



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Uso del sensore iperspettrale MIVIS per la realizzazione di cartografia forestale a media e grande scala

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Uso del sensore iperspettrale MIVIS per la realizzazione di cartografia forestale a media e grande scala / G. Chirici; L. Bottai; A. Castagnoli; M. Marchetti; A. Oradini. - In: GENIO RURALE- ESTIMO E TERRITORIO. - ISSN 0016-6863. - STAMPA. - 9:(1997), pp. 54-63.

Availability:

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/955267> of the repository was last updated on

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

Uso del sensore iperspettrale MIVIS per la realizzazione di cartografia forestale a media e grande scala

Introduzione

Il presente articolo vuole rendere note le potenzialità di un nuovo metodo di lavoro finalizzato alla realizzazione di cartografia forestale, ma anche più estensivamente ambientale, basato sull'uso sinergico di diverse fonti di dati, che vengono trattati mediante sistemi informativi geografici (G.I.S.) capaci di integrarli, elaborarli e gestirli in forma organizzata (Kevin *et al.*, 1994). Tra i dati utilizzati sono preponderanti quelli tele-rilevati ed in particolare quelli prodotti dal sensore iperspettrale aviotrasportato MIVIS ad elevata risoluzione sia spaziale ma soprattutto spettrale.

Questo sensore rappresenta il più avanzato strumento operativo in ambito internazionale ed è stato finora prodotto in un unico esemplare di proprietà del C.N.R. per il progetto Lara (Bianchi *et al.*, 1994).

Per l'area presa in esame è stata realizzata una cartografia digitale forestale a indirizzo vegetazionale a scala di dettaglio (1:10.000), utilizzando le basi di classificazione CORINE/Biotopes con una evidente valenza operativa sia per l'approfondimento del progetto CORINE/Land Cover sia per le iniziative necessarie ai programmi nazionali e locali tesi alla salvaguardia della natura e allo sviluppo compatibile (Commission of the European Communities, 1991).

La conduzione della ricerca è stata resa possibile dalla realizzazione del progetto "Vulnerabilità degli acquiferi delle sorgenti del Peschiera" da parte della *Compagnia Generale di Riprese Aeree S.p.A. di Parma* per conto dell'ACEA - Roma e della disponibilità e collaborazione assicurata dal Progetto C.N.R. Lara, in particolare dal suo responsabile scientifico prof. Carlo Maria Marino.

Area d'indagine

Il territorio oggetto di studio è quello comprendente i seguenti quattro biotopi, individuati dal censimento condotto dalla Società Botanica Italiana (*Gruppo di lavoro per la conservazione della natura della Società Botanica Italiana*, 1971 e 1979):

- Laghi di Paterno e Piana di San Vittorino,
- Piano di Rascino,
- Valle di Malito,
- Montagne della Duchessa e Massiccio del Monte Velino.

ALESSANDRO CASTAGNOLI

MARCO MARCHETTI

LORENZO BOTTAI

GHERARDO CHIRICI

ARTURO ORADINI

Oltre ai biotopi sopra menzionati tutta l'area risulta di elevato interesse naturalistico e paesaggistico e, comunque, tale da costituire nel complesso un *continuum* difficilmente scomponibile sia in termini di indagine ambien-

tale che di gestione ecologica del territorio. L'area è sita in provincia di Rieti (Lazio) e si estende su una superficie di circa 25.000 ha.

I limiti orientale e meridionale sono rappresentati dal confine regionale, che coincide con la linea di spartiacque del Velino; il limite settentrionale dalla Piana di San Vittorino fino all'abitato di Antrudoco ed il confine occidentale è individuato dalla Valle del Salto (coordinate UTM est min: 2351489, max 2371675; coordinate UTM nord min: 4681759, max: 4706629). Per quanto riguarda le caratteristiche geologiche e pedologiche va rilevato che la parte dell'Appennino laziale ricadente nella zona di indagine vede una estesa presenza di formazioni calcaree, diffuse in strati anche di notevole spessore.

In tempi geologicamente recenti (Quaternario) la zona è stata parzialmente sottoposta all'azione modellatrice di piccoli ghiacciai che, alle quote più alte del territorio, hanno originato alcune figure morfologiche tipiche di questi ambienti (circhi e morene).

Prendendo in considerazione gli aspetti pedologici va notato che le caratteristiche chimiche dei terreni non costituiscono un fattore limitante per la diffusione della vegetazione; determinanti risultano essere invece la morfologia, la profondità, la pietrosità e la capacità di ritenuta idrica del suolo.

L'intera zona è scarsamente abitata e coltivata, fenomeno in parte dovuto ad un processo di abbandono antropico iniziato circa 20 anni fa; sono evidenti fenomeni di evoluzione spontanea della vegetazione verso forme più naturali (successioni secondarie).

La zona è coperta per la maggior parte da boschi, anche grazie ad un intervento di riforestazione eseguito negli anni '50 con Pino nero (*Pinus nigra* sp.). Le principali tipologie forestali presenti sono: querceti (*Quercus cerris* e *Quercus pubescens*), faggete (*Fagus sylvatica*) e castagneti (*Castanea sativa*).

Metodologia

I dati multispettrali ad alta risoluzione presentano problematiche diverse rispetto ai dati satellitari della serie

Landsat TM generalmente utilizzati nelle indagini ambientali. Il dato a grande risoluzione risulta essere molto dispendioso sia in termini di processamento macchina che di spazio occupato nella memoria. Il problema da risolvere più considerevole è però senz'altro la correzione geometrica del dato "grezzo" originale che manifesta forti distorsioni legate sia alle variazioni di assetto della piattaforma in volo che alle deformazioni determinate dalla accidentata morfologia del territorio collinare e montagnoso (Pavanati, 1996). Correzioni geometriche di precisione sono possibili tramite l'utilizzo di un modello digitale del terreno e conoscendo l'esatta posizione e assetto del sensore per ogni linea acquisita. In alternativa alla suddetta tecnica, che risulta molto dispendiosa sia per l'utilizzo di algoritmi di calcolo sofisticati che per i costi economici (costruzione del modello digitale del terreno), è possibile ottenere una soddisfacente georeferenziazione suddividendo l'intera strisciata in immagini più piccole e utilizzando le consuete metodiche per punti di controllo (Richards, 1995).

