

UNIVERSITA' IUAV DI VENEZIA

SCUOLA DI DOTTORATO

DOTTORATO DI RICERCA IN NUOVE TECNOLOGIE E INFORMAZIONE TERRITORIO & AMBIENTE

CICLO XXIII

**Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative
per l'analisi delle dinamiche spaziali dei soprassuoli forestali**

Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

Dottorando:

Dott. Daniele Savio

Tutors:

Prof. Domenico Patassini

Prof. Tommaso Anfodillo

Anno Accademico 2007/2008

A mia madre



*"E quando scelsi la selva per imparare ad essere,
foglia per foglia estesi le mie lezioni,
e appresi ad essere radice, fango profondo,
terra silenziosa, notte cristallina e,
a poco a poco più, tutta la selva."*

- Pablo Neruda -

RIASSUNTO

L'obiettivo della tesi riguarda l'utilizzo di immagini aerofotogrammetriche storiche e la loro integrazione con *datasets* esistenti per caratterizzare le dinamiche spaziali dei soprassuoli boschivi in relazione ai cambiamenti socio-economici ed ai processi di successione forestale secondaria. Un particolare approfondimento delle tematiche affrontate ha riguardato gli aspetti legati alla pre-elaborazione ed alla classificazione di immagini aeree storiche di diverse epoche attraverso la definizione di procedure semi-automatiche per l'estrazione delle coperture forestali scalabili su area vasta.

Nei capitoli introduttivi si definiscono i nuovi scenari della domanda informativa e l'importanza che in questo contesto possono assumere le tecnologie dell'informazione geografica. In particolare si evidenzia come la definizione di percorsi di sviluppo sostenibile richieda la capacità di conciliare le esigenze di crescita economica e di benessere sociale con l'attuazione di politiche gestionali delle risorse ambientali che rispondano da un lato ad equilibrate strategie pianificatorie locali, dall'altro ad impegni assunti a livello transnazionale, quali gli accordi sottoscritti dall'Italia e da altri Paesi per la riduzione dei gas serra e la conservazione della biodiversità. Anche nel settore forestale, pertanto, è sempre più avvertita la necessità di riformulare gli indirizzi gestionali in relazione alla multifunzionalità delle foreste, ricercando l'integrazione ed il coordinamento tra gli strumenti di pianificazione territoriale, paesistica e forestale. Per rispondere pienamente a tali istanze è, dunque, necessario costituire un quadro di conoscenze che analizzi le risorse forestali non solo dal punto di vista ecologico, biologico e strutturale, ma che sia anche in grado di cogliere aspetti dinamici e legati alle trasformazioni di uso del suolo.

Successivamente vengono esaminate le fonti di dati disponibili con lo scopo di trovare elementi di raccordo che consentano una lettura diacronica degli assetti territoriali a diverse scale di analisi. Tale obiettivo, tuttavia, risente di limitazioni dovute a difformità relative alla definizione di bosco adottata, alle tecniche di produzione e di rappresentazione, alla scala di rappresentazione. E' in questo contesto che emerge la necessità di integrare il confronto multitemporale con le informazioni desumibili da fotogrammi aerei storici (volo GAI del 1954 e volo Montagna Veneta del 1991), così da garantire differenti riferimenti cronologici e l'esame di un orizzonte temporale sufficientemente ampio per rendere analizzabili sia i fenomeni indotti dall'uomo, sia i processi naturali di successione.

Il capitolo 7 descrive in modo dettagliato le fasi di pre-processing e le procedure di classificazione delle foto aeree storiche. Le difficoltà di estrazione tematica, legate ad ineliminabili elementi di criticità di queste immagini, rappresentati dalla scarsa informazione spettrale e da numerosi fattori che ne deteriorano la qualità, vengono superate sviluppando classificatori operanti con logica *fuzzy* basati sul paradigma *object-oriented*. Le soluzioni proposte, che si differenziano in base alle caratteristiche delle emulsioni ed alle possibilità di implementazione di informazioni ancillari, consentono di ottenere *outputs* caratterizzati da un'elevata accuratezza tematica e permettono di desumere informazioni sulle trasformazioni dell'uso del suolo che si qualificano per una precisione geometrica adeguata a rappresentare il fenomeno in relazione agli intervalli temporali esaminati. Si procede, inoltre, ad una validazione delle stime delle variazioni areali ottenute con questa procedura, adottando in parallelo un approccio di tipo inventariale, che consente di associare, attraverso stimatori statistici, un intervallo fiduciario ai risultati ottenuti.

Nel capitolo 8 l'applicazione concreta del confronto multitemporale ad un contesto territoriale, rappresentato dalla Comunità Montana dei Sette Comuni, ampiamente documentato sotto il profilo storico, socio-economico e gestionale, è servita a valutare gli esiti di questo approccio analitico ed a relazionare i processi di trasformazione ai principali fattori naturali ed antropici di cambiamento che li hanno generati.

ABSTRACT

The goal of this dissertation is to highlight the way historic aerial surveying images can be integrated into existing datasets when analysing the dynamics of forest topsoil in relation to socio-economic changes and to the evolutionary dynamics of forests. The themes covered range from preliminary data processing to a classification of aerial images that span across different historical periods. These images, which serve to estimate forest coverage on a vast scale, have been taken using semi-automatic techniques.

The opening chapters consider the latest scenarios on the demand for information and the importance of geographic information technology within this context. Particular attention has gone into illustrating to what extent sustainable development processes must accommodate the needs of economic growth and social well-being by means of policy implementation that helps regulate the management of environmental resources, compatibly to local planning strategies on the one hand, and cross-border commitments (for instance agreements between Italy and other countries to lower greenhouse gas and preserve biodiversity) on the other. Currently the forestry sector too faces an increasingly urgent need to find new management policies that incorporate the multiple functions of forests and integrate as well as coordinate spatial, landscape and forestry planning tools. To fully respond to such needs a framework capable of analysing forestry resources is needed, not only from an ecological, biological and structural perspective, but also from one which can capture the transformation dynamics of land use.

The next section examines the source of available data with the goal of discovering operational hypotheses that enable a diachronic interpretation of spatial organization at different scales. This goal however has limitations in terms of the conceptual definition of the forest, the processing and representation techniques, as well as the spatial scale. The need to integrate a time series analysis with information obtained from historical images taken by aerial surveying thus arose (*GAI* aerial photos of 1954 and *Montagna Veneta* of 1991). It guaranteed a chronological time reference and vast enough time frame to analyse not simply man induced phenomena but even the processes of natural change.

Chapter 7 provides a detailed description of the pre-processing and classifying phases of historical aerial photograph frames. The difficulty in coming up with thematic maps stems from intrinsic critical constraints that are difficult to be

eliminated. In addition, a scarcity of spectral data and other factors deteriorate the quality of the images. To overcome these problems, fuzzy classifiers based on the object-oriented paradigm were adopted. The solutions proposed differ, depending on the characteristics of the emulsions, and on the possibility of using supplementary data which can yield greater thematic detail of the *outputs*. Significant information on the transformations of land use can thus be supplied. Such information proves to be geometrically accurate and suited to represent the phenomenon being studied in relation to the time series explored. In addition, the estimates of areal variations obtained are validated, adopting, in parallel, an inventory-like approach. It thus becomes possible to obtain, by means of statistical estimators, an acceptable confidence interval. Chapter 8 illustrates an operational application of time series analysis set within a spatial context, in this case the mountain area called *Comunità Montana dei Sette Comuni*. This region has a well documented historic, socio-economic and management profile which served to assess the results obtained through this analytical approach and to link the transformation processes to the intervening natural and man made factors.

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
2	NUOVE ISTANZE INFORMATIVE NEL SETTORE FORESTALE	5
2.1	La domanda informativa nella pianificazione forestale e territoriale	6
2.2	Il monitoraggio forestale nel quadro delle richieste del protocollo di Kyoto.....	11
2.3	Variazioni della superficie forestale, dinamiche di paesaggio e conservazione della biodiversità.....	15
3	CONTESTO CONOSCITIVO DI RIFERIMENTO.....	18
3.1	Basi di dati cartografiche	18
3.2	Repertorio aerofotogrammetrico	23
4	OBIETTIVI DELLA RICERCA E APPROCCIO METODOLOGICO.....	24
5	AREA DI STUDIO: L'ALTOPIANO DEI SETTE COMUNI.....	29
6	BASI INFORMATIVE	33
6.1	Caratteristiche delle basi di dati ufficiali	33
6.1.1	La Carta forestale del Regno d'Italia	33
6.1.2	La prima Carta Forestale Regionale	38
6.1.3	La Carta Regionale dei Tipi forestali	47
6.1.4	La Carta della Copertura del suolo.....	55
6.2	Immagini aerofotogrammetriche - caratteristiche e selezione dei fotogrammi.....	61
6.2.1	Volo GAI del 1954-55.....	61
6.2.2	Volo "1191-92 REVEN Montagna Veneta"	68
7	MODALITÀ DI PRE-PROCESSING E DI CLASSIFICAZIONE DELLE FOTO AEREE PER LA DETERMINAZIONE DELLE SUPERFICI FORESTALI.....	75
7.1	Trattamento dei fotogrammi del volo 1991-92 REVEN Montagna Veneta.....	77
7.1.1	Ortorettifica.....	77
7.1.2	Mosaicatura.....	88
7.1.3	Classificazione object-oriented	94
7.1.4	Classificazione con approccio inventariale.....	135
7.2	Trattamento dei fotogrammi del volo GAI.....	141
7.2.1	Ortorettifica e mosaicatura	141
7.2.2	Classificazione object-oriented	143
8	INTEGRAZIONE DEI DATI ED ANALISI MULTITEMPORALE.....	167
8.1	Comparabilità dei livelli informativi.....	167
8.1.1	Comparabilità tematica.....	167
8.1.2	Comparabilità geometrica.....	171
8.2	Overlay ed elaborazioni di sintesi.....	174
8.2.1	Variazioni tra il 1954 e il 1991.....	174
8.2.2	Variazioni tra il 1991 e il 2007.....	186
8.3	Risultati a confronto: rappresentazione in continuo e metodo inventariale	198
8.3.1	Risultati della classificazione per punti ed elaborazione dei dati.....	198
8.3.2	Comparazione dei risultati	204
9	CONSIDERAZIONI RIEPILOGATIVE E CONCLUSIVE	206
	Bibliografia	213
	Sitografia	222

1 INTRODUZIONE

Le vicende che hanno determinato l'attuale assetto del territorio in Italia ed in Europa sono state oggetto di numerose analisi storiche e disciplinari che hanno messo in luce da un lato la stretta connessione tra lo sviluppo socio economico, l'uso del suolo e l'utilizzazione delle sue risorse, dall'altro la diretta relazione tra conoscenza e governo del territorio (Lombroso, 2004).

Lo scenario attuale è il risultato di processi pianificatori che in passato spesso non hanno saputo disciplinare in modo equilibrato lo stato dei luoghi, determinando un disordine localizzativo che non ha coniugato crescita economica, organizzazione territoriale e qualità della vita. La necessità di impostare adeguate strategie di pianificazione territoriale che contemperino l'esigenza di fruire e valorizzare gli ambiti naturali con i temi dello sviluppo economico ed urbanistico richiede, pertanto, un monitoraggio periodico e di dettaglio delle risorse ambientali, ovvero di quella rete di spazi lasciati "vuoti" dai processi insediativi.

Se restringiamo l'ambito di osservazione al settore forestale e la scala di analisi al territorio regionale del Veneto, possiamo, invece, constatare che questo paradigma concettuale trova applicazioni saldamente radicate nei secoli. Già dalla fine del Quattrocento la conoscenza dell'entità, della distribuzione spaziale e dello stato degli ecosistemi forestali assume fondamentale importanza nella definizione di indirizzi e nell'attuazione di efficaci e calibrate politiche ambientali ed economiche sostenibili con il territorio. La Repubblica Veneta, infatti, ha avuto il merito di applicare i principi della conservazione delle foreste e della preservazione per loro mezzo dell'ambiente, già comuni ai popoli dell'Etruria e della Magna Grecia e di cui si perse, invece, nozione in epoca romana e nel Medioevo. Oltre alle utilità immediate del prodotto legnoso, alle foreste venne riconosciuto un importante ruolo nella regimazione delle acque, nella protezione del suolo, nella stabilizzazione dei terreni acclivi. I primi provvedimenti normativi di carattere generale relativi alla salvaguardia dei boschi risalenti al 1475 e successivamente riconfermati ed integrati nel 1530 non si limitavano a porre limitazioni all'abbattimento delle piante utili alla marina, ma stabilivano anche una serie di misure atte a regolamentare il pascolo e a rimboschire le aree prossimali ai corsi d'acqua, con l'intento di affrontare direttamente le cause primarie del dissesto idrogeologico che si manifestava con piene devastanti nei territori di pianura e con il deposito di ingenti quantità di sedimenti erosi in laguna (Preto, 1985). Accanto all'adozione

di provvedimenti mirati ad una gestione integrata del territorio e ad una concezione degli equilibri ambientali non più separata dalle attività umane, quindi in grado di cogliere le relazioni di causa-effetto, vengono formandosi, attraverso rilevazioni topografiche e statistiche, basi di conoscenza che trovano espressione anche in forma grafica (Savio, 2001). La realizzazione del supporto informativo necessario a definire ambiti e modalità di gestione del patrimonio boschivo avviene attraverso l'allestimento dei cosiddetti "catasti" (o "catastici"), che divengono lo strumento per monitorare periodicamente e definire in termini quantitativi e qualitativi i boschi esistenti nel Dominio (Susmel, 1994).

Questa tradizione vede una sua continuazione nell'ordinamento e nella cura delle foreste da parte di una Regione che da sempre è stata all'avanguardia in questo settore. La politica forestale attuata dalla Regione del Veneto e la diffusa pianificazione forestale, che oggi interessa tutte le proprietà pubbliche e di recente va diffondendosi anche in quelle private, basata sull'applicazione dei principi della selvicoltura naturalistica, hanno consentito un rapido recupero ambientale delle foreste dopo gli eccessivi sfruttamenti avvenuti nel corso degli ultimi conflitti mondiali.

L'inventariazione, la cartografia ed il monitoraggio dei boschi costituiscono la necessaria base informativa per dare attuazione ai nuovi strumenti pianificatori, ma le soluzioni oggi disponibili sono il risultato di un lungo cammino che ha segnato l'evoluzione verso forme di rappresentazione del territorio rispondenti a necessità descrittive e prescrittive più complesse e diversificate. Con il prevalere di un approccio alla gestione del bosco che tende a considerarne l'intrinseco valore paesaggistico, sociale e storico accanto a quello ecologico ed ambientale ed al tradizionale valore economico, si richiedono forme di monitoraggio più frequenti e dettagliate delle aree forestali e degli ambienti naturali e seminaturali ad esse collegati rispetto alle necessità delle forme tradizionali di gestione. L'avvento delle nuove tecnologie dell'informazione territoriale segna un cambiamento dei materiali informativi di base, delle metodologie di estrazione e di rappresentazione del dato geografico, oltre che del panorama delle possibili applicazioni del monitoraggio forestale. In questo contesto fondamentale è stato l'impulso del telerilevamento satellitare, che ha consentito di monitorare a costi sostenibili processi di cambiamento territoriale su scala transnazionale, rendendo possibile la derivazione di informazioni complesse utili a supportare le scelte dei *decision maker* a livello globale. Si consideri, ad esempio, il programma CORINE (CLC90 ed i suoi aggiornamenti

I&CLC2000 e CLC2006), che permette di verificare dinamicamente lo stato delle coperture del suolo nell'area comunitaria, al fine di fornire supporto allo sviluppo di politiche comuni, controllarne gli effetti e proporre eventuali correttivi. Contestualmente al progetto Image e Corine Land Cover 2000 è stata redatta da parte dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e dei Servizi Tecnici una Carta Forestale d'Italia in scala 1:100.000. Un prodotto con queste caratteristiche, tuttavia, risulta di problematica applicazione anche ai soli fini statistici, in quanto non consente il riconoscimento di elementi areali con estensioni prossime all'unità minima cartografabile prevista dalla definizione di bosco sviluppata dalla FAO (0,5 ha) ed ormai recepita quale standard di riferimento internazionale. E' evidente, pertanto, che anche per la rappresentazione di aree vaste si richiede un livello di dettaglio nella ricostruzione delle geometrie che fino a pochi anni fa poteva essere ottenuta esclusivamente tramite l'interpretazione di immagini aerofotogrammetriche. I recenti sensori ad elevata risoluzione spaziale (Ikonos, QuickBird, GeoEye, WorldView) hanno aggiunto alla naturale missione sinottica del telerilevamento satellitare una risoluzione comparabile a quella dei voli fotogrammetrici. Lo sviluppo delle nuove camere fotogrammetriche digitali multispettrali, a sua volta, avvicina la tecnologia fotogrammetrica al telerilevamento satellitare sia per quanto concerne i prodotti, sia riguardo alle tecniche di trattamento ed elaborazione dei dati. La fotogrammetria, tuttavia, ha una lunga storia di applicazioni operative ed una tradizione consolidata, mentre il telerilevamento satellitare vede i suoi albori agli inizi degli anni '70 e solo le immagini più recenti presentano requisiti di risoluzione spaziale conformi alle più comuni esigenze applicative in campo forestale. Di conseguenza le foto aeree storiche, le cui modalità e tecniche di analisi costituiscono uno dei temi chiave di questa ricerca, rappresentano l'unica ed insostituibile risorsa informativa da cui sia possibile desumere con elevato dettaglio testimonianze sulle dinamiche di trasformazione del paesaggio silvo-pastorale ed attuare una lettura diacronica di medio-lungo periodo, fonte documentale del rapporto uomo-ambiente e di preziose informazioni geografiche storiche stratificate, funzionale all'applicazione di modelli di predittivi o di simulazione nello studio delle dinamiche di trasformazione del territorio e dell'ambiente e nella comprensione del rapporto tra luoghi e comunità insediate (Cantile, 2004), con importanti ricadute nell'impostazione delle future linee programmatiche e gestionali. Un altro argomento rilevante che verrà affrontato è quello dell'aggregazione e della comparabilità tra fonti di dati diverse. L'applicazione degli strumenti

urbanistici di vario livello previsti dalla L.R. n.11 del 23 aprile 2004 richiede, infatti, oltre ad un approccio multidisciplinare, la frequente integrazione di informazioni derivanti da fonti diversificate, ovvero prodotte sotto forma di statistiche, data-base georiferiti o carte tematiche. I dati disponibili relativi alle coperture forestali, raccolti in occasione di diverse indagini, non risultano sempre confrontabili per una serie di motivi che vanno dall'evoluzione dei sistemi di rilevazione nelle diverse epoche di acquisizione, alle differenti finalità dei vari strumenti conoscitivi, alla diversità della definizione di bosco adottata a livello legislativo rispetto ad altri standard.

Queste problematiche impongono un'ulteriore riflessione sulle possibilità di uniformare le modalità di rappresentazione della superficie forestale regionale, per costituire, utilizzando le soluzioni tecnologiche attualmente disponibili, un protocollo di monitoraggio periodico rispondente alle nuove richieste informative e compatibile con una decrescente disponibilità di mezzi finanziari.

2 NUOVE ISTANZE INFORMATIVE NEL SETTORE FORESTALE

Le recenti trasformazioni legislative in Italia e nelle singole Regioni concernenti gli strumenti di governo del territorio si orientano nella direzione di un superamento delle politiche di settore e verso la costruzione di strumenti capaci di coadiuvare strategie integrate di governo. Anche in Veneto questa tendenza ha evidenti ricadute ogni tipo di attività regolativa dell'uso e della trasformazione delle risorse territoriali, a partire dalle pratiche di regolazione urbanistica e territoriale, passando per le azioni di valorizzazione delle identità paesaggistiche, di salvaguardia idrogeologica del suolo, di tutela degli habitat naturali, di definizione delle linee di sviluppo rurale, per arrivare a trovare applicazione anche nei metodi e negli strumenti di pianificazione delle risorse forestali (Monacci, Lucchesi, 2007).

Nella definizione di opportunità e modi di valorizzazione ed utilizzo di queste risorse, senza alterarne in modo traumatico gli equilibri, è necessaria una lettura del territorio inteso come insieme di sistemi fisici ed antropici, caratterizzato cioè da fenomeni ed elementi diversificati in continua interazione. Questa esigenza è proporzionale alla crescita della popolazione mondiale ed alla conseguente riduzione della biosfera (lo spazio vitale per abitante), che portano ad una sempre maggiore competizione per il territorio ed il suo uso. Diviene determinante, pertanto, lo sviluppo di una visione interdisciplinare e sinottica dipendente dalla conoscenza dei parametri essenziali del territorio, che sono da un lato la presenza delle risorse nella loro globalità, dall'altro i processi di trasformazione all'origine delle risorse stesse. Anche le risorse forestali, pertanto, rientrano in un contesto di equilibri transitori e mutevoli che permeano e caratterizzano i sistemi territoriali e di conseguenza anch'esse sono soggette a cambiamenti che, in tempi più o meno lunghi, rendono la loro distribuzione legata più alla dimensione temporale ed agli interventi disequilibranti correlati all'uso delle risorse stesse, che al senso vero dell'evoluzione sistemica naturale. In ogni caso diventa indispensabile pianificare l'uso e le trasformazioni delle risorse forestali conoscendone le reali disponibilità e sapendo prevedere le conseguenze di eventuali squilibri sulle dinamiche del sistema territorio (Baggio, 1994). Le interazioni tra gli elementi fisico-naturalistici che caratterizzano una regione, ed i processi antropici che determinano una progressiva trasformazione dei "paesaggi culturali", prodotto della coazione tra meccanismi ecologici e trasformazioni economico-sociali, sono elementi condizionanti le scelte di pianificazione forestale, che si adegueranno

entro certi limiti ai nuovi equilibri posti in essere dalle tendenze al cambiamento proprie ad un determinato contesto. Diventa quindi determinante saper ricostruire queste tendenze di trasformazione sistemica per poter cogliere la previsione delle ricadute posteriori di determinate proposte di indirizzo, permettendo in questo modo di valutare anche giudizi di possibili alternative. Di conseguenza l'analisi pre-pianificatoria non può riferirsi solo alla conoscenza o al controllo dello stato di fatto esistente su un territorio, ma deve individuare le condizioni dinamiche delle sue componenti attraverso la ricostruzione storica delle trasformazioni pregresse.

Il superamento di un modello di analisi sincronico inizia ad affermarsi sia nei nuovi strumenti di pianificazione forestale e territoriale, sia a livello normativo. In entrambi i casi emerge la necessità di disporre di informazioni georiferite che rappresentino lo stato della copertura del suolo in periodi storici diversi, in un orizzonte temporale sufficientemente ampio da rendere percepibili ed interpretabili i processi di trasformazione. La scala temporale di analisi può variare in relazione alla propensione dinamica delle componenti territoriali considerate ed alla specificità del contesto applicativo.

Questo nuovo paradigma di conoscenza, come si chiarirà nelle pagine che seguono, è anche presupposto necessario all'attuazione degli impegni assunti dall'Italia e da altri Paesi per la riduzione delle emissioni dei gas serra e per la conservazione della biodiversità. Ciò significa costituire un quadro di conoscenze che analizzi il bosco non solo dal punto di vista biologico, ecologico e strutturale, ma che colga anche gli aspetti legati alle trasformazioni dell'uso del suolo, che a loro volta sono indicatori effettivi di cambiamenti nelle esigenze sociali. In questo contesto significativo può essere il ruolo delle nuove tecnologie dell'informazione geografica, con i limiti e le potenzialità che le caratterizzano in uno scenario in continua evoluzione, che segue (e talvolta genera) le dinamiche della domanda informativa.

2.1 La domanda informativa nella pianificazione forestale e territoriale

La pianificazione forestale ha recentemente recepito la necessità di porre in essere una revisione delle strategie programmatiche e gestionali in relazione alla multifunzionalità delle foreste e alle connessioni con la pianificazione paesistica e delle aree protette, nonché all'esigenza di coordinamento ed

integrazione con gli strumenti di pianificazione territoriale previsti dalla L.R. n.11 del 2004. E' stato, pertanto, introdotto un ulteriore livello di pianificazione forestale, che risponde agli obiettivi espressi dal Decreto 16 giugno 2005 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, e trova consistenza nei Piani Forestali di Indirizzo Territoriale (PFIT), che si configurano come uno strumento di pianificazione forestale a scala sovraziendale adatto a fornire le linee guida per la gestione di unità territoriali omogenee riferibili a singoli ambiti amministrativi, come le Autorità di Bacino o le Comunità Montane. Il PFIT, ponendosi ad un livello intermedio tra i Piani di Assestamento e la Politica Forestale Regionale, opera ad una scala adeguata per poter considerare in modo integrato le necessità e le problematiche del settore forestale in relazione alla sua multifunzionalità e alle connessioni con la pianificazione urbanistica, paesistica e delle aree protette (Corona et al., 2010). Ed infatti le linee di indirizzo previste dal PFIT devono essere coerenti con i contenuti del Piano Territoriale Regionale di Coordinamento (PTRC), dei Piani Territoriali di Coordinamento Provinciali (PTCP), dei Piani di Area Vasta (PAV), dei Piani stralcio di distretto per l'Assestamento Idrogeologico (PAI), dei piani di bacino distrettuali, rappresentando, per i livelli di pianificazione sovracomunale, dei veri e propri piani territoriali di settore in materia forestale, i cui contenuti devono essere recepiti dagli strumenti urbanistici comunali ed intercomunali per gli specifici aspetti forestali. Rispetto alla pianificazione forestale su scala aziendale e sovraziendale il PFIT è sovraordinato e pertanto ha un ruolo di indirizzo nel disciplinare la compartimentazione e nel delineare indicazioni gestionali. Per assolvere a questa funzione il PFIT deve poter disporre di basi conoscitive tali da consentire la composizione di un quadro sia complessivo che di dettaglio sull'attuale consistenza, sulle dinamiche spaziali, sulle caratteristiche strutturali e particolari problematiche gestionali delle aree boscate presenti nel territorio oggetto del piano.

Parte di queste informazioni possono essere desunte dai Piani di Riassetto Forestale o dai Piani di Riordino Forestale in vigore e scaduti rientranti nell'ambito territoriale regolamentato dal PFIT e dai *database* delle utilizzazioni forestali, soprattutto per quanto concerne la stima dei principali parametri dendroauxometrici e delle provvigioni. Gli elaborati cartografici allegati ai Piani di Riassetto Forestale storici non consentono, invece, di produrre un'attendibile analisi multitemporale, in quanto i metodi di rilievo e restituzione cartografica cui fanno riferimento sono connotati da caratteristiche di precisione geometrica non comparabili con quelle delle basi informative attuali.

L'art. 1 del Decreto 16 giugno 2005 prevede per il conseguimento degli obiettivi strategici: "la buona conoscenza del territorio in generale e forestale in particolare, la pianificazione forestale ai vari livelli (regionale, eventualmente sub-regionale e soprattutto aziendale), condivisa attraverso la sensibilizzazione e la compartecipazione di tutte le componenti sociali interessate al territorio stesso. Occorre quindi incentivare in vario modo le attività volte alla conoscenza e alla pianificazione del territorio forestale." Inoltre sancisce: "Le regioni possono prevedere piani forestali per ambiti territoriali specifici, al fine di rendere più agevole l'attuazione della politica forestale a livello locale."

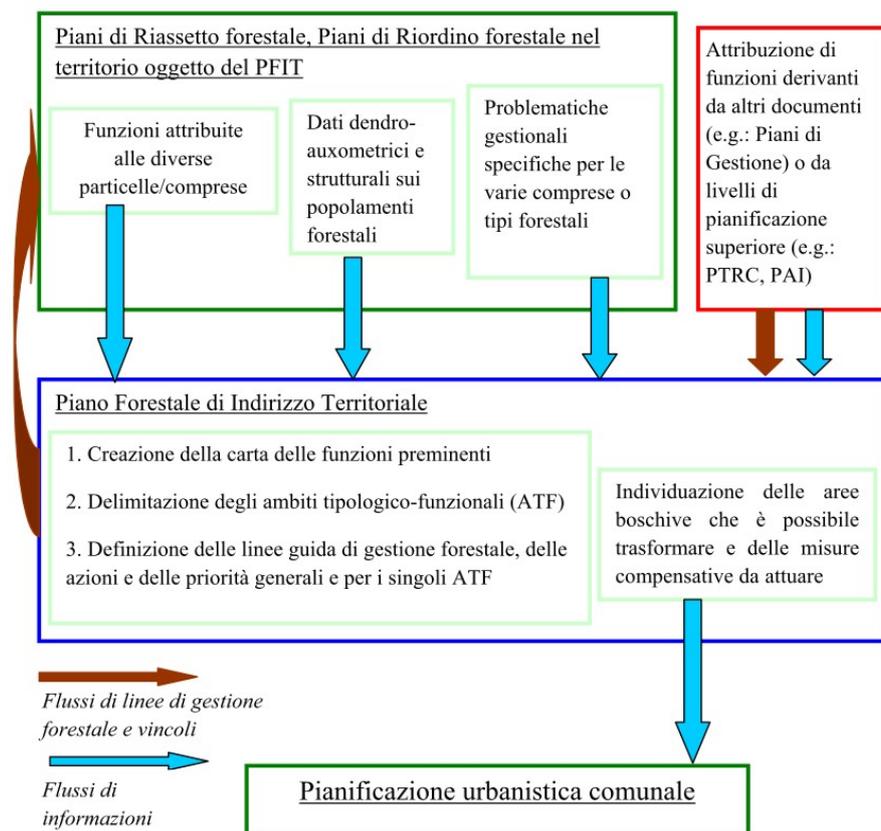


Figura 1. Flussi informativi e relazioni tra i vari strumenti pianificatori (tratto da Corona et al., 2010)

Nella prima sperimentazione attuativa di questo livello sovraordinato di pianificazione forestale, che ha trovato applicazione sull'Altopiano dei Sette Comuni, questa problematica si evidenzia soprattutto laddove il PFIT si propone di individuare le aree in cui l'espansione naturale del bosco può determinare una minaccia per la conservazione della biodiversità sia in termini di habitat che di specie e la scomparsa di paesaggi culturali.

L'attenzione, pertanto, si pone sulla determinazione dei cosiddetti "boschi di neoformazione" (o "neoformazioni forestali"), ovvero sui quei popolamenti di recente insediamento che rappresentano il risultato dell'abbandono dei terreni agricoli montani per il venir meno di motivazioni economiche a fronte di sfavorevoli fattori morfologici ed altitudinali. Per questi boschi è prevista la possibilità di trasformazione in altre forme di uso del suolo in deroga alle misure compensative previste dall'art. 15 della L.R. n.52/1978. La successiva DGR 30 dicembre 1997, n.4808 introduce un chiarimento all'enunciazione di "recupero culturale di terreni agricoli abbandonati", contenuta nel succitato articolo della Legge Forestale Regionale, che di fatto racchiude una prima

I commi 2 e 3 dell'art.15 della legge regionale 13 settembre 1978, n.52 sanciscono:

2. E' vietata qualsiasi riduzione della superficie forestale salvo espressa autorizzazione della Giunta regionale nei casi in cui è possibile compensare la perdita delle funzioni di interesse generale svolte dal bosco oggetto della richiesta, mediante l'adozione di una delle seguenti misure:

- a) destinazione a bosco di almeno altrettanta superficie;
- b) miglioramento culturale di una superficie forestale di estensione doppia rispetto a quella ridotta;
- c) versamento di una somma, in un apposito fondo regionale, pari al costo medio del miglioramento culturale di una superficie doppia a quella di cui si chiede la riduzione. (9)

3. Per la realizzazione di opere a servizio dei boschi, dei pascoli e dei prati-pascoli nonché per gli interventi di regimazione idraulica e per il recupero culturale di terreni agricoli abbandonati in territori classificati montani, l'autorizzazione di cui al comma 2, è concessa in deroga alle misure richieste alle lettere a), b) e c).

definizione di “neoforestazione forestale”: *si considera l'insieme delle azioni finalizzate al riutilizzo -a fini produttivi primari - di quei terreni in passato già coltivati o sfruttati a fini zootecnici e successivamente invasi dalla vegetazione arborea, ad esclusione dei casi in cui il bosco, già pienamente affermato, sia soggetto ad un regolare regime colturale.* Dal punto di vista delle procedure autorizzative, viene a costituirsi in via amministrativa, relativamente alla riduzione di superficie boscata, un regime diversificato tra neoforestazioni (intese come boschi in cui non è possibile individuare una precisa linea colturale) e boschi affermati (intesi come boschi soggetti ad un regolare regime colturale). Tra gli obiettivi del PFIT rientra, quindi, l'individuazione delle aree boschive che potranno essere trasformate in altri usi del suolo (per il ripristino di pascoli, per la conservazione della biodiversità o per esigenze urbanistiche) senza alcun intervento compensativo e di quelle aree in cui, al contrario, l'espansione del bosco ha un maggior valore ecologico o svolge funzioni eteroprotettive e, pertanto, va tutelata.

