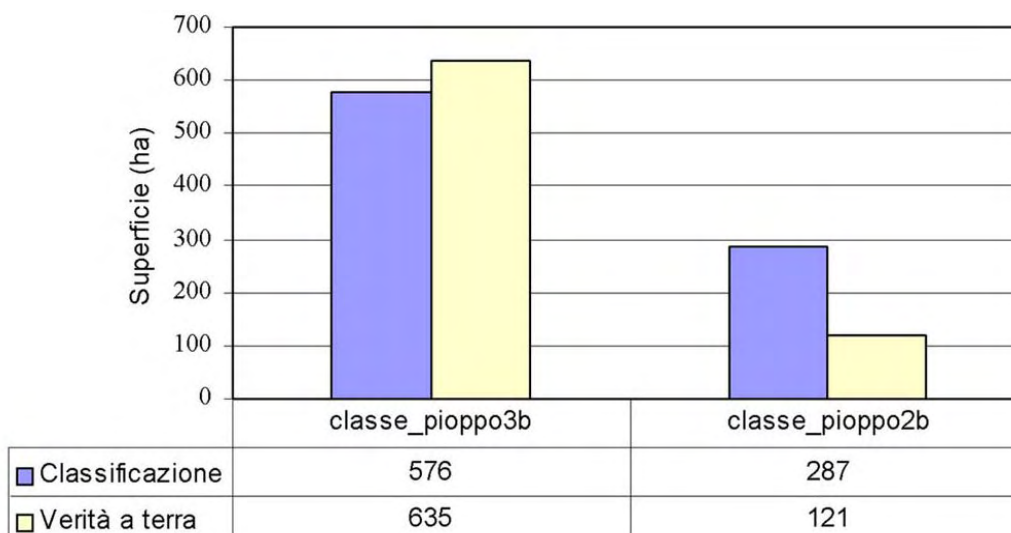


Fig. 10 - Superfici (ha) suddivise per classi di copertura dei pioppeti derivati da classificazione *object-oriented* dell'immagine QUICKBIRD (giugno 2006) e da dati di verità a terra derivati dall'aggiornamento in campo della fotointerpretazione (volo TerraItaly 2000) nell'area di studio di Casale Monferrato.

territorio agricolo come quello della Pianura Padana. La fase di segmentazione delle immagini ha raggiunto risultati ottimali quando, unitamente alle informazioni spettrali, sono state introdotte immagini derivate da filtri passa-alto e filtri tessiturali, estremamente idonei per l'identificazione delle discontinuità in quanto esaltano nell'immagine le regioni di confine tra oggetti differenti.

Si sono ottenuti buoni livelli di accuratezza totale nelle classificazioni (74-82%) per il riconoscimento delle superfici a pioppo in diverse classi di copertura. Per gli impianti appena costituiti o all'inizio del turno (2°-3° anno di età) le classificazioni non hanno fornito risultati attendibili in quanto gli scostamenti tra le superfici classificate e quelle derivate dalla fotointerpretazione risultano essere molto elevati. Al contrario, per i pioppeti prossimi alla maturazione o maturi (classe_pioppo34 per Valenza e classe_pioppo3b per Casale Monferrato), le procedure di classificazione automatica hanno permesso di ottenere risultati affidabili (sottostime tra 5-10%) che confermano l'utilità dei dati da satellite per l'identificazione delle coperture a pioppo. Inoltre si è ottenuto un generale miglioramento dei valori di accuratezza della classificazione per l'area di Casale Monferrato utilizzando classi di copertura definite secondo il modello spettrale, diverse da quelle stabilite in base al modello fotografico per fotointerpretazione. Questo lavoro rappresenta una prima applicazione delle immagini da satellite ad elevata risoluzione negli studi di monitoraggio delle superfici coltivate a pioppo e delle

loro variazioni, che sono necessari per supportare le azioni di pianificazione territoriale da parte delle Amministrazioni pubbliche. Tuttavia, per far fronte alle esigenze di programmazione degli approvvigionamenti di legno del comparto industriale è fondamentale stimare soprattutto le superfici disponibili al taglio e quindi identificare in fase di classificazione i pioppeti in classi di copertura adatte a tale fine.

Le classi di copertura che sono state adottate in questo lavoro non sono infatti propriamente adeguate per effettuare stime rigorose di superfici a pioppo pronte al taglio, in quanto comprendono anche pioppeti lontani dalla maturità commerciale. Sono quindi in corso ulteriori studi per migliorare le procedure di classificazione *object-oriented* utilizzando funzioni di appartenenza con logica *fuzzy* che prevedono l'individuazione di parametri spettrali e di forma proprie dei pioppeti maturi e di quelli appena impiantati.

Al momento quindi, per utilizzare i dati satellitari ad alta risoluzione spaziale può essere utile adottare le tecniche di segmentazione automatica che abbattano i tempi di digitalizzazione delle singole particelle pioppicole e successivamente, mediante una classificazione a video, ripartirle in classi di copertura specifiche per conseguire accurate stime di superfici per l'aggiornamento delle statistiche pioppicole.