Caratteristiche del sensore

Il sensore aviotrasportato MIVIS (Multispectral Infrared/Visible Imaging Spectrometer) della Daedalus Enterprise inc. funziona in una tipica configurazione chiamata "wisk-broom": la luce riflessa dallo specchio rotante è raccolta da un telescopio parabolico, alimenta quattro spettrometri che coprono un'ampia parte dello spettro elettromagnetico, dal visibile all'infrarosso termico. Il sistema campiona 755 pixel per ogni linea acquisita con un IFOV (Instant Field of View) pari a 2 mrad, mentre il complessivo FOV (Field of View) risulta essere circa di 71.059°. Il segnale grezzo viene amplificato, campionato e registrato a 12 bit. In tabella 1 sono riasunte le principali caratteristiche tecniche (Daedalus, 1990).

Per l'alta risoluzione ottenibile (dimensione del pixel a partire da 2,5 m a seconda della quota relativa di volo) e per il numero di canali di registrazione (102), le immagini MIVIS risultano di straordinaria utilità per un vastissimo spettro di applicazioni, sia per lo studio delle acque superficiali che per l'emerso, antropizzato o ad elevata naturalità, per attività di conoscenza, inventario, monitoraggio o pianificazione territoriale.

Caratteristiche dei Sistemi Informativi Territoriali (S.I.T.)

I GIS utilizzati per il presente lavoro non sono descritti in quanto lo scopo dell'articolo è di offrire metodologie e tecniche di lavoro compatibili con la più larga generalità dei GIS commerciali su piattaforma PC. In particolare, sono inclusi fra i GIS in grado di sopportare l'attività descritta anche quelli abilitati per Windows ad 8 bit, utilizzabili in ambiente Windows 95. I requisiti hardware sono minimi, le più comuni configurazioni per PC Pentium sono sufficienti.

Occorre che i sistemi siano in grado di compiere le normali funzioni di un SIT quali: trattamento di immagini raster e vettoriali, gestione di DB associati ad elemen-

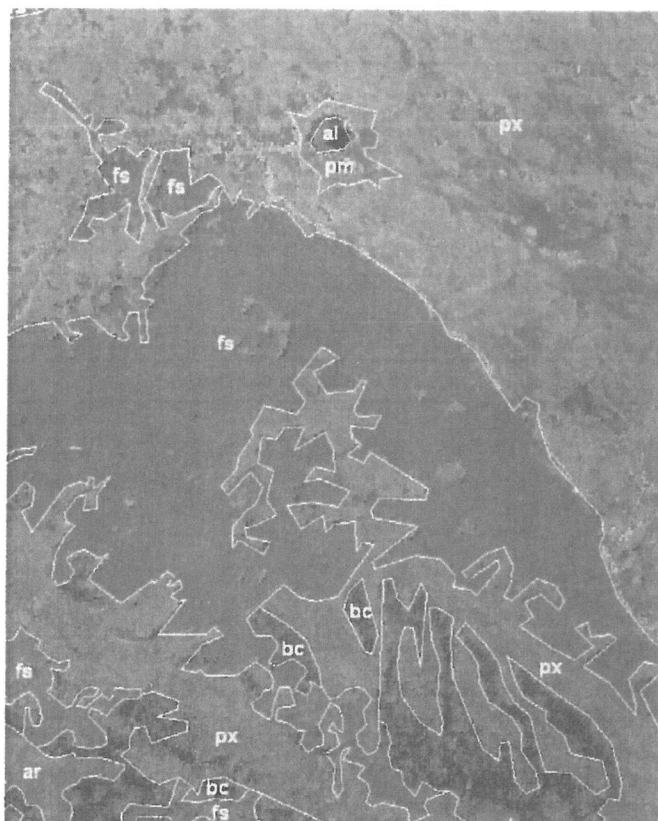


Figura 1 - Composizione RGB dei canali 18-14-13 del sensore MIVIS, che fornisce una immagine all'infrarosso falso colore, con sovrapposta la classificazione forestale delle diverse formazioni vegetali.

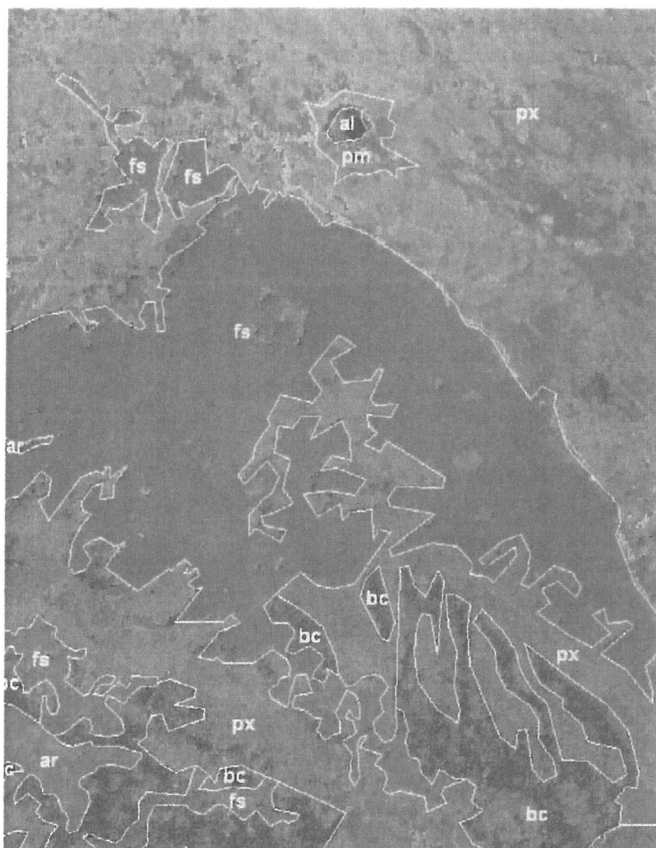


Figura 2 - Composizione RGB dei canali 9-7-5 del sensore MIVIS, che fornisce una immagine a colori reali.

Tabella 1

Numero di canali: 102	
Spettro elettromagnetico coperto:	20 bande da 0,43 a 0,83 mm 8 bande da 1,15 a 1,55 mm 64 bande da 1,985 a 2,479 mm 10 bande da 8,21 a 12,7 mm
FOV: 71.059°	
IFOV: 2,0 mrad	
pixel per linea: 755	

Tabella 2

Banda	Lunghezza d'onda (nm)
5	520
7	562
9	600
13	682
14	700
18	782
25	1.374
26	1.423
35	2.039
42	2.099
50	2.164
93	8.378

ti geografici, specifiche elaborazioni di immagini telerilevate, preparazione di stampe, ecc. Si suggerisce, in quest'ambito, l'utilizzo di sistemi complementari in funzione delle loro peculiari caratteristiche:

- per la classificazione supervised delle immagini, per l'analisi delle componenti principali e per la preparazione della matrice di confusione;

- per la georeferenziazione, l'interpretazione e la digitalizzazione a video, per la composizione delle immagini a falso colore e per la preparazione delle stampe.