A prescindere dalle prescrizioni contenute negli strumenti di pianificazione forestale, dal quadro normativo ora rappresentato non emerge una definizione di neoforestazione forestale ancorata ad un esplicito riferimento temporale. Parimenti le definizioni che vengono date in letteratura hanno a riferimento requisiti di natura funzionale, senza richiamo precisi ai tempi necessari per conseguire la condizione di “bosco affermato”, anche perché questi possono variare sensibilmente in relazione alle condizioni stazionali (quota, pendenza, esposizione, tipo di substrato) ed al tipo di popolamento.

In un recente studio condotto in Trentino Alto Adige (Sitzia, 2009) si considerano boschi di neoforestazione quei soprassuoli forestali che non hanno ancora raggiunto la piena autonomia funzionale rispetto alle formazioni vegetali non boschive che li precedevano. Appare subito evidente che tale definizione si discosta in termini concettuali (e temporali) da quella proposta dalla D.G.R n.4808/1997. Una formazione che abbia raggiunto la piena autonomia funzionale può, infatti, non risultare ancora soggetta ad un regolare regime colturale.

In questo contesto di estrema incertezza interpretativa, l'intervallo temporale necessario per poter distinguere un bosco di neoforestazione da un bosco affermato viene spesso definito anche sulla base della disponibilità di fonti informative necessarie a determinare i cambiamenti dell'uso del suolo nell'intero ambito territoriale oggetto di studio. Nel progetto “Neoboschi” (Carriero, Wolynnski, 2005; Sitzia, 2009) si pongono a confronto le superfici

forestali come apparivano nel 1973, desunte dai fotogrammi del volo 1973 della ditta Rossi S.r.l. di Brescia, con quelle identificate nelle ortofoto digitali del volo IT2000, considerando, pertanto, un intervallo di tempo di circa 30 anni (più precisamente di 26 anni).

Di diversa natura sono le basi informative adottate dalla Regione del Veneto in risposta alla necessità di definire, nell'ambito degli strumenti urbanistici di vario livello, il vincolo paesaggistico e di destinazione determinato dal bosco, rappresentati nelle Tavole 1 e 2 dei PAT (piani di assetto del territorio comunale), PATI (piani di assetto del territorio intercomunale) e PTCP. Vengono, infatti, poste a confronto la Carta Forestale Regionale del 1983 (CFR 1983) e la Carta Regionale dei Tipi forestali del 2006 (CFR 2006), considerando, pertanto, un intervallo temporale di circa vent'anni. In questo contesto le neoformazioni forestali concorrono alla determinazione della superficie agricola utilizzata (SAU), che rientra nel calcolo del limite massimo di trasformabilità di questa superficie in zone con destinazioni diverse da quella agricola. Questa condizione vale solo per i Comuni montani e collinari (come individuati in base alla definizione delle zone altimetriche secondo l'ISTAT). Nell'allegato A alla DGR 3650/2008, "Atti di indirizzo ai sensi dell'art. 50 della L.R. 23 aprile 2004, n. 11", si stabilisce che a questi Comuni viene data la possibilità di aumentare la quota di SAU trasformabile aggiungendo alla SAU esistente la quota del 9,5% della superficie boscata comunale per i Comuni di collina e la quota del 3,8% per i Comuni di montagna.

Si precisa, inoltre, che "La quota aggiunta alla SAU esistente fa riferimento alla percentuale media di incremento della superficie boscata calcolata dalla comparazione tra l'inventario della Carta Forestale versione 1984 e dell'inventario della Carta Forestale versione 2006. La scelta di considerare i dati riferiti alla CFR 1983 e alla CFR 2006 deriva dal fatto di considerare le neoformazioni forestali quelle che si sono insediate negli ultimi 20 anni corrispondenti grosso modo al periodo intercorso tra i due inventari." E si pongono le seguenti limitazioni: "qualora il PAT delinea la trasformazione o la riduzione di superfici classificate a bosco ai sensi dell'art. 14 della LR 19.09.1978, n. 52, la trasformabilità di tali superfici, in sede di PI (piano degli interventi comunali), è soggetta ai limiti previsti dall'art. 4 del D. Lgs. 18.05.2001 n. 227 e dall'art. 15 della LR n. 52/78 e s.m.i. Pertanto essa risulta possibile solo a seguito dei dovuti procedimenti autorizzativi, atti a valutare la compatibilità degli interventi previsti nel PI con le funzioni di interesse generale svolte dal bosco (conservazione biodiversità, stabilità dei terreni, tutela del

paesaggio, ecc.) e con le condizioni per la loro eventuale compensazione. A tal fine, in fase pianificatoria, il PI individuerà tali aree prevalentemente nelle superfici boscate di neoformazione cioè boschi di recente formazione in cui non sia possibile individuare una precisa linea colturale, insistenti su mappali catastalmente classificati non a bosco e prossimi alle zone abitate. Dalla trasformazione o riduzione di superfici boscate saranno escluse di norma ai fini edificatori: 1. le formazioni boscate affermate ricadenti in particelle catastali già classificate con qualità di coltura a bosco ceduo e bosco d'alto fusto; 2. le superfici boscate insistenti su mappali classificati non a bosco ma inclusi tra compagini arboree affermate o frutto di imboschimento naturale verso i pascoli in quota".

Nella DGR 3811/2009 si puntualizza che la delimitazione delle aree boscate effettuata con la CFR 2006 assume ai fini del vincolo paesaggistico e di destinazione valore ricognitivo e non costitutivo del vincolo medesimo. Questo chiarimento da un lato serve a riconoscere che le foreste rappresentano una realtà soggetta a continua evoluzione, pertanto anche i vincoli legati alla presenza del bosco sono connotati da una spiccata dinamicità, dall'altro evidenza che possono occorrere discordanze nella perimetrazione delle coperture forestali richiedono una verifica dell'accuratezza geometrica da effettuarsi con le modalità operative previste dalla DGR n.4808/97, che prevede rilievi a terra per la definizione di dettaglio delle aree a bosco. Ai Comuni è data facoltà, nel corso della redazione del PAT, di controllare la precisione delle delimitazioni cartografiche dei confini del bosco avvalendosi di ortofoto digitali recenti.

Non è definito, tuttavia, un metodo per determinare con altrettanto dettaglio le formazioni boschive insediatesi nell'ultimo ventennio. La loro individuazione attraverso tecniche di *overlay* cartografico è soggetta a notevoli imprecisioni dovute, come si vedrà in seguito, alle caratteristiche delle basi informative disponibili.

2.2 Il monitoraggio forestale nel quadro delle richieste del protocollo di Kyoto

Con la ratifica della Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici (UNFCC), dal 1992 l'Italia partecipa in sede internazionale alle iniziative per la riduzione delle emissioni di gas serra. Obiettivo della Convenzione è "stabilizzare le concentrazioni di gas ad effetto serra nell'atmosfera a un livello tale che

escluda qualsiasi pericolosa interferenza delle attività umane sul sistema climatico". Organo esecutivo della Convenzione è la Conferenza delle Parti (COP), che annualmente si riunisce per verificarne l'applicazione. Nel corso della COP-3, nel 1997, è stato presentato il Protocollo di Kyoto (PK), che impegna i Paesi industrializzati ed i Paesi con economie in transizione ad obiettivi di riduzione delle emissioni di sei gas serra (anidride carbonica, protossido di azoto, metano, gli idrofluorocarburi, perfluorocarburi e esafluoruro di zolfo), che causano effetto serra e promuove la protezione e l'espansione forestale ai fini dell'assorbimento della CO₂, il principale dei sei gas, proveniente per lo più dai consumi di energia.

Il protocollo prevede impegni di riduzione dei gas serra da parte dei paesi firmatari, da attuare entro il periodo 2008-2012 (*first commitment period*) rispetto ai livelli di emissione del 1990 (per i gas fluorurati si lascia al paese la possibilità di scegliere il 1990 oppure il 1995 come anno base).

La ratifica del PK da parte dell'Unione Europea, decisa dai capi di governo dei singoli Paesi nel giugno del 2001 a Goteborg, è formalmente avvenuta il 4 marzo del 2002. Con tale decisione gli Stati Membri si sono impegnati a completare il processo di ratifica in sede nazionale entro giugno 2002 (l'Italia ha provveduto con la legge 120 del 1 giugno 2002) con obiettivi di riduzione diversi per ciascun Paese.

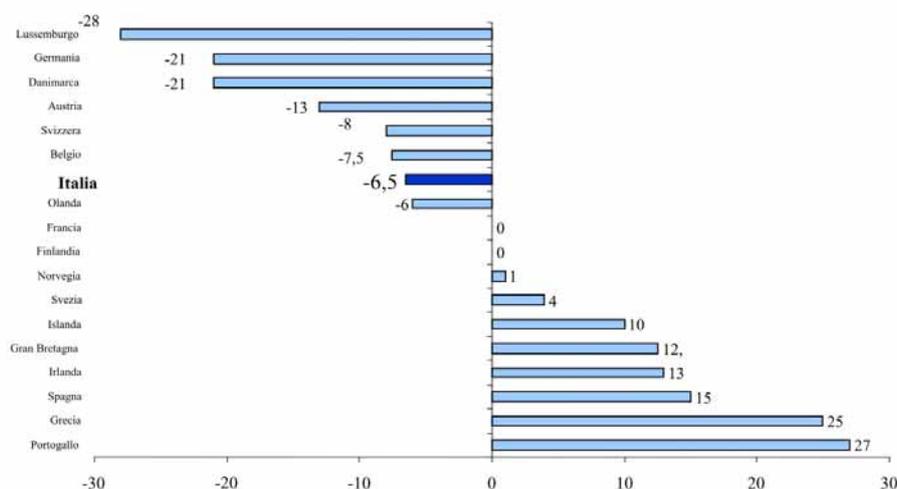


Figura 2. Impegni di riduzione percentuale delle emissioni rispetto al 1990 nella UE.

Il protocollo prevede la possibilità di raggiungere gli obiettivi stabiliti, oltre che con misure nazionali, anche attraverso programmi in cooperazione tra più paesi. A questo fine il Protocollo ha istituito due meccanismi che consentono di

accreditare le riduzioni delle emissioni ottenute attraverso progetti di cooperazione tra paesi industrializzati finalizzati alla riduzione delle emissioni attraverso la diffusione e l'impiego delle tecnologie più efficienti (*Joint Implementation*), progetti di miglioramento dell'efficienza energetica nei paesi in via di sviluppo da parte dei paesi industrializzati. Il protocollo prevede, inoltre, la possibilità del commercio delle emissioni tra paesi industrializzati (*Emission Trading*). Anche le iniziative di forestazione concorrono al raggiungimento degli obiettivi grazie alla capacità di assorbimento (*sink*) di CO₂ delle foreste.

L'Italia si è impegnata a conseguire una riduzione del 6.5% delle emissioni rispetto al 1990. Poiché tuttavia, a partire da tale data, si è registrato un aumento delle emissioni complessive di circa il 19.5%, il reale obiettivo che si troverà ad affrontare il nostro Paese risulterà in realtà assai più gravoso (Anfodillo et al., 2006).

All'art. 4 della UNFCCC tra gli obblighi dei Paesi firmatari vi è quello di contabilizzare, attraverso inventari nazionali, le emissioni e le sottrazioni di gas serra. In questo conteggio rientrano una serie di misure in campo agricolo e forestale denominate attività di *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (LULUCF), che potranno essere incluse nel bilancio nazionale dei gas serra nel caso in cui la differenza tra assorbimenti ed emissioni sia positiva. Per poter essere contabilizzate le attività di LULUCF devono rispondere a due condizioni: aver avuto inizio dal 1990 (*baseline*) ed essere indotte dall'uomo (*human-induced*), ossia devono essere intenzionali, cioè riconducibili ad espliciti interventi gestionali, non naturali. E' stato scelto, pertanto, un conteggio parziale delle variazioni di carbonio atmosferico legate al cambio di uso del suolo agro-forestale, per non allontanarsi dalle finalità del PK che richiede lo sviluppo di specifiche politiche nazionali di abbattimento delle emissioni (Pettenella, Zanchi, 2006). L'articolo 3.3 del PK impone di conteggiare gli assorbimenti di carbonio derivanti da attività di afforestazione (*Afforestation*) e riforestazione (*Reforestation*) realizzate dopo il 1990 al netto delle emissioni dovute ad attività di deforestazione (*Deforestation*). Tra le diverse tipologie di riforestazione o afforestazione può rientrare anche la naturale espansione della superficie forestali per effetto delle politiche di riduzione della superficie agro-pastorale o delle politiche di protezione dell'ambiente. In questo caso l'unico costo da sostenere è quello della loro certificazione, che rientra nei costi del Registro Nazionale dei Serbatoi di Carbonio e agro-forestali. Il Registro deve

La differenza tra afforestazione e riforestazione consiste nel periodo di tempo in cui il suolo non è stato precedentemente occupato da foresta:
 - si ha **Afforestation** quando l'impianto viene fatto su terreni non boscati da più di 50 anni;
 - **Reforestation** consiste nell'attività di conversione in foresta su terreni non boscati da meno di 50 anni.

analizzare le variazioni dei flussi dei gas serra inerenti le attività degli articoli 3.3 e 3.4 del PK, in particolare, per le foreste:

- assorbimenti/emissioni derivanti dalle variazioni di superficie (*Afforestation + Reforestation - Deforestation - ARD*)
- assorbimenti determinati dall'aumento delle provvigioni (*Forest Management*).



Figura 3. Struttura del Registro dei Serbatoi di Carbonio Agroforestali.

La gestione forestale (*Forest Management*), come misura complementare, entra nel conteggio nazionale solo con il 15% dei crediti prodotti. Il rimanente 85% dei crediti di carbonio può essere parzialmente utilizzato per originare un mercato volontario dei crediti da gestione forestale. La produzione di questi crediti deriva, pertanto, dall'impegno volontario del proprietario (privato o ente pubblico) di un bosco soggetto a pianificazione forestale (Piano di Riassetto Forestale) a risparmiare un'aliquota dell'incremento di massa legnosa con l'obiettivo del raggiungimento della provvigione ottimale del bosco. Questo impegno vincola i proprietari a non scendere al di sotto della *baseline* provvigionale raggiunta alla scadenza del piano per almeno 30 anni. La quantificazione dei crediti accumulati avviene con le modalità di calcolo e attraverso i rilievi previsti nei piani economici. Il monitoraggio dei risultati dell'azione di risparmio dell'incremento, pertanto, si attua contestualmente al rinnovo del piano (ogni 10-12 anni). I crediti vendibili sul mercato volontario sono quelli prodotti dalle sole particelle forestali con attitudine produttiva (per osservanza del principio di addizionalità, sono escluse quelle particelle che erogano preminentemente altri servizi: eteroprotettivi, turistico-ricreativi, ambientali) e devono rappresentare solo parte della differenza tra incremento periodico e ripresa reale. È necessario, infatti, garantire la permanenza del carbonio assorbito dalla foresta, costituendo un *buffer* di incremento non utilizzato e non negoziabile che assicuri il rispetto dell'impegno assunto nel caso

In tale scenario si inserisce il progetto Carbomark, finanziato nell'ambito del Programma Life+, che punta a promuovere i mercati di carbonio volontari e locali come strumenti per le politiche della UE finalizzate alla mitigazione dei cambiamenti climatici. L'attivazione dei mercati locali di carbonio prevede il coinvolgimento delle imprese che vogliono distinguersi per etica ambientale e dei proprietari forestali che intendono risparmiare parte dell'incremento di massa legnosa.

in cui si verificano fenomeni accidentali che determinano il ritorno in atmosfera del carbonio fissato (ad esempio: incendi, attacchi di insetti, schianti da vento o da neve).

Per evitare il doppio conteggio, i crediti utilizzabili per il mercato volontario locale devono essere esclusivamente quelli prodotti nei boschi classificati come tali nel 1990. Le attività di *Reforestation* e *Afforestation* generano, infatti, crediti negoziabili solo a livello internazionale direttamente dai Governi dei Paesi che hanno aderito al PK.

Di conseguenza è di fondamentale importanza non solo disporre di adeguate stime sulla variazione della superficie boscata per ricavare informazioni sullo stock di carbonio e sulle capacità fissative dei boschi di neoformazione (*AR*), ma anche definire con precisione l'entità della superficie forestale nel 1990, informazione quest'ultima propedeutica alla certificazione dei crediti derivanti da attività di *Forest Management*. Il grado di accuratezza e le metodologie adottabili possono variare in relazione alla scala di rappresentazione ed alle specifiche finalità applicative, purché il metodo di analisi sia coerente con gli approcci previsti nelle *Good Practice Guidance For Land Use, Land-Use Change and Forestry* definite dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2003).

2.3 Variazioni della superficie forestale, dinamiche di paesaggio e conservazione della biodiversità

A scala mondiale si assiste ad una riduzione della superficie forestale pari a circa 13 milioni di ettari l'anno e la causa principale di questa allarmante tendenza è rappresentata dalla conversione delle foreste in terre agricole. I tassi di deforestazione più alti si registrano in Africa ed America del Sud ed interessano in gran parte le foreste primarie, che continuano a contrarsi sensibilmente, tant'è che nel periodo 2000-2005 è stata registrata una perdita di circa 6 milioni ha/anno (dati FAO – Forest Resource Assessment 2005, <http://www.fao.org/forestry/FRA2005>). Ciononostante nel mondo la riduzione netta di superficie forestale relativa al periodo 2000-2005 è stata stimata pari a 7,3 milioni di ha/anno, vale a dire un decremento medio di 1,6 milioni di ha/anno inferiore a quello stimato nel periodo 1990-2000. Questo risultato è dovuto prevalentemente agli imboschimenti su grande scala realizzati e in corso in Cina ed all'espansione delle foreste europee, che si attesta mediamente sui

Il problema della non permanenza del carbonio in è stato oggetto del 44° Corso di Cultura in Ecologia, ai cui Atti (Anfodillo et al., a cura di, 2008) si rimanda per approfondimenti.

660.000 ha/anno nel periodo 2000-2005. Tale processo in Europa è dovuto alla diffusione delle aree protette, all'istituzione di siti soggetti a forme di gestione speciale per la conservazione della biodiversità (Rete Natura 2000), ma anche al graduale abbandono delle attività agricole dalle terre marginali, conseguenza delle profonde trasformazioni socio-economiche del dopoguerra.

In Italia, come in altri Paesi europei, si assiste ad una forte concentrazione delle attività economiche intensive nei territori di pianura, seguita da uno sviluppo urbano diffuso che ha seriamente sollevato il problema della salvaguardia degli ambienti naturali, in particolare dei boschi planiziali (De Capua et al., 2005). Al contrario, i territori montani risentono del graduale declino delle attività legate alla tradizione agro-silvo-pastorale, che determinano sostanziali modifiche all'assetto generale del paesaggio, portando ad una lenta, impercettibile, ma progressiva ridefinizione del mosaico ambientale, che viene avvertita solo quando genera conflitti di uso del territorio. Solo allora la questione trova spazio con toni allarmistici nei mezzi di comunicazione, accompagnati da cifre destinate a colpire l'attenzione dell'opinione pubblica.

Per comprendere l'entità delle trasformazioni paesaggistiche ad una scala temporale adeguata a rappresentare le dinamiche di colonizzazione forestale secondaria degli alpeggi e delle aree agricole marginali, è necessario innanzitutto disporre di basi informative tra loro confrontabili, ossia riconducibili agli stessi modelli interpretativi, e rappresentative di un intervallo temporale di almeno 50 anni.

Le uniche informazioni relative alle superfici forestali raccolte con periodicità regolare fin dal 1933 sono quelle fornite dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), ma questi dati sono soggetti ad un significativo margine di indeterminatezza dovuto, oltre che al metodo di indagine, alle variazioni della definizione di bosco intercorse nel tempo. La definizione adottata dall'ISTAT appare, infatti, molto più restrittiva rispetto ai recenti standard adottati a livello internazionale (ad esempio quello FRA2000, che si descriverà in seguito) o alle definizioni giuridiche di bosco sancite a livello nazionale (Decreto Legislativo n.227/2001) o regionale (L.R. n.52/1978). L'analisi dei dati ISTAT degli ultimi cinquant'anni evidenzia un'espansione della superficie forestale a livello nazionale da 5.745.490 ha del 1954 a 6.855.844 ha del 2002, pertanto un incremento di superficie di circa il 20%) (Pompei, Scarascia-Mugnozza, 2008), tuttavia tale statistica è scarsamente significativa, perché non è direttamente confrontabile con altre fonti informative e non rappresenta quei contesti caratterizzati da una maggiore componente dinamica, come gli arbusteti e le

In un articolo pubblicato sul quotidiano "La Repubblica" l'11 luglio 2010 si sostiene che la superficie forestale in Italia è aumentata del 200% rispetto al dopoguerra e del 300% dal 1920.

L'ISTAT considera superficie boscata quella rappresentata da una superficie di terreno non inferiore a 1/2 ettaro, in cui sono presenti piante forestali legnose, arboree e/o arbustive, che producono legno, o altri prodotti forestali, determinanti, a maturità, un'area d'insidenza di almeno il 50 per cento della superficie e suscettibili di avere un ruolo indiretto sul clima e sul regime delle acque.

La valutazione della variazione di superficie boscata è largamente approssimativa, perché assume come base di partenza indagini catastali risalenti alla prima metà del XX secolo fondate su valutazioni empiriche che fanno riferimento a categorie forestali diverse da quelle adottate in successive indagini (Preto, 1985).

neoformazioni che, a seconda dei periodi e degli interessi locali, oscillano periodicamente tra bosco e pascolo, tra abbandono e coltura. L'inventario Forestale Nazionale del 1985 (IFNI '85), infatti, propone dei risultati sostanzialmente diversi al dato ISTAT (8.675.100 ha a metà degli anni '80). La notevole discordanza dei dati ISTAT/IFNI '85 si trova spiegazione proprio nelle differenze delle definizioni dell'oggetto di rappresentazione e nel fatto che le statistiche forestali nazionali non prevedevano rilievi di tipo inventariale estesi a tutto il territorio nazionale, ma la compilazione di questionari che documentavano solo le variazioni di superficie forestale.

A prescindere dalla definizione di bosco adottata e dal modello informativo di riferimento, il dato quantitativo riferito alle superficie forestale di per se stesso non rappresenta uno strumento diagnostico da cui possa scaturire un'analisi territoriale più complessa, che consideri ad esempio le variazioni nel tempo delle diverse *patch* ambientali, i fenomeni di frammentazione, la scomparsa di habitat. La gestione del bosco a livello di paesaggio deve tenere conto delle esigenze di habitat e specie in riferimento anche alle relazioni esistenti a scala territoriale ed ai *trend* evolutivi. Ad esempio l'apertura di vuoti più o meno ampi nella copertura arborea può concorrere ad innescare processi di successione della vegetazione e creare *pattern* spaziali che possono avere positive ricadute sulla diversità a livello di paesaggio e di specie (Masutti, Battisti, 2007). Una corretta gestione della biodiversità richiede, pertanto, un'analisi multitemporale che ricostruisca la struttura del paesaggio forestale attraverso una caratterizzazione di forma, grandezza, organizzazione spaziale e numerosità delle *patch* territoriali, per consentire il monitoraggio delle trasformazioni e per identificare *trend* dei cambiamenti (Geri et al., 2008). È evidente che una risposta a questa richiesta informativa non può venire da un campionamento inventariale, ma piuttosto da una restituzione cartografica in continuo che presenti adeguate caratteristiche di scala e dettaglio geometrico.

3 CONTESTO CONOSCITIVO DI RIFERIMENTO

Dopo aver definito le istanze informative che motivano un'analisi multitemporale delle coperture forestali riferite a determinati periodo storici, è necessario relazionare tali istanze alle basi di dati disponibili e alle loro caratteristiche. Questi *layers* informativi possono derivare da attività di acquisizione tematica condotte a scala regionale o da programmi di monitoraggio nazionali o transnazionali. Un primo *screening* di queste risorse permette di individuare i livelli informativi potenzialmente integrabili in un confronto diacronico.

3.1 Basi di dati cartografiche

A scala regionale è stata da tempo avviata una pluralità di iniziative per la formazione ed il costante aggiornamento di un quadro conoscitivo, che recentemente sono state adeguate ai requisiti di accessibilità, fruibilità ed interoperabilità dettati da disposizioni statali (Codice dell'Amministrazione Digitale, D.Lgs. 82/05) e comunitarie (Direttiva INSPIRE). Queste attività costituiscono il supporto di base per la maggior parte delle iniziative di pianificazione degli enti territoriali, fornendo quindi adeguati strumenti di conoscenza del territorio.

Principale base di riferimento per la redazione degli strumenti urbanistici regionali è la Carta Tecnica Regionale. Questo prodotto, destinato ad un utilizzo multifunzionale, si limita a fornire una rappresentazione della morfologia del terreno, delle acque, della vegetazione, dei confini amministrativi ed, in generale, delle opere dell'uomo, dosando i vari elementi in relazione ad una adeguata densità della trama cartografica, sicché non risultino pregiudicate le qualità fondamentali di precisione, completezza e fedeltà di rappresentazione, e, perciò, senza assumere alcun aspetto tematico preponderante. Il primo lotto è stato prodotto tra il 1983 e il 1999, ma proprio la caratteristica di aspecificità tematica della CTR, pone dei limiti ad un impiego del livello 5 ("vegetazione") codice 3 ("limite del bosco") nel contesto di una comparazione con *datasets* che rispondono a definizioni standard di bosco rigorosamente determinate. A ciò si aggiunge la caratteristica che i rilievi per la formazione della CTR sono stati

Nelle specifiche di acquisizione della Carta Tecnica Regionale la determinazione delle formazioni boschive è così regolamentata:
*"Il segno di limite di bosco è usato solamente quando le piante terminali costituiscono una linea ben definita ed appariscente.
 Il segno di limite di bosco serve anche ad indicare le divisioni interne fra bosco di diversa essenza.
 Per appezzamenti che in scala risultano inferiore al cm², può essere tralasciato il segno di essenza.
 Per rappresentare le tagliate, cioè i tagli di ampia larghezza eseguiti nei grandi boschi secondo linee spesso diritte, per divisioni di proprietà o di appezzamenti o per isolare gli incendi, si usano due segni paralleli di limite di bosco. Se la tagliata è praticabile come stradone di servizio del bosco, viene rappresentata col segno di strada campestre o carreggiabile a seconda delle sue caratteristiche. La larghezza del segno di tagliata è proporzionata all'ampiezza del particolare."*

eseguiti in periodi diversi, pertanto non si dispone di un *output* cartografico cronologicamente omogeneo per l'intero territorio regionale.

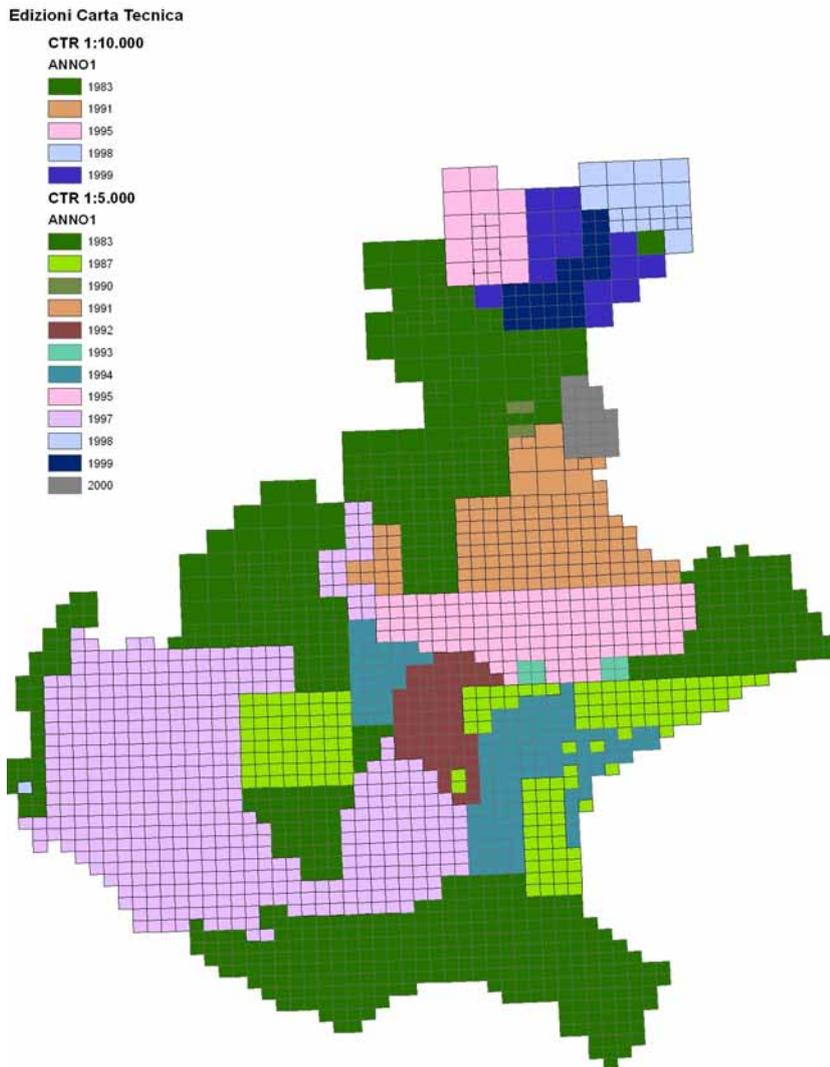


Figura 4. Copertura ed anno di realizzazione dei primi lotti della Carta Tecnica Regionale.

Più interessanti sono le possibilità applicative di un altro importante e recente strumento conoscitivo multitematico, la Carta della Copertura del Suolo del Veneto (edizione 2009), che integra immagini satellitari e ortofoto digitali del volo TERRAITALY 2007 con dati territoriali di varia natura, per produrre un'informazione tematica articolata in 173 classi con una densità informativa corrispondente ad un'unità minima cartografabile di 2.500 m². Nella Carta della Copertura del Suolo confluiscono i contenuti della Carta Regionale dei Tipi forestali (edizione 2006), che, a sua volta, costituisce un aggiornamento della Carta Forestale Regionale del 1983, riprendendone le geometrie ed

adeguandola al sistema classificatorio su base tipologica. Le caratteristiche di queste tre basi informative saranno dettagliatamente analizzate nel paragrafo 6.1.

A differenza di quanto è avvenuto in altri Paesi, nel panorama forestale italiano è venuta a mancare una tradizione di studi e di impiego di tipologie forestali su scala nazionale (Del Favero, 2004). Dopo alcuni contributi sperimentali nella seconda metà degli anni ottanta (Del Favero et al., 1990) inquadramenti della vegetazione forestale su base tipologica gradualmente sono stati sviluppati su quasi tutto il territorio nazionale a partire dal decennio scorso su iniziativa delle singole regioni. Alla precedente assenza di un inquadramento classificatorio riconosciuto a livello nazionale fa riscontro la mancanza di prodotti cartografici realizzati in modo omogeneo e unitario su tutto il territorio italiano. Per avere una cartografia dei boschi italiani secondo uno schema distintivo, pur semplificato, delle diverse categorie di bosco presenti sul territorio nazionale, bisogna risalire al 1936, anno in cui fu realizzata la Carta Forestale del Regno d'Italia (vedasi paragrafo 6.1.1).

