

VIRGINIA PUZZOLO
 MATTEO NARDELLI
 FLORA DE NATALE
 LORENZO BRUZZONE

Classificazioni di coperture forestali in aree alpine mediante immagini Landsat TM multi-temporali

Introduzione

Il telerilevamento da aereo e da satellite è stato ampiamente utilizzato in campo forestale sia per la classificazione del territorio forestale che per la stima di caratteristiche strutturali e biofisiche (WULDER 1998).

Immagini satellitari a media risoluzione, come quelle Landsat TM, sono state usate per la classificazione delle foreste con diversi gradi di successo (FRANKLIN, 1994; SCHRIEVER, CONGALTON, 1995; WHITE *et al.*, 1995). Buoni risultati sono stati ottenuti nella discriminazione delle conifere dalle latifoglie mentre non sempre sono soddisfacenti i risultati a livello di specie o gruppi di specie. (MOORE, BAUER, 1990; BAUER *et al.*, 1994).

Il livello di discriminazione ottenibile usando singole immagini Landsat TM è, infatti, generalmente basso (McCORMICK *et al.*, 1994) a causa della bassa separabilità delle specie dovuta all'effetto combinato della risoluzione spaziale (il lato del singolo pixel è pari a 30 m) e delle poche variazioni nella risposta spettrale che esistono tra specie con caratteristiche di riflettanza simili.

In questo contesto, diversi autori hanno riconosciuto i vantaggi dell'utilizzo di immagini "multi-temporali" riprese nello stes-

so anno per migliorare la capacità di classificazione a livello sia di uso del suolo (PAXLENNEY, WOODOOK, 1997; OETTER *et al.*, 2000) che di categorie forestali (SCHRIEVER, CONGALTON, 1995; WOLTER *et al.*, 1995; MICKELSON *et al.*, 1998; GEMMELL *et al.*, 2001). Immagini che colgano diversi momenti fenologici possono, infatti, aiutare a discriminare meglio specie aventi risposte spettrali simili (WOLTER *et al.*, 1995) e che, per tale motivo, risultano praticamente indistinguibili su singole immagini (GEMMELL *et al.*, 2001).

In questo studio, sono state utilizzate due immagini Landsat TM di giugno ed ottobre per verificare l'utilità di informazioni multi-temporali nella classificazione delle aree boscate sia a livello di conifere-latifoglie che di specie o gruppi di specie. Il lavoro è stato condotto su un'area alpina del Trentino orientale, nell'ambito del progetto RI.SELV.ITALIA del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali.

Area oggetto di studio

L'area oggetto di studio è localizzata nella parte orientale del Trentino e corrisponde per gran parte al Comprensorio dell'Alta Valsugana. La vegetazione forestale

sul territorio in esame è caratterizzata da una forte prevalenza di conifere ed in particolare di abete rosso, dovuta sia a fattori ecologici che ai condizionamenti pregressi della coltivazione del bosco che ha favorito la diffusione di questa specie.

Nelle fasce collinari e montane, sui suoli più poveri o nelle condizioni più alterate dalla presenza antropica, si riscontrano frequentemente due specie di conifere pioniere: il pino silvestre (talvolta sostituito dal pino nero), che forma anche estesi popolamenti puri, ed il larice, l'unica conifera italiana dal comportamento deciduo, in grado di colonizzare coltivi o prati-pascoli abbandonati, dalle quote medio basse a quelle più elevate dove può associarsi al pino cembro.

La vegetazione delle latifoglie è per lo più relegata a cedui presenti alle quote più basse, nei fondovalle e nella fascia collinare-sub-montana dove costituisce querceti di rovere, aceri-frassinetti/tiglieti e ostrieti e, dove è maggiore l'influenza antropica, boschi misti di castagno e robinia. Nella fascia montana è presente il faggio, governato sia a ceduo che a fustaia, nelle condizioni climatiche (con elevata umidità atmosferica) e edafiche (sui suoli più profondi) più favorevoli per questa specie. Il faggio si ritrova spesso consorziato con l'abete bianco e, dove le condizioni climatiche sono più continentali, anche con l'abete rosso.

Metodologia

In questo studio sono state utilizzate due immagini Landsat TM (19/06/00 e 12/10/01) da cui sono state estratte due sotto-scene delle dimensioni di 754 x 800 pixel corrispondenti all'area oggetto di studio. Le sotto-scene sono state coregistrate e georeferenziate usando il software Envi 3.5.