Alcune particolari operazioni hanno richiesto la preparazione di specifici programmi in linguaggio Turbo C (acquisizione dei dati, analisi dell'istogramma, classificazione unsupervised), peraltro non necessari utilizzando software completi ed evoluti.

Elaborazioni

Uno dei principali obiettivi della ricerca è stata la determinazione dell'affidabilità dell'utilizzo delle immagini multispettrali per la discriminazione delle principali caratteristiche delle formazioni vegetali. Abbiamo inoltre utilizzato la consueta tecnica di processamento e classificazione di immagini tramite algoritmi di elaborazione basati sul criterio di verosimiglianza. Sono state selezionate solo alcune delle 102 bande disponibili per ridurre il set di dati da trattare; sono state analizzate ed elaborate infatti solamente le bande riportate nella tabella 2 per un totale di 12 canali, in quanto costituivano quelle più significative in relazione alla risposta della vegetazione.

Georeferenziazione

I dati del sensore MIVIS sono stati preprocessati e compressi da 16 ad 8 bit in quanto provenienti da un ambiente UNIX. Le immagini rappresentano strisciate

lunghe circa 25 km e larghe circa 4 km ciascuna. Di ogni strisciata è stata selezionata e ritagliata una unità di analisi di circa 4 x 4 km.

Precedentemente era stata eseguita la scansione ad alta risoluzione (800 dpi) della tavoletta IGM 1:25.000 della zona; l'immagine raster così ottenuta era stata georeferita con precisione, utilizzando come punti di controllo nodi del reticolo geografico.

A questo punto si è georeferita l'immagine MIVIS ricercando un congruo numero di punti riconoscibili sulla base topografica digitale (incroci di strade, fossi, ecc.) ed utilizzando, per la correzione geometrica, una funzione polinomiale quadrata.

L'errore quadratico medio è risultato dello stesso ordine di grandezza dell'errore di graficismo per una scala 1:10.000, tenendo comunque conto che il riferimento per il grado di accuratezza non è stato una verità terreno ma la cartografia rasterizzata 1:25.000. L'ergonomia dell'interfaccia sistema-utente del software, indicato ha reso estremamente veloce questa fase che è stata svolta interamente a video, digitalizzando fisicamente i punti di controllo. La ridotta estensione della zona ha poi contribuito a ridurre fortemente gli errori, mentre l'alta risoluzione spaziale iniziale delle immagini (pixel 5 m x 5 m) ha permesso di ottenere, dopo il ricampionamento, un risultato finale di tutto rispetto (pixel 6 m x 6 m).

L'algoritmo utilizzato per il ricampionamento è stato quello di *nearest-neighbour*, considerato il più adatto per limitare l'alterazione radiometrica dei pixel che formano l'immagine (Bernstein *et al.*, 1983).

Analisi delle componenti principali

Sul set dei dati selezionati (12 canali) è stata effettuata l'elaborazione in componenti principali e sono state selezionate le prime 5 componenti, che rappresentano in totale circa il 94% della varianza spiegata (Jensen, 1986).

La matrice di correlazione allegata (tab. 4) mostra come il set di dati utilizzato sia composto da bande tra loro non fortemente correlate, quindi altamente significative. La correlazione non molto alta indica inoltre che la selezione dei canali ci permette una analisi con dati non ridondanti. Si osserva in special modo come la banda nell'infrarosso (canale 18) sia la meno correlata rispetto a tutte le altre.

Elaborazione in falsi colori

Dalla precedente analisi sono state selezionate le bande meno correlate fra loro (e di conseguenza più informative) e sono state combinate in modo da ottenere una rappresentazione in falsi colori. In particolare, considerate le caratteristiche delle moderne schede video che possono rappresentare anche colori formati dalle combinazioni RGB a 24 bit, sono state realizzate immagini a colori facendo corrispondere i canali prescelti ai colori Red Green e Blue.

L'elaborazione che è stata giudicata migliore sia per l'informazione rappresentata che per gli aspetti qualitativi delle bande (scarso rumore) è stata quella 18-14-13 riportata in figura 1.

Tabella 3

Matrice di confusione (Verità a terra).

Classi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Tot.	Pr. %
1	266	0	15	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	296	0,899
2	0	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	156	1,000
3	7	1	195	52	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	256	0,762
4	20	0	55	407	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	482	0,844
5	0	0	0	0	158	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	158	1,000
6	0	0	0	0	0	135	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	0,964
7	0	0	0	0	0	0	383	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	388	0,987
8	0	0	0	0	0	0	3	126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	129	0,977
9	0	0	0	0	0	0	2	0	375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	377	0,995
10	0	0	0	0	0	7	0	0	0	375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	382	0,982
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	147	0	0	1	0	0	0	0	0	0	148	0,993
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	1	0	0	0	0	0	0	47	0,979
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	2	0	0	0	0	0	0	82	0,976
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	3	260	0	39	0	0	0	0	309	0,841
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	0	6	0	9	0	135	0,889
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	179	0	0	0	0	192	0,932
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	0	0	0	138	1,000
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104	0	0	104	1,000
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	103	0	110	0,936
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	18	1,000

K = 0,927

L'immagine che ne deriva mette molto bene in evidenza le caratteristiche della vegetazione naturale ed assomiglia molto, come gamma cromatica, alle consuete fotografie-aeree all'infrarosso falso colore. Anche in questo caso, infatti, la vegetazione appare in colore rosso (alta riflettanza nell'infrarosso) rispetto alle altre classi di uso del suolo, e in particolare una diversa gradazione nel colore rosso mette in evidenza tipologie forestali differenti. Il fotointerprete è in grado di distinguere perfettamente le formazioni di conifere e latifoglie. All'interno delle latifoglie è possibile distinguere il faggio dalle altre latifoglie che in questo caso sono prevalentemente querce. Da una attenta analisi sulla tessitura dell'immagine sono state evidenziate anche le classi relative al castagno (castagneto da frutto) determinate dalla caratteristica chioma globosa che lo contraddistingue.

Per soddisfare le esigenze dei rilevatori di campagna è stata prodotta anche la combinazione a colori con risposta simile al visibile utilizzando i canali 9-7-5 (fig. 2).