Le uniche altre fonti informative sulle superfici forestali a scala nazionale, oltre ai già citati *report* statistici annuali predisposti dall'ISTAT, sono costituite da rilevamenti campionari che vanno a costituire gli inventari forestali. I due inventari forestali nazionali realizzati a distanza ventennale, l'Inventario Forestale del 1985 e il recente Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi di Carbonio, non sono, tuttavia, tra loro comparabili per la diversa definizione di bosco adottata e, comunque, per risultare statisticamente significativi a scala sub regionale, necessitano di un infittimento della maglia unichilometrica di campionamento attraverso la classificazione di nuovi punti.

Tentativi di applicazione a scala regionale di progetti nati a livello europeo, hanno già evidenziato che l'inadeguatezza del dettaglio di rappresentazione può dar luogo ad interpretazioni comparative con prodotti di maggiore scala incoerenti con il fenomeno che si vuole monitorare. Un esempio è quello del progetto *Corine Land Cover (CLC)* nato specificamente per il rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del territorio, con particolare attenzione alle esigenze di tutela ambientale. Il progetto *CLC* ha l'indubbio vantaggio di produrre aggiornamenti periodici (attualmente sono disponibili tre coperture: *CLC 90, Image & CLC 2000, CLC 2006*) del tutto gratuiti. Questa base informativa, prodotta ad una scala 1:100.000, non consente di identificare zone di superficie inferiore a 25 ha e di larghezza inferiore a 100 m. Di conseguenza tutti gli usi del suolo il cui mosaico è costituito da tessere di

Mentre nell'INFC viene ripresa la definizione di bosco FRA2000, nel precedente Inventario Forestale del 1985 il bosco viene definito come un territorio con copertura arborea del 20% e con un'estensione di almeno 2000 m².

Il programma CORINE (*Coordination of Information on the Environment*), varato dal Consiglio della Comunità Europea nel 1985, è nato con la funzione principale di verificare lo stato dell'ambiente nella Comunità, per orientare le politiche comuni, controllarne gli effetti e proporre eventuali miglioramenti.

dimensione inferiore all'unità minima, sono soggetti a sottostime a favore degli usi del suolo dominanti che li inglobano. I limiti posti dalla risoluzione planimetrica del progetto *CLC* hanno importanti ricadute anche nelle valutazioni quantitative dei cambiamenti di uso del suolo ed in particolare nella stima della variazione della superficie boscata regionale dal 1992, anno di riferimento delle immagini satellitari utilizzate per *CLC 90*, al 2000-2001, epoca di riferimento per *Image & CLC 2000*. Da un'analisi dei cambiamenti a livello regionale, infatti, si rileva un aumento della superficie boscata di solo 243 ettari e, per la provincia di Belluno, addirittura una riduzione della stessa di 116 ettari. Questi risultati non devono sorprendere, ma vanno interpretati alla luce di quanto in precedenza esposto. Di fatto *CLC 90* classifica già "bosco" gli inclusi prativi e pascolivi abbandonati di superficie inferiore alla minima unità cartografata, anticipando le ricadute del lento processo evolutivo di chiusura delle radure, che a questa scala di analisi non viene registrato. La palese inadeguatezza di questo prodotto per numerose finalità applicative in realtà territoriali molto frammentate rende, pertanto, inattendibili stime quantitative sull'entità del fenomeno di ricolonizzazione da parte del bosco dei pascoli montani abbandonati o sottoutilizzati.

Più interessanti, invece, sembrano le possibilità applicative della realizzazione di un altro progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea, *GSE Forest Monitoring* (www.gmes-forest.info), parte integrante del programma *Global Monitoring for Environment and Security Services Element (GMES)*, che consiste nella realizzazione di carte di uso e cambiamento del suolo finalizzate alla stima dell'assorbimento di CO₂ derivante dalle attività di *LULUCF*. Nel 2007 è stata completata l'intera copertura nazionale con riferimento al 1990, che verrà utilizzata dal Ministero per l'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare nell'ambito della costituzione del Registro Nazionale dei Serbatoi di Carbonio e agro-forestali. Il prodotto finale presenta le seguenti caratteristiche:

- risoluzione geometrica di 30 m;
- unità minima cartografata di 0,5 ha;
- RMS < 30 m;
- accuratezza tematica complessiva percentuale (per il Veneto) pari a 93,6;
- definizione di 6 classi di uso del suolo (forest, cropland, grassland, settlement, water and wetland, unproductive).

Forest terreno di area minima di mezzo ettaro (0,5 ha) con copertura arborea di più del dieci per cento (10%) con alberi con altezza potenziale a maturità, in situ, di almeno due metri. Un bosco alto può consistere in formazioni forestali chiuse, dove gli alberi dei vari strati coprono un'alta porzione del suolo, oppure in formazioni forestali aperte.

Per il raggiungimento dei requisiti qualitativi richiesti dal progetto, il processo di classificazione, eseguito su immagini Landsat 5 TM, in particolare per le aree collinari ad elevata eterogeneità e frammentazione, in cui il potere risolutivo del dato Landsat spesso non risulta sufficiente, è stato completato con una revisione foto interpretativa basata sull'analisi comparata tra i fotogrammi ortorettificati del volo Italia 1988-1989 e le immagini Landsat stesse. Fotogrammi del volo Italia 1988-1989 sono stati utilizzati anche per la validazione del prodotto finale.

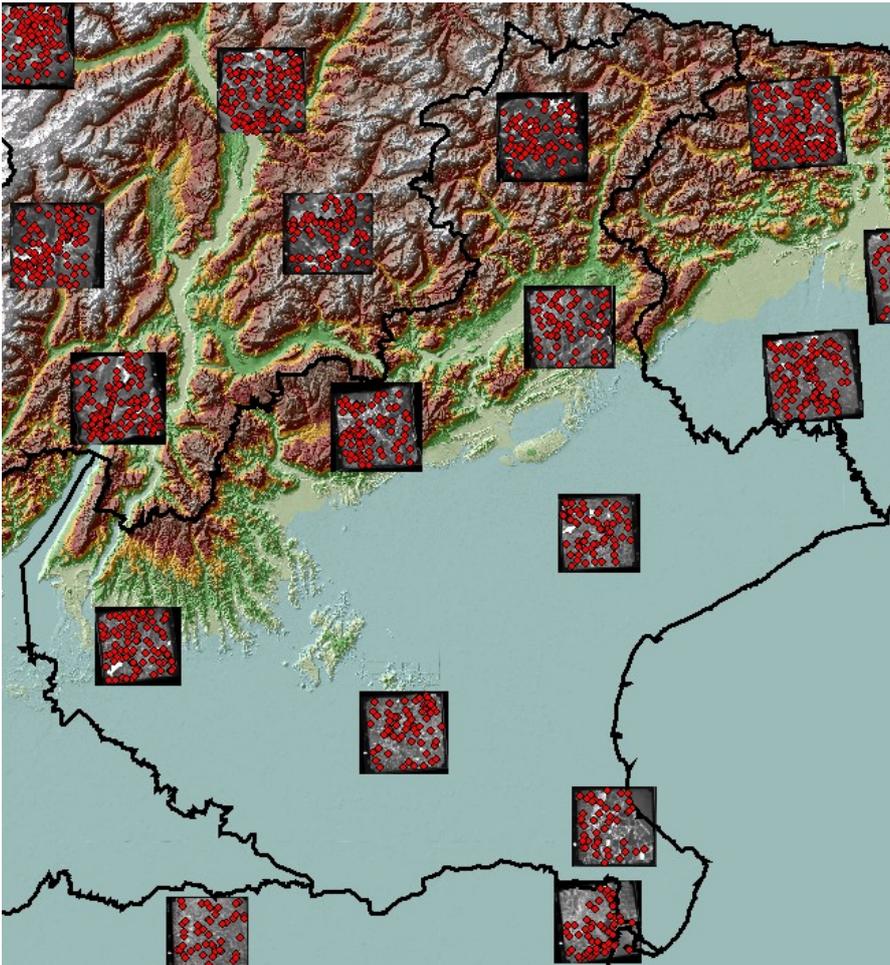


Figura 5. Validazione su foto aeree del Volo Italia 1988-89.

Questo *dataset* verrà utilizzato per la determinazione delle superfici forestali nell'anno 1990 e per la successiva *change detection* in comparazione con elaborazioni analoghe risultanti dagli strati informativi prodotti nell'ambito di questo lavoro di tesi, per valutare, a diverse scale nell'ambito dell'area di studio, gli effetti della risoluzione geometrica di rappresentazione nella precisione delle stime di superficie e di cambiamento.

3.2 Repertorio aerofotogrammetrico

Dell'ampio repertorio disponibile presso l'aerofototeca regionale, che raccoglie oltre 35.000 foto aeree del territorio veneto eseguite in diversi anni a partire dal 1978, alle quali vanno aggiunti il volo R.A.F. del 1944-45 e il volo GAI del 1954-55, sono state selezionate le foto aeree del volo GAI e quelle del volo "1991-92 REVEN Montagna Veneta". Il 1954 è stato il primo riferimento temporale ad essere preso in considerazione, in quanto, a partire da quel momento, hanno avuto inizio le trasformazioni economiche e sociali che hanno determinato l'evoluzione del territorio dal dopoguerra ad oggi e che hanno indotto allo spopolamento delle campagne, ai rimboschimenti ed alla concentrazione demografica nelle città. Il volo "1991-92 REVEN Montagna Veneta", invece, rappresenta la prima copertura aerofotogrammetrica a colori del territorio montano del Veneto e la sua collocazione temporale si dimostra utile sia in riferimento all'applicazione del protocollo di Kyoto, sia per l'individuazione dei boschi di neoformazione.

4 OBIETTIVI DELLA RICERCA E APPROCCIO METODOLOGICO

Dall'analisi delle istanze informative, che riflettono la crescente attenzione in ambito scientifico, ma anche da parte delle amministrazioni pubbliche e dei privati verso i nuovi valori del bosco, non più legati alla sola funzione produttiva, bensì connessi a politiche forestali sempre più vincolanti in risposta di accordi internazionali sottoscritti dal nostro Paese (Convenzioni sulla conservazione della diversità biologica, sui cambiamenti climatici, sulla lotta alla desertificazione), è emersa la necessità di disporre di basi informative che consentano, da un lato, di produrre stime complessive sull'entità delle risorse forestali in determinati periodi storici su ampi comprensori, dall'altro, ad un livello di scala maggiore, di supportare analisi più sofisticate, focalizzate ad una gestione del bosco sostenibile non solo in relazione agli equilibri ecosistemici, ma anche nei confronti degli squilibri indotti direttamente o indirettamente dall'uomo che generano trasformazioni degli usi del suolo e dell'assetto territoriale percettibili solo nel lungo periodo. Ecco, dunque, che si genera una domanda informativa che si differenzia a seconda della scala geografica e temporale in cui si contestualizza.

In questo quadro tutte le attività pregresse di inventariazione e monitoraggio forestale alle diverse scale meritano un'attenta valutazione per quanto riguarda la possibilità di rispondere in maniera adeguata ad una rappresentazione diacronica dei fenomeni di trasformazione. E tuttavia si potrà constatare come una realtà nazionale quanto mai articolata e differenziata sotto il profilo dei sistemi informativi forestali, generata da una serie di progetti a scala territoriale nazionale o regionale quasi mai connessi tra loro o mutualmente integrati, renda difficilmente comparabili e poco utilizzabili i dati forniti dalle esperienze finora realizzate.

In particolare non è possibile confrontare dati inventariali con mappature in continuo, perché si tratta di strumenti di analisi e di approcci operativi diversi che rispondono a differenti obiettivi, la cui applicazione può risultare più o meno adeguata soprattutto in relazione alle dimensioni della regione da esaminare (Corona, 2010). Gli inventari forestali, infatti, sono in grado di fornire informazioni di accuratezza statisticamente accertabile riguardanti l'entità e lo stato delle risorse forestali e i loro cambiamenti, ma, per contro, non sanno fornire indicazioni adeguate sulla loro localizzazione. Le carte forestali, invece, indicano la distribuzione dei fenomeni sul territorio ma, a causa di incertezze

ineliminabili sotto il profilo tecnico e definitorio, non producono stime quantitative altrettanto attendibili ed associabili ad intervalli fiduciarî definiti (Collalti et al., 2009).

E, tuttavia, non è corretto ritenere che le iniziative inventariali e le rappresentazioni cartografiche in continuo siano competitive fra loro o addirittura mutualmente esclusive. In realtà si tratta di strumenti complementari, strettamente e funzionalmente collegabili l'uno all'altro, se rispondenti a standard comuni di classificazione.

Laddove l'impiego di metodologie classiche di inventariazione delle risorse forestali si scontra con le esigenze, illustrate al paragrafo 2, di ottenere un dettaglio di informazione elevato a diverse scale di analisi, la soluzione è da ricercarsi nell'integrazione tra questi differenti approcci, per produrre un'informazione rispondente ad una pluralità di necessità applicative, con una verifica, a scala comprensoriale, della correttezza della stima delle superfici.

Tale premessa consente di delineare gli obiettivi e l'approccio metodologico adottato in questa ricerca.

A partire dal quadro di istanze informative e di *datasets* disponibili, storici e di recente acquisizione, illustrato nei paragrafi precedenti, in prima analisi si cercheranno elementi di raccordo, evidenziandone nel contempo le difformità, tra le basi informative che si prestano maggiormente, pur con limitazioni ineliminabili, ad essere utilizzate nel contesto di un confronto diacronico. Queste sono: la Carta dei popolamenti forestali del 1936, la Carta Forestale Regionale del 1983, la Carta Regionale dei Tipi forestali del 2006 e la Carta della Copertura del Suolo del Veneto del 2009.

Dall'anamnesi delle caratteristiche tematiche e geometriche di questi *datasets* ufficiali, tuttavia, emergerà la necessità di integrare questo quadro conoscitivo con ulteriori iniziative di monitoraggio che consentano di ottenere un prodotto di elevata precisione geometrica e garantiscano continuità temporale allo studio dell'evoluzione storica delle coperture forestali.

Nella fase successiva, pertanto, ci si propone di delineare soluzioni tecniche applicabili su area vasta, in relazione all'utilizzo di dati telerilevati storici, per la costruzione di nuovi strati informativi sulle coperture forestali del suolo conformi a standard comuni e, quindi, direttamente implementabili in un'analisi multitemporale.

L'applicazione concreta di questo studio al territorio della Comunità Montana dei Sette Comuni consentirà di valutare gli esiti di questo approccio metodologico e delle trasformazioni rilevate in quest'area, che presenta dinamiche di sviluppo

socio-economico peculiari nel contesto delle Comunità Montane della fascia prealpina, soprattutto in relazione all'importante ruolo assunto negli ultimi decenni dal comparto turistico.

Più nel dettaglio, la metodologia proposta si articola nelle seguenti fasi operative:

1. descrizione analitica delle basi di dati ufficiali (Carta dei popolamenti forestali del 1936, Carta Forestale Regionale del 1983, Carta Regionale dei Tipi forestali del 2006, Carta della Copertura del Suolo del Veneto del 2009) propedeutica ad una valutazione delle possibilità ed ai limiti di un loro utilizzo nella costruzione di un quadro conoscitivo sulle dinamiche spaziali delle coperture forestali;
2. derivazione di una dato vettoriale relativo alle coperture boschive nel 1954 a partire dalle foto aeree del Volo GAI;
3. derivazione di una cartografia della vegetazione forestale a partire dai fotogrammi del volo "1991-1992 REVEN Montagna Veneta";
4. confronto multitemporale con *datasets* recenti, preceduto da un'armonizzazione dei prodotti cartografici selezionati;
5. validazione delle stime di variazione della superficie forestale attraverso l'applicazione di un metodo statistico-inventariale.

Lo sviluppo delle fasi 2 e 3 sarà oggetto di particolari approfondimenti. Le fotografie aeree, infatti, rappresentano un'insostituibile risorsa informativa da cui si possono desumere con elevato dettaglio informazioni sulle trasformazioni dell'uso del suolo e, nel contesto specifico di questa tesi, sulle dinamiche spaziali delle coperture forestali in un orizzonte temporale sufficientemente ampio per rendere apprezzabili non solo i fenomeni *human induced*, ma anche i processi naturali di successione. L'estrazione tematica da fotogrammi storici, oltre alle problematiche legate al recupero della metricità delle immagini, presenta numerosi elementi di criticità, rappresentati dalla sia dalla scarsa informazione spettrale (problematica che riguarda le emulsioni pancromatiche, ossia quasi tutta la produzione aerofotogrammetrica antecedente al 1990) sia, più in generale, dai numerosi fattori, indipendenti dalle procedure di *pre-processing*, che ne deteriorano la qualità e che saranno oggetto di descrizione analitica nei paragrafi successivi.

E' in questo contesto che verranno testate le potenzialità di derivazione di informazioni tematiche offerte dai classificatori operanti con logica *fuzzy* basati

sul paradigma *object-oriented*. Questi permettono di superare i limiti mostrati dai classificatori *pixel-oriented* attraverso una classificazione di poligoni vettoriali generati mediante un processo di segmentazione dell'immagine che può implementare informazioni di tipo spettrale, geometrico, tessiturale, contestuale, gerarchico e tematico (derivante da strati informativi accessori), prestandosi all'interpretazione di obiettivi complessi, come la determinazione di sistemi naturali e seminaturali (Chirici et al., 2003; Chirici, Corona, 2006).

Un importante obiettivo di questa tesi, pertanto, è di suggerire soluzioni innovative, sfruttando le opportunità offerte dalle tecniche di classificazione *object-oriented*, per la produzione di cartografie delle coperture forestali a partire da fotogrammi storici, proponendo soluzioni metodologiche oggettive e scalabili su area vasta. Verranno proposte due procedure diversificate, rispettivamente per emulsioni a colori (volo "1991-1992 REVEN Montagna Veneta") e per fotogrammi pancromatici (volo GAI). Le strategie di costruzione dell'algoritmo di classificazione si differenzieranno sia in relazione al numero di canali spettrali disponibili, sia in rapporto all'epoca di acquisizione dei fotogrammi e, pertanto, alla possibilità di integrare nel processo di classificazione informazioni tematiche accessorie prossime temporalmente e di adeguata precisione geometrica.

E' stato, infine, considerato un importante rischio in cui si può incorrere nella produzione di mappe tematiche, ottenute sia tramite fotointerpretazione manuale, sia ricorrendo a procedure di classificazione semi-automatica, ovvero quello di commettere errori sistematici, per i quali non vi sia nessuna compensazione. Si è proceduto, pertanto, ad una verifica della correttezza della stima della variazione di superficie boscata adottando in parallelo il metodo statistico-inventariale. L'integrazione di dati inventariali per la validazione delle stime delle variazioni areali ottenute con la rappresentazione in continuo è stata applicata all'intervallo temporale 1991-2007, in ragione della maggiore precisione richiesta per cogliere incrementi di superficie forestale ad una distanza temporale di modesta entità rapportata ai tempi in cui si esplicano le dinamiche forestali di successione.

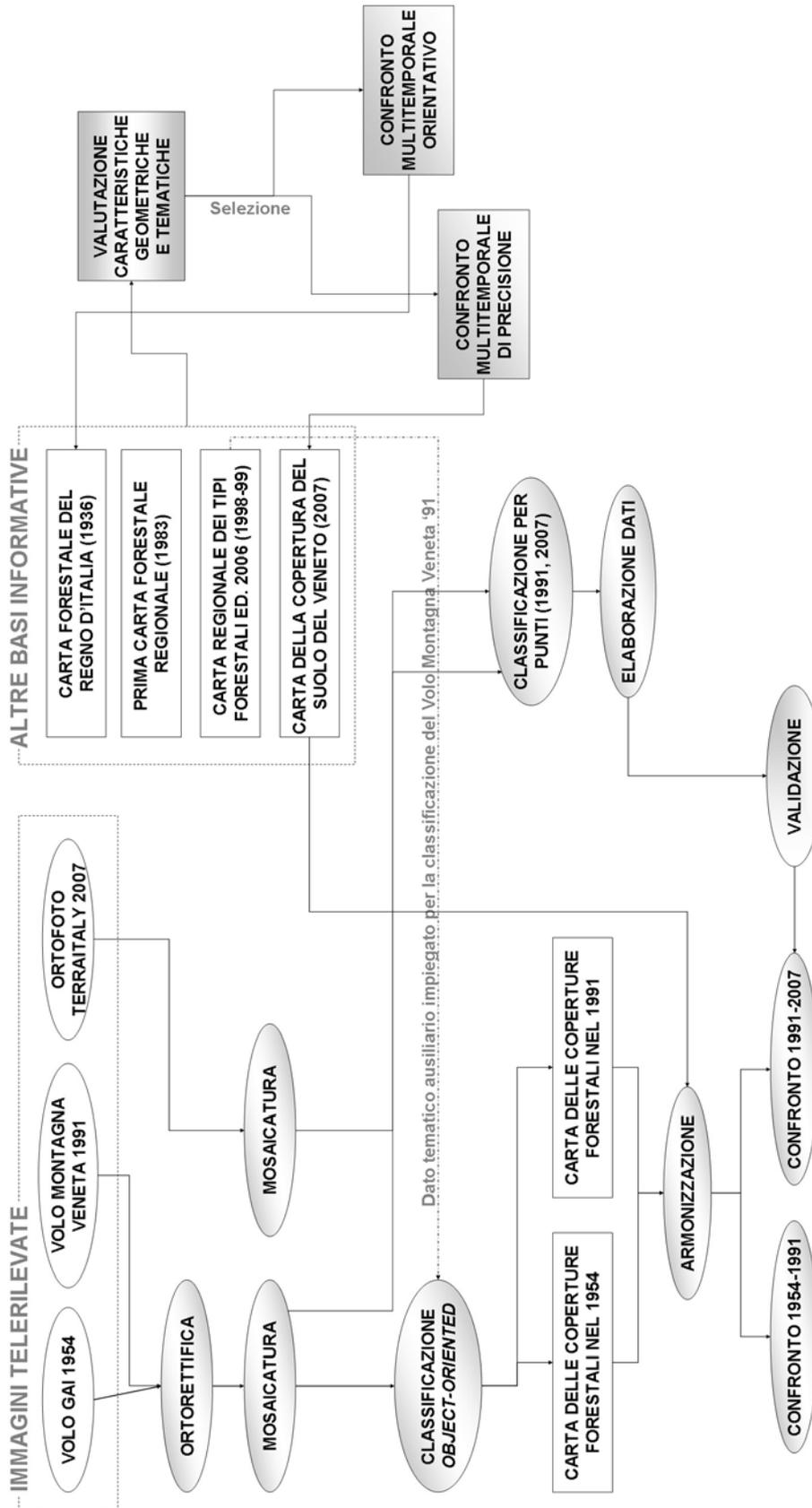


Figura 6. Quadro di sintesi della procedura adottata.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

5 AREA DI STUDIO: L'ALTOPIANO DEI SETTE COMUNI

L'Altopiano dei Sette Comuni è situato nel settore settentrionale della Provincia di Vicenza ed appartiene al gruppo delle Prealpi Veneto-Trentine, pur presentando confini naturali ben definiti, in quanto è delimitato dalla Valle del Brenta ad est, dalla Valsugana a nord, dalla Val d'Astico ad ovest, mentre ai margini meridionali degrada rapidamente verso la pianura vicentina. Il suo territorio rientra nell'ambito amministrativo della Comunità Montana "Spettabile Reggenza dei Sette Comuni", per una superficie complessiva di 46.652 ha. I Comuni storicamente appartenenti alla Comunità Montana sono Rotzo, Roana, Asiago, Gallio, Foza, Enego e Lusiana. A questi, nel 1976, si è aggiunto Conco, promosso da contrada a Comune, per cui, nonostante il nome, l'Altopiano dei Sette Comuni in realtà è composto da otto Comuni (Soave, 2005).

Il territorio è caratterizzato da ampie estensioni con pronunciata morfologia montuosa che contrastano con l'aspetto tabulare della fascia centrale, dove i pendii degradano morbidamente verso la conca di Asiago.

Sotto l'aspetto fitogeografico e climatico, la Comunità Montana dei Sette Comuni è compresa tra la regione forestale esomesalpica, che contraddistingue i distretti settentrionali e i rilievi a sud di Asiago (Cima Fonti, Monte Mazze, Monte Cimone, Monte Bertia), e la regione esalpica, che interessa gli impluvi centrali e i pendii meridionale, caratterizzata da precipitazioni abbondanti e da una minore capacità concorrenziale delle peccete.

Comune	Superficie (ha)	Quota (m s.l.m)		
		Minima	Massima	Media
Asiago	16.300	359	2.305	1.495
Conco	2.693	321	1.327	930
Enego	5.289	194	1.663	1.127
Foza	3.518	196	1.823	1.183
Gallio	4.775	551	1.768	1.289
Lusiana	3.419	208	1.385	912
Roana	7.848	552	2.013	1.217
Rotzo	2.824	385	1.933	1.303

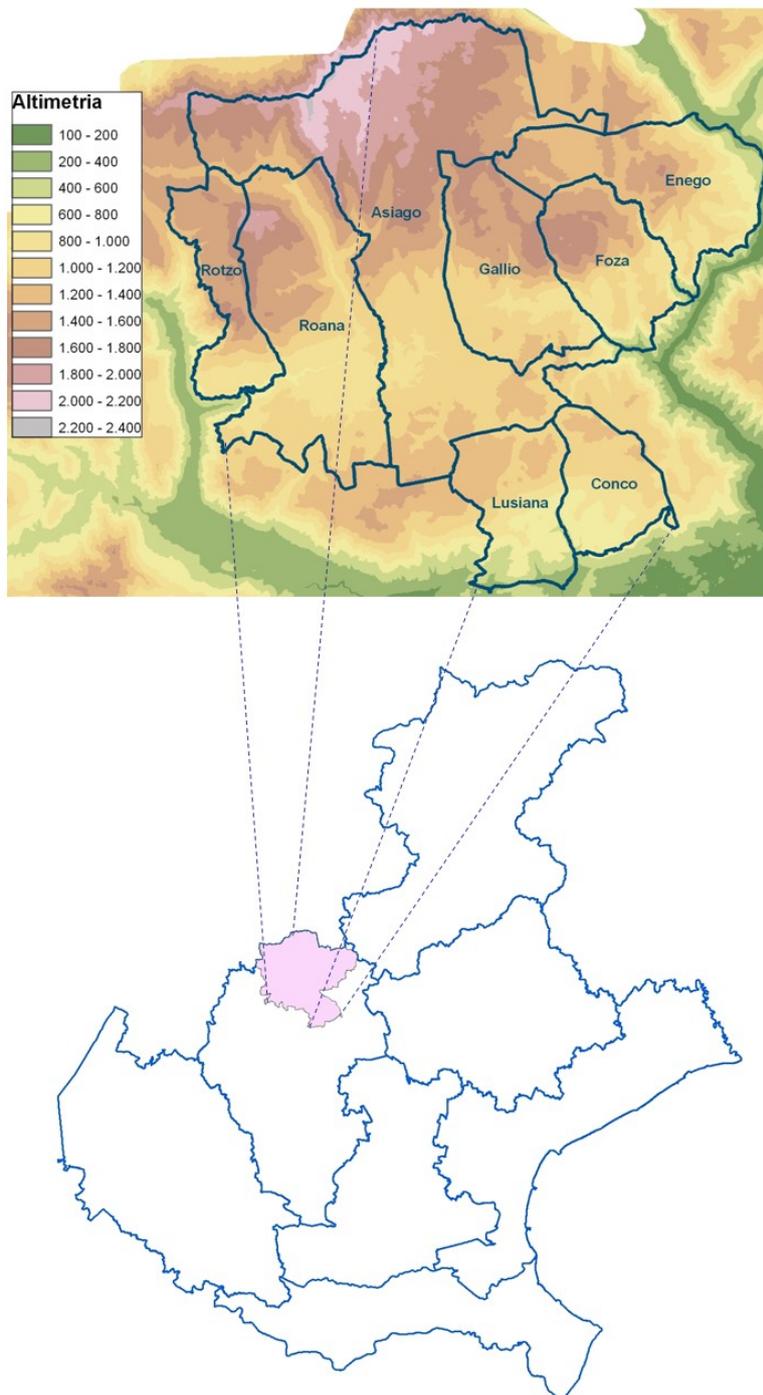


Figura 7. Comuni e fasce altimetriche della Comunità Montana dei Sette Comuni.

La vegetazione forestale copre circa il 65% della superficie della Comunità Montana ed è rappresentata da 22 tipi forestali, distribuiti secondo una seriazione altitudinale che va dal castagneto alla mugheta. Le categorie forestali più diffuse sono le peccete (8.775 ha), le faggete (7.350 ha) e gli abieteti (5.090 ha), seguite dalle formazioni antropogene (4.072 ha), dai lariceti e laricicembreti (2.183 ha), dalle mughete (1.399 ha), dagli orno-ostrieti e orstrio-

Queste statistiche sono state tratte dalla Carta Regionale dei Tipi forestali (edizione 2006) con riferimento alla definizione di bosco di cui alla L.R. 52/78.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

5 - Area di studio: l'Altopiano dei sette comuni

querzeti (1.116 ha), mentre poco significativa è la presenza degli arbusteti (213 ha), degli aceri-frassineti e aceri tiglieti (77 ha), delle pinete di pino silvestre (39 ha), dei castagneti e rovereti (16 ha) e dei saliceti e altre formazioni riparie (4 ha).

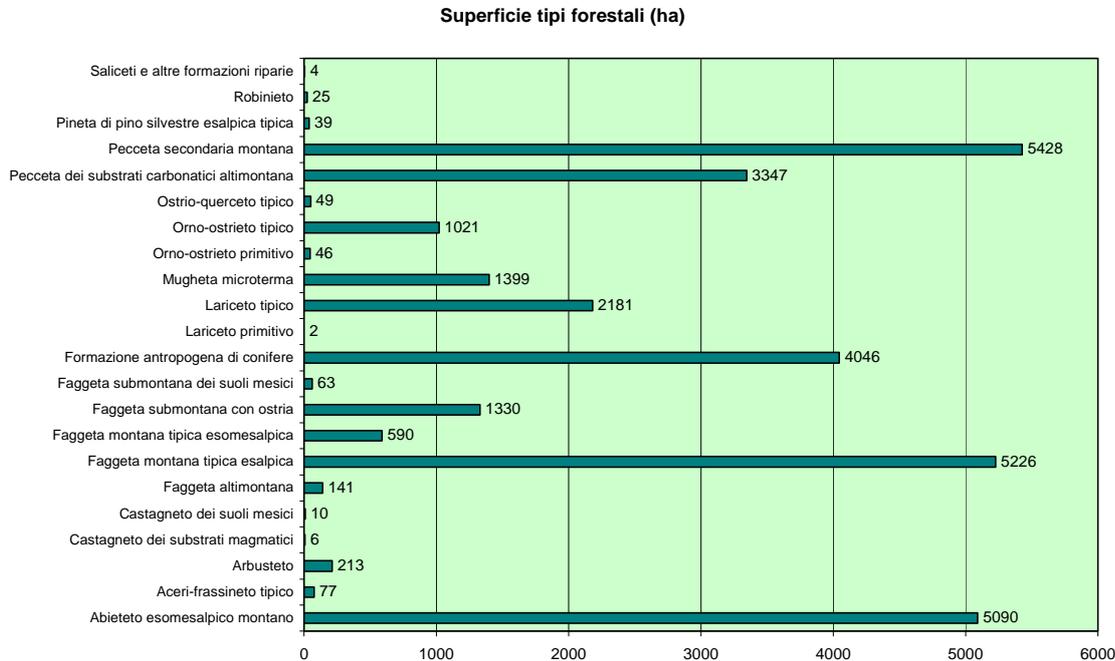


Figura 8. Ripartizione della superficie boscata per tipi forestali.