La classificazione è stata condotta in due fasi: nella prima sono state separate le due principali categorie forestali, ovvero conifere e latifoglie, mentre nella seconda si è voluto approfondire il grado d'analisi differenziando le conifere in base alle specie dominanti: abeti (comprendendo sia l'abete bian-

co che l'abete rosso), pini (senza distinzione fra pino silvestre e pino nero) e larici.

Il metodo di classificazione utilizzato in entrambe le classificazioni è stato il *Maximum likelihood*, applicato sia alle singole immagini estiva ed autunnale che a quella ottenuta dalla loro fusione in un'unica immagine detta, per tale motivo, multi-temporale. Al fine di escludere dalle classificazioni pixel con bassi valori di probabilità di appartenenza alle classi, è stato impostato un valore di soglia di rifiuto pari a 0,9.

È stata, anche, creata una maschera bosco-non bosco per focalizzare la classificazione sulle sole aree boschive. La maschera è stata ricavata, con qualche modifica, dai poligoni di bosco risultanti dal database dei Piani Economici e Forestali della Provincia Autonoma di Trento (PEFO), usando il software ArcView 3.3. Questo database è stato anche utilizzato per la selezione delle aree di *training* (dati di verità a terra che guidano la classificazione). Sono state dapprima individuate le particelle omogenee, sia per composizione che per grado di copertura, da cui sono stati successivamente selezionati i poligoni del *training set* anche con l'aiuto della foto interpretazione di orto-foto digitali a colori (volo IT2000).

Sono stati selezionati dei poligoni per ciascuna delle seguenti specie arboree: abete rosso, abete bianco, pino silvestre, pino nero e larice per le conifere; faggio, castagno-robinia e quercia-carpino per le latifoglie. Le aree così selezionate sono state poi accorpate in conifere e latifoglie per la prima classificazione e nelle classi abetine, pinete, lariceti e latifoglie per la seconda (tab. 1).

Abete bianco	} Conifere	} Abetine - peccete
Abete rosso		
Pino nero		} Pinete
Pino silvestre		
Larice		Lariceti
Castagno	} Latifoglie	} Latifoglie
Faggio		
Quercia		
Carpino		

Tab.1 - Classi considerate nelle due classificazioni delle coperture forestali.

Valutazione dell'accuratezza

L'accuratezza globale (overall accuracy) è data dalla percentuale di punti di verifica a terra correttamente classificati rispetto al numero totale di punti verificati.

L'accuratezza del produttore (producer's accuracy) è data dallo stesso rapporto, ma in relazione ad ogni singola classe e permette di valutare come una determinata classe del territorio viene rappresentata dalla mappa ottenuta.

L'accuratezza dell'utilizzatore (user's accuracy) è invece data dalla percentuale dei punti di controllo classificati bene rispetto al totale dei punti controllati che nella mappa risultavano di quella data classe. Quest'ultima viene chiamata anche affidabilità, poiché è una misura di quanto sia affidabile la rappresentazione del territorio ottenuta con la classificazione.

Il coefficiente K, infine, è un indice complesso, che permette di esprimere in sintesi sia l'accuratezza del produttore che l'affidabilità della classificazione.

La stima dell'accuratezza dei risultati ottenuti è stata eseguita su un *test set* iniziale di 1000 punti selezionati mediante campionamento casuale su tutta l'area di studio, dei quali sono stati considerati solo quelli di classificazione certa, pari a 529.

Dalle matrici di confusione sono stati poi calcolati alcuni indici che permettono la valutazione della bontà della classificazione risultante, ed in particolare: l'accuratezza globale calcolata complessivamente su tutte le classi, l'accuratezza del produttore e quella dell'utilizzatore o affidabilità, calcolate in riferimento a ciascuna classe, ed un indice di sintesi, il coefficiente K (COHEN, 1960).

Classificazione conifere-latifoglie

In tabella 2 sono riportati i risultati delle accuratèzze per le classificazioni conifere-latifoglie.

Confrontando i risultati ottenuti con le due immagini, estiva ed autunnale, si nota che quella estiva presenta un aumento nell'accuratezza globale rispetto a quella autunnale (91,70% contro 90,63%) mantenendo valori di K costanti e pari a 0,72. Se però con l'immagine estiva si classificano meglio le conifere (PA=92,25%), con quella autunnale si ha un risultato migliore per le latifoglie con un aumento nell'accuratezza (PA) di circa il 4%. Ciò è principalmente dovuto all'aumento della separabilità tra latifoglie e conifere nel periodo autunnale, quando le prime entrando in stasi vegetativa perdono le foglie.