Interpretazione a video delle immagini

L'elaborazione in falsi colori, realizzata in formato BMP, è stata utilizzata dall'operatore per una fotointerpretazione diretta a video. Il fotointerprete, utilizzando le immagini MIVIS assieme ad altri dati georeferenziati (Landsat TM, foto aeree scandite), ha potuto adottare una metodologia di lavoro estremamente agevole, utilizzando sul video l'immagine della stessa zona ottenuta con sensori diversi. L'alta risoluzione del MIVIS può così essere abbinata alla familiarità di una foto aerea o di un'immagine del Landsat TM, il risultato

è l'ottimizzazione del riconoscimento delle diverse tipologie vegetazionali abbinata ad una notevole velocità di lavoro. Sono state discriminate 8 classi di vegetazione (oltre ai corpi d'acqua), utilizzando chiavi interpretative raccolte nel corso di sopralluoghi nell'area d'indagine. Si è così ottenuto un file vettoriale in cui ad ogni poligono

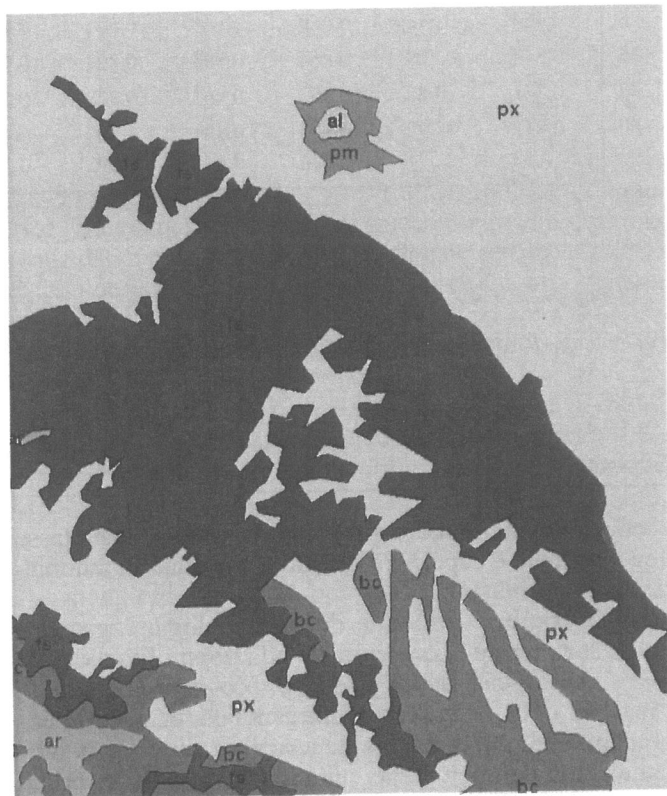


Figura 3 - Carta forestale ottenuta per interpretazione a video delle immagini.

Tabella 4

Analisi delle componenti principali.

Matrice di varianza-covarianza

	Canali utilizzati											
	5	7	9	13	14	18	25	26	35	42	50	93
5	1043,58											
7	868,67	777,86										
9	1123,72	956,06	1257,09									
13	1389,31	1142,1	1547,91	2008,14								
14	943,87	843,79	1058,5	1276,53	967,23							
18	-189,09	-48,37	-216,51	-393,26	-31,65	679,22						
25	110,67	199,97	145,45	91,4	276,82	409,57	1925,1					
26	481,43	456,87	556,64	660,77	539,67	48,28	392,26	1027,41				
35	1310,68	1084,34	1472	1901,53	1227,3	-361,5	147,34	716,32	2306,74			
42	931,06	783,71	1046,65	1324,8	882,35	-211,6	130,48	523,95	1509,11	1172,5		
50	803,13	682,23	902,49	1139,78	770,21	-153	136,49	455,14	1257,11	891,87	936,19	
93	688,03	553	760,04	998,83	633,19	-190,8	44,79	337,39	998,88	669,01	586,31	1179,68

Matrice di correlazione

	Canali utilizzati											
	5	7	9	13	14	18	25	26	35	42	50	93
5	1											
7	0,964	1										
9	0,981	0,966	1									
13	0,959	0,913	0,974	1								
14	0,939	0,972	0,959	0,915	1							
18	-0,224	-0,066	-0,234	-0,336	-0,039	1						
25	0,078	0,163	0,093	0,046	0,202	0,358	1					
26	0,464	0,511	0,489	0,46	0,541	0,057	0,278	1				
35	0,844	0,809	0,864	0,883	0,821	-0,288	0,069	0,465	1			
42	0,841	0,82	0,862	0,863	0,828	-0,237	0,086	0,477	0,917	1		
50	0,812	0,799	0,831	0,831	0,809	-0,191	0,101	0,464	0,855	0,851	1	
93	0,62	0,577	0,624	0,648	0,592	-0,213	0,029	0,306	0,605	0,568	0,557	1

Autovalori derivati dalla matrice di correlazione

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7,96	1,53	0,65	0,6	0,55	0,37	0,16	0,08	0,04	0,04	0,01	0,01

Percentuale di varianza spiegata da ogni singola componente

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
66,37	12,76	5,38	4,96	4,54	3,09	1,36	0,67	0,34	0,33	0,11	0,08
66,37	79,13	84,51	89,47	94,01	97,1	98,46	99,13	99,47	99,8	99,91	99,99

Var. cumulata.

sono associati: numero progressivo, sigla della classe vegetazionale e superficie dell'area calcolata in automatico dal sistema.

La discriminazione delle diverse tipologie vegetazionali è stata molto agevole grazie alla possibilità di "zoomare" fino a scale molto grandi, per cogliere nei dettagli i margini delle diverse zone. In generale, una dimensione di pixel di 2 x 2 m in scala terreno è considerata ottimale per la definizione dei più piccoli ambiti territoriali.

Nel seguente prospetto si riportano le categorie utilizzate nella classificazione e le sigle adottate in figura 3.