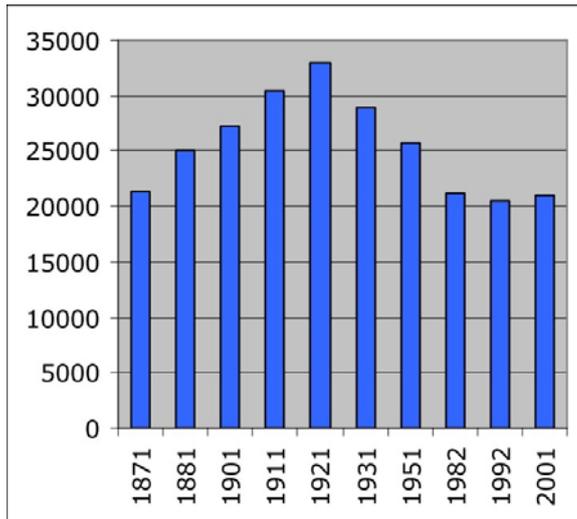
Un aspetto che distingue l'Altopiano dei Sette Comuni dalle altre Comunità Montane della fascia prealpina è la diffusa pianificazione forestale, sviluppata a partire dagli anni '30. I piani di riassetto forestale coprono una superficie di 31.082 ha, di cui circa il 70% boscati. All'80% delle particelle assestamentali è stata attribuita una prevalente funzione produttiva, al 10% una funzione ambientale e al rimanente 10% una funzione protettiva.

Storicamente il territorio dell'Altopiano è stato caratterizzato da una propria autonomia e identità culturale. Fin dal periodo medioevale le sue popolazioni erano governate da un'istituzione interna al territorio, la Reggenza, che ne assicurava la sopravvivenza attraverso una gestione oculata delle risorse naturali e dei beni del demanio civico. Dopo l'abolizione della Reggenza, nel 1807, la gestione del patrimonio collettivo è passata ai comuni, che continuano ad assicurare il godimento degli usi civici.

L'evento che segnò più profondamente questo territorio fu la prima guerra mondiale, che inflisse pesanti perdite al suo capitale umano ed ambientale. Interi paesi e contrade furono rasi al suolo. La metà dei boschi subì seri

danneggiamenti ed oltre il 30% fu completamente distrutto da bombardamenti, tagli e incendi (Soave, 2005).

L'andamento demografico seguì le vicende storiche locali. Da uno studio sull'andamento storico delle dinamiche demografiche, risulta che nel periodo tra il 1871 (Zalin, 2005) e il 2001 (fonte: ISTAT) la popolazione si è ridotta da 21.361 unità a 18.703 unità, con un valore massimo nel 1921, la cui spiegazione è da ricercarsi nell'euforia della ricostruzione post-bellica, quando la popolazione residente raggiunse le 32.905 unità.



Questi dati sono riferiti ai soli sette Comuni storici dell'Altopiano, pertanto non comprendono il Comune di Conco.

Figura 9. Andamento della popolazione residente sull'Altopiano dei Sette Comuni dal 1871 al 2001.

Complessivamente il tasso di spopolamento è, comunque, più contenuto rispetto ad altre zone montane contermini, anche se il valore di densità media di popolazione (nel 2001 è di 45 abitanti/km²) è poco rappresentativo delle diverse realtà comunali, con valori che scendono al di sotto dei 20 abitanti/km² per i Comuni di Foza e Rotzo.

I processi di antropizzazione del territorio, tuttavia, non sono commisurati all'andamento demografico, ma devono essere relazionati all'inquadramento socio-economico dell'area in esame, con particolare riferimento ai settori che rappresentano le attività dominanti, ovvero il settore primario, in evidente contrazione, ed il comparto turistico, che presenta un *trend* positivo soprattutto per il forte rilancio dell'agriturismo (Corona et al., 2010). La zootecnia, alla fine dell'800 basata sull'allevamento ovino e caprino, attualmente si basa quasi esclusivamente sul patrimonio bovino, costituito prevalentemente da vacche da latte.

6 BASI INFORMATIVE

6.1 Caratteristiche delle basi di dati ufficiali

6.1.1 La Carta forestale del Regno d'Italia

Per numerosi aspetti la genesi del primo documento base per l'informazione e la programmazione nel settore forestale e montano a scala nazionale ruota attorno alla carismatica figura di Arrigo Serpieri. Docente di Economia ed Estimo Forestale, si affermò per acume e competenza e ricoprì importanti incarichi di governo: dal 1919 al 1936 fu Presidente del Segretariato per la Montagna e ad interim, dal 1929 al 1935, Sottosegretario all'Agricoltura. Serpieri lasciò una profonda impronta nella legislazione forestale ed agricola, nei settori della bonifica e dei miglioramenti fondiari, tanto che le attuali normative statali e regionali si ispirano ancora ai suoi concetti.



Figura 10. Arrigo Serpieri nella sua veste di Capitano del Genio Militare

Alla sua opera si deve il Regio Decreto Legge n.3267 del 30 dicembre 1923, con cui fu riordinata e riformata la disarmonica legislazione forestale preesistente. Si trattava di una legge che poneva l'accento soprattutto sulle zone montane, con particolare attenzione alla difesa del suolo e alla protezione delle pendici montane. Tra le disposizioni introdotte dalla legge Serpieri ricordiamo l'obbligatorietà della predisposizione dei piani economici (o di assestamento forestale) per la gestione dei boschi pubblici, le disposizioni per la redazione

delle Prescrizioni di Massima e di Polizia Forestale, l'istituzione dell'ASFD (Azienda di Stato Foreste Demaniali), l'intervento diretto dello Stato per la sistemazione idraulica forestale dei bacini montani e, dettato di particolare rilevanza, l'istituzione del vincolo idrogeologico non indennizzabile. Con questo provvedimento fu anche prescritto che la determinazione dei boschi e dei territori montani da assoggettare a particolari restrizioni d'uso per ragioni d'interesse generale (vincolo idrogeologico) non fosse più affidata ad elenchi descrittivi, come prescriveva la legge n. 3917 del 1877, ma che si dovesse far uso di mappe catastali ridotte alla scala 1:10.000. Solo così sarebbe stato possibile determinare le aree da vincolare con la precisione necessaria ad evitare le contestazioni sorte in passato. Fu in quella circostanza che si pensò di conseguire con le medesime economie anche l'obiettivo di realizzare una base cartografica utile ad affrontare le problematiche di gestione delle foreste, oltre che di conservazione del suolo. Il lavoro di delimitazione delle aree sottoposte a regime vincolistico fu, pertanto, abbinato al rilevamento delle superfici boscate per la formazione della Carta forestale del Regno.

Inizialmente furono eseguiti i rilevamenti su lotti sperimentali che comprendevano le provincie di Gorizia, Imperia, Treviso e l'Ampezzano e restituiti alla scala 1.10:000. Le indicazioni di queste prime carte riguardavano, oltre ai terreni da sottoporre a vincolo idrogeologico, i boschi, i prati e pascoli arborati e cespugliati, gli incolti produttivi e, solo per le zone montane, i prati e pascoli nudi. Di fatto queste prime carte non riportavano solo la componente forestale, ma riproducevano la fisionomia del paesaggio silvo-pastorale. L'esperienza condotta nelle suddette regioni, tuttavia, dimostrò che un lavoro condotto con tale dettaglio per l'intero territorio del Regno avrebbe comportato tempi considerevoli e costi insostenibili.

Negli anni a venire il rilievo cartografico delle foreste italiane, ultimato nel 1936, fu affidato alla Milizia Forestale che operò attraverso rilevamenti di campagna condotti con metodi speditivi. Tutti gli elementi rilevati sul territorio, riportati, con metodologia piuttosto empirica, inizialmente su carta alla scala 1:25.000, furono successivamente restituiti e stampati su 274 fogli della base cartografica ufficiale dell'Istituto Geografico Militare alla scala 1:100.000. Furono anche predisposti quadri riassuntivi alla scala 1:1.000.000 che riportavano le superfici e le percentuali di territorio ricoperte da foreste. Tavole numeriche, inoltre, riportavano gli stessi dati per provincia e sempre su base provinciale la superficie forestale ripartita per forma di governo e tipo di popolamento.

Il metodo di rilevamento adottato nell'esecuzione dei lotti sperimentali fu quello esposto da Arrigo Serpieri nella pubblicazione: *Per un'organica illustrazione della montagna italiana*, Firenze, Vallecchi editore, 1921.

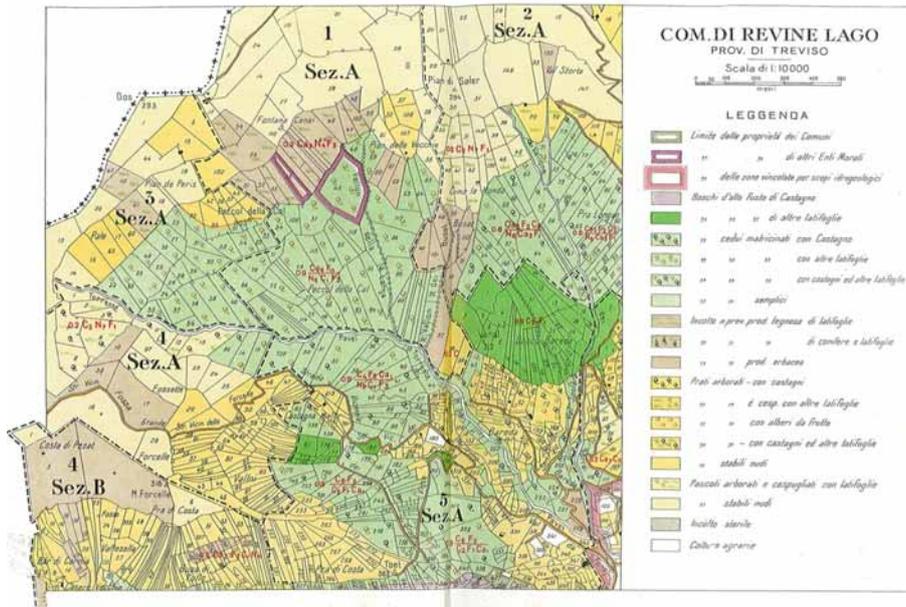


Figura 11. Un esempio della carta del vincolo idrogeologico e catasto forestale predisposta nei primi lotti sperimentali alla scala 1:10.000. La legenda, oltre ai boschi, comprendeva anche altre categorie di uso del suolo.

La legenda della carta riportava la distinzione tra i seguenti tipi di soprassuolo forestale (Morandini, 1976):

- resinose (colore viola) con segni particolari per *Picea excelsa*, *Abies alba*, *Larix decidua*, *Pinus pinea*, altri pini;
- formazioni di *Quercus petraea* e *Quercus robur* (colore marrone);
- formazioni di *Quercus cerris* (colore marrone con grafismi particolari);
- formazioni di *Quercus suber* (colore arancio);
- formazioni di *Castanea sativa* (colore verde);
- altre specie e formazioni miste (colore giallo);
- boschi degradati e da ricostituire (colore viola).

Inoltre, per ciascuna di queste formazioni, particolari retinature consentivano di distinguere le fustaie, i cedui semplici ed i cedui composti.

Il risultato di questo cospicuo lavoro, mai più replicato in modo omogeneo per l'intero territorio nazionale, rispose in modo soddisfacente alle esigenze del periodo prebellico, che erano soprattutto orientate ad individuare i boschi per la funzione loro attribuita di rifornimento di legna da ardere e di copertura per le truppe operanti. Fu altresì utile ai fini statistici e, quindi, di utile supporto alla politica forestale, ma non fu applicabile alla pianificazione forestale, in quanto,

come si poté rilevare in numerosi casi, non presentava sufficiente precisione di dettaglio. Il personale che delimitò i limiti delle diverse formazioni e delle differenti tipologie strutturali, infatti, operò senza una preparazione specifica ed alcun riferimento ad una superficie minima cartografabile.

La restituzione in formato vettoriale dei fogli relativi alla Regione Veneto è stata eseguita dal gruppo di lavoro dell'Università degli Studi del Molise coordinato dal Prof. Marco Marchetti.

Il dato cartografico è stato fornito nel sistema di riferimento WGS 84 (World Geodetic System 1984) e, pertanto, è stato necessario provvedere, prima dell'utilizzo, alla sua trasposizione nel sistema cartografico adottato dalla Regione del Veneto come standard per la rappresentazione delle proprie banche dati territoriali: proiezione di Gauss-Boaga, fuso Ovest, sul Datum Hayford 1924, orientata a Roma Montemario (Roma 40), comunemente indicata come *Gauss-Boaga 1*. Per questa operazione è stato utilizzato il software Global Mapper v.10.

Il dataset è stato strutturato in modo da consentire l'elaborazione di due tematismi:

- il tipo di popolamento
- la forma di governo o tipo vegetazionale-culturale.

Pur fornendo, a livello regionale e provinciale, un utilissimo quadro della situazione e degli aspetti più caratteristici delle foreste dell'epoca, la Carta forestale del Regno non costituisce un attendibile elemento di comparazione con le più recenti basi di dati del settore alle relative scale. L'impossibilità di valutarne l'accuratezza e la probabilità di incorrere in errori statisticamente non trascurabili in contesti locali e di dettaglio risulteranno necessariamente limitanti nel delineare gli ambiti applicativi di questa fonte cartografica nell'ambito di un'analisi diacronica.

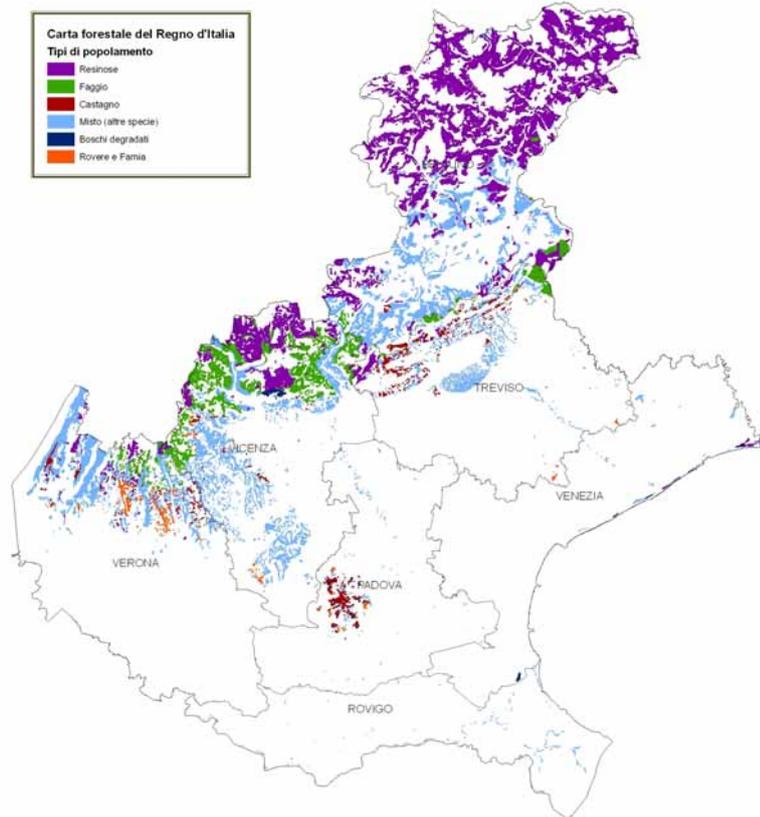


Figura 12. Carta dei tipi di popolamento forestale

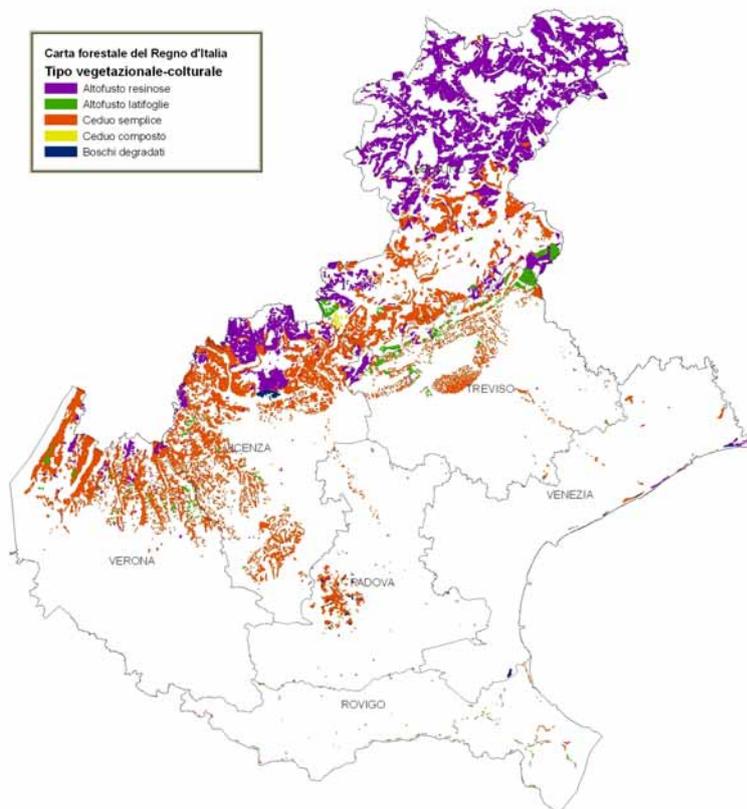


Figura 13. Carta dei tipi vegetazionali-culturali

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

6.1.2 *La prima Carta Forestale Regionale*

Con il trasferimento alle Regioni delle funzioni di cui al D.P.R. n.616 del 1977, con il quale si completa il decentramento delle funzioni amministrative relative alle materie indicate dall'art. 117 della Costituzione ancora esercitate da organi centrali e periferici dello Stato, di fatto si demandò alle Regioni anche l'esecuzione della carta forestale nazionale, in gestazione ormai da tempo, che avrebbe dovuto aggiornare e perfezionare quella risalente al 1936. La Regione del Veneto, con la Legge Forestale Regionale promulgata nel 1978 (L.R. 13 settembre 1978, n.52), che all'articolo 31 deliberava la predisposizione di un moderno documento descrittivo delle principali caratteristiche qualitative e quantitative e dello stato culturale del bosco, fu tra le prime ad impegnarsi ad approntare una propria Carta Forestale Regionale di supporto alla pianificazione degli interventi in ambito forestale e, più in generale, alle necessità di pianificazione territoriale ai diversi livelli.

Il Dipartimento Regionale delle Foreste dimostrò di voler dare rapida applicazione a quell'articolo e già dopo pochi mesi incaricò l'Istituto di Ecologia e Selvicoltura dell'Università di Padova di predisporre una metodologia di rilevamento che riassume le conoscenze fino ad allora accumulate nelle cartografie tematiche, analitiche e di sintesi e, relativamente alla scelta dei parametri da rilevare, studi e ricerche trentennali sulle foreste venete. Questa metodologia fu compendiata in un manuale tecnico-operativo per il rilevamento di campagna. Per l'applicazione delle norme e dei concetti in esso riassunti, furono addestrati e dotati delle strumentazioni necessarie dodici laureati in scienze forestali e trentacinque tra periti agrari e geometri, i quali, organizzati in dieci squadre ciascuna delle quali guidata da un laureato forestale, condussero le operazioni di rilevamento percorrendo tutto il territorio regionale tra giugno del 1979 ed ottobre del 1981.

Per il riporto dei rilevamenti di campagna si stabilì di avvalersi delle tavolette IGM alla scala 1:25.000, al fine di predisporre un documento cartografico ufficiale adottando la scala 1:50.000 convenuta a livello nazionale. I rilievi e le informazioni raccolte furono organizzate suddividendo il territorio in unità geografiche univoche, le Unità idrografiche, corrispondenti con quei settori del

Il testo storico dell'art. 31 della L.R. n.52/78 riporta quanto segue: "La Giunta regionale provvede alla elaborazione delle carte regionali forestali e dei dissesti in scala 1:100.000 e attiva e cura il servizio di statistica forestale. La stessa Giunta provvede alla formazione professionale dei lavoratori forestali". Recentemente, con la Legge regionale 25 luglio, n.9 - il testo della L.R. n.52/78 è stato riformato in più punti. Il testo vigente della Legge Forestale Regionale all'art. 35 comma 1 stabilisce: "Per conseguire gli obiettivi di cui all'articolo 1 la Giunta regionale promuove e attua le attività di indagine, studio e ricerca nel settore forestale nonché l'elaborazione delle statistiche e delle cartografie forestali."

territorio regionale che si configurano con i bacini di raccolta delle principali aste fluviali e che delimitano un territorio con caratteristiche dimensionali ed ecologiche ritenute idonee per un'organica pianificazione forestale.

I codici di riferimento che, nella stesura originaria, identificavano ciascuna particella cartografica e la scheda descrittiva ad essa associata sono tre:

- il sottobacino: codice di 4 cifre di cui le prime due indicano l'Unità idrografica e le seconde due il Sottobacino;
- l'unità amministrativa: 7 cifre di cui le prime due identificano la Provincia (codice ISTAT), le tre successive il Comune (codice ISTAT), le ultime due la Comunità Montana (codice regionale);
- la particella cartografica: 7 cifre di cui le prime tre riportano il codice della tavoletta IGM 1:25.000 e le successive quattro l'identificativo progressivo della particella cartografica insistente sulla tavoletta.

Con la successiva vettorializzazione della Carta forestale questa codifica è stata semplificata, assegnando ad ogni particella un unico codice identificativo di 8 cifre che indica con le prime due cifre l'Unità idrografica di riferimento, con le tre successive il codice della tavoletta IGM 1:25.000 e con le ultime tre il numero progressivo della particella.

Le particelle cartografiche operativamente furono delineate come quelle porzioni di territorio boscato relativamente omogenee nei confronti di cinque parametri descrittivi:

- **Composizione dendrologica:** sintesi dei rapporti quantitativi tra le diverse specie legnose attraverso l'indicazione della specie arborea dominante e delle varie specie consociate (tramite un codice-specie di tre lettere) e della relativa percentuale di presenza effettiva riferita all'area di insidenza delle chiome;
- **Tipo vegetazionale-culturale:** si distinguono fustaie ordinarie, fustaie infraperte di alta quota, cedui a regime, cedui invecchiati, cedui in conversione, formazioni particolari (arbusteti, rupi boscate, canali di valanga, fustaie estremamente rade, boschi ripari, castagneti da frutto, piantagioni a rapido accrescimento), formazioni promiscue;
- **Aliquota generale di copertura:** è un parametro calcolato che sintetizza i valori di copertura espressa in decili delle superfici improduttive, produttive scoperte e produttive boscate all'interno della particella cartografica;

Le 47 Unità idrografiche sono, a loro volta, suddivise in Sottobacini (in totale 363).

Per ciascuno dei 5 parametri descrittivi furono ricercate le uniformità di maggiore significatività forestale per la realizzazione di una cartografia di sintesi, evitando di perdersi in analisi troppo dettagliate che sarebbero risultate difficilmente traducibili alla definitiva scala 1:50.000 ed avrebbero reso meno percepibili le maggiori evidenze vegetazionali e selvicolturali.

- Regime colturale: si esprime lo stato colturale dei tipi vegetazionali-colturali distinguendo le formazioni a regime selvicolturale dalle formazioni a sviluppo naturale controllato, evidenziando l'eventuale esistenza di condizionamenti particolari (pascolo intensivo o recente incendio);
- Struttura generale: da rilevarsi per le sole fustaie, ne esprime la coetaneità, disetaneità o irregolarità sulla base delle dimensioni e della presenza relativa dei tipi strutturali della serie coetanea.

Fatto salvo per i limiti obbligati rappresentati dai confini amministrativi e del sottobacino, la chiusura di una particella cartografica e l'apertura di una contigua è determinata dalla variazione di uno solo dei suddetti parametri, con la condizione di non superare il limite dimensionale di 5 ha di superficie, assunto per postulato come unità minima cartografabile.

Per le superfici non soggette a pianificazione forestale e, pertanto, prive di conoscenze preacquisite, si procedeva ad un rilevamento estimativo attraverso circoscrizioni sequenziali. Operativamente si iniziava all'individuazione da un opportuno punto di osservazione di una macroarea visibile ed interpretabile, quindi si procedeva, per successivi avvicinamenti, a differenziarla in particelle cartografiche omogenee considerando, inizialmente, uno solo dei parametri fondamentali, per poi procedere ad un'ulteriore frammentazione man mano che venivano presi in esame gli altri quattro parametri sopra descritti.

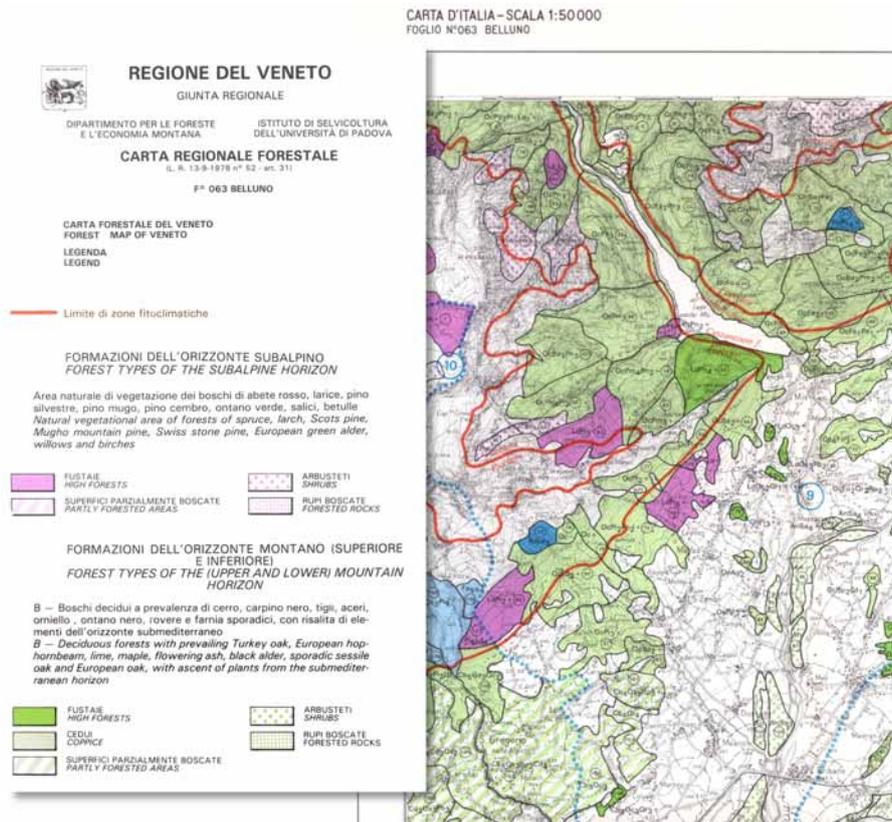
I limiti delle particelle, pertanto, non devono essere fatti corrispondere, come di norma avviene nella pratica dell'assestamento forestale, a limiti fisiografici, ad eccezione dei casi in cui tali limiti non siano determinanti di una variazione rimarchevole dei parametri dianzi elencati.

Al termine di queste operazioni di campagna, la parcellizzazione definitiva veniva accuratamente riportata sulle tavolette IGM al 25.000 e per ogni particella si provvedeva a compilare una scheda cartografica trascrivendo le informazioni raccolte sul brogliaccio di campagna.

La scheda cartografica riportava una descrizione standard, rappresentata da tutte le informazioni cartografiche fondamentali dianzi descritte (i tre codici di riferimento e i cinque parametri fondamentali) ed eventuali osservazioni particolari annotate sul brogliaccio di campagna all'atto del rilievo.

Eseguito il quadro d'unione, il particellare fu ridelimitato sul supporto cartografico al 50.000 (sempre su base IGM), procedendo all'attribuzione

dell'orizzonte vegetazionale (secondo la legenda predisposta dall'Istituto di Ecologia e Selvicoltura dell'Università di Padova), della zona fitoclimatica secondo Pavari e del cingolo vegetazionale secondo Schmid. Il materiale definitivo così allestito, costituito da 31 fogli, fu avviato per la stampa, eseguita presso lo Stabilimento Poligrafico di Firenze.



La prima carta forestale regionale offre riferimenti utili ad indirizzare l'azione selvicolturale differenziando con tinte conformi agli standards internazionali gli orizzonti vegetazionali, delimitando le **zone fitoclimatiche** secondo Pavari e, parallelamente, inscrivendo le cenosi forestali originarie rappresentate attraverso i **cingoli vegetazionali** secondo E. Schmid.

Figura 14. Rappresentazione alla scala 1:50.000 della Carta Forestale Regionale

Il contenuto informativo delle schede cartografiche è stato, invece, strutturato su un apposito database gestito dal Centro Elaborazione Dati del Dipartimento Regionale per le Foreste, che, tuttavia, inizialmente, in ragione delle tecnologie di programmazione disponibili e della limitatezza dei supporti di memorizzazione, consentiva elaborazioni su superfici territoriali non più ampie delle singole unità idrografiche. Solo con l'avvento di personal computer con capacità di calcolo adeguate ad elaborazioni unitarie dei dati è stato possibile condividere con l'utenza il database della carta forestale attraverso la predisposizione di un pacchetto software per MS DOS che consentiva elaborazioni a livello particellare e su differenti livelli di aggregazione di unità territoriali (Unità idrografiche, Sottobacini, Comunità Montane, Comuni, Provincie o l'intera Regione).

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali - Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

GESTIONE CARTA FORESTALE REGIONALE - ELABORAZIONI: Dati riassuntivi					
AMBITO TERRITORIALE: TOTALE REGIONE					
Numero Particelle	1088	-	Sup. Totale	58.499.31	-
Sup. non Boscata	8.393.19	-	Massa Totale	7.550.626	-
Incr. Corr. Tot.	261.324	-	Incr. Percent.	3.5 %	-
			Incr. Corr. Unit.	5.22	mc
Composizione dendrologica e percentuali di presenza: Specie dominante FAS 66%					
1ª Consoc.	PCA 12%	-	2ª OSC	7%	-
			3ª LRD	5%	-
			4ª LDD	2%	-
			5ª SDD	2%	-
PROPRIETA' PRIVATA: Percentuale in superficie 61%					
Numero Particelle	765	-	Sup. Totale	35.648.95	-
			Sup. Boscata	30.086.78	-
PROPRIETA' PUBBLICA: Percentuale in superficie 39%					
Numero Particelle	517	-	Sup. Totale	22.850.36	-
			Sup. Boscata	20.019.35	-
Tipologia PSTA 0% - PREG 0% - PCON 0% - PCOL 0% - PECC 0%					
GOVERNO A FUSTAIA: Num. Part. 179 - Sup. Tot. 9.371.82 - Sup. Bos. 8.452.12					
Tip. ORDINARIE	83%	-	ALTA QUOIA	17%	-
			Percentuale in superficie 16%		
GOVERNO A CEDUO: Num. Part. 783 - Sup. Tot. 41.876.96 - Sup. Bos. 37.304.38					
Tip. A REGIME	62%	-	IN CONU.	29%	-
			INUECCH.	9%	-
			Perc. in superficie 72%		
ALTRE FORMAZ.: Num. Part. 76 - Sup. Tot. 4.141.51 - Sup. Bos. 2.647.51 7%					
FORMAZ. PROM.: Num. Part. 42 - Sup. Tot. 3.109.03 - Sup. Bos. 1.702.11 5%					
Quota media: 1056m.s.m. Pend. media: 59% Esp. media: 176° TMA: 6.8 TMG: -1.0					

Figura 15. Esempio di elaborazione con il pacchetto software GCF (Gestione dei dati della Carta Forestale)

Gli archivi alfa-numeric, perfezionati ed arricchiti con ulteriori informazioni (le provvigioni unitarie, gli incrementi, le forme di proprietà, ecc), parte desunte per sovrapposizione con le particelle assesta mentali, parte calcolate a partire dal DTM regionale, sono stati correlati agli archivi grafici ottenuti dalla digitalizzazione delle tavolette al 25.000, anch'essi sottoposti ad una parziale revisione. In particolare, per ovviare alle inevitabili imprecisioni risultanti dalle tecniche speditive adottate nei rilievi di campagna, è stato attuato un controllo ed una rettifica dei limiti particellari sulla base dei fotogrammi dei voli effettuati per la redazione della Carta Tecnica Regionale. Questo miglioramento dell'accuratezza geometrica, tuttavia, non è stato messo in atto in modo sistematico e non è stato ultimato, pertanto il livello di precisione dell'elaborato di cui oggi disponiamo non presenta caratteri di omogeneità sull'intero territorio regionale. Questo è un evidente elemento di criticità che porrà inevitabili limiti di valutazione nel contesto di una comparazione con altre basi di dati caratterizzate da una demarcazione cartografica più accurata.