I migliori risultati sia di *Overall accuracy* che di K si ottengono, però, dalla classificazione multi-temporale raggiungendo rispettivamente valori di 93,69% e 0,78. Si notano anche incrementi di alcuni punti percentuali nella *Producer's accuracy* della classe conifere che raggiunge un valore di 94,58%. Ancora più netto è il miglioramento

Immagine	multi-temporale		estiva		autunnale	
	PA (%)	UA (%)	PA (%)	UA (%)	PA (%)	UA (%)
Conifere	94.58	97.80	92.25	97.76	90.31	98.20
Latifoglie	89.16	76.29	88.75	68.27	92.13	66.67
OA (%)	93.69		91.70		90.63	
K	0.78		0.72		0.72	
% pixel non classificati	4.80		6.19		2.19	

Tab. 2 - *Producer's* (PA), *User's* (UA), *Overall accuracy* (OA) e K ottenuti per la classificazione conifere-latifoglie delle immagini TM multi-temporale, estiva e autunnale.

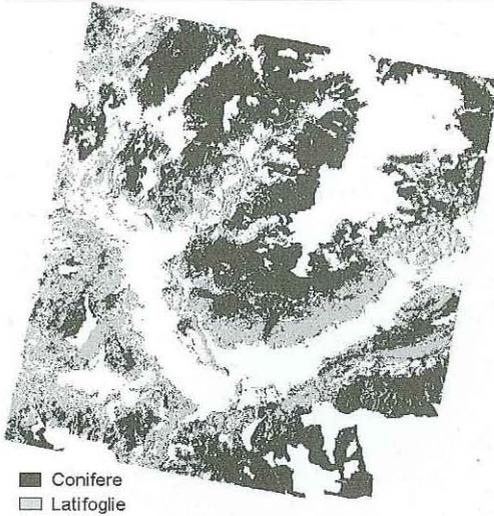


Fig. 1 – Classificazione conifere-latifoglie ottenuta con l'immagine TM multi-temporale.

dell'*User's accuracy* della classe latifoglie che da un massimo di 68,27% nella classificazione mono-temporale arriva al 76,29%.

In figura 1, si può osservare la classificazione conifere-latifoglie dell'area di studio ottenuta dall'immagine multi-temporale.

Classificazione per gruppi di specie

Per quanto riguarda i risultati delle classificazioni a livello di gruppi di specie, riportati in tabella 3, si può notare che la classificazione basata sull'immagine estiva è considerevolmente più accurata di quella relativa all'immagine autunnale. L'accuratezza globale infatti risulta pari al 75,55%

nel primo caso e a solo al 67,97% nell'altro; inoltre, si evidenziano risultati migliori con l'immagine estiva sia per l'indice K sia per la *Producer's* e la *User's accuracy* per tutte le classi considerate.

Un ulteriore miglioramento nell'accuratezza si ottiene nella classificazione multi-temporale, con la quale si ottengono valori di accuratezza globale pari al 77,05%.

Per la classe abeti si evidenzia un aumento sia nella PA che nell'UA così come si ottengono risultati migliori di PA per le classi pini e latifoglie. Un peggioramento notevole, invece, si verifica per la classe larice, che presenta valori particolarmente bassi di PA, pari al 28,33%. Ciò è probabilmente da ascrivere al fatto che il larice è una conifera decidua che presenta un comportamento intermedio tra quello delle conifere e quello delle latifoglie.

Firme spettrali e separabilità delle classi

Il miglioramento complessivo della classificazione ottenuto usando l'immagine TM multi-temporale, sia nella prima classificazione conifere-latifoglie che nella seconda a livello di specie o gruppi di specie, è dovuto al diverso comportamento spettrale delle specie considerate, come si può osservare in figura 2.

La risposta spettrale delle specie, infatti, non è costante durante l'arco dell'anno ma cambia in funzione dello stadio vegetativo in cui queste si trovano. Osservando la risposta spettrale delle quattro classi di copertura boschiva identificate (fig. 2), emerge che la riflettanza delle latifoglie si riduce di oltre il

Immagine	multi-temporale		estiva		autunnale	
	PA (%)	UA (%)	PA (%)	UA (%)	PA (%)	UA (%)
Abeti	83.96	91.11	80.41	90.49	68.92	89.47
Pini	70.15	55.95	66.67	58.67	65.67	36.67
Larice	28.33	45.95	45.16	40.58	33.33	41.67
Latifoglie	93.83	69.09	88.61	72.92	89.89	68.97
OA (%)	77.05		75.55		67.97	
K	0.63		0.61		0.52	
% Pixel non classificati	6.13		7.45		2.29	

Tab. 3 - *Producer's* (PA), *User's* (UA), *Overall accuracy* (OA) e K ottenuti per la classificazione di dettaglio delle immagini mono-temporali e multi-temporale.