Acque superficiali	al
Praterie montane mesofile	pm
Praterie montane xerofile	px
Boschi di conifere	bc
Faggete	fs
Boschi misti di querce a prevalenza di cerro	qc
Boschi misti di querce a prevalenza di roverella	qp
Incolti e seminativi	sa
Arbusteti	ar

Tabella 5

Numero	Classi individuate	Classi CORINE/Biotopes
1)	Vegetazione palustre	53 Water-fringe vegetation
2)	Margini delle zone boschive	
3)	Terreni nudi	62.14 Southern Italian calcareous cliffs
4)	Praterie montane xerofile	34.74 Central and southern Apennine dry grasslands
5)	Faggete a copertura colma	41.18 Southern Italian Beech Forests
6)	Faggete a copertura lacunosa	41.18 Southern Italian Beech Forests
7)	Praterie montane mesofile	36.382 Central Apennine closed grasslands
8)	Formazioni arbustive	87.1 Fallows fields
9)	Formazioni di conifere	42.612 Apennine <i>Pinus nigra</i> forests
10)	Acque interne	2 Non-marine waters
11)	Querceti misti a prevalenza di roverella	41.732 Southern Italian <i>Quercus pubescens</i> woods
12)	Seminativi	82.11 Field crops

Classificazione delle immagini

Per la classificazione delle immagini sono state utilizzate solamente le 5 componenti principali estratte ed è stata applicata una metodologia mista *supervised* ed *unsupervised*, descritta recentemente da Richards (1995) e di seguito ricordata.

Le cinque componenti sono state precedentemente filtrate tramite un filtro passa-basso con una finestra di 3×3 pixel, in modo da eliminare l'effetto della forte variabilità spettrale legata alla alta risoluzione geometrica.

La metodologia di classificazione adottata consta delle seguenti fasi:

- classificazione tramite analisi dei cluster,
- identificazione dei cluster da parte del fotointerprete,
- estrazione delle firme spettrali dei cluster caratteristici,
- aggiunta di aree di training selezionate appositamente,
- classificazione supervised.

Per la prima elaborazione automatica è stato utilizzato un classificatore *unsupervised*, non gerarchico, iterativo, che ha generato una classificazione a 20 classi (Heller *et al.*, 1983).

Analizzando le classi estratte dal classificatore, il fotointerprete le ha associate alle tipologie vegetazionali presenti. Inoltre, i cluster rappresentati da pochi pixels e con caratteristiche spettrali con alta varianza sono stati eliminati.

Altre classi sono state inserite dal fotointerprete, digitalizzando le aree di training direttamente a video. Il classificatore automatico *unsupervised*, infatti, può non essere in grado di distinguere classi importanti ma rappresentate da pochi pixels (come nel caso di corpi d'acqua). In questo caso si è verificato che le caratteristiche spettrali dei pixel relative al lago venissero erroneamente assegnate alla stessa classe delle conifere. Per ovviare a questo problema si è resa necessaria l'estrazione della firma spettrale del lago in questione.

Per ogni cluster significativo e per le aree di training selezionate, sono state elaborate le firme spettrali necessarie al classificatore di massima verosimiglianza. Le statistiche estratte sono relative a: medie, deviazione standard per ogni banda e matrice di varianza-covarianza, come nel caso delle immagini da satellite.

Il risultato della classificazione (fig. 4) è stato confron-

tato anche con l'utilizzo di aree di training estratte con metodi tradizionali quali l'interpretazione di foto-aree pancromatiche.

La digitalizzazione delle suddette aree ha permesso una analisi della precisione, tramite la tecnica della matrice di confusione.

La matrice di confusione è una tabella i cui elementi rappresentano il numero dei pixels appartenenti alla *j*-esima classe di verità a terra e alla *i*-esima classe di copertura, dove *j* e *i* rappresentano rispettivamente gli indici delle colonne e delle righe della matrice. Per considerare il grado di dispersione degli elementi all'interno della matrice è stato utilizzato il coefficiente statistico Kappa, che varia da -1, quando la distribuzione è casuale, a 1, quando gli elementi sono distribuiti sulla diagonale principale, cioè quando la classificazione è al massimo grado di precisione (Congalton *et al.*, 1983). Nella tabella 3 vengono riportati i risultati della classificazione con i relativi coefficienti di precisione, in particolare il coefficiente Kappa è risultato di 0,927. Le classi ottenute sono quelle rappresentate in tabella 5.

Conclusioni

L'impiego delle immagini MIVIS supportate da una adeguata raccolta di dati in campo ha consentito la realizzazione di una carta vegetazionale a scala 1:10.000 di grande dettaglio e di ottima rispondenza alla verità a terra.

I vantaggi che derivano dal metodo proposto sono diversi:

- grande *risoluzione spaziale e spettrale* che si traduce in una maggiore capacità di analisi del territorio, nella fattispecie una migliore identificazione delle diverse tipologie vegetazionali presenti;
- grande *elasticità e velocità* di lavoro grazie all'utilizzo dei GIS;
- maggiore *comodità* per il fotointerprete che può, almeno in parte, sostituire lunghe sessioni allo stereoscopio con più agevoli digitalizzazioni "on screen" effettuando nello stesso ambiente di lavoro il complesso delle attività tematiche e cartografiche.

Le immagini MIVIS, una volta georeferenziate e composte per ottenere immagini a colori reali o a falso colore, possono essere facilmente stampate (plotter o stampanti laser) a media scala (1:10.000, 1:25.000) e utilizza-



Legenda

- Corpi d'acqua
- Aree nude
- Ecotoni
- Formazioni erbustive
- Faggeta a densità colma
- Faggeta a densità lacunosa
- Formazioni di conifere
- Praterie montane xerofile
- Seminativi, prati e terreni lavorati

Figura 4 - Carta forestale ottenuta per classificazione con metodologia mista *supervised* ed *unsupervised*.

te al posto di foto aeree o di ortofotocarte nei rilevamenti a terra (indagini forestali, pedologiche, geologiche, vegetazionali, ecc.).

Come si può facilmente comprendere, questo risultato rappresenta qualcosa di più di una semplice carta della vegetazione ma costituisce, *in nuce*, un Sistema Informativo Territoriale che può essere ampliato con altri layers informativi ed utilizzato per i più diversi scopi di analisi e gestione territoriale.

Con questo articolo si è anche cercato di dimostrare la praticità dell'utilizzo dei GIS. In molti settori, infatti, (vedi l'urbanistica) questi strumenti sono ormai insostituibili mentre in campo forestale sono ancora troppo spesso utilizzati esclusivamente come strumenti di ricerca. Una loro maggiore diffusione operativa non potrà che portare ad una migliore comprensione e gestione del territorio.

BIBLIOGRAFIA

Amadesi E., Bizzi S., Giardina M.C., Medri R., Terranova C., Vianello G. (1995) - *Telerilevamento e immagini da satellite per la realizzazione di carte della copertura boschiva*. In: "Copertura forestale e territorio", (Bagnaresi U., Vianello G., a cura di), Franco Angeli.