Alla fine degli anni '90 i dati cartografici ed alfanumerici della carta forestale furono convertiti nel formato *shape* di ESRI, che è divenuto da ormai un decennio lo standard del Sistema Informativo Forestale della Direzione Foreste ed Economia Montana, e furono per la prima volta resi di pubblico dominio con la pubblicazione del volume "Biodiversità e indicatori nei tipi forestali del Veneto" (Del Favero et al., 2000), che portava in allegato un CD Rom, "Sintesi del Sistema Informativo Forestale del Veneto" (Del Favero et al., 2001), il quale, oltre alla carta forestale, raccoglieva tutta una serie di informazioni.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali - Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

Rispetto al contenuto informativo delle schede particellari originarie e ai dati successivamente implementati nel software GCF, il *dataset* collegato allo *shape* presenta una struttura semplificata, omettendo tutte quelle informazioni facilmente ottenibili attraverso semplici operazioni di *overlay* con altri strati informativi.

Nome campo	Tipo dati	Descrizione
A_PARTIC	Testo	Codice identificativo della particella
B_SUPHA	Numerico	Superficie in ettari
C_SP1	Testo	Codice identificativo della specie dominante
D_SP1PER	Numerico	Composizione percentuale della specie dominante
E_SP2	Testo	Codice identificativo della prima specie consociata
F_SP2PER	Numerico	Composizione percentuale della prima specie consociata
G_SP3	Testo	Codice identificativo della seconda specie consociata
H_SP3PER	Numerico	Composizione percentuale della seconda specie consociata
I_SP4	Testo	Codice identificativo della terza specie consociata
L_SP4PER	Numerico	Composizione percentuale della terza specie consociata
M_SP5	Testo	Codice identificativo della quarta specie consociata
N_SP5PER	Numerico	Composizione percentuale della quarta specie consociata
O_SP6	Testo	Codice identificativo della quinta specie consociata
P_SP6PER	Numerico	Composizione percentuale della quinta specie consociata
Q_QUOTA	Numerico	Quota media
R_PEND	Numerico	Pendenza media
S_ESPOS	Numerico	Esposizione media
T_ASSOL	Numerico	Assolazione media
U_FITACL	Numerico	Zona fitoclimatica (secondo Pavari)
V_TIPVE1	Testo	Tipo vegetazionale primario
W_INDP1R1	Numerico	Indice pirologico
X_CING	Testo	Cingolo vegetazionale (secondo Schmid)
Z_TIPFOR	Testo	Tipologia forestale prevalente

Figura 16. Struttura del dataset della carta forestale

Oltre alla caratterizzazione della composizione dendrologica espressa in termini di percentuale di copertura della specie legnosa dominante e delle cinque specie consociate, viene riportata nel campo "Z_TIPFOR" l'attribuzione della tipologia forestale a livello gerarchico di *categoria* tipologica.

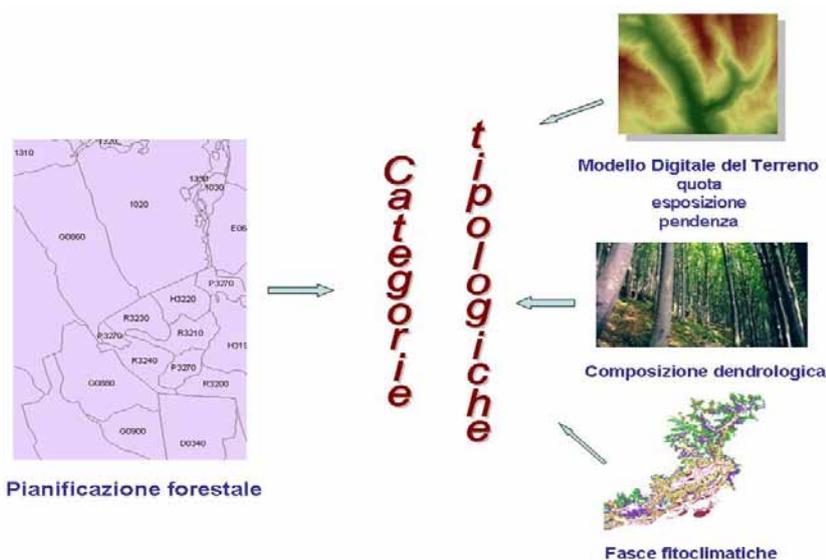


Figura 17. Procedura di individuazione delle categorie tipologiche

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali - Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

L'individuazione della categoria forestale è avvenuta per attribuzione diretta qualora questa informazione fosse presente nelle banche dati cartografiche dei piani di riassetto forestale; negli altri casi si è proceduto per via sintetica con elaborazioni automatiche, modellate a partire dalle indicazioni tratte da fonti bibliografiche specifiche, a partire dalla composizione dendrologica del soprassuolo arboreo e da altre informazioni interagenti quali la quota media, l'esposizione prevalente, la fascia fitoclimatica.

Mancano, invece, notizie dei due parametri cartografici originari, il tipo vegetazionale-culturale e l'aliquota di copertura, che, peraltro, rivestono una rilevanza non trascurabile per una valutazione analitica, attuata dal confronto con altre basi di dati, delle dinamiche evolutive dei soprassuoli forestali. Non si possono, pertanto, omettere alcune informazioni di maggior dettaglio, riferite a questi due parametri, con particolare riferimento ai criteri qualitativi e quantitativi secondo i quali sono stati eseguiti i rilievi.

In particolare, nel "Manuale per il rilevamento di campagna per la compilazione della carta forestale", redatto dal Prof. Bernardo Hellrigl, si richiama esplicitamente alla definizione di bosco di cui all'art.14 della Legge Regionale 13 settembre 1978, n.52, sulla quale si tornerà anche in seguito. Ai fini della definizione di bosco il grado di copertura definisce quell'aliquota minima di copertura arborea (rapporto tra l'area d'insidenza delle chiome e la superficie complessiva del terreno) superata la quale, in condizioni di uniformità nella distribuzione degli alberi, la vegetazione arborea o arbustiva costituisce "bosco". Questo limite è fissato dalla legge regionale in un minimo di copertura del 30% (salvo i casi in cui vi sia in atto rinnovazione forestale).

All'atto del rilevamento cartografico, tale minimo di copertura, inteso come "aliquota generale di copertura", è stato, invece, prefissato secondo differenti soglie in relazione al tipo vegetazionale-culturale:

→ del 10%:

- per tutte le fustaie ordinarie con altezza minima a maturità superiore a 5 m nelle quali non viene esercitata una prevalente attività pascoliva;
- per le fustaie infraperte di alta quota con altezza minima a maturità superiore a 5 m indipendentemente dall'intensità dell'esercizio del pascolo;

Art. 14 della L.R. 52/1978 (testo storico): "Agli effetti della presente legge si considerano a bosco tutti quei terreni che sono coperti da vegetazione forestale arborea o arbustiva, di origine naturale o artificiale, in qualsiasi stadio di sviluppo.

Sono parimenti da considerarsi boschi i castagneti da frutto.

I terreni, privi temporaneamente della vegetazione forestale, per cause naturali o per intervento dell'uomo, conservano la classificazione a bosco.

Non sono da considerarsi bosco le colture legnose specializzate, purché su terreno escluso dal vincolo idrogeologico, con turno inferiore ai venti anni.

Sono parimenti esclusi i parchi cittadini ed i filari di piante.

I prati arborati, non si considerano bosco, se il grado di copertura arborea non supera il 30 per cento e se non vi è in atto rinnovazione forestale."

- per i castagneti da frutto nei quali non viene esercitata una prevalente attività pascoliva;
- del 10% previsionale:
- per tutte le fustaie giovani delle categorie con altezza minore a 5 m nelle quali non viene esercitata una prevalente attività pascoliva;
 - per le giovani fustaie infraperte di alta quota con altezza minore a 5 m indipendentemente dall'intensità dell'esercizio del pascolo;
 - per i boschi di qualsiasi categoria danneggiati da incendio;
- del 20%
- per tutti i cedui nei quali non viene esercitata una prevalente attività pascoliva;
 - per gli arbusteti e cespuglieti nei quali viene esercitata una prevalente attività pascoliva;
 - per le rupi boscate;
 - per i boschi ripari;
- del 30%
- per le praterie arborate, arbustate, cespugliate o con ceduo a prevalente utilizzazione alpicolturale che non rientrano nelle categorie delle fustaie infraperte di alta quota.

Aliquota di copertura alla quale darà luogo l'attuale rinnovazione affermata quando avrà raggiunto una altezza media di 5 m.

Nel tipo vegetazionale-culturale delle "fustaie estremamente rade", caratterizzato da formazioni di prevalente interesse naturalistico-ambientale, inoltre, sono state rilevate:

- "formazioni legnose a soggetti isolati" quando in condizioni di una certa uniformità di distribuzione degli alberi (e/o degli arbusti e/o dei cespugli) sussistano condizioni di copertura compresi tra i minimi indicati per le fustaie ordinarie e la metà degli stessi ("aliquota generale di copertura" compresa tra il 5% ed il 10%);
- "formazioni legnose a soggetti raggruppati in gruppi isolati", quando in condizioni di copertura compresi tra quelli minimi indicati per le fustaie ordinarie e metà di essi ("aliquota generale di copertura" compresa tra il 5% ed il 10%) gli alberi, e/o gli arbusti, e/o i cespugli

sono rinserrati in piccolissimi gruppi di discreta densità notevolmente distanziati tra di loro.

Da questo articolato quadro che illustra anche casistiche particolari, ma non infrequenti, si evince che la prima Carta forestale regionale è stata concepita come un quadro conoscitivo che va a rappresentare e a descrivere con buon dettaglio analitico anche formazioni che non rientrano nella definizione giuridica di bosco (ad esempio quelle pioniere ed ecotonali) e, sia in questa accezione, sia per la scala di rappresentazione adottata, pur con i limiti di precisione geometrica evidenziati, ha rappresentato per oltre un ventennio un insostituibile complemento informativo con i dati provenienti dalla pianificazione forestale, tant'è che è stata anche implementata nel modello di integrazione di dati adottato per la predisposizione della Carta Regionale dei Tipi forestali.

6.1.3 La Carta Regionale dei Tipi forestali

La selvicoltura italiana ed, in un'accezione più ampia, le modalità stesse di gestione dei soprassuoli forestali nel ventennio successivo alla redazione della prima Carta forestale regionale sono andate incontro a profonde trasformazioni, da imputarsi, in primo luogo, al forte ridimensionamento della produzione interna di materiale legnoso, per la globalizzazione dei mercati e la delocalizzazione delle aziende della filiera, parallelamente all'accresciuta attenzione rivolta alle problematiche conservazionistiche ed alle nuove esigenze di sostenibilità gestionale, contestuali all'avvio delle già citate iniziative a livello internazionale che hanno portato in primo piano le tematiche della conservazione della biodiversità e dell'utilizzo delle biomasse legnose quale fonte energetica alternativa al carbonio di origine fossile.

Nel contempo anche le conoscenze sul bosco mutarono, sviluppandosi in una direzione che pose maggior attenzione alle relazioni ed ai dinamismi interspecifici, in una concezione ecologica del bosco che sta alla base degli studi condotti a scala regionale sulle tipologie forestali con l'intento di formulare un sistema di classificazione delle formazioni forestali, sufficientemente articolato da consentire il superamento di un'eccessiva semplificazione della realtà forestale, cui affiancare specifici modelli culturali.

La necessità di scomporre il sistema foresta in un mosaico di unità sufficientemente ridotte da risultare omogenee e, quindi, di consentire l'applicazione in ciascuna unità di linee gestionali standardizzate, ma nel contempo non tanto piccole da rendere difficoltosa una visione d'insieme del sistema stesso, di fatto, condizionò anche la scelta della scala di rappresentazione cartografica dei tipi forestali. L'esigenza di spazializzare con un livello adeguato di precisione la distribuzione dei tipi forestali fece emergere la volontà di procedere all'aggiornamento della Carta forestale regionale, che nella nuova versione è stata denominata *Carta regionale dei tipi forestali*.

Il nuovo elaborato cartografico, predisposto tra il 2000 ed il 2005, si presentò con un output finale alla scala 1:10.000, ottenuta grazie al raggiungimento di una maggiore accuratezza geometrica risultato dell'adozione di standard metodologici che in tutte le fasi del lavoro si basarono sull'interpretazione di immagini telerilevate. Le differenze con la prima Carta forestale regionale sono, pertanto, sostanziali e riguardano sia la metodologia di redazione, sia il contenuto informativo.

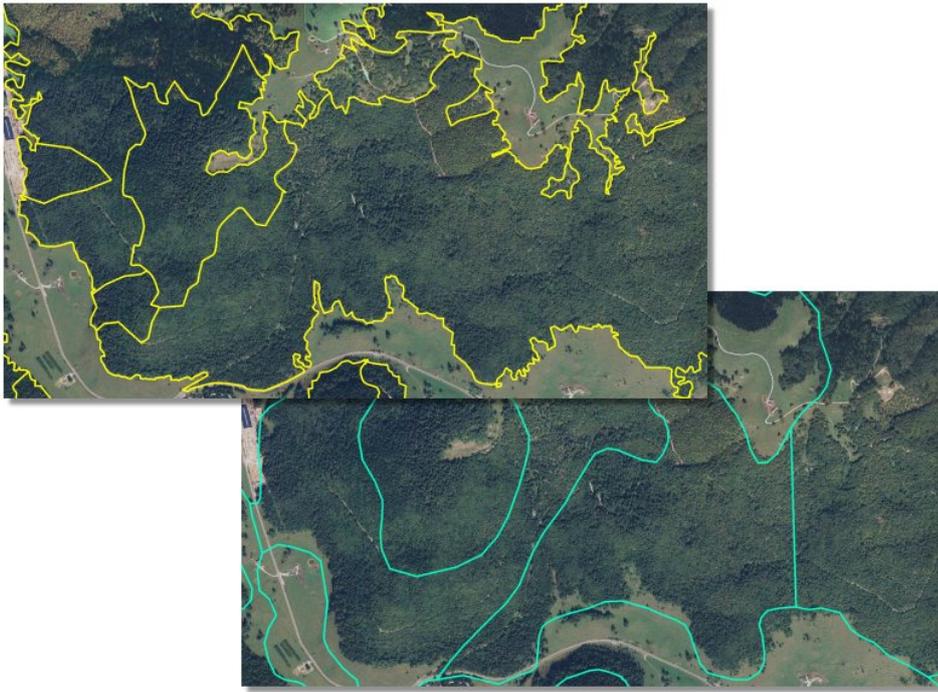


Figura 18. La differente precisione geometrica tra la Carta regionale dei tipi forestali (in giallo) e la prima Carta forestale regionale (in azzurro)

Per quanto concerne gli aspetti metodologici, operativamente si procedette attraverso due livelli successivi di approfondimento che corrispondono ai due principali livelli gerarchici secondo i quali si articola il sistema di classificazione adottato.

In una prima fase, preliminare alla classificazione tematica a livello di categoria tipologica, la perimetrazione delle aree boscate è avvenuta principalmente tramite interpretazione a video e digitalizzazione manuale delle ortofoto digitali del volo "ITALIA 2000". Sono anche state sperimentate su alcune aree del territorio regionale tecniche di classificazione *object-oriented*, basate sulla generazione di poligoni tramite la segmentazione semi-automatica dell'immagine grezza e successiva classificazione supervisionata, implementate nel software *e-Cognition*. In queste prime applicazioni l'utilizzo di questo software aveva prodotto risultati di apprezzabile precisione geometrica, ma di insufficiente precisione tematica, essendo l'informazione spettrale limitata alle sole tre bande nel campo del visibile.

La definizione delle aree boscate si basò su criteri di tipo quantitativo, facendo riferimento sia alla definizione di bosco adottata dalla Regione del Veneto all'art. 14 della Legge Regionale n.52 del 1978, come modificata dalla Legge Regionale n. 5 del 2005, sia a quella adottata nel processo *Global Forest*

Per la predisposizione dei primi lotti sperimentali in provincia di Treviso si impiegarono le ortofoto digitali del volo "AIMA 1996". Successivamente le perimetrazioni di queste superfici sono state aggiornate utilizzando le ortofoto del volo "ITALIA 2000".

Resource Assessment dell'anno 2000 (FRA2000), guidato dalla FAO a livello mondiale ed adottato anche dalla Commissione Europea.

Secondo la definizione FRA2000 si considera bosco un territorio con copertura arborea superiore al 10 per cento, su un'estensione maggiore di 0,5 ha e con alberi alti, a maturità, almeno 5 metri. Può trattarsi di formazioni arboree chiuse o aperte, di soprassuoli forestali giovani o di aree temporaneamente scoperte di alberi per cause naturali o per l'intervento dell'uomo, ma suscettibile di ricopertura a breve termine. Sono, inoltre, inclusi nelle aree boscate i vivai forestali, le strade forestali, le fasce tagliafuoco, le piccole radure, le barriere frangivento e le fasce boscate, purché maggiori di 0,5 ha e larghe più di 20 metri e le piantagioni di alberi per la produzione di legno. Sono esclusi dalla definizione di bosco i territori usati prevalentemente per le pratiche agricole.

La Regione del Veneto prevede, invece, una superficie ed una copertura minime rispettivamente del 30% e di 2000 m² (le modalità di determinazione della superficie e della copertura sono stabilite nel dettaglio nella DGR n.4808 del 1997 allegato B1, "Norme tecniche per la redazione dei Piani di Riordino Forestale, dei Progetti di taglio e delle Dichiarazioni di taglio") ed assimila alla vegetazione forestale arborea, anche se non esplicitamente dichiarato nel testo di legge, formazioni con portamento arbustivo quali le mughete, le alnete di ontano verde, i corileti, gli arbusteti costieri, la pseudomacchia.

Di conseguenza le aree classificabili "bosco" secondo entrambe le definizioni dovettero rispettare le seguenti specifiche:

- unità minima cartografata è di 0,2 ha e deve avere copertura arborea non inferiore al 10%;
- sono inclusi i soprassuoli giovani e le aree temporaneamente scoperte per cause naturali o per intervento umano, ma suscettibili di ricopertura a breve termine secondo i requisiti indicati nel punto precedente;
- sono inclusi i vivai forestali, gli arboreti da seme, i castagneti da frutto, le strade forestali, le fratte tagliate, le fasce tagliafuoco e altre aperture nel bosco, comunque non superiori a 0,2 ha, nonché le barriere frangivento e le fasce boscate di larghezza maggiore di 20 m.

Adottando l'una o l'altra definizione di bosco, restavano comunque esclusi consorzi di un certo interesse e di rilevanza territoriale, quali gli impianti di arboricoltura da legno e le formazioni arbustive che esprimono la prima fase di

Definizione di bosco adottata dalla Regione del Veneto (art.14 della L.R. n.52/18 novellata dalla L.R. n.5/05):

1. Agli effetti della presente legge si considerano a bosco tutti quei terreni che sono coperti da vegetazione forestale arborea associata o meno a quella arbustiva, di origine naturale o artificiale, in qualsiasi stadio di sviluppo.

2. Sono parimenti da considerarsi bosco i castagneti da frutto.

3. I terreni, privi temporaneamente della vegetazione forestale, per cause naturali o per intervento dell'uomo, conservano la classificazione a bosco.

4. Non sono considerate bosco le colture legnose specializzate.

5. Per coltura legnosa specializzata si intende l'impianto di origine artificiale, effettuato anche ai sensi della regolamentazione comunitaria, reversibile a fine ciclo culturale ed eseguito su terreni precedentemente non boscati.

6. Le colture legnose specializzate devono essere gestite secondo le indicazioni fornite dal servizio forestale regionale competente per territorio, fatta eccezione per quelle esistenti su terreno escluso da vincolo idrogeologico.

7. Sono parimenti esclusi i parchi cittadini ed i filari di piante.

8. Non si considerano a bosco i terreni in cui il grado di copertura arborea non supera il trenta per cento della relativa superficie e in cui non vi è in atto rinnovazione forestale e le macchie boscate, realizzate in base al Reg. CE 1257/1999 del Consiglio del 17 maggio 1999 sul sostegno allo sviluppo rurale da parte del Fondo europeo agricolo di orientamento e di garanzia (FEAOG) e che modifica ed abroga taluni regolamenti ed in base ai relativi regolamenti precedenti.

8 bis. I boschi, come definiti al presente articolo, devono avere estensione non inferiore a 2.000 metri quadrati e larghezza media non inferiore a 20 metri.

8 ter. Sono assimilate a bosco le radure e tutte le altre superfici d'estensione inferiore a 2.000 metri quadrati che interrompono la continuità del bosco.

8 quater. Le disposizioni di cui ai commi 8 bis e 8 ter non si applicano nelle aree naturali protette e nei siti della rete Natura 2000 di cui alla Direttiva 92/43/CEE del Consiglio del 21 maggio 1992, relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche, qualora i rispettivi piani di gestione o gli strumenti di pianificazione forestale di cui all'articolo 23, individuino valori parametrici di maggiore tutela.

8 quinquies. La definizione di bosco di cui al presente articolo si applica anche ai fini dell'applicazione dell'articolo 142, comma 1, lettera g), del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 "Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137".

ricolonizzazione forestale di colture o pascoli abbandonati. Queste formazioni sono state ugualmente censite riportando in un apposito campo la notazione "non bosco".

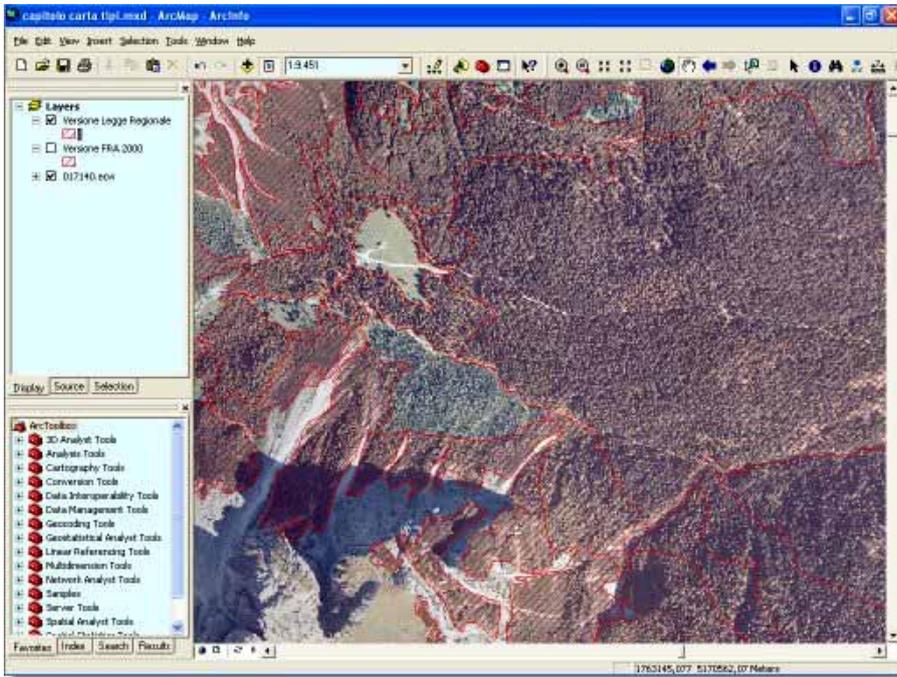


Figura 19. Copertura forestale secondo la definizione di bosco di cui all'art. 14 della L.R. n.52/78

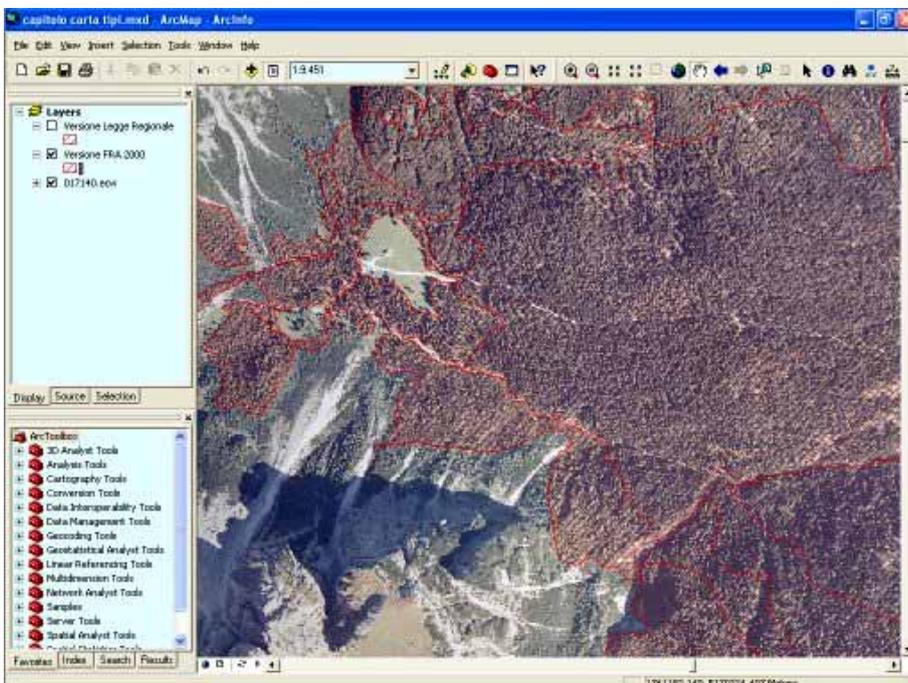


Figura 20. Copertura forestale secondo la definizione di bosco FRA2000

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

Ai poligoni così rilevati venne attribuito il grado di copertura arborea, applicando quattro soglie dimensionali e assegnando tre classi di copertura, che consentono di identificare il bosco secondo le due definizioni di riferimento:

- 10-30%
- 31-70%
- 71-100%.

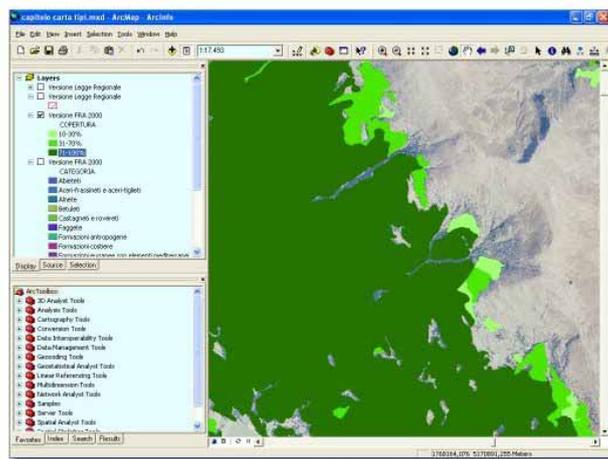
Da un punto di vista operativo il limite di densità arborea del 10% fu determinabile con relativa facilità dai fotointerpreti su ortofoto con risoluzione geometrica di 1 m e su superfici di estensione limitata. Risultarono meno facilmente differenziabili le classi di copertura comprese tra il 31-70% ed il 71-100%, in quanto lo stacco visivo può essere limitato, tale da non consentire una sicura distinzione tra le due classi di copertura, soprattutto su terreni con morfologia variabile per effetto delle ombre al suolo che tendono a dare l'impressione di una copertura arborea superiore a quella effettivamente presente.

Le aree censite furono, successivamente, distinte in unità ecologiche omogenee afferenti alle categorie forestali o a raggruppamenti di tipi. In questo primo livello di approfondimento tematico si utilizzarono, con un approccio multitemporale, anche immagini multispettrali Landsat 5 TM e Landsat 7 ETM, ma parvero subito evidenti i limiti posti dalla risoluzione geometrica del sensore, inadeguata ad una definizione tematica alla scala richiesta. Nella maggior parte dei casi l'interpretazione delle ortofoto digitali è stata affinata attraverso la lettura stereoscopica di foto aeree e l'integrazione di altre informazioni georiferite, limitando ai soli residui casi dubbi le verifiche in campo.

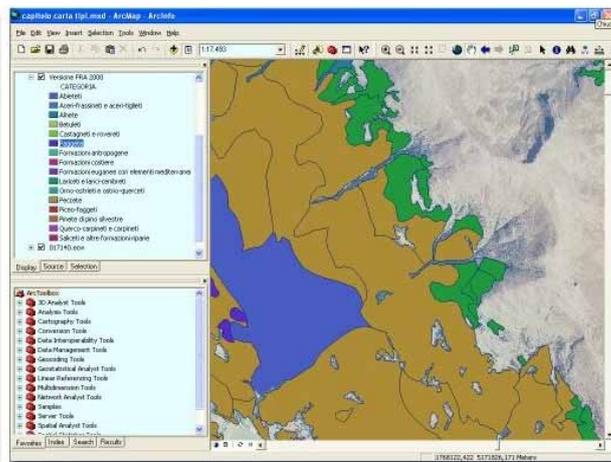
La procedura ora descritta consentì di determinare i poligoni di base di un *output* cartografico intermedio attraverso l'attribuzione dei due parametri fondamentali che ne determinano le dimensioni e l'allocazione spaziale: il grado di copertura arborea e la classificazione tipologica a livello di categoria (Figura 21).

In una fase successiva, ciascun poligono fu oggetto di ulteriori verifiche e, attraverso un approccio di analisi interattiva di dati provenienti da diverse fonti messo a punto dal gruppo di lavoro coordinato dall'Accademia Italiana di Scienze Forestali, fu possibile assegnare l'attribuzione tipologica alla scala gerarchica di *tipo* secondo il sistema di classificazione definito nel testo *Biodiversità e indicatori nei tipi forestali del Veneto* (Del Favero et al., 2000).

In realtà non sempre sussiste corrispondenza tra la legenda della Carta regionale dei tipi forestali e la classificazione riportata in questa pubblicazione, in quanto, da un lato sono state introdotte nuove unità di classificazione non ancora analizzate negli studi sulle tipologie forestali (es.: i saliceti, le formazioni riparie) o non afferenti ai consorzi forestali (es.: arboricoltura da legno), dall'altro alcune unità tipologiche sono state accorpate con altre



Classi di copertura



Categorie tipologiche

Figura 21. Rappresentazione secondo i due parametri fondamentali

La prima Carta Forestale Regionale fu la principale tra le fonti di informazione di supporto alla fotointerpretazione impiegate nell'attribuzione delle unità tipologiche, benché nell'utilizzo di questo dato si frapponesse il problema della mancanza di corrispondenza e il diverso grado di dettaglio tra i poligoni dei due prodotti cartografici, oltre alla difficoltà di tradurre in chiave tipologica l'informazione relativa alla composizione dendrologica in essa riportata. Ancor più problematico è stato l'impiego delle informazioni contenute nei piani di riassetto forestale per il limite che, nella maggior parte dei casi, i confini delle unità tipologiche riportati nelle cartografie allegate ai piani di riassetto forestale sono stati fatti coincidere con quelli delle particelle assestamentali.