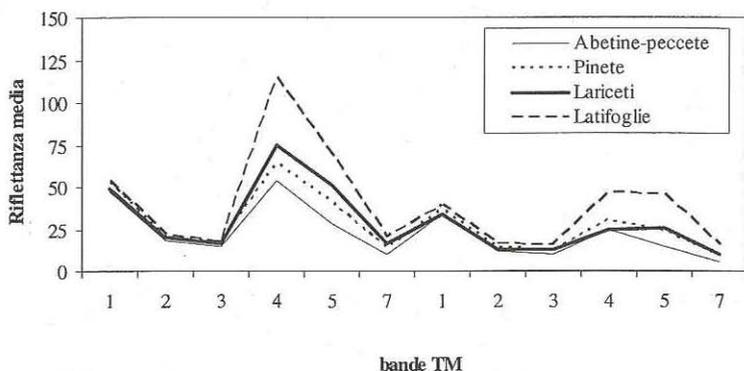


Fig. 2 - Firme spettrali multi-temporali delle diverse classi di copertura boschiva.

50% nelle bande TM 4 e 5 tra l'immagine estiva e quella autunnale. Questo è dovuto alla perdita delle foglie ed all'entrata in stasi vegetativa che caratterizza le specie caducifoglie nel periodo autunnale.

Le conifere presentano, invece, una variazione della risposta spettrale meno marcata in quanto sono specie sempreverdi, ad eccezione del larice che, essendo deciduo, ha un andamento nella risposta spettrale più simile a quello delle latifoglie, con valori di riflettanza medi più alti delle altre conifere nelle bande 4 e 5 dell'immagine estiva. Tale specie però nell'immagine autunnale presenta valori di riflettanza simili a quelli degli abeti nella banda 4 e a quelli dei pini nella banda 5. Questo è il motivo dei bassi valori di accuratezza ottenuti sia sull'immagine autunnale che su quella multi-temporale.

Al fine di verificare se la separabilità delle firme spettrali delle diverse classi risulta effettivamente significativa sono state valutate le separabilità delle classi calcolando la distanza Jeffries-Matusita, ottenendo i valori riportati in tabella 4.

Osservando questa tabella risulta evidente che la separabilità delle classi considerate, denominate per semplicità abetine, pinete, lariceti e boschi di latifoglie, aumenta notevolmente sull'immagine multi-temporale rispetto sia a quella estiva che a quella autunnale. L'aumento della separabilità è dovuto al fatto che le informazioni multi-temporali aiutano a discriminare meglio specie che presentano risposte spettrali simili su

Immagine autunnale

	Abetine	Latifoglie	Lariceti	Pinete
Abetine	-			
Latifoglie	1,7696	-		
Lariceti	1,3497	1,6632	-	
Pinete	1,2274	1,2401	1,4693	-

Immagine estiva

	Abetine	Latifoglie	Lariceti	Pinete
Abetine	-			
Latifoglie	1,9338	-		
Lariceti	1,3381	1,5518	-	
Pinete	1,6504	1,5472	1,4809	-

Multi-temporale

	Abetine	Latifoglie	Lariceti	Pinete
Abetine	-			
Latifoglie	1,9946	-		
Lariceti	1,7763	1,9399	-	
Pinete	1,9166	1,8572	1,9381	-

Tab. 4 - Separabilità delle classi ottenute per le immagini usate in questo studio.

single immagini (WOLTER *et al.*, 1995), incrementando di conseguenza anche l'accuratezza della classificazione risultante, come precedentemente evidenziato.

Discussione

L'utilizzo di immagini Landsat TM relative a diversi periodi dell'anno determina un miglioramento nella classificazione di coperture forestali, specialmente in boschi caratterizzati da coperture miste e da specie decidue (HE *et al.*, 1998), in quanto fornisce informazioni aggiuntive rispetto a quel-

le contenute in una singola immagine (GEMMELL *et al.*, 2001).