Aronoff S. (1990) - *Geographic Information Systems: A Management Perspective*, WDL Publications, Ottawa, Canada.

Avena G.C., Blasi C. (1980) - *Carta della vegetazione del massiccio del monte Velino. Appennino abruzzese*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Collana del programma finalizzato "Promozione della qualità dell'ambiente".

Avena G.C., Blasi C., Scoppola A., Veri L. - *Sulla presenza di popolamenti ad *Ostrya carpinifolia* Scop inquadabili nel Melittio-*

ostrectum carpinifoliae Ass. nova nelle valli del fiume Salto e del fiume Fioi (Regioni Cicolana e Carscolana: appennino laziale-abruzzese) in Not. Filosoc. n. 16.

Bianchi R., Marino C.M. (1994) - *CNR LARA PROJET: Mivis/Midas environmental airborne hyperspectral remote sensing system*, Proceedings of the first International Airborn Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, III, pp. 613-619.

Bernstein, Ralph, ed (1983) - *Image Geometry and Rectification* Chapter 21 in Manual of Remote Sensing, edited by Robert N., Colwell. Falls Church, Virginia, American Society of Photogrammetry.

Budd J.T.C. (1991) - *Remote sensing techniques for monitoring land cover*. In: Goldsmith F.B. (ed), Monitoring for Conservation and Ecology. Chapman and Hall.

Carbonetti L., Finocchi P. (coordinatori) (1985) - *Rimboschimento, silvicoltura, protezione del suolo nella provincia di Rieti*, Istituto di Ricerche Economico-Sociali "Placido Martini", Roma.

Carta Geologica Italiana (1934) - Foglio n. 145 (Avezzano), scala 1:100.000.

Clark University (1995) - *Idrisi for Windows User's Guide*.

Commission of the European Communities (1991) - *CORINE Biotopes*. L2920 Luxembourg.

Congalton R.G., Oderwald R.G. e Mead R.A. (1983) - *Assessing Landsat Classification Accuracy Using Discrete Multivariate Analysis Statistical Techniques*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 49, No 2, 1671-1678.

Daedalus Enterprise, Inc. (1990) - *Thermal Infrared Multispectral (TIMS) Technical characteristics*.

Goetz A., Vane G. (1988) - *Terrestrial Imaging Spectroscopy*, Remote Sensing of Environment, vol. 24.

Gruppo di lavoro per la conservazione della natura della Società Botanica Italiana (1971 e 1979) - *Censimento dei biotopi di rilevante interesse vegetazionale meritevoli di conservazione in Italia, Camerino*, Tip. Succ. Savini-Mercuri, n. 1 e 2.

Heller R.C., Ulliman J.J. (1983) - *Forest Resource Assessment in R.N.* Colwell (editore), *Manual of Remote Sensing*, II edizione American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, II Volume.

- Jensen John R. (1986) - *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall.
- Kevin P., Corbley (1994) - *Forest Service Develops Low-Cost Regional Mapping Technique*, *Earth Observation Magazine*, December '94, pp. 42-44.
- Lewotzky K. (1994) - *Hyperspectral imaging: evolution of imaging spectrometry*, *OE Reports*, November 1994.
- Ministero Agricoltura e Foreste (1976) - *Carta della Montagna*, Vol. II, Monografie regionali 12, Lazio.
- Montelucci G. (1952-53) - *La vegetazione del monte Terminillo (Appennino centrale)*, Pubblicazione n. 30 del Centro per lo Studio della Flora e della Vegetazione italiana del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto Botanico dell'Università di Firenze.
- Montelucci G. (1953) - *Escursione sociale al monte Terminillo e al Parco Nazionale d'Abruzzo: 30 luglio-2 agosto 1953*, Rendiconti delle sedute e brevi comunicazioni in *Nuovo Giornale Botanico Italiano*, Vol. LX n. 4.
- Pavanati M. (1996) - *Reti neurali*, in *Reti neurali ed algoritmi regionali: tecniche e problematiche nella applicazione del telerilevamento su ambienti lagunari*. Quaderno n. 2 A.I.T. pp. 75-163.
- Pedrotti F. (1969) - *Introduzione alla vegetazione dell'Appennino Centrale*, Pubblicazione n. 53 dell'Istituto di Botanica dell'Università di Camerino.
- Pedrotti F., Sanesi G., Ballelli S., Cortini Pedrotti C., Orsomando E. - *Il piano di Rascino (Rieti): note fitogeografiche*.
- Richards J.A. (1995) - *Remote Sensing Digital Image Analysis*. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, pp. 133-148.
- Touring Club Italiano (1957) - *Conosci l'Italia. L'Italia fisica*.
- Touring Club Italiano (1958) - *Conosci l'Italia. La flora*.

Ad Alessandro Castagnoli va attribuita l'ideazione del progetto; Marco Marchetti ha curato l'impostazione metodologica e scientifica; Lorenzo Bottai l'elaborazione e la classificazione delle immagini; Gherardo Chirici le applicazioni GTS; Arturo Oradini gli aspetti forestali e le elaborazioni cartografiche.

Alessandro Castagnoli svolge la sua attività presso la *Compagnia Generale Ripresearee*, Parma; Marco Marchetti e Lorenzo Bottai sono dottori forestali, liberi professionisti; Gherardo Chirici e Arturo Oradini operano presso lo studio RDM, Firenze.

ALLEGATI

Di seguito viene data una sintetica illustrazione delle tipologie sopra menzionate di cui è indicata nel titolo anche la relativa categoria secondo la classificazione CORINE/Biotopes della Comunità Europea.

I popolamenti delle coltri clastiche montane e sopramontane (61.3B Central mediterranean scree)

Tali popolamenti sono circoscritti al massiccio del Monte Velino dove sono localizzati per lo più in corrispondenza delle aree interessate da deposizione di materiali morenici durante il Quaternario e dal successivo apporto di detriti in tempi recenti ed attuali. Il materiale clastico, di dimensione notevolmente variabile da punto a punto, ha determinato la forma degli accumuli in base agli specifici angoli di riposo. Ne è derivata una certa ricchezza di forme a stabilità differenziata, sia per il gradiente di pendio del substrato su cui giacciono, sia per il grado di compattazione degli elementi. In relazione all'angolo di riposo e alle dimensioni dei clasti, cioè alle due componenti che controllano l'attività stessa dei "brecciai", uno studio condotto da Avena e Blasi (1980) ha individuato due associazioni, tipiche l'una di una situazione più stabile, l'altra più dinamica e di minor equilibrio. Alla prima associazione caratterizzata da *Festuca dimorpha*, *Galium magellense*, *Linaria purpurea*, *Laserpitium siler* subsp. *siculum*, gli Autori hanno assegnato la denominazione di *Laserpitio siler - Festucetum dimorphae*, mentre la seconda associazione, caratterizzata da *Isatis allionii*, *Crepis pygmaea*, *Papaver degenii* e *Adonis distorta*, è stata denominata *Crepido pygmaeae-Isatidetum allionii* affine di *Istatido-Thlaspeetum rotundifolii*.