Per migliorare ulteriormente l'accuratezza tematica, a questi elementi informativi fu affiancato un modello probabilistico della distribuzione dei tipi forestali ecologicamente coerenti con le variabili ambientali locali. Questo approccio interrelava i dati ambientali disponibili per un certo territorio con le

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

conoscenze acquisite sulle relazioni ecologiche esistenti tra unità tipologiche e le stesse variabili ambientali, consentendo la generazione automatica di un insieme di carte, una per ciascuna categoria, che evidenziava la probabilità in quel territorio della presenza di ogni tipo afferente a quella categoria. Queste carte probabilistiche furono essenzialmente utilizzate per un controllo dell'attribuzione delle unità tipologiche effettuata con il procedimento precedentemente descritto, consentendo di evidenziare le situazioni anomale da sottoporre ad ulteriori verifiche.

Il lavoro si concluse dopo una serie di controlli condotti considerando la possibilità di utilizzare tutte le risorse conoscitive disponibili per evitare l'impiego di ulteriori risorse finanziarie. I rilievi diretti di campagna furono, pertanto, concentrati nelle aree meno note e si procedette alla consultazione di esperti conoscitori delle singole aree.

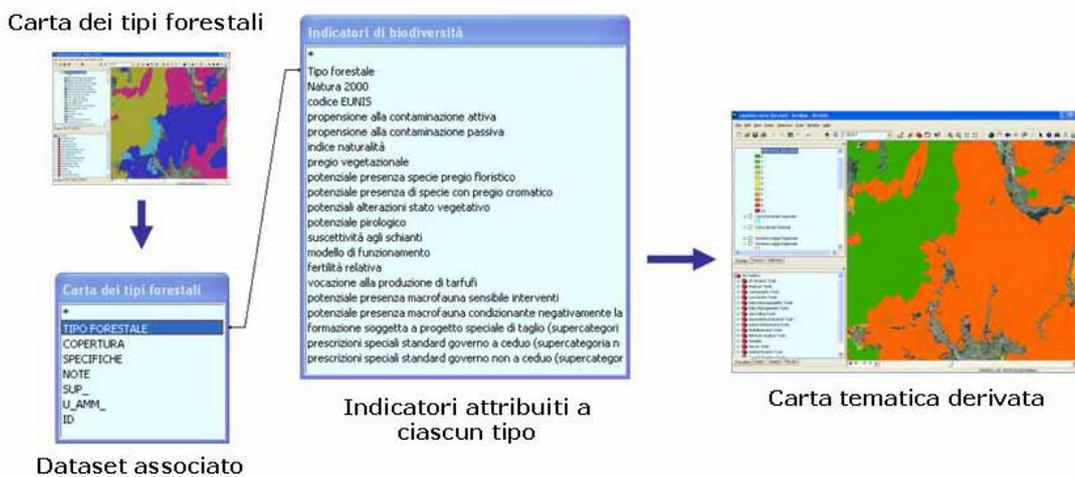


Figura 22. Processo di derivazione di ulteriori tematismi

Le potenzialità applicative di questo prodotto cartografico furono ampliate dalla possibilità di associare a ciascun poligono le informazioni contenute nel testo *Biodiversità e indicatori nei tipi forestali del Veneto*, consentendo la generazione di una serie di cartografie derivate che, opportunamente interpretate, possono trovare impiego in vari processi pianificatori. Nei possibili impieghi di queste ulteriori elaborazioni tematiche è essenziale averne chiari i limiti. Le informazioni desumibili da queste rappresentazioni tematiche fanno, difatti, riferimento a situazioni potenziali, non ad informazioni rilevate.

La Carta regionale dei tipi forestali costituisce ad oggi il documento informativo tematicamente più aggiornato sulla realtà forestale del Veneto. Con i suoi

44.406 poligoni censisce circa 440.000 ha di territorio, di cui 414.893 ha boscati secondo la L.R. n.52/78 e 394.909 ha secondo FRA2000. E', tuttavia, opportuno ricordare che, anche se ultimata nel 2005 e pubblicata l'anno successivo, la Carta regionale dei tipi forestali è rappresentativa della consistenza delle foreste venete nel 1998-1999, anni in cui è stato eseguito dalla Compagnia Generale Riprese Aeree di Parma il volo ITALIA 2000.

6.1.4 La Carta della Copertura del suolo

Nel corso del convegno che si è svolto a Venezia presso la Scuola Grande di San Giovanni Evangelista il 30 settembre 2009 è stata ufficialmente presentata la Carta della Copertura del Suolo del Veneto, una banca dati di elevata accuratezza geometrica e di grande dettaglio tematico che intende costituire una base conoscitiva di riferimento per le scelte di programmazione territoriale ed ambientale, oltre a rappresentare una base informativa di cui è previsto un periodico aggiornamento, che, in tale prospettiva, potrà consentire di comprendere le dinamiche di trasformazione del territorio regionale (AA.VV., 2009). La costituzione di questo *database* geografico ha avuto avvio nel marzo del 2005, con l'adesione della Regione del Veneto ad una prima applicazione sperimentale del progetto europeo GSE Land, finanziato e coordinato dall'ESA (*European Space Agency*), che, nell'ambito del più ampio spettro delle iniziative GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), prevede la fornitura di servizi dedicati al monitoraggio del territorio con l'ausilio di dati satellitari ad alta risoluzione. A questa fase sperimentale, che ha interessato alcune aree campione selezionate dalla stessa ESA, è seguita, a partire dal dicembre del 2006, quella attuativa dell'intero progetto a copertura di tutto il territorio regionale (De Gennaro M. et al., 2007). La realizzazione complessiva della banca dati della Copertura del Suolo è avvenuta inizialmente attraverso l'attuazione del progetto GSE Land - Urban Atlas, che prevede una classificazione delle aree urbane secondo la legenda Moland (*Monitoring Land Use/Cover Dynamics*), fino al IV livello, in conformità con quanto indicato dal progetto CORINE Land Cover, mentre per la descrizione degli ambiti naturali e seminaturali si limita al secondo livello del sistema di classificazione CORINE. Questo livello di discriminazione tematica non è, tuttavia, sufficiente a rappresentare la variabilità del territorio ed i fenomeni di trasformazione negli ambiti naturali e seminaturali, pertanto, in un successivo approfondimento del progetto, di grande interesse per le tematiche connesse alla gestione del patrimonio forestale, agli usi agricoli del territorio, alla valutazione del paesaggio e degli aspetti legati alla biodiversità, sono state implementate con adeguato dettaglio tematico i suoli agricoli (classe 2), le foreste e le aree seminaturali (classe 3), le zone umide (classe 4) e i corpi acquei (classe 5). Il prodotto finale articola la lettura del territorio regionale al V livello di dettaglio, per un totale di 174 classi di copertura del suolo, con una unità

La carta della **copertura del suolo** (*land cover*) rappresenta ciò che attiene alle caratteristiche fisiche della superficie terrestre, ovvero la distribuzione di corpi acquei, vegetazione, ghiacciai, deserti, aree improduttive ed altre caratteristiche fisiche indotte dalle attività umane, come insediamenti ed infrastrutture.

La carta dell'**uso del suolo** (*land use*) rappresenta ciò che riguarda l'utilizzo e le modalità di gestione di determinate coperture del suolo da parte dell'uomo.

minima cartografata pari a 2.500 mq, una tolleranza geometrica non superiore a 5 m, una accuratezza tematica superiore all'80% per la classe 1 e all'85% per le aree extraurbane (AA.VV., 2008). L'*output* è disponibile sia in formato raster, suddiviso in 586 sezioni in scala 1:10.000, sia in forma vettoriale nel formato *shape* di ESRI, nel sistema di riferimento Gauss Boaga fuso Ovest.

Le informazioni semantiche necessarie alla costituzione della Carta della Copertura del Suolo sono state desunte integrando l'informazione tematica desunta dalle immagini satellitari SPOT 5 del 10 settembre 2006 con il database TeleAtlas, la Carta Tecnica Regionale Numerica, il grafo stradale e le ortofoto più recenti.

Nella realizzazione della seconda fase del progetto il processo di produzione del nuovo *output* vettoriale e del *dataset* ad esso associato è stato organizzato in modo da garantire la congruenza logica e geometrica con la banca dati di copertura del suolo realizzata con il progetto GSE Land - UrbanAtlas e da massimizzare l'implementazione di ulteriori informazioni già disponibili nell'insieme di dati territoriali acquisiti dalla Regione, quali la Carta dei Tipi Forestali, la banca dati catastale vettoriale, i limiti amministrativi, le malghe, i limiti delle aree irrigue. La definizione della legenda per i territori extraurbani coniuga le specifiche europee del programma CORINE Land Cover, definite univocamente per i primi tre livelli, con la rappresentazione peculiare delle classi di interesse locale, riconducibile al 4° e al 5° livello di legenda in relazione alle informazioni contenute nei dati ancillari di riferimento.

In particolare, per la tematizzazione degli ambiti forestali rientranti nella classe 3 del primo livello della legenda di CORINE Land Cover ("Territori boscati e aree seminaturali"), si è fatto riferimento al sistema di classificazione adottato nella Carta Regionale dei Tipi forestali, i cui contenuti tematici sono confluiti nelle classi di legenda della Carta della Copertura del Suolo conservando i raggruppamenti per Categoria forestale (in linea tendenziale) al 4° livello tematico e l'articolazione per Tipo forestale al 5° livello.

Al 4° livello tematico, ove possibile, è stata mantenuta l'aggregazione in Categorie forestali, ma in alcuni casi, la necessità di rendere coerente l'ordinamento classificatorio alla legenda CORINE, ha imposto la costituzione di raggruppamenti che non trovano corrispondenza nella Carta Regionale dei Tipi Forestali (le voci riportate in rosso in tabella).

2° livello (CLC)	3° livello (CLC)	4° livello (Categorie forestali)
31 - Aree boscate	311 - Boschi di latifoglie	3111 - Aceri-frassineti e aceri-tiglieti
		3112 - Alneti e betuleti
		3113 - Castagneti e rovereti
		3114 - Faggete
		3115 - Formazioni antropogene di latifoglie (robinieti, impianti di latifoglie)
		3116 - Formazioni costiere o fluviali (leccete, boschi costieri dei suoli idrici, saliceti e altre formazioni riparie)
		3117 - Formazioni euganee con elementi mediterranei (querceti dei substrati magmatici con elementi mediterranei)
		3118 - Orno-ostrieti e ostrio-querceti
		3119 - Quercocarpineti e carpineti
	312 - Boschi di conifere	3121 - Abieteti
		3122 - Formazioni antropogene di conifere
		3123 - Lariceti e laricicembreti
		3124 - Peccete
		3125 - Pinete di pino silvestre
	313 - Boschi misti	3131 - Piceo-faggeti
32 - Ambienti con vegetazione arbustiva e/o erbacea in evoluzione	322 - Lande e cespuglieti	3221 - Arbusteti
		3222 - Pseudomacchia
		3223 - Mughete

Tabella 1. Classi di vegetazione forestale al 4° livello tematico

Si segnala che la classe 3115 include gli impianti di latifoglie, che non rientrano tra le coperture forestali. Nella classe 333, "aree a vegetazione rada", sono rappresentate le formazioni arboree molto rade (con grado di copertura delle chiome inferiore al 10%) e le mughete con grado di copertura inferiore al 30%, che non possono considerarsi bosco né ai sensi della L.R. n.25/78, né secondo la definizione FRA2000. Probabilmente in questa classe sono impropriamente confluiti molti poligoni della classe 324, "aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione" (vegetazione arbustiva o erbacea con alberi sparsi, ovvero formazioni che possono derivare dalla degradazione della foresta o da una rinnovazione della stessa per ricolonizzazione di aree non forestali), che

risulta rappresentata su tutto il territorio regionale da 6 unità poligonali, per una superficie complessiva di soli 22 ha.

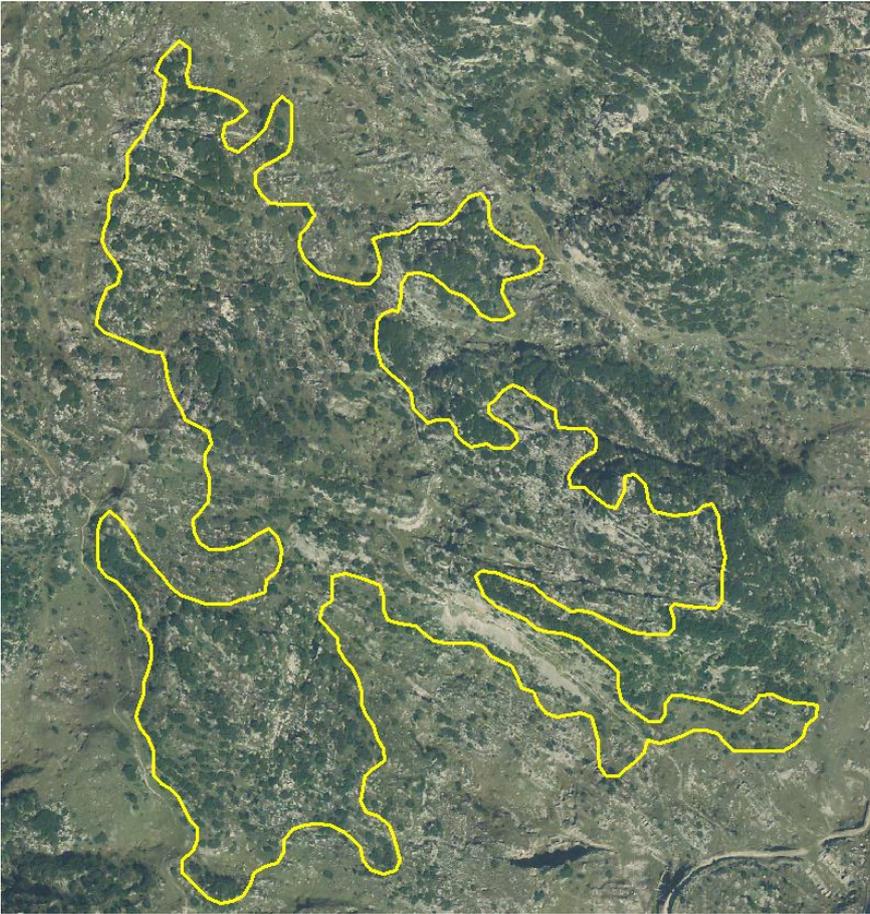


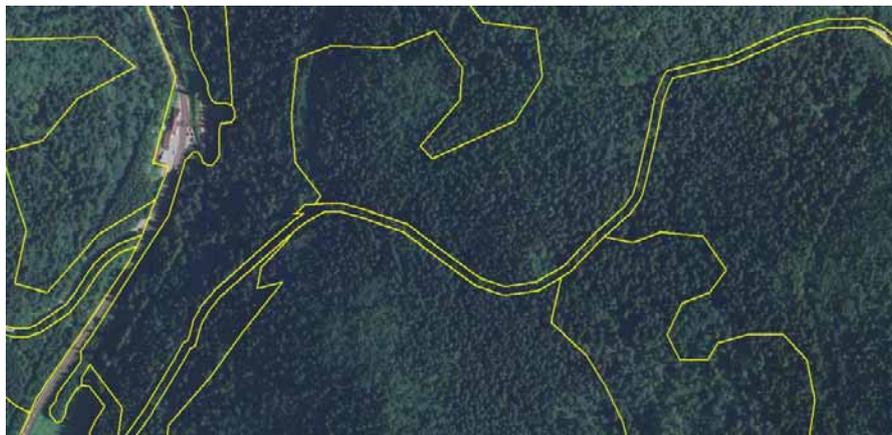
Figura 23. Mugheta con copertura insufficiente (>30%) nel Comune di Asiago

L'aspetto che qualifica maggiormente la riedizione delle coperture forestali nella Carta della Copertura del Suolo consiste nell'integrazione dei contenuti informativi della Carta dei Regionale dei Tipi forestali su una componente geometrica completamente aggiornata e notevolmente migliorata, in coerenza con il requisito, comune a tutti i temi rappresentati, di contenere l'errore entro i 5 m. Il consistenti progressi in termini di accuratezza geometrica sono stati conseguiti anche grazie all'utilizzo di ortofoto con risoluzione geometrica di 0,5 m. Quale supporto fotogrammetrico sono, infatti, state inizialmente impiegate le ortofoto digitali TELAER 2006, che, tuttavia, hanno mostrato *RMS* incompatibili con gli *standard* di precisione prefissati. Le immagini TELAER sono servite esclusivamente per la definizione geometrico-tematica della provincia di Vicenza, fintanto che non sono state acquistate dalla Compagnia Generale Ripresearee di Parma le ortofoto TERRAITALY 2006-2007, acquisite con la camera aerofotogrammetrica digitale ADS40. Il consistente miglioramento della

precisione geometrica dei limiti esterni delle formazioni arboree ed arbustive è stato ottenuto soprattutto grazie all'applicazione integrata di tecniche di segmentazione delle immagini, classificazione automatica e fotointerpretazione a video, ovvero attraverso una metodologia di lavoro del tutto analoga a quella adottata in questo lavoro di tesi per la classificazione delle foto aeree del volo GAI e del volo Montagna Veneta del '91. La rappresentazione vettoriale dei limiti esterni delle coperture forestali integrata nella Carta della Copertura del Suolo presenta, pertanto, caratteristiche di accuratezza geometrica, derivanti dal processo di estrazione e dalle caratteristiche delle immagini analizzate, che consentono di stimare con precisione la superficie forestale complessiva e di localizzare i processi di ricolonizzazione del bosco.

E' d'obbligo, tuttavia, segnalare alcune criticità di questo prodotto conseguenti al suo adeguamento geometrico alla topologia dei livelli informativi relativi alle altre classi di copertura del suolo, in particolare alle topologie derivate dal livello 02 ("viabilità e trasporti") della Carta Tecnica Regionale Numerica. Questa ridefinizione dei poligoni della carta delle coperture forestali (di seguito denominata **CCF2007**), peraltro necessaria alla sua integrazione nella Carta della Copertura del Suolo, determina, infatti, alcune difformità di questa base di dati dai parametri minimi dimensionali previsti sia dalla definizione di bosco ai sensi dell'art.14 della L.R. n.52/78, sia dalla definizione FRA2000. Con particolare frequenza è stato rilevato il caso dell'esclusione dalle superfici boscate della rete viaria secondaria, determinante interruzioni della copertura arborea di larghezza media inferiore ai 20 m.





La CCF2007 risente dell'adeguamento delle topologie ereditate dalla CTRN per quanto concerne la viabilità secondaria, di conseguenza dalla superficie boscata vengono sottratte le strade secondarie anche se completamente sottoposte alla copertura arborea o determinanti interruzioni irrilevanti della stessa (di larghezza inferiore a 20 m). L'introduzione di questo elemento d'errore produce una lieve sottostima della superficie boscata effettiva.

Figura 24a-b. Poligoni della Carta dei Tipi forestali (a) e della CCF2007 (b)

Molto meno rilevante nel computo delle superfici appare la discordanza tra i limiti dimensionali della superficie minima previsti dalla Carta della Copertura del Suolo (2500 mq) e dalla definizione di bosco di cui all'art. 14 della L.R. n.52/78 (2000 mq).

Nome Item	Descrizione
Source	Provincia di appartenenza del poligono
AREA_HA	Superficie del poligono espressa in ettari
Perimetro	Perimetro del poligono espresso in metri
ID_POLIGON	ID numerico univoco del poligono
DATA_CLASS	Epoca di aggiornamento (anno)
CODICE_NUM	Codifica di legenda completa (5°livello)
CODICE	Codifica di legenda completa (stringa)
Legenda	Descrizione sintetica della classe
Inf_Int	Informazioni integrative
1_Livello	Codifica di legenda 1° livello CORINE
2_Livello	Codifica di legenda 2° livello CORINE
3_Livello	Codifica di legenda 3° livello CORINE
4_Livello	Codifica di legenda 4° livello CORINE

Tabella 2. Struttura della tabella degli attributi della Carta della Copertura del Suolo versione standard.

6.2 Immagini aerofotogrammetriche – caratteristiche e selezione dei fotogrammi

6.2.1 Volo GAI del 1954-55

Il volo GAI, eseguito su committenza statunitense (USA Army Map Service) tra il 1954 e il 1955 dal Gruppo Aeronautico Italiano, costituisce la prima sistematica iniziativa di monitoraggio aerofotogrammetrico del territorio dell'Italia centrale e settentrionale. Il consorzio di imprese che si costituì per l'occasione si dotò delle strumentazioni necessarie ad eseguire riprese stereoscopiche, che furono realizzate alle quote medie di 5.000 e 10.000 m.

Caratteristiche dei fotogrammi	
Quota di ripresa	5.000 - 10.000 m
Focale	150 mm
Scala	1:30.000 - 1:58.000
Emulsione	B/N
Numero delle strisciate	80
Numero dei fotogrammi	1.512
Sovrapposizione stereoscopica longitudinale	60% - 80%
Risoluzione delle scansioni	600 dpi
Risoluzione geometrica del pixel	~ 1 m (1,27 m) - ~ 2,5 m

Queste riprese aeree costituiscono una preziosa documentazione storica dell'assetto territoriale nel dopoguerra e possono, pertanto, essere impiegate per l'interpretazione di trasformazioni idrogeologiche e morfologiche del territorio o per la predisposizione di cartografie tematiche storiche finalizzate all'analisi dei cambiamenti degli usi del suolo.

I fotogrammi del volo GAI sono stati utilizzati per documentare lo stato dei soprassuoli forestali in un periodo storico nel quale non sono disponibili documentazioni cartografiche, consentendo di ottenere distanze temporali abbastanza regolari rispetto alle basi informative ufficiali disponibili.

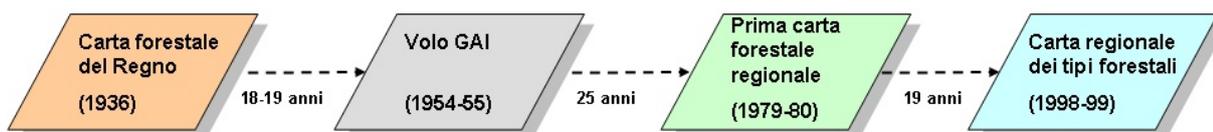


Figura 25. Tendenziale regolarità nelle distanze temporali

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali - Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

Il lavoro di ortorettifica, mosaicatura e classificazione di una selezione di questi fotogrammi rientra nell'ambito dell'attuazione delle attività previste dalla Convenzione stipulata tra Università IUAV di Venezia (tramite il suo spin-off UniSky) e Regione del Veneto – Direzione Foreste ed Economia Montana, pubblicata nel sito della Regione del Veneto il 5 maggio 2009, avente per oggetto la determinazione dei fenomeni di ricolonizzazione del bosco sul territorio regionale con particolare riferimento alle aree montane e collinari. Questa tesi di dottorato, pur rispondendo a finalità che travalicano gli obiettivi della succitata Convenzione, ha apportato un importante contributo alla realizzazione delle attività in essa previste, sviluppando approfondimenti che confluiscono in tale lavoro, in particolare per quanto riguarda:

- la selezione dei fotogrammi del volo GAI (descritta in questo paragrafo);
- la descrizione analitica di alcune basi informative (la Carta Forestale del Regno d'Italia, la Carta Forestale Regionale, la Carta Regionale dei Tipi forestali);
- la definizione della procedura di mosaicatura e di classificazione dei fotogrammi del volo GAI.

Si riportano, pertanto, i criteri adottati nella selezione dei fotogrammi del Volo GAI per l'intero territorio regionale, benché, nelle applicazioni di questo lavoro di tesi, vengano utilizzati solo 10 fotogrammi.

Il trattamento dei fotogrammi del volo GAI è stato realizzato a coprire la superficie della Regione in modo non sistematico, ma operando una selezione su base territoriale dei 1.512 fotogrammi disponibili secondo le modalità di seguito descritte.

Inizialmente il territorio regionale è stato suddiviso in due grandi aree:

- un'area comprendente tutti i rilievi orografici veneti, dalle Dolomiti, alle Prealpi, alle colline prealpine e subalpine (Monti Lessini, Colli Berici, Colli Euganei, area del Montello);
- un'area che comprende la pianura veneta ed i litorali.

Per definire queste due macroaree si è fatto riferimento non tanto a limiti altimetrici o di acclività, ma ad unità complesse di sintesi che combinassero fattori climatici, morfologici e geo-litologici. Questo è stato possibile considerando le *regioni forestali*, che comunemente costituiscono la prima chiave interpretativa della distribuzione della vegetazione forestale (Del Favero, 2004).

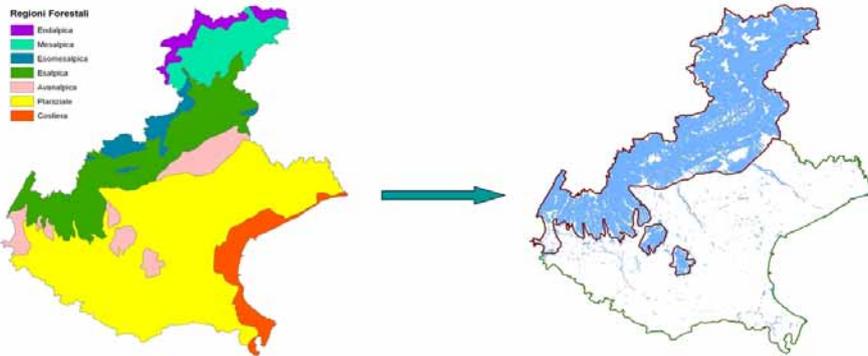
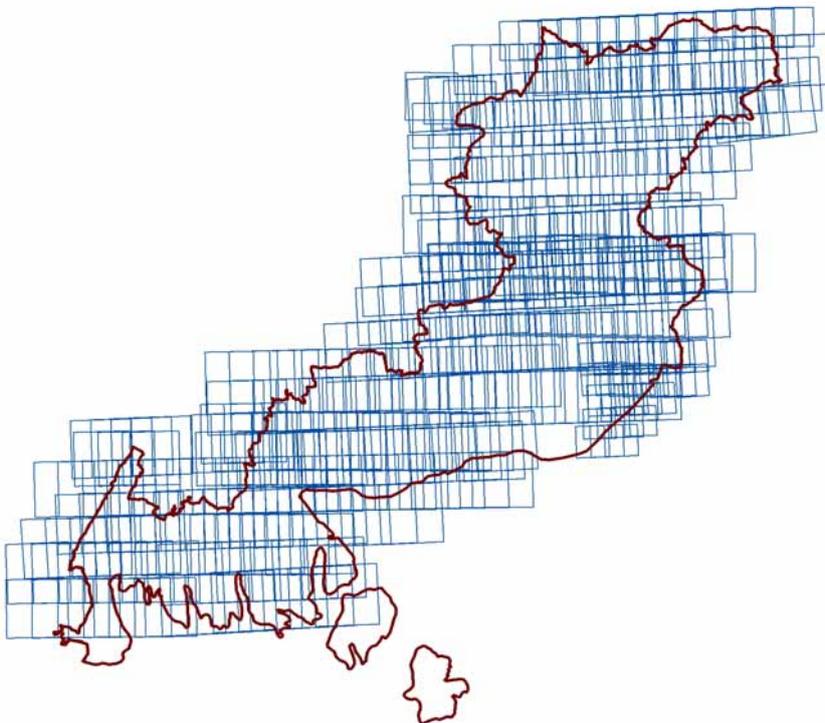


Figura 26. Escludendo la regione pianiziale e costiera, si definisce un'area che comprende oltre il 98% delle foreste venete

Sono stati selezionati tutti i fotogrammi rientranti o intersecanti l'area montuosa e collinare, per la quale si intende produrre un *layout* cartografico esteso a tutto il territorio.



I boschi rientranti nell'area montuosa e collinare sono ricoperti da **377** fotogrammi della ripresa effettuata nel 1954 (in blu) e da **133** del volo eseguito nel 1955 (in verde).

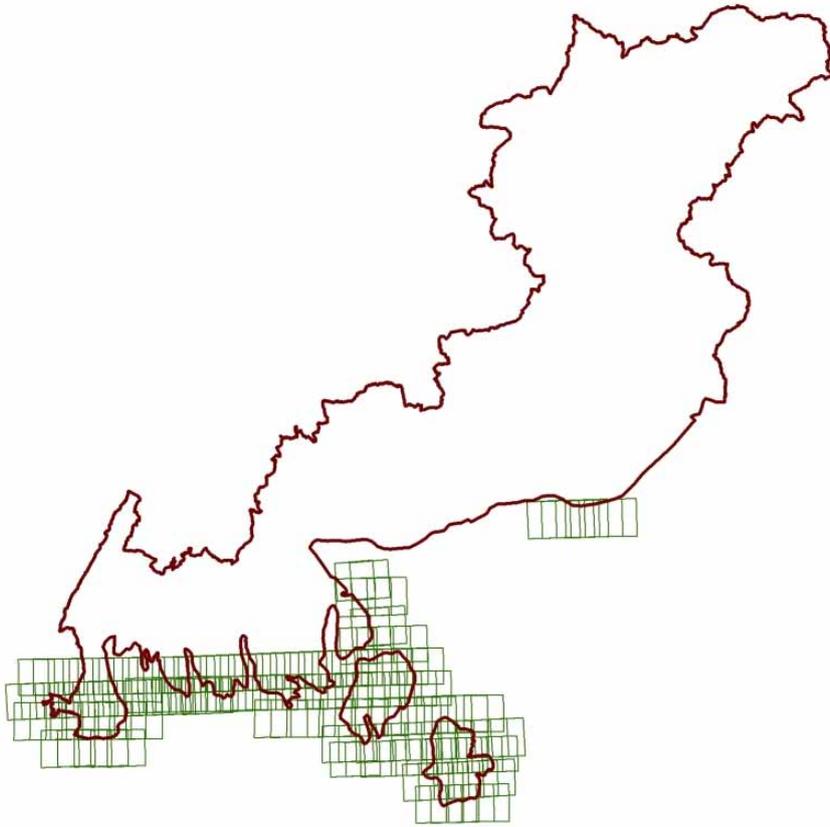


Figura 27. Fotogrammi del 1954 (27a) e del 1955 (27b) ricoprenti i territori montani e collinari

L'area pianiziale e costiera, rappresentata dai rispettivi distretti fitogeografici (o regioni forestali), include l'1,98 delle foreste venete, costituite da unità estremamente frammentate, accerchiate dalle monoculture agrarie, dagli insediamenti industriali, dagli agglomerati urbani e dall'esteso reticolo delle vie di comunicazione.

Dell'antico mosaico di foreste pianiziali intervallate da paludi ed acquitrini che caratterizzava la Pianura Padana in epoca preromana ormai non rimangono che sparute e fragili testimonianze. Questi antichi testimoni di vicende naturali ed umane ospitano ancora oggi piccoli popolamenti di uccelli, mammiferi ed invertebrati unici al mondo, che rischiano di scomparire del tutto. L'estensione di questi boschi relitti è, infatti, ben inferiore ai 200 ha, che rappresentano, a detta di molti studiosi, in questo specifico contesto e in funzione della fauna ospitata, la *Minimum Dynamic Area*. Alle problematiche dell'estensione ridotta

e dell'isolamento, si aggiunge, infine, quella dell'eccessiva semplificazione strutturale (originariamente questi soprassuoli erano pluristratificati e soggetti a complessi equilibri).

La storia evolutiva dei boschi della pianura veneta è, comunque, ben nota e, pertanto, nell'ambito della Convenzione con la Regione del Veneto, non è parso opportuno, anche in relazione alle economie disponibili, monitorare le dinamiche di queste cenosi forestali attraverso un rilevamento esteso a tutto il territorio. Di conseguenza l'ambito di analisi è stato limitato ad aree selezionate in funzione dell'attuale presenza di popolamenti rilevanti da un punto di vista naturalistico o laddove siano note situazioni particolarmente conflittuali tra conservazione dei soprassuoli forestali e processi economici in atto. I fotogrammi, pertanto, sono stati distribuiti in modo da includere le seguenti fattispecie:

- lembi relitti dei Quercocarpineti planiziali (*Quercetum-Carpinetum boreoitalicum* PIGNATTI 1953, *Asparagus tenuifolii-Quercetum roboris* MARINCEK 1994);
- boschi della fascia litoranea.