Bibliografia

Baatz M, Benz U, Dehghani S, Heynen M, Holtje A, Hofman P, Mimler M, Sohlbach M, Willhauck G (2003). eCognition. User Guide 3. Definiens Imaging GmbH, Mun-

- chen, Germany, pp. 486.
- Baatz M, Schäpe A (2000). Multiresolution segmentation - an optimisation approach for high quality multi-scale image segmentation. In: "Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI" (Strobl J, Blaschke T, Griesebner G eds). Vorträge zum AGIT-Syposium Salzburg, Herbert Wichmann, Heidelberg, pp. 12-23.
- Brivio PA, Lechi G, Zilioli E (2006). Principi e metodi di telerilevamento. Città Studi Edizioni, Grugliasco (TO), pp. 521.
- Cellerino GP, Lapietra G (1977). Interpretazione di aerofotografie in piccola scala per il censimento della pioppicoltura. *Cellulosa e Carta XXVIII* (3): 1-11.
- Chen Y, Fung T, Lin W, Wang J (2005). An image fusion method based on object-oriented image classification. In: "Geoscience and Remote Sensing Symposium", IGARSS '05. Proceedings. IEEE International, 25-29 July 2005, pp. 3924-3927.
- Chiarabaglio PM, Coaloa D (2002). Valutazione qualitativa e quantitativa del pioppeto maturo in piedi. *L'Informatore Agrario* 41: 25-27.
- Chirici G, Corona P (2006). Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per il rilevamento delle risorse forestali. Aracne Editrice, Roma, pp. 186.
- 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.
- Chubey MS, Franklin SE, Wulder MA (2006). Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72: 383-394.
- Coaloa D (1999). Condizioni favorevoli all'espansione della pioppicoltura. *L'Informatore Agrario* 36: 79-81.
- Coaloa D (2007a). Estensione della pioppicoltura italiana dal secondo dopoguerra ad oggi. In: "Il libro bianco della pioppicoltura" (Commissione Nazionale per il Pioppo ed). Supplemento al n. 26/2008 di *Agrisole* 27 giugno 2008, pp. 19-22.
- Coaloa D (2007b). Inventario della pioppicoltura nella pianura piemontese nel 2006. Risultati progetto ARBOLEPI 2 "Indagine del mercato dell'arboricoltura da legno piemontese con particolare riferimento alla pioppicoltura", Regione Piemonte - Economia Montana e Foreste, Settore Politiche Forestali, pp. 12. [online] URL: <http://www.regione.piemonte.it/montagna/foreste/arboricoltura/pioppi.htm>
- Coaloa D, Chiarabaglio PM (1998). Inventario della pioppicoltura con aerofotografie ad alta quota. *Sherwood* 32: 49-51.
- Coaloa D, Grignetti A, Niccolini G (2006). Classificazioni di immagini ad elevata risoluzione mediante tecniche *object oriented* per il riconoscimento dell'arboricoltura da legno. In: Atti della 10° Conferenza Nazionale ASITA. Bolzano (Italia), 14-17 novembre 2006, pp. 711-716.
- Congalton RG (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37: 35-46. - doi: 10.1016/0034-4257(91)90048-B
- Franklin SE, Madie AJ, Lavigne MB (2001). Using spatial co-occurrence texture to increase forest structure and species composition classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67: 849-855.
- Giannetti F, Canavesio A (2004). Prove di segmentazione multirisoluzione su fotografie aeree e immagini multispettrali per la delimitazione delle aree boscate. In: Atti 8° Conferenza Nazionale ASITA, Roma 14-17 Dicembre 2004, Vol. II, pp.1177-1182.
- Gomarasca M (2004). Elementi di geomática. Associazione Italiana di Telerilevamento (AIT) Edizioni, Milano, pp. 618.
- Lamonaca A (2006). Utilizzo di immagini Quickbird per il monitoraggio annuale della superficie forestale. *L'Italia Forestale e Montana* 2: 119-132. - doi: 10.4129/IFM.2006.2.02
- Lapietra G, Megier J (1977). Stima delle aree coltivate a pioppo in Italia settentrionale, utilizzando i dati da satellite Landsat. *Cellulosa e Carta XXVIII* (3): 13-23.
- Lapietra G, Sampietro L, Collot T (1980). Inventario statistico per punti della pioppicoltura specializzata nella Pianura Padana. S.A.F., Roma, pp. 112.
- Leduc F (2004). Features space optimization prior to fuzzy image classification. [online] URL: <http://www.fusion2004.foi.se/papers/IFO4-0547.pdf>
- Meng Q (2006). Geostatistical prediction and mapping for large area forest inventory using remote sensing data. [online] URL: http://www.ucgis.org/summer2006/studentpapers/Mengqm_July03_2006.pdf
- Nervo G, Radice Fossati F (2006). Le iniziative per il rilancio della pioppicoltura italiana. *Alberi e Territorio* 1-2: 14-22.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium, Goddard Space Flight Center, Washington, NASA SP-351 I, pp. 309-317.