I popolamenti rupestri (62.14 Southern Italian calcareous cliffs)

Questi popolamenti sono ubicati per lo più nelle zone cacuminali del Monte Velino e del Massiccio della Duchessa, a quote generalmente elevate; un altro nucleo consistente è dislocato sulle pendici del Monte Rotondo in località "il Costone" e "Coppo di Cava". Sono tipici delle stazioni molto acclivi, con pendenze superiori anche al 100%, caratterizzate da suolo molto superficiale e con estesa rocciosità affiorante. La densità di copertura è in genere molto scarsa, oscillante tra il 20 e il 60%, e le specie più frequenti sono: *Potentilla apennina*, *Asplenium rutamuraria*, *Asplenium tri-chomanes*, *Draba aizoides*, *Saxifraga paniculata* v. *stabiana*, *Saxifraga porophylla* e *Potentilla caulescens*, cui si accompagnano numerosi elementi del *Seslerietalia apenninae* e dei *Thlaspietalia stylosi*.

Le praterie montane mesofile (36.382 Central Apennine closed grasslands)

Tali praterie sono sensibilmente meno rappresentate di quelle xerofile per la scarsa capacità di ritenzione idrica di questi suoli, tutti giacenti su matrice calcarea; in diversi casi, tuttavia, le condizioni orografiche hanno determinato considerevoli accumuli di terreno e di sostanza organica in impluvi e conche dando luogo a suoli di discreta fertilità e freschezza, capaci di ospitare un cotico fitto e con discreta composizione pabulare; in diversi casi alle specie erbacee si uniscono il nocciolo ed il ginepro comune.

Le praterie montane xerofile
(34.74 Central and southern Apennine dry grasslands)

Sono le praterie tipiche dei versanti più acclivi e solatii, caratterizzate spesso anche da forme di erosione e da elevata pietrosità. In termini di estensione costituiscono la seconda tipologia vegetazionale presente nell'area in esame dove sono per lo più dislocate tra i 1.200 e i 1.500 metri di quota. L'esposizione prevalentemente meridionale e le caratteristiche geolitologiche del substrato, soprattutto in termini di scarsa capacità di ritenuta idrica, determinano condizioni stagionali estremamente sfavorevoli. Vi predomina una vegetazione prevalentemente xerofila, costituita per lo più da piante erbacee annuali e da arbusti spinosi che formano un cotico magro e poco produttivo. Fra le specie più comuni ricordiamo *Phleum* sp., *Avena* sp., *Cynodon dactylon*, *Vulpia* sp., *Festuca* sp., *Poa pratensis*, *Bromus erectus*, nonché specie aromatiche spinose di valore pabulare assai basso quali *Helicrysum italicum*, *Thimus serpyllum*, *Cytisus* sp., *Spartium junceum*, ecc.

L'utilizzazione della vegetazione erbacea spontanea avviene attraverso il pascolamento libero. Indubbiamente il carico eccessivo ha contribuito notevolmente ad impoverire e a peggiorare le già precarie condizioni vegetative di queste formazioni; ne è una dimostrazione evidente la continua interruzione del cotico lungo le curve di livello (linee di pascolamento). In questi ultimi anni tuttavia la pressione del pascolo si è di gran lunga attenuata e le previsioni sono orientate verso un'ulteriore riduzione dei capi e questo sicuramente si tradurrà in un miglioramento progressivo della composizione pabulare.

Le faggete
(41.18 *Geranio versicolor* - *Fagion*; Southern Italian Beech Forests)

Le faggete costituiscono la tipologia vegetazionale più diffusa nell'area di indagine, dove occupano in genere la fascia altitudinale compresa mediamente tra i 900 e i 1.500 m; solo in rari casi si spingono fino a 1.700-1.800 m (Monte Velino e Montagne della Duchessa). Tali popolamenti rappresentano attualmente la formazione arborea più elevata in altitudine e che tendenzialmente, in concomitanza con la riduzione della pressione esercitata dal pascolo, potrebbe in molti casi vedere ulteriormente innalzato il suo limite superiore.

Il limite altitudinale inferiore varia molto in relazione alle caratteristiche stagionali; essendo il faggio una specie esigente in fatto di umidità edafica ed atmosferica, i consorzi dove prevale questa specie possono scendere alle basse quote nelle esposizioni a Nord e lungo gli impluvi. In queste situazioni, su circa 600 ha di superficie, si sono rilevate comunque anche forme di mescolanza con altre latifoglie meno esigenti in fatto di umidità, come il cerro, il carpino nero, l'orniello e l'acero opalo.

Generalmente però il faggio tende a formare popolamenti monospecifici con al più limitata presenza di acero opalo, farinaccio, maggiociondolo e qualche raro acero di monte. Il tipo di governo a cui è sottoposto è quasi totalmente a ceduo con poche eccezioni; i tratti di altofusto sono infatti relegati alle zone più impervie e lontane da strade, dove soprattutto in passato l'utilizzazione risultava problematica. Se il forte fabbisogno di legna da ardere, fino a pochi decenni fa, ha condizionato le caratteristiche strutturali di questi soprassuoli, attualmente, data la scarsa richiesta del prodotto, in molti casi il ceduo ha oltrepassato il turno previsto dalle Prescrizioni di Massima (24 anni) e si sta avviando naturalmente verso l'altofusto; sarebbe quindi auspicabile favorire questa tendenza e intervenire con tagli di conversione oculati, dando la precedenza a quei soprassuoli che maggiormente presentano condizioni tali da garantire una buona riuscita dell'intervento.