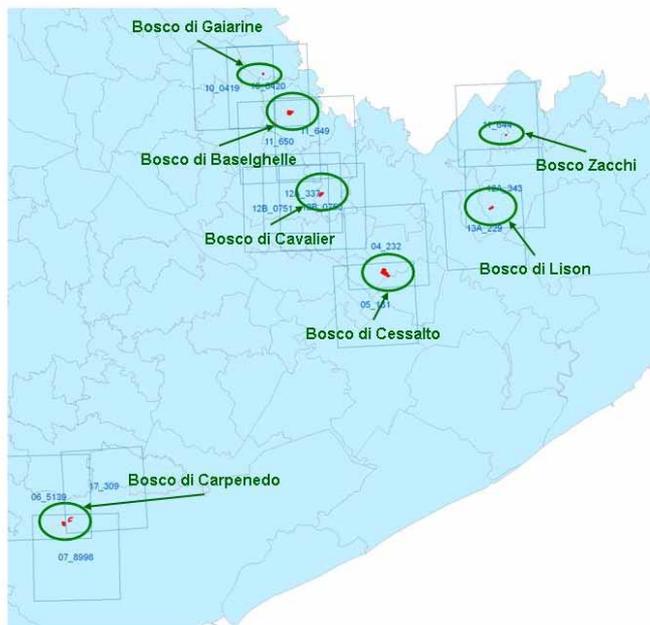


Figura 28. Copertura fotogrammetrica dei più importanti boschi planiziali

In questa selezione i Quercocarpineti planiziali sono rappresentati da 7 nuclei storici, che costituiscono altrettanti Siti di Importanza Comunitaria e Zone di Protezione Speciale:

- Bosco di Baselghelle (IT3240006: 13,83 ha)

Minimum Dynamic Area: estensione minima di un determinato habitat necessaria a mantenere la *Minimum viable population*, ovvero la più piccola popolazione isolata avente il 99% di probabilità di persistere per 1000 anni nonostante gli effetti di eventi demografici, genetici ed ambientali casuali e le catastrofi naturali. Generalmente, per mantenere elevata la variabilità genetica e proteggere la popolazione da eventi sfavorevoli eccezionali, questo numero è superiore a 10.000 unità per piante ed invertebrati, mentre può variare da 500 a 5.000 individui per i vertebrati.

- Bosco di Cessalto (IT3240008: 27,55 ha)
- Bosco di Gaiarine (IT3240016: 2,1 ha)
- Bosco di Cavalier (IT3240017: 9,43 ha)
- Bosco di Lison (IT3250006: 5,56 ha)
- Bosco di Carpenedo (IT3250010: 12,91 ha)
- Bosco Zacchi (IT3250022: 0,75 ha)

Tutti questi boschi hanno una superficie insufficiente a garantire l'esistenza di una *core area* e possono essere assimilati, sotto il profilo ecologico e microclimatico, a "sistemi lineari" più che a formazioni forestali.

A questi, in Comune di Chioggia, si aggiunge il SIC-ZPS IT3250032, Bosco Nordio, Riserva Naturale Integrale gestita da Veneto Agricoltura. Bosco Nordio si sviluppa su un sistema di dune fossili che distano più di 4 km dalla costa e rappresenta la più importante testimonianza della fascia boscata che anticamente interessava il litorale veneto.

Per selezionare i fotogrammi del volo GAI relativi alle attuali formazioni litorali, si è fatto riferimento alla Carta regionale dei tipi forestali, operando una selezione spaziale con i seguenti tipi forestali:

- Arbusteto costiero
- Bosco costiero dei suoli idrici
- Lecceta.

Sono, inoltre, state considerate, tra le "Formazioni antropogene di conifere", le seguenti cenosi forestali, molto diffuse sul litorale veneto, che, in virtù del progressivo deperimento delle pinete, rappresentano uno stadio evolutivo intermedio verso il reinsediamento della lecceta:

- Pineta di pino domestico su bosco costiero dei suoli idrici
- Pineta di pino domestico su lecceta
- Pineta di pino marittimo su lecceta.

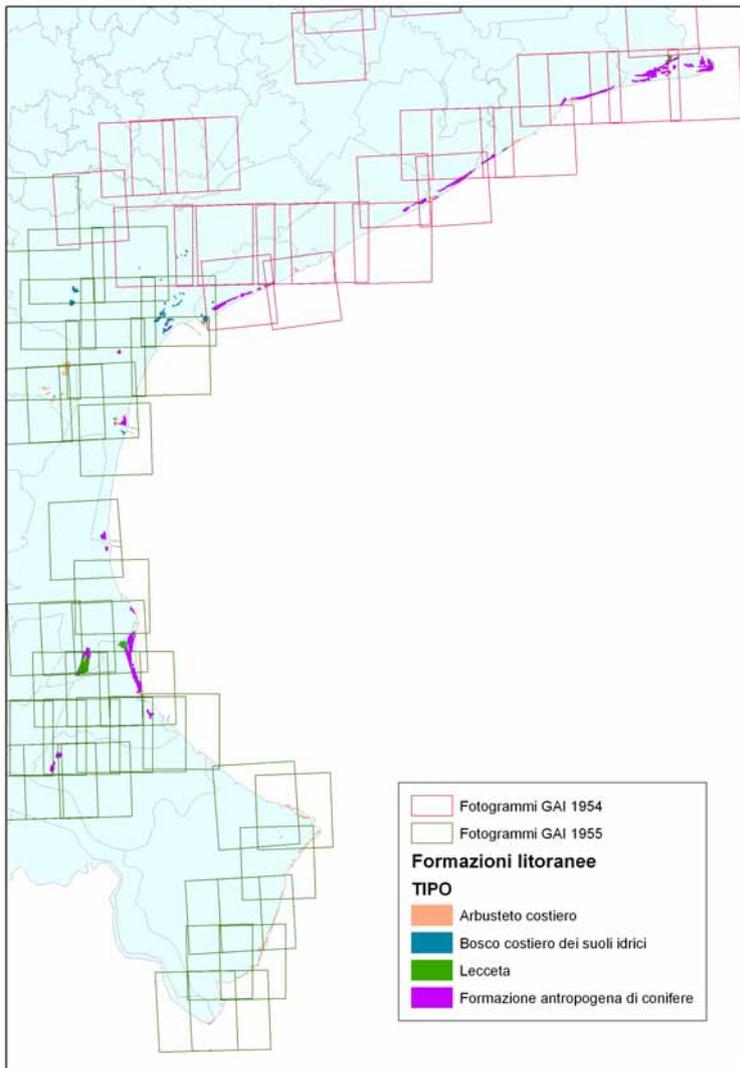


Figura 29. Formazioni della fascia litoranea considerate nella selezione dei fotogrammi.

Adottando questi criteri, sono stati selezionati, per la pianura veneta e per la fascia litoranea, 73 fotogrammi del volo GAI, che vanno a sommarsi ai 510 dell'area montana e collinare, per un totale di **583** fotogrammi.

6.2.2 Volo “1191-92 REVEN Montagna Veneta”

Le foto aeree possono essere classificate, in base al tipo di pellicola utilizzata, in foto in bianco e nero normali (ortocromatiche o pancromatiche), foto in bianco e nero all'infrarosso, foto a colori normali (RGB) e foto a colori all'infrarosso, dette anche “a falsi colori”. Le foto in bianco e nero normali, le più usate in assoluto fino agli inizi degli anni '90 per il loro costo accessibile in relazione alle tecnologie allora disponibili (da 2 a 10 volte inferiore rispetto alle emulsioni a colori), riproducono con diverse gradazioni di grigio ciò che in natura appare nello spettro del visibile. La gamma di tonalità di grigio nelle pellicole ortocromatiche è meno ampia delle pancromatiche, che, di conseguenza, hanno trovato un più diffuso utilizzo. Le pellicole pancromatiche hanno, tuttavia, la caratteristica e la limitazione di avere una scarsa sensibilità spettrale nei confronti dei verdi (Amadesi, 1977). Le diverse tonalità di verde nelle emulsioni pancromatiche, di conseguenza, risultano indistinguibili, pertanto queste foto mal si prestano a studi sulla vegetazione.

Il primo utilizzo di emulsioni a colori per l'esecuzione di un'ampia copertura del territorio regionale risale alla ripresa eseguita dalla Compagnia Generale Riprese aeree di Parma nei mesi di aprile e maggio 1987, denominata “1987 REVEN”, che, tuttavia, interessa solo parzialmente le Province di Venezia, Padova, Vicenza e Verona, lambendo solo le propaggini meridionali dei Monti Lessini e del Monte Baldo (Figura 30). La stessa CGR di Parma, tra marzo ed ottobre del 1990, ha eseguito un'ulteriore ripresa a colori su 92 strisciate che vanno a coprire integralmente la Provincia di Rovigo e parzialmente le Province di Verona, Vicenza, Padova, Treviso e Venezia. Anche in questo caso l'area alpina è rimasta totalmente esclusa, mentre, invece, da questo volo è interessata parte della fascia pedemontana, in particolare tutta la Lessinia e parte del Monte Baldo (Figura 31).

Il primo programma di volo concepito allo scopo di coprire con una ripresa a colori a grande scala il territorio montano della Regione fu attuato nei due anni successivi. Il volo, denominato “1991-92 REVEN Montagna Veneta” comprende 136 strisciate ed un totale di 2372 fotogrammi eseguiti ad una quota di volo compresa tra i 2700-2800 m (Figura 32).

Prima di allora in Veneto si annovera il volo “1982 Venezia colore”, commissionato dal Comune di Venezia ed eseguito anch'esso dalla Compagnia Generale Riprese aeree di Parma, che copre parzialmente il territorio incluso nei limiti amministrativi del Comune di Venezia (Centro Storico, parte del litorale e della Laguna). Per questa ripresa, eseguita ad una quota di 1000 m, fu utilizzata una particolare camera con focale molto ampia (305 mm), che ha consentito di ottenere fotogrammi alla scala 1:3.100

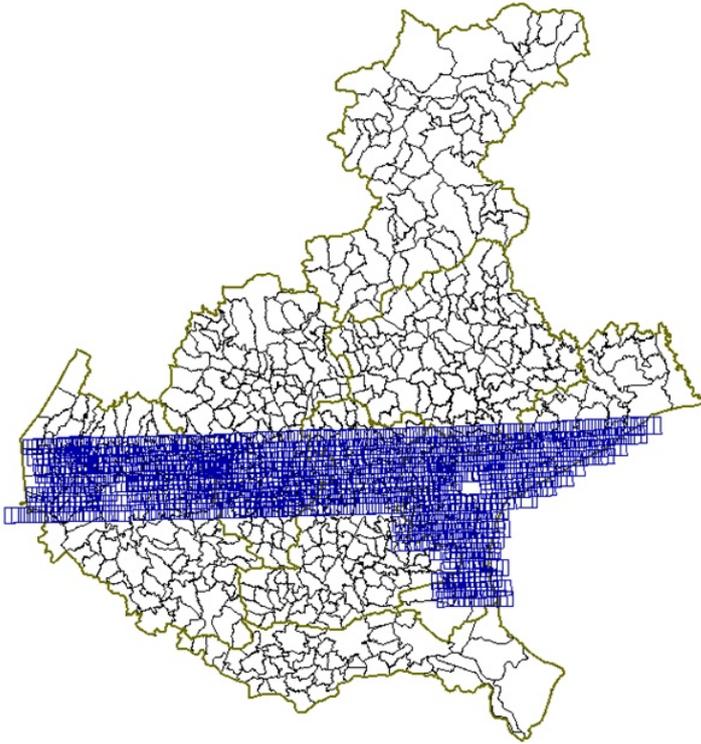


Figura 30. Grafico di volo della ripresa "1987 REVEN" (927 fotogrammi su 43 strisciate)

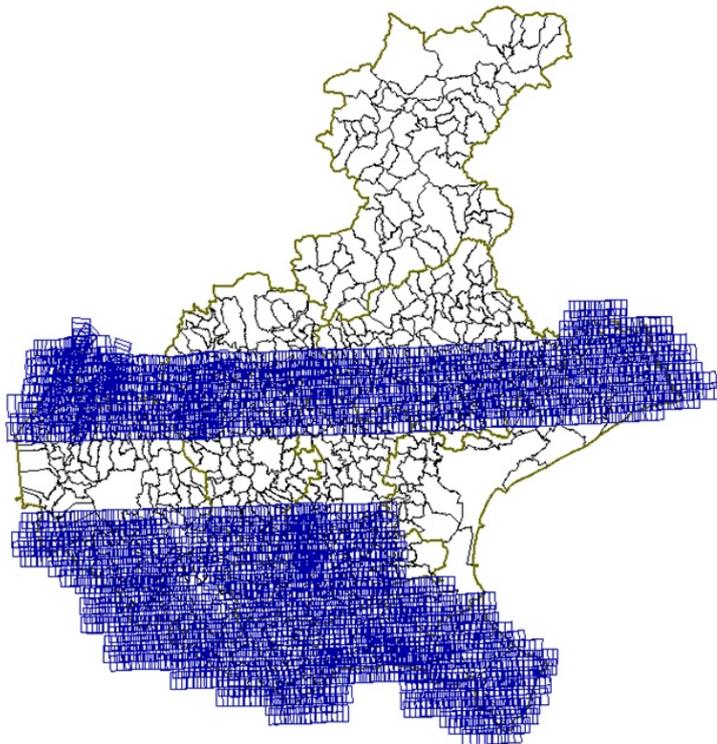


Figura 31. Copertura della ripresa "1990 REVEN": 2554 fotogrammi su 92 strisciate

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

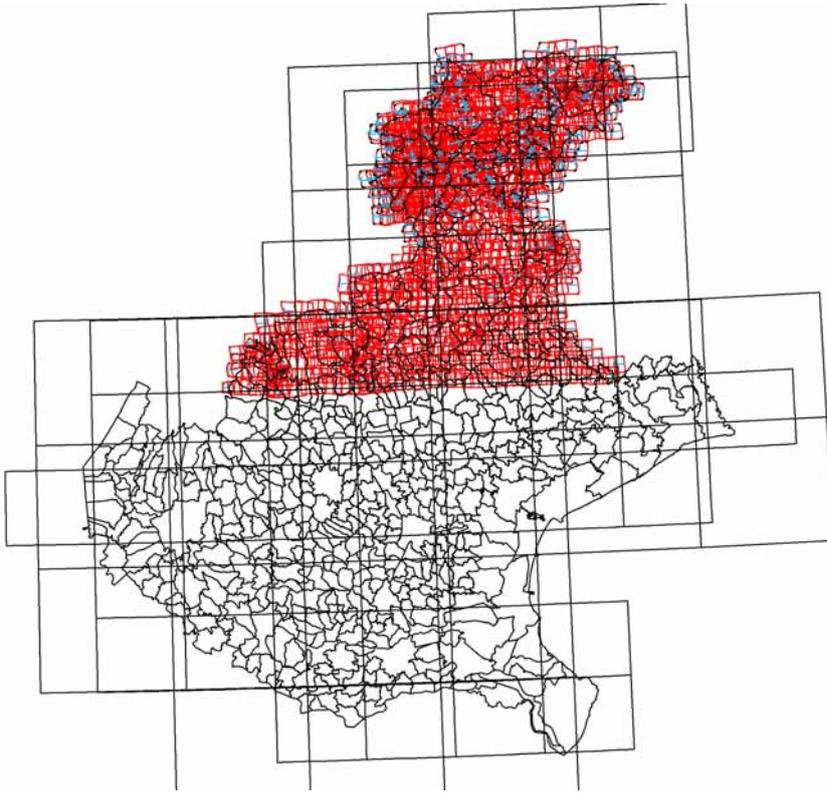


Figura 32. Grafico di volo della ripresa "1991-92 REVEN Montagna Veneta"

La scala dei fotogrammi è data dalla semplice relazione che rapporta l'ampiezza angolare f dello strumento rilevatore impiegato (focale) e la distanza H dello strumento stesso dal suolo:

$$\frac{1}{scala} = \frac{H}{f}$$

Per l'esecuzione della ripresa, assegnata alla Ditta Rossi di Brescia, è stata utilizzata una camera fotogrammetrica ZEISS RMK A 15/23 con obiettivo PLEOGON A2, *wide angle* di 90° (grandangolo), focale di 153.073 mm e formato del negativo di 23 x 23 cm. La scala media dei fotogrammi prodotti, pertanto, oscilla tra 1:17.500-1:18.500.

Dal grafico seguente, che evidenzia la relazione approssimativa che intercorre tra la scala del fotogramma e la scala della carta derivabile, si può desumere che dall'utilizzo di questa base informativa aerofotogrammetrica sia possibile ottenere una rappresentazione ad una scala intermedia tra 1:5.000 ed 1:10.000. E', tuttavia, opportuno tener presente che tale relazione empirica è determinata dall'effettiva possibilità di discriminare in modo univoco gli oggetti da

In aerofotogrammetria è più corretto parlare di scala media del fotogramma, sia per l'effetto di distorsione dell'immagine dovuto all'angolo di ripresa, sia in ragione della variabilità della quota relativa in conseguenza della presenza di rilievi.

Wide angle. angolo di campo ha per vertice il centro della presa ed i lati passanti per gli estremi della diagonale del formato dell'immagine.

cartografare previsti per ciascuna scala nominale delle carte e, pertanto, nel caso di scansioni digitali, può variare sensibilmente anche in relazione alla qualità del supporto informatizzato.

Relazione fra la scala del fotogramma e la scala della carta

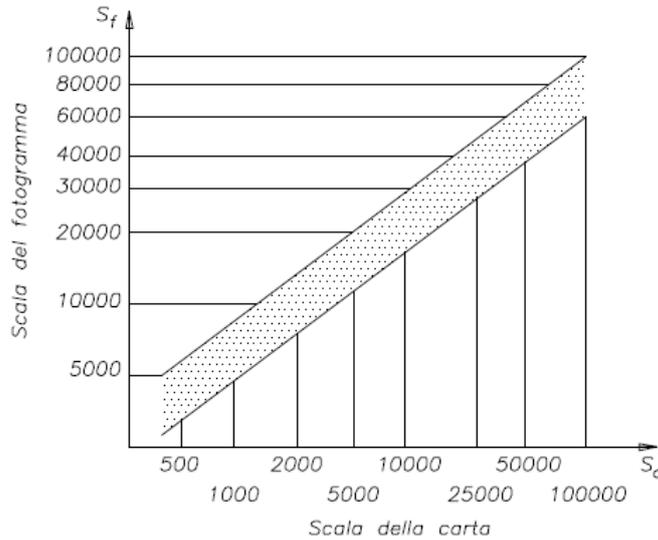


Figura 33. Grafico di derivazione della scala

Per consentire la sovrapposizione necessaria alla ricostruzione del modello stereoscopico negli strumenti di restituzione fotogrammetrica, i fotogrammi sono stati scattati con una sequenza e seguendo un piano di volo tali da garantire un overlap del 60-80% ed un sidelap medio del (~)40%, in modo da assicurare, sui terreni maggiormente accidentati, almeno una doppia copertura stereoscopica (3 fotogrammi che inquadrano la stessa area). La variabilità della percentuale di ricoprimento longitudinale e trasversale tra le strisciate è correlata ad oscillazioni della quota relativa di volo, che, di conseguenza, producono anche lievi variazioni anche nella scala media dei fotogrammi.

I fotogrammi del volo "1991-92 REVEN Montagna Veneta" sono stati tutti acquisiti tramite scanner piano formato A3 ad una risoluzione ottica di 600 DPI e salvati in formato TIFF non compresso. La risoluzione al suolo del pixel espressa in metri (R^m), conseguentemente alle variazioni di scala suddette, oscilla tra i 0,75 ed i 0.85.

$$R^m = \frac{2.54}{scala \times 100 \times 600}$$

L'elevata percentuale di ricoprimento, come si è detto, è funzionale alla riproduzione di una visione stereoscopica del territorio ossia alla simulazione di una visualizzazione tridimensionale degli oggetti che consente di valutarne meglio la conformazione e l'altezza. L'analisi stereoscopica ha trovato numerose applicazioni in campo forestale: in Veneto, ad esempio, è stato possibile definire delle chiavi di fotointerpretazione su base fisionomica che sono servite di supporto alla classificazione di dettaglio delle categorie forestali.

Diversamente, per una classificazione semplificata dell'uso del suolo finalizzata esclusivamente alla determinazione quantitativa delle superfici forestali, si ricorrerà a tecniche di classificazione che non richiedono l'apporto dell'informazione stereoscopica. Di conseguenza la selezione dei fotogrammi che rappresentano l'area di studio è stata eseguita in due fasi:

- selezione spaziale tramite intersezione tra il vettoriale del grafico di volo ed i limiti amministrativi della Comunità Montana;
- selezione manuale con l'obiettivo di ridurre il numero di fotogrammi, garantendo la continuità della copertura ed un overlap compreso tra il 20% ed il 40%.

Il contenimento dell'overlap entro i limiti sopra indicati ha consentito di ridurre sensibilmente il numero dei fotogrammi garantendo, nel contempo, una sovrapposizione sufficiente a consentire, nella fase di mosaicatura, la rimozione dei margini del fotogramma, soggetti a forti aberrazioni cromatiche e ad una sensibile riduzione della nitidezza.

La riduzione del numero di fotogrammi ha consentito di contenere entro limiti di fattibilità i tempi del processo di preparazione del dato che precede la classificazione ed, in particolare, della procedura di ortorettifica.

In questo modo è stato possibile ottenere la completa copertura del territorio compreso entro i limiti amministrativi della Comunità Montana ad eccezione di:

- un esiguo lembo meridionale dei Comuni di Lusiana e di Conco, che non rientra nella copertura del volo "1991-92 REVEN Montagna Veneta";
- le creste della Cima della Caldiera, interessate da nuclei di vegetazione forestale molto rada e difficilmente distinguibili (mughete e lariceti), che segnano lo spartiacque tra il Comune di Asiago e la Valsugana;
- una fascia di territorio di circa 7 Km per 1 Km compresa tra i Comuni di Asiago, Roana e Rotzo, corrispondente alla strisciata 3A, in corrispondenza della quale non sono disponibili alcuni fotogrammi.

I fotogrammi, in corrispondenza delle rocce nude, dominanti in quest'area, sono affetti da forti aberrazioni cromatiche.

Complessivamente si va ad analizzare una superficie di circa 570 Km².

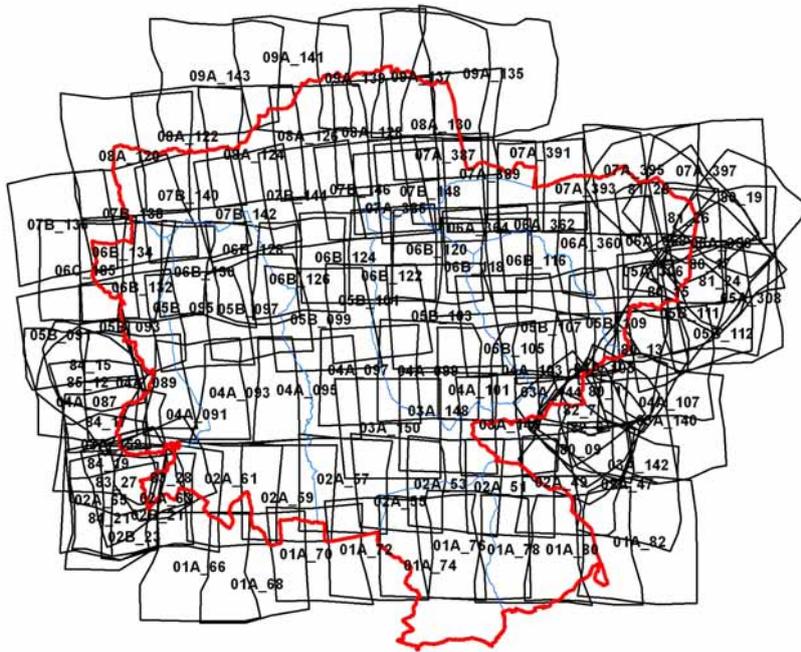


Figura 34. Preselezione dei fotogrammi ottenuta tramite overlay geografico con i limiti amministrativi della Comunità Montana della Spettabile Reggenza dei Sette Comuni.

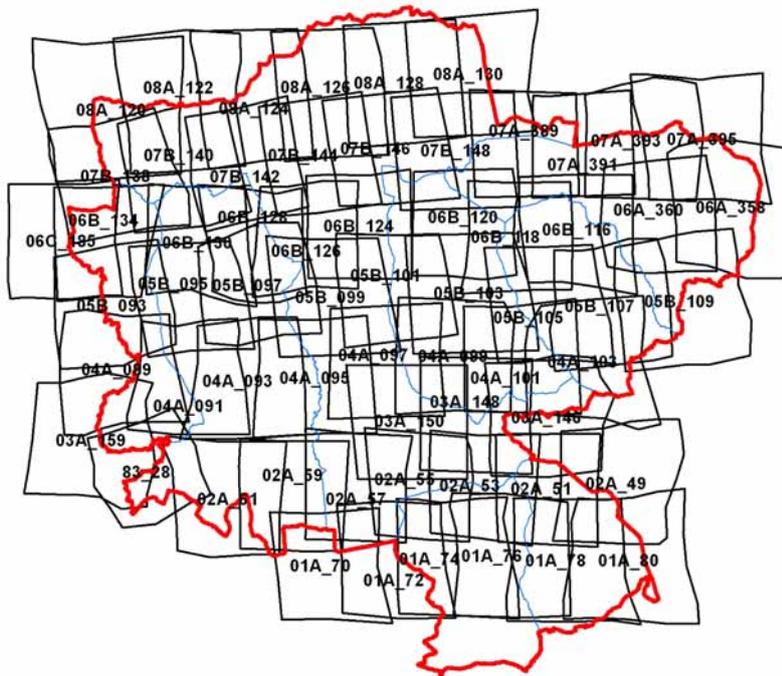
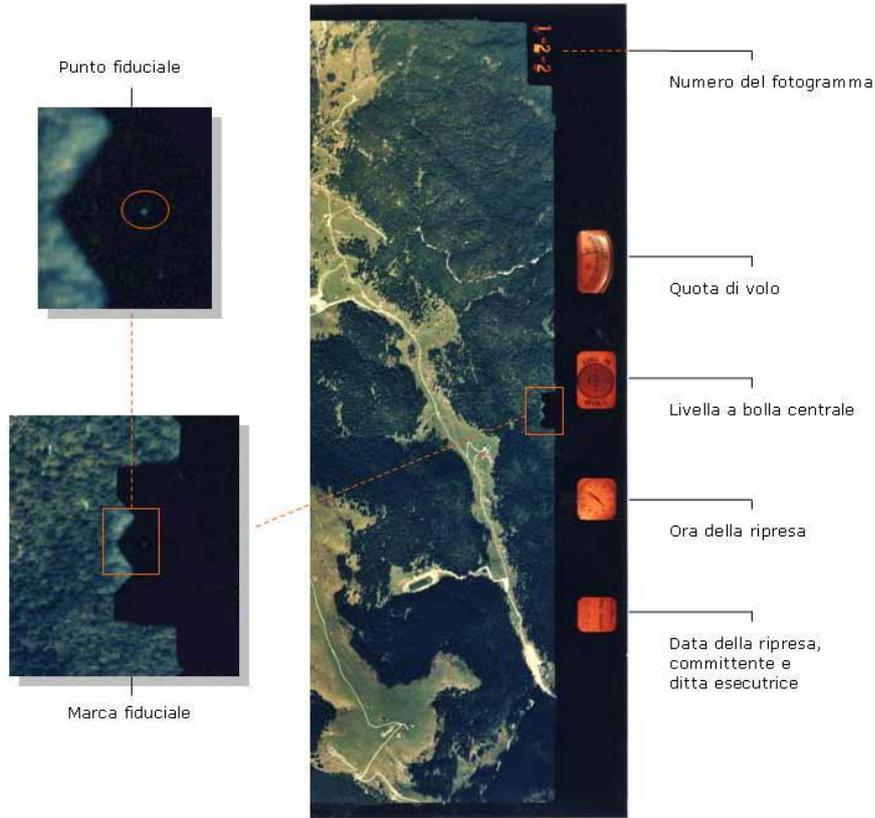


Figura 35. L'affinamento della selezione eseguito secondo i criteri descritti ha consentito di ridurre il numero dei fotogrammi da 113 a 64.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

Tutti i **64 fotogrammi** selezionati sono stati sottoposti ad un processo di ortorettifica, di mosaicatura, di bilanciamento tonale e di classificazione supervisionata, tutte fasi che, nei capitoli successivi, saranno oggetto di accurati approfondimenti metodologici.



A destra, il *data strip*, in cui sono riportate le immagini degli strumenti di bordo.

A sinistra, particolari di una delle quattro *marche fiduciali* poste a metà di ciascun lato.

Figura 36. Visione parziale di un fotogramma con i suoi elementi caratteristici.

7 MODALITÀ DI PRE-PROCESSING E DI CLASSIFICAZIONE DELLE FOTO AEREE PER LA DETERMINAZIONE DELLE SUPERFICI FORESTALI

In questo capitolo vengono descritte le modalità di pre-elaborazione delle immagini aerofotogrammetriche utilizzate nell'analisi delle variazioni della copertura forestale che precedono la fase di classificazione tematica. Il trattamento di quest'ultima fa riferimento esclusivamente alle recenti tecniche di segmentazione e classificazione *object-oriented*, le quali, a differenza dei sistemi di classificazione *pixel-oriented*, consentono di ottenere un output intermedio di tipo vettoriale. I poligoni ottenuti dal processo automatico di segmentazione possono essere successivamente processati con algoritmi di classificazione di tipo *unsupervised* o *supervised* oppure sottoposti a fotointerpretazione manuale.

I sistemi di classificazione automatica o semi-automatica, che facciano riferimento ad un approccio *pixel-oriented* o *object-oriented*, attraverso tecniche di attribuzione *hard* o metodi statistici basati sulla logica sfocata o sulle reti neurali, hanno il comune obiettivo di derivare l'informazione tematica ricercata senza o con il minimo contributo manuale del foto interprete, riducendo tempi e costi di produzione delle basi di dati di copertura/uso del suolo. La classificazione per pixel, tuttavia, è caratterizzata da alcuni limiti:

- l'accuratezza della classificazione tende a diminuire all'aumentare del grado di complessità del sistema di nomenclatura adottato e all'aumentare della risoluzione geometrica dell'immagine;
- *output* finale è in formato *raster*, pertanto difficilmente fruibile da parte dell'utente, abituato a gestire archivi cartografici in formato vettoriale (Chirici, Corona, 2006).

I vantaggi dell'approccio *object-oriented* risiedono, oltre che nella generazione di un prodotto cartografico conforme ai canoni standard della cartografia tematica, nella possibilità di oggettivizzare il processo di delineazione dei poligoni (in particolare nei casi in cui i limiti dei poligoni corrispondono ai limiti tra diverse unità tematiche), svincolandolo dalla soggettività dell'operatore (come avviene nella fotointerpretazione manuale), consentendo l'automatizzazione del processo medesimo e la sua perfetta replicabilità su immagini con analoghe caratteristiche spettrali e geometriche. Inoltre, l'approccio *object-based* consente di associare all'informazione spettrale dei

pixels contenuti in ciascun oggetto, le informazioni derivanti dalle caratteristiche geometriche, di tessitura, dalle relazioni topologiche tra gli oggetti e dalla loro distribuzione spaziale, tutti elementi che consentono di rappresentare con più precisione la complessa (ma non sempre casuale) distribuzione degli elementi del paesaggio. Queste potenzialità del paradigma *object-oriented* e la possibilità, ulteriore peculiarità di questo approccio, di implementare fonti ancillari di supporto alla classificazione, lo rendono particolarmente indicato nella derivazione di carte di uso del suolo da immagini aerofotogrammetriche pancromatiche o RGB, povere di informazione spettrale e spesso caratterizzate da variazioni di tonalità non sempre associabili ad una diversa classe di copertura del suolo, ma piuttosto a fenomeni di riflessione o ombreggiatura, oppure da salti cromatici dipendenti ad una non perfetta riduzione, nella mosaicatura di fotogrammi contigui, del "gradino" radiometrico.