I cambiamenti fenologici aiutano a separare specie difficilmente riconoscibili su singole immagini, come nel caso delle specie decidue da quelle sempreverdi, che possono essere facilmente distinte quando si dispone di immagini acquisite dopo la caduta delle foglie (LILLESAND, KIEFER, 2000). Anche le caratteristiche delle chiome e del sottobosco variano durante l'arco dell'anno, modificando il contrasto tra chiome e sottobosco (MILLER *et al.*, 1998) e, di conseguenza, influenzandone la separabilità (GEMMELL *et al.*, 2001).

La classificazione di paesaggi caratterizzati da variazioni stagionali, forestali (WOLTER *et al.*, 1995; MICKELSON *et al.*, 1998) o agrari (PAX-LENNEY, WOODCOCK, 1997), mostra un incremento nell'accuratezza quando è derivata da immagini multi-temporali raggiungendo per le coperture forestali accuratèzze globali che variano tra il 70 ed il 95% (WOLTER *et al.*, 1995).

In questo studio, si sono ottenuti valori di *Overall accuracy* pari al 93,69% con K di 0,78 nella classificazione conifere-latifoglie e di 77,05% con $K=0,63$ spingendo l'analisi a livello di gruppi di specie. Questi risultati confermano che immagini di più date, distribuite in modo opportuno durante l'arco dell'anno, aumentano la capacità di discriminazione delle specie perché contengono informazioni sulle variazioni stagionali della risposta spettrale delle chiome (McCORMICK *et al.*, 1993).

È però essenziale disporre di immagini che riprendano le specie in diversi stadi fenologici e, pertanto, ben distribuite durante l'arco dell'anno in base anche alle caratteristiche climatiche (sia macro che micro climatiche) e stagionali della zona in esame.

Conclusioni

Dai risultati ottenuti, si conferma che l'utilizzo di più immagini relative a diversi periodi dello stesso anno aiuta nella classi-

ficazione di coperture forestali presenti nell'area oggetto di studio.

Le informazioni sulle variazioni del tempo della risposta spettrale delle classi considerate hanno, infatti, permesso di ottenere un miglioramento nella discriminazione raggiungendo valori di accuratezza globale buoni sia a livello di conifere-latifoglie (93,69%) che di specie o gruppi di specie (77,05%).

Si è inoltre notato che l'immagine di giugno dà i risultati di accuratèzze migliori rispetto a quella di ottobre, specialmente quando si spinge l'analisi nella classificazione di dettaglio (75,55% contro 67,97%), anche se l'immagine autunnale fornisce informazioni utili per la discriminazione delle latifoglie.

Ringraziamenti

Gli autori colgono l'occasione per ringraziare il Servizio Foreste della Provincia Autonoma di Trento per i dati e i materiali messi a disposizione nell'ambito della collaborazione in corso al progetto RI.SELV.ITALIA.

dott.ssa Flora De Natale

dott.ssa Virginia Puzolo

Istituto Sperimentale per l'Assessment Forestale e l'Alpicoltura

P.za Nicolini, 6 - 38050 Villazzano, Trento

e-mail: denatale@isafa.it

e-mail: virginia.puzolo@isafa.it

prof. Lorenzo Bruzzone

Matteo Nardelli

Dip. Informatica e Telecomunicazioni
Università di Trento

Via Sommarive 14, 38050 - Povo, Trento

e-mail: lorenzo.bruzzone@ing.unitn.it

e-mail: mattenar@iol.it

BIBLIOGRAFIA

BAUER M.E., BURK T.E., EK A.R., COPPIN P.R., LIME S.D., WALSH T.A., WALTERS D.K., BEFORT W., HEINZEN D.F., 1994 - *Satellite inventory of Minnesota forest resources*. Phot. Eng. & Rem. Sens., 60: 287-298.

COHEN J., 1960 - *A coefficient of agreement for nominal scales*. Educational and psychological measurement, 20 (1): 37-46.

FRANKLIN S.E., 1994 - *Discrimination of subalpine forest species and canopy density using digital CASI, SPOT PLA, and Landsat TM data*. Phot. Eng. & Rem. Sens., 60: 1233-1241.

GEMMELL F., VARJO J., STRANDSTROM M., 2001 - *Estimating forest cover in a boreal forest test site using Thematic Mapper data from two dates*. Rem. Sens. Env., 77, 2: 197-211.

HE H.S., MLADENOFF D.J., RADELOFF C., CROW T.R., 1998 - *Integration of GIS data and classified satellite imagery for regional forest assessment*. Ecological Application, 8, 4: 1072-1083.