I boschi di castagno
(41.9 *Castanea sativa* - dominated formations; Chestnut woods)

La diffusione del castagno in questo territorio è stata sicuramente determinata dall'uomo che traeva dal castagneto da frutto un'importante integrazione alla povera economia montana; attualmente solo in prossimità del piccolo abitato di Stàffoli rimangono due ridotti nuclei di castagneto da frutto, in parte abbandonati ed in precarie condizioni vegetative, mentre per il resto i boschi di castagno sono fitocenosi miste con altre cupulifere. In particolare sopra l'abitato di Antrodoco il castagno è consociato al cerro, alla più xerofila roverella e a qualche sporadica rovere; mentre in un'altra vasta area in Val di Malito, oltre al cerro si trova anche il faggio.

I querceti misti a prevalenza di roverella
(41.732 Southern Italian and Sicilian *Quercus pubescens* woods)

Questi popolamenti sono molto estesi e occupano, in genere indipendentemente dall'esposizione dei versanti, le stazioni più asciutte e a suolo superficiale. La composizione specifica di questi soprassuoli vede la prevalenza della roverella e dell'orniello, oltre che del carpino nero che può costituire una componente assai rilevante; meno rappresentati sono invece l'acero opalo e il cerro. La coesistenza e la combinazione assai variabile di elementi termofili (roverella e orniello) e mesofili (carpino nero, cerro ed acero opalo) si giustificano con la forte variabilità delle condizioni stagionali ed edafiche nell'orizzonte submediterraneo di bassa montagna.

La fascia altitudinale di pertinenza di queste formazioni risulta molto ampia, in particolare nelle esposizioni meridionali dove si estende dai 400 ai 1.300 m s.l.m. Selvicolturalmente si tratta quasi sempre di boschi cedui con un mode-

sto sviluppo in altezza (5-6 m) e a copertura interrotta; sovente si osserva un folto strato arbustivo composto soprattutto da *Cytisus* sp. e da *Juniperus communis*. Lo strato erbaceo è quasi sempre presente ed è rappresentato per lo più da specie a carattere steppico. Questi soprassuoli sono stati soggetti nel passato ad una forte pressione antropica, intesa come sfruttamento eccessivo delle risorse legnose ed esercizio indiscriminato del pascolo, mentre attualmente tale pressione appare sensibilmente diminuita e si verificano le premesse per una ricostituzione di formazioni vegetali più evolute.

I querceti misti a prevalenza di cerro
(41.7511 Southern Italian *Quercus cerris* woods)

Oltre ai boschi misti di castagno e querce già descritti, nella parte meridionale dell'area di indagine, e precisamente sul basso versante delle Montagne della Duchessa, si rinviene una consistente fascia di querceti a netta prevalenza di cerro. Si tratta di densi soprassuoli governati a ceduo di considerevoli capacità produttive, dove oltre al cerro si rinvengono anche carpino nero, roverella, orniello e acero campestre. La presenza di queste ultime specie diventa più consistente via via che aumentano le condizioni di xericità.

Le formazioni di conifere
(42.612 Apennine *Pinus nigra* forests)

Si tratta di formazioni artificiali, dislocate su terreni molto poveri dove spesso affiora la matrice calcarea, per lo più di 30-40 anni di età, a scarsa densità e costituite innanzitutto da pino nero. In questi popolamenti, in genere non sono state eseguite le dovute cure colturali e gli individui si presentano filati e deperienti. Sotto copertura, soprattutto nelle buche che si sono aperte naturalmente a causa degli schianti, si rinvengono spesso nuclei ed individui sparsi di latifoglie (in genere faggio, cerro e acero opalo), nonché giovani piante di pino nero. Il processo di sostituzione del pino è stato in parte incentivato dall'uomo in quanto sotto la pineta sono state eseguite in passato delle semine di cerro.

Le formazioni arbustive
(87.1 Fallows fields)

Queste formazioni ricoprono coltivi e pascoli abbandonati ed appaiono abbastanza frammentate in quanto collegate con il fenomeno dell'abbandono delle pratiche agricole che si verifica in modo del tutto irregolare nei diversi appezzamenti. Anche la successione ecologica si sviluppa nelle diverse stazioni in forme assai varie; in taluni casi si può riscontrare un immediato ingresso di specie arboree quali roverella, pioppo tremulo e carpino nero; in altri, più frequenti, il processo di colonizzazione inizia con specie arbustive. Le più diffuse sono il ginepro comune, la ginestra odorosa, il rovo, il prugnolo e la rosa canina.

I seminativi e i prati falciabili
(82.11 Field Crops)

I seminativi ed i prati falciabili sono ubicate nelle zone pianeggianti e subpianeggianti, in genere in corrispondenza di alluvioni di fondovalle o di conoidi di deiezione stabilizzati.

Il seminativo è costituito principalmente da colture cerealicole, soprattutto frumento, mentre nei prati falciabili si riscontrano foraggere permanenti quali trifoglio, erba medica e sulla, oltre ad erbai misti di leguminose e graminacee.

Le coltivazioni legnose agrarie, di scarsa estensione, sono rappresentate dalla vite e dai frutteti, presenti sia in piccoli appezzamenti come coltura specializzata che, più spesso, come colture consociate a quelle erbacee.

Nell'ambito di questa categoria i prati falciabili costituiscono senza dubbio il fenomeno più importante, e non solo in termini di superficie: considerando infatti l'importanza che la pastorizia e l'attività zootecnica rivestono nella zona si capisce come spesso vengano privilegiate le colture foraggere alle altre. In genere queste superfici vengono sottoposte alla fine di giugno allo sfalcio; dopo lo sfalcio l'area dei prati viene aperta al pascolo. Anche nei piani alti spesso oltre alle foraggere, che sono per la maggior parte rappresentate da graminacee, è possibile rinvenire altre colture quali orzo, segale e frumento. Si tratta in genere di piccoli appezzamenti dove in passato sono state eseguite delle intense attività di spietramento; ne sono una testimonianza i muretti che bordano i campi. Si può prevedere comunque che, in conseguenza al fenomeno dell'abbandono delle attività agricole nelle aree marginali, peraltro comune a tutta la zona, le superfici interessate da colture agrarie saranno soggette a graduale diminuzione a vantaggio delle formazioni forestali ad esse limitrofe, attraverso fasi di ricolonizzazione generalmente a breve termine.

La vegetazione palustre
(53 Water-fringe vegetation)

Questa tipologia vegetazionale si estende su una superficie molto ridotta (circa 50 ha) ed è localizzata nelle immediate vicinanze del fiume Velino, in località "Piana di San Vittorino" e attorno al Lago di Paterno. Dette località sono entrambe situate nel lembo Nord-Ovest dell'area di indagine e sono state censite come biotopi per l'interesse della flora acquatica e palustre presente.