La metodologia descritta nelle pagine seguenti delinea, pertanto, una procedura di derivazione di informazioni tematiche che consente di comparare con elevata precisione foto aeree recenti e storiche per lo studio dei cambiamenti del paesaggio forestale.

Le procedure di pre-elaborazione e classificazione dei fotogrammi del volo GAI e di quelli del volo 1991-92 REVEN Montagna Veneta, pur seguendo fondamenti metodologici comuni, presentano problematiche differenti in relazione alle caratteristiche spettrali e geometriche ed alle informazioni disponibili necessarie nelle fasi di *pre-processing*. Sono oggetto, pertanto, di trattazione distinta.

La **geometria** di un oggetto fornisce strumenti per la sua descrizione quantitativa attraverso espressioni matematiche relative alle sue caratteristiche spaziali (dimensione, forma, orientamento).

La **topologia** analizza le relazioni spaziali e contestuali tra oggetti di classi diverse. Consente di porre vincoli standardizzati o definire regole relazionali empiriche.

La **tessitura** considera la covarianza dei valori dei pixel in funzione della distanza e della direzione.

7.1 *Trattamento dei fotogrammi del volo 1991-92 REVEN Montagna Veneta*

7.1.1 *Ortorettifica*

Il processo di fotointerpretazione, ovvero una valutazione meramente visiva dei fotogrammi, sarebbe di per sé sufficiente per identificare in modo immediato, anche se sommario, le modificazioni di copertura del suolo avvenute nel territorio tra diverse epoche. Un approccio di questo tipo, tuttavia, non consentirebbe alcun tipo di analisi territoriale oggettiva e, soprattutto, l'*overlay* con altre basi informative georiferite, pertanto limiterebbe notevolmente le potenzialità di impiego delle informazioni associate ai fotogrammi storici. Il recupero a fini metrici dei 64 fotogrammi del volo "REVEN Montagna Veneta 1991-92" che ricoprono l'area di studio, pur rappresentando la fase che ha maggiormente influito sui tempi di elaborazione delle immagini, è stato, pertanto, necessario per conferire caratteristiche oggettive (come una precisa collocazione in un sistema geodetico-cartografico) ai singoli fotogrammi attraverso la coregistrazione con immagini recenti che hanno già subito un processo di correzione geometrica e georeferenziazione.

In territori montani la georeferenziazione dell'immagine deve essere eseguita contestualmente ad una procedura che corregga la posizione dei pixel compensando le deformazioni indotte dai rilievi. Il procedimento più corretto per la metricizzazione di un fotogramma è basato, pertanto, sulla sua correzione geometrica differenziale basata su un DEM noto che descriva la conformazione del territorio rappresentato e che consenta, in tale modo, la rettifica delle deformazioni geometriche dell'immagine, trasformandola, almeno in via teorica, in una rappresentazione in proiezione ortogonale.

La procedura di ortorettifica dei fotogrammi del volo Montagna Veneta del 1991 è stata eseguita attraverso l'acquisizione dei seguenti dati accessori:

- il DTM Digitalia con passo di 10 m (forzato a 5 m);
- il certificato di calibrazione della camera fotogrammetrica;
- le ortofoto digitali RGB TERRAITALY™ del 2006-07.

L'accuratezza del processo è influenzata da diversi fattori, tra cui uno dei principali è la risoluzione geometrica del modello digitale del terreno (in relazione alla risoluzione geometrica dell'immagine da ortorettificare) e la

Le potenzialità di utilizzo delle informazioni estraibili dai fotogrammi del volo Montagna Veneta del 1991 si basano sulla possibilità di correlarle correttamente con altre fonti informative integrate in un sistema di riferimento geografico.

precisione delle quote dei nodi. Per il Veneto il DTM Digitalia presenta un *RMS* (*Root Mean Square error*) di 1.26 m ed è il modello 3D più dettagliato ad oggi disponibile per l'area coperta dalle immagini. Da esso sono state ricavate le coordinate *Z* associate ai *GCP* (*Ground Control Points*). Altri fattori da cui è dipesa la bontà del risultato sono:

- la risoluzione geometrica dell'immagine grezza;
- la conoscenza accurata dei parametri di orientamento interno dei fotogrammi;
- la risoluzione geometrica dell'immagine di riferimento e la precisione nell'acquisizione dei *GCP*;
- l'acquisizione di un numero adeguato di punti di controllo a terra e la loro distribuzione;
- l'assenza di "scoperture" dovute ad estese zone in ombra o di aree difficilmente riconoscibili;
- la morfologia del terreno (l'assenza di linee di frattura o bruschi cambiamenti di pendenza).

La risoluzione dell'immagine grezza varia tra i 0.71 e i 0.85 m in relazione alla oscillazioni della quota di ripresa. Per orientamento interno si intende l'orientamento dei fotogrammi rispetto alla camera fotogrammetrica utilizzata e per determinarlo con precisione è necessario disporre del certificato di calibrazione che descrive le caratteristiche geometriche della fotocamera. Il certificato di calibrazione della camera fotogrammetrica ZEISS RMK A 15/23 è stato fornito dalla società Rossi di Brescia, esecutrice della ripresa, su richiesta inoltrata per tramite del Centro per la Cartografia della Regione del Veneto. I parametri in esso contenuti hanno permesso l'applicazione di un modello basato sulla ricostruzione rigorosa della geometria della presa e l'applicazione di algoritmi di calcolo implementati nel software ERDAS IMAGINE v.9.3 della Leica Geosystems estremamente accurati che consentono ridurre, in presenza di riferimenti facilmente riconoscibili, l'errore di posizionamento a valori prossimi alla dimensione del pixel.

La precisione del processo di ortorettifica è determinata anche dalle caratteristiche dell'immagine utilizzata per la definizione dei punti di controllo e, di norma, i criteri condizionanti la scelta dell'immagine di riferimento sono quelli della maggiore prossimità temporale con i fotogrammi da ortorettificare e della migliore risoluzione geometrica. Nel caso specifico l'area di studio rientra in ben quattro coperture aerofotogrammetriche, prodotte tra il 2000 e il 2007, di cui la Regione del Veneto ha acquisito la licenza d'uso. La scelta della base di

Se la distanza temporale tra l'immagine *raw* e l'ortofoto digitale di riferimento è grande, l'individuazione dei punti omologhi può rivelarsi difficoltosa a causa cambiamenti intercorsi.

riferimento più idonea si è dovuta, pertanto, orientare fra tre programmi di volo attuati dalla Compagnia Generale Ripreseeree di Parma ed uno dal consorzio TELAER, costituito dalle società Alenia Spazio e Telespazio:

- programma "IT 2000"TM;
- TERRAITALYTM NR 2003;
- TELAER 2006-2007;
- TERRAITALYTM 2007 RGB e FCIR.

In questa scelta, nel contesto in cui si opera, la valutazione delle caratteristiche dei singoli prodotti (risoluzione geometrica, incidenza delle ombre, prossimità temporale, tecnica di produzione) assume un'importanza secondaria. È necessario, invece, definire prioritariamente la strategia di analisi delle variazioni dei limiti del bosco che successivamente verrà condotta, attraverso un esame comparativo tra le modalità di classificazione dei fotogrammi del volo Montagna Veneta del 1991 e le tecniche e i materiali che sono stati utilizzati per produrre le altre basi informative.

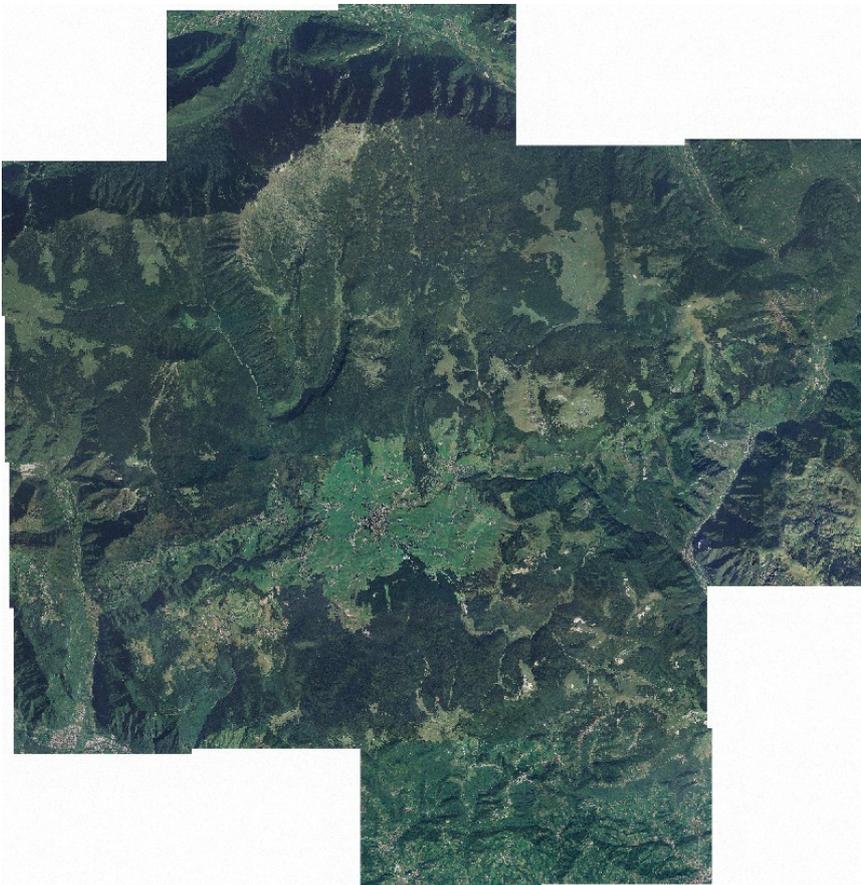
La Carta Regionale dei tipi forestali è stata realizzata tramite fotointerpretazione manuale a partire dalle ortofoto digitali del volo IT 2000, mentre dalle ortofoto TERRAITALYTM 2007 RGB sono stati estratti, con tecniche di segmentazione multirisoluzione e classificazione *object-oriented*, i limiti del bosco implementati nella Carta della Copertura del Suolo del Veneto. Essendo state utilizzate tecniche automatiche di aereotriangolazione e stereocorrezione, le immagini realizzate in questi programmi di volo portano con sé un errore di posizionamento minimo (in nessun caso superiore alle dimensioni del pixel), che, tuttavia, non va ignorato. Pertanto ricavare le coordinate planimetriche dei *GCP* da assegnare ai fotogrammi del volo Montagna Veneta del 1991 dalle ortofoto TERRAITALYTM 2007 significa minimizzare gli errori di posizionamento rispetto a questa base informativa. Se, infatti, si raffrontano le immagini ortorettificate a partire da questa base di verità a terra con le ortofoto IT 2000, si osserva, rispetto a queste ultime, una minor precisione, poiché, in linea teorica, gli errori di posizionamento assoluti dei singoli prodotti si sommano.

Di conseguenza, se ci si ponesse l'obiettivo di attuare con la massima precisione il confronto multitemporale con la Carta Regionale dei tipi forestali, la scelta dell'immagine di riferimento come verità a terra, dovrebbe ricadere sulle ortofoto IT 2000. Tuttavia la minimizzazione dei valori di *RMS* in questo caso è ininfluente nella precisione dell'analisi, perché di fatto viene inficiata dalla diversa metodologia adottata per la predisposizione della cartografia tematica

(digitalizzazione a video rispetto alla segmentazione automatica utilizzata per i fotogrammi del volo Montagna Veneta del '91).

Nella procedura di ortorettifica, pertanto, sono state utilizzate le ortofoto TERRAITALY™ 2007, con la finalità di ottenere un prodotto perfettamente comparabile con i limiti del bosco della Carta della Copertura del Suolo del Veneto e con la consapevolezza che il confronto con la Carta Regionale dei tipi forestali produrrà risultati affetti da un'impresione di cui dovrà essere stimata l'entità.

Le singole immagini, contraddistinte da un codice a sei cifre uguale a quello della corrispondente sezione della CTR10, sono state selezionate a coprire l'intera area di studio e successivamente sono state mosaicate senza essere sottoposte a procedure di bilanciamento radiometrico.

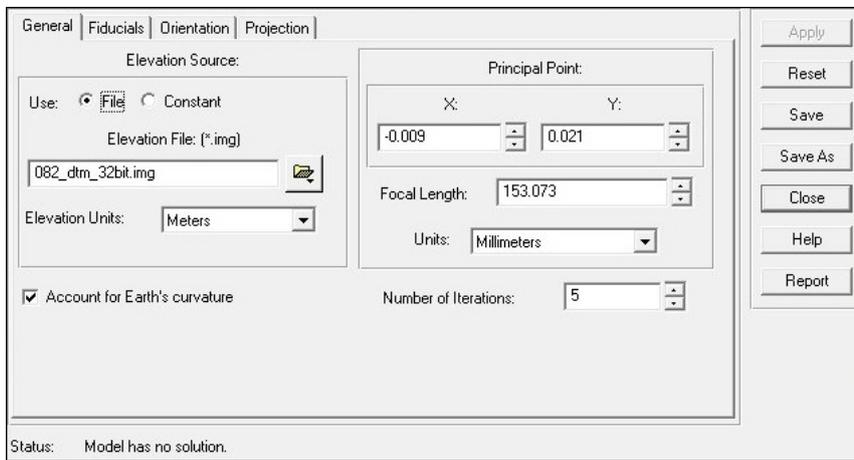


Ortofoto utilizzate		
061140	082070	082140
061150	082080	082150
082010	082090	082160
082020	082100	083010
082030	082110	083050
082040	082120	083090
082050	082130	103030
082060	082140	103040

Figura 37. Mosaico delle ortofoto TERRAITALY 2007 utilizzato per l'orientamento esterno

Prima di sottoporli ad ortorettifica, tutti i fotogrammi sono stati ritagliati utilizzando un *editor* di immagini per eliminare gli elementi contenuti nel *data strip*, che possono rappresentare un elemento di disturbo nella mosaicatura dei fotogrammi.

La procedura di correzione geometrica integrata software ERDAS IMAGINE v.9.3 richiede, nel caso siano disponibili, l'implementazione nella costruzione del modello della camera dei parametri riportati nel certificato di calibrazione. In particolare, in un primo *step*, è stato necessario specificare la posizione del punto principale di autocollimazione e la lunghezza della focale dell'obbiettivo.



In un secondo *step* sono state definite le dimensioni fisiche della fotografia attraverso la posizione dei punti fiduciali, che successivamente sono stati collimati a video per individuarne le rispettive coordinate matriciali sull'immagine. I punti di collimazione, in questo modello definito con estrema precisione grazie alla conoscenza della precisa posizione dei punti fiduciali come riportata nel certificato di calibrazione, consentono di ridurre il numero dei *Check Points* a poche unità o a nessuno, in quanto sono essi stessi sufficienti a validare l'accuratezza del modello.

Il passaggio successivo consiste nell'identificazione dei *Ground Control Points*. L'acquisizione dei *GCP* è una fase critica nella procedura di ortorettifica in quanto condiziona direttamente il risultato della correzione geometrica. A differenza dei modelli basati sulle Funzioni Polinomiali Razionali, note anche come *Rational Functions Models*, l'effetto di un punto palesemente sbagliato, che potrebbe distorcere sensibilmente il risultato della correzione, risulta subito evidente negli scarti residui, poiché il calcolo del modello non si basa solo sui *GCP*, ma anche sui punti fiduciali (Pulighe, 2009). Per ottenere buoni livelli di accuratezza, i *GCP* devono possedere le seguenti caratteristiche:

- Localizzazione visibile: i singoli *GCP* devono essere chiaramente identificabili e collimabili, pertanto la loro scelta è stata condizionata dall'effettiva visibilità su entrambe le immagini.

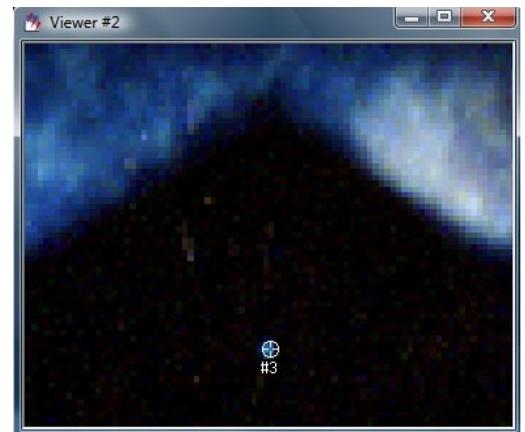
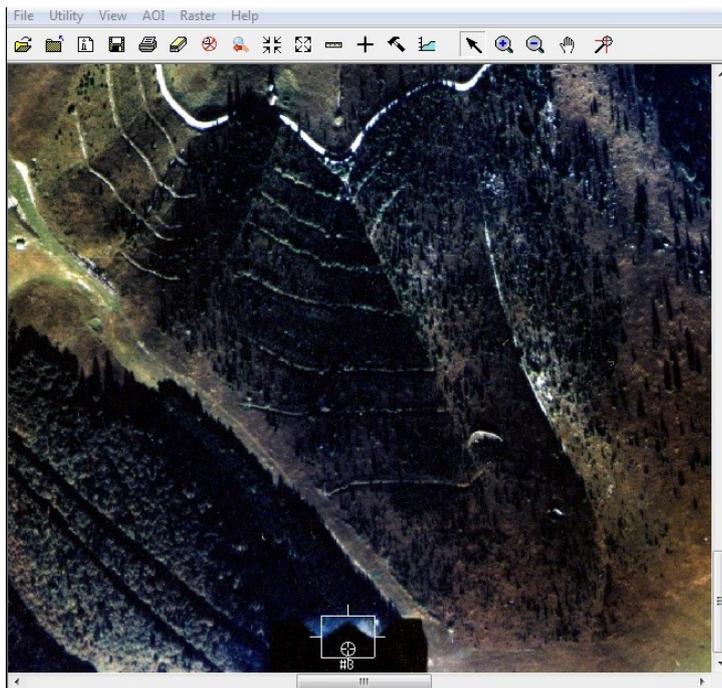
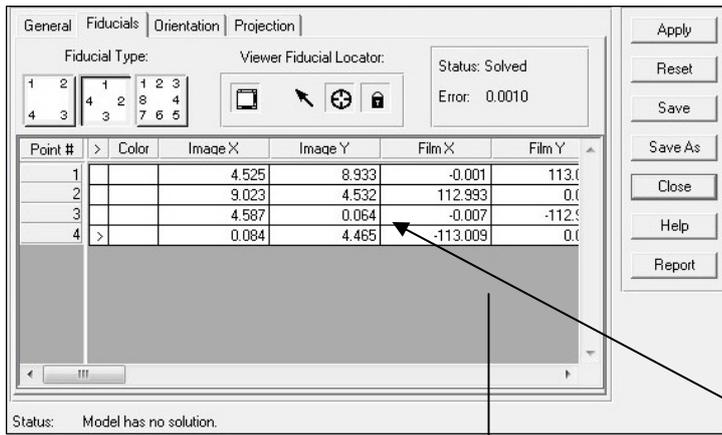
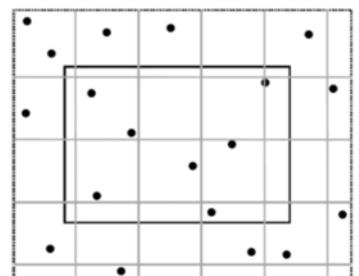
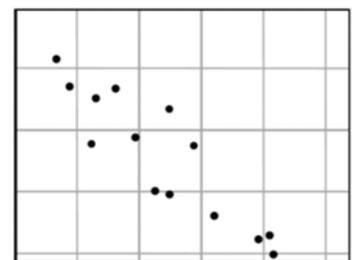


Figura 38. Collimazione dei punti fiduciali

- Distribuzione omogenea: i *GCP* sono stati distribuiti in modo da coprire in modo uniforme le immagini. Si è posta particolare attenzione ad acquisirne alcuni lungo i bordi e in corrispondenza degli angoli dei fotogrammi, essendo queste le parti maggiormente soggette a deformazioni. (Cilloccu et al., 2009).
- Numerosità: il numero consigliato di *GCP* varia in relazione alla risoluzione geometrica dell'immagine e al modello utilizzato per la correzione. Nel caso specifico sono stati acquisiti tra i 10 e i 15 *GCP* per immagine. Oltre questo numero non si sono rilevati significativi miglioramenti nella precisione del modello.



Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

- Accuratezza: i singoli *GCP* sono stati identificati ad un livello di *zoom* molto spinto (fino a rendere visibili i singoli pixel) in corrispondenza di punti facilmente collimabili, quali massi erratici, spigoli di edifici, incroci di strade.

Adottando questa procedura si sono ottenuti valori di residuo totale nel 90% dei fotogrammi inferiori a 2.5 m e in tutte le immagini mai superiori a 4 m.

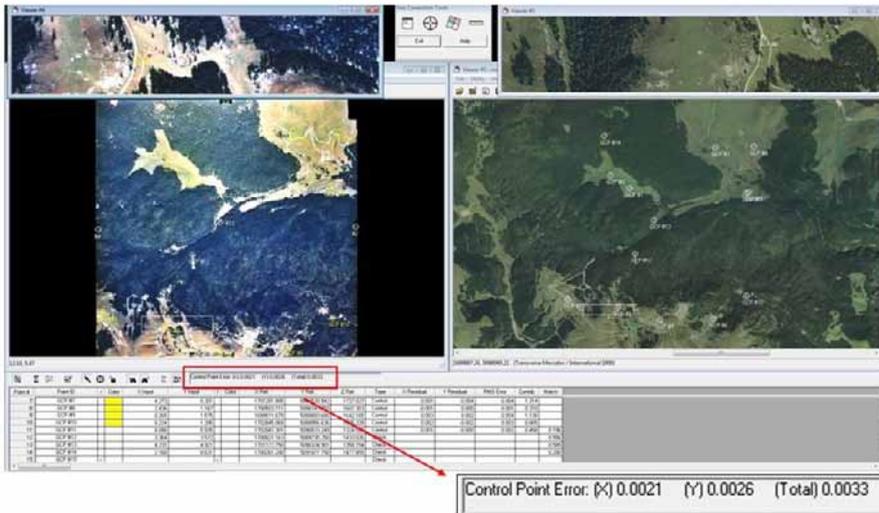


Figura 39. Acquisizione dei GCP ed errore residuo totale

L'ultimo passaggio nella procedura di ortorettifica consiste nel ricampionamento dell'immagine. Nel caso dei fotogrammi trattati è necessario ricalcolare i valori radiometrici dei pixel non solo per le trasformazioni di posizione e geometria che essi vengono ad assumere nell'immagine corretta, ma anche la trasformazione della *GSD* (*Ground Sample Distance*), che, vista la variabilità da immagine ad immagine della dimensione del pixel a terra, è stata uniformata forzando i pixel di tutti i fotogrammi ad una *GSD* pari ad 1 m.

La scelta del metodo di ricampionamento è stata effettuata considerando in particolare gli effetti che l'applicazione della funzione di trasformazione avrebbe prodotto sull'informazione spettrale del singolo pixel ed alle sue ricadute qualitative sulla procedura di segmentazione e classificazione implementata nel software Definiens.

Per ciascuno dei quattro metodi di interpolazione dati e ricampionamento integrati in ERDAS sono stati eseguiti dei test di segmentazione adottando un fattore di scala molto piccolo (applicato successivamente nella generazione degli oggetti del secondo livello), per valutare gli effetti delle diverse funzioni

La configurazione ottimale teorica nella distribuzione dei *GCP* (figura in basso) nella pratica non è sempre ottenibile, in particolare in quei fotogrammi in cui la copertura forestale è prevalente e mancano piccole chiarie con punti riconoscibili nelle due immagini. In questi casi si è acquisito qualche *GCP* anche in aree boscate, utilizzando la funzione di autocollimazione implementata nel software e, successivamente, correggendo la posizione del punto fino ad ottenere il valore di *RMS* totale più basso.

Il residuo totale è calcolato a partire dall'*RMS* dei singoli *GCP*, espresso dalla formula:

$$R_i = \sqrt{XR_i^2 + YR_i^2}$$

dove:

R_i = *RMS* error per il *GCP*_{*i*}

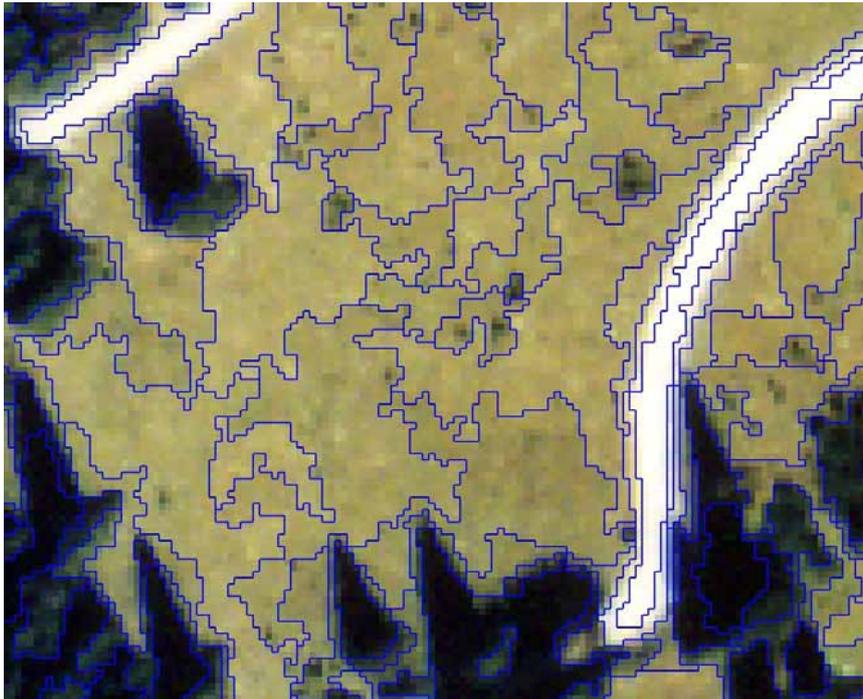
XR_i = il residuo nella direzione X per il *GCP*_{*i*}

YR_i = il residuo nella direzione Y per il *GCP*_{*i*}

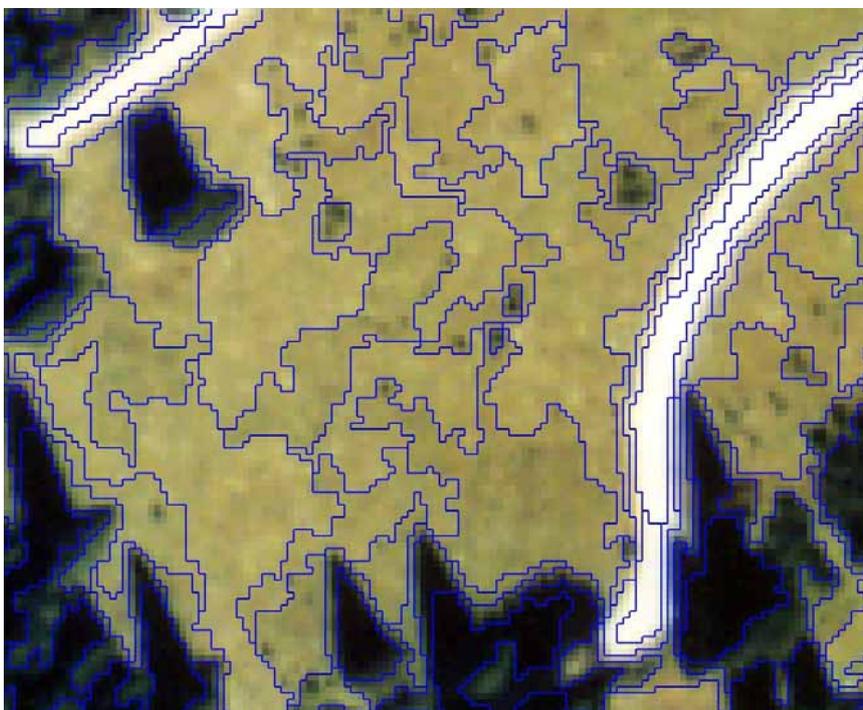
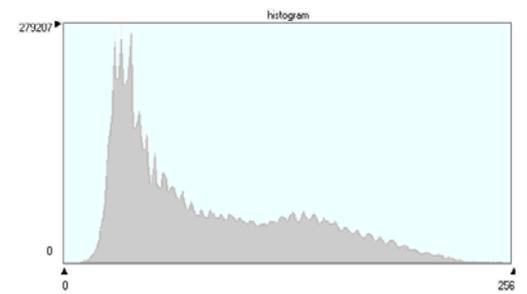
da cui si ottiene il valore di *RMS error* totale per gli *n* *GCP* utilizzati:

$$T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n XR_i^2 + YR_i^2}$$

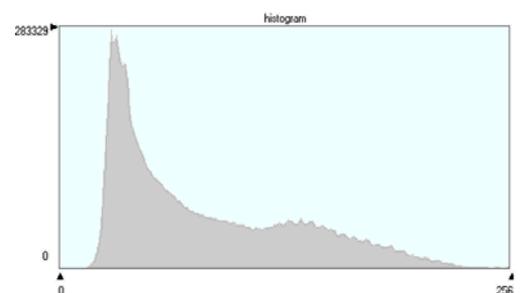
di ricalcolo dei valori spettrali sulla precisione della delimitazione di aree di piccole dimensioni caratterizzate da una differente copertura del suolo.



a) - *nearest neighbor*

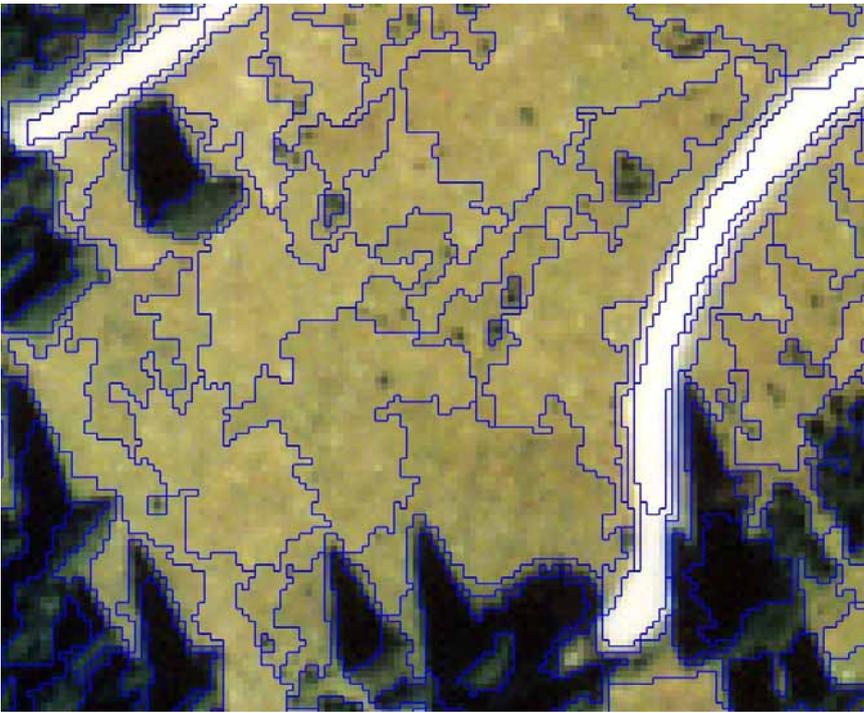


b) - *bilinear interpolation*