LILLESAND T.M., KIEFER R.W., 2000 - *Remote Sensing and Image Interpretation*. 4th Edition, John Wiley & Sons, New York, 477-482.

MCCORMICK N., KENNEDY P., FOLVING S., 1993 - *An integrated methodology for mapping European forest ecosystems using satellite remote sensing*. Proceedings to the International Workshop "Satellite technology and GIS for Mediterranean forest mapping and fire management" held in Thessaloniki, Greece between 4th and 6th November.

MCCORMICK N., KENNEDY P., FOLVING S., 1994 - *Forest nomenclature schemes suitable for satellite remote sensing surveys*. Atti del workshop internazionale "Design a system of nomenclature for European forest mapping", tenuto a Joensuu, dal 13 al 15 giugno.

MICKELSON J.G., CIVCO D.L., SILANDER J.A., 1998 - *Delineating forest canopy species in the north-eastern United States using multi-temporal TM imagery*. Phot. Eng. Rem. Sens., 64, 9: 891-904.

MILLER J.R., WHITE H.P., CHEN J.M., McDERMID G., PEDDLE D., FOURNIER R., SHEPHERD P., RUBINSTEIN I., FREEMANTLE J., SOFFER R., LEDREW E., 1997 - *Seasonal change in understory reflectance of boreal forests and influence on canopy vegetation indices*. J.Geophys.Res., v.102, 24: 29475-29482.

MOORE M.M., BAUER M.E., 1990 - *Classification of forest vegetation in north-central Minnesota using Landsat Multispectral Scanner and Thematic Mapper data*. For.Sc., 36: 330-342.

OETTER D.R., COHEN W.B., BERTERRITCHE M., MAIERSPERGER T.K., KENNEDY R.E., 2000 - *Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data*. Rem. Sens. Env., 76: 139-155.

PAX-LENNEY M., WOODOOK C.E., 1997 - *Monitoring agricultural lands in Egypt with multitemporal Landsat TM imagery: How many images are needed?* Rem. Sens. Env., 59, 3: 522-529.

SCHRIEVER J.R., CONGALTON R.G., 1995 - *Evaluating seasonal variability as an aid to cover-type mapping from Landsat Thematic Mapper data in the Northeast*. Phot.Eng.&Rem.Sens., 61: 321-327.

WHITE J.D., KROH G.C., PINDER J.E., 1995 - *Forest mapping at Lassen volcanic National park, California, using Landsat TM data and a Geographical information system*. Phot. Eng.& Rem. Sens., 61: 299-305

WOLTER P.T., MLADENOFF D.J., HOST G.E., CROW T.R., 1995 - *Improved forest classification in the Northern Lake States using multi-temporal Landsat imagery*. Phot.Eng.Rem.Sens., 61: 1129-1143.

WULDER M., 1998 - *Optical remote sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters*. Progress in Physical Geography, 22, 4: 449-476.

Riassunto

In questo lavoro è stata valutata l'utilità di immagini Landsat TM multi-temporali per la classificazione delle coperture forestali in un'area di studio localizzata nelle Alpi orientali del Trentino. In particolare, al fine di migliorare la discriminazione delle specie sempreverdi da quelle decidue, si è deciso di utilizzare un set di immagini composto da una scena estiva ed una autunnale.

La classificazione è stata condotta in due fasi usando il classificatore a massima verosimiglianza: dopo aver distinto le latifoglie dalle conifere, per queste ultime si è proceduto ad una classificazione più dettagliata. Sono stati inoltre confrontati e discussi i diversi risultati ottenuti usando singole immagini TM oppure immagini multi-temporali. Per entrambe le classificazioni effettuate è stato notato che l'uso dell'immagine multi-temporale ha portato ad un incremento dell'accuratezza.

Summary

In this paper, the usefulness of multi-seasonal Landsat TM images for forest cover classification was evaluated in a test area located in the Eastern Alps of Trentino. In particular, a multi-seasonal data-set of two images, taken in June and October, was chosen for increasing the separability between evergreen and broadleaved species by enhancing the discrimination capabilities of their phenological trends.

The classification was carried out in two steps using the Maximum likelihood classifier: firstly, coniferous and broadleaved deciduous forests were discriminated and then the coniferous forests were classified at a more detailed level. The results achieved by the classification of the single TM images and the multi-seasonal image were compared and discussed.

The results obtained for both the classifications showed that an increase of accuracy was achieved using the multi-seasonal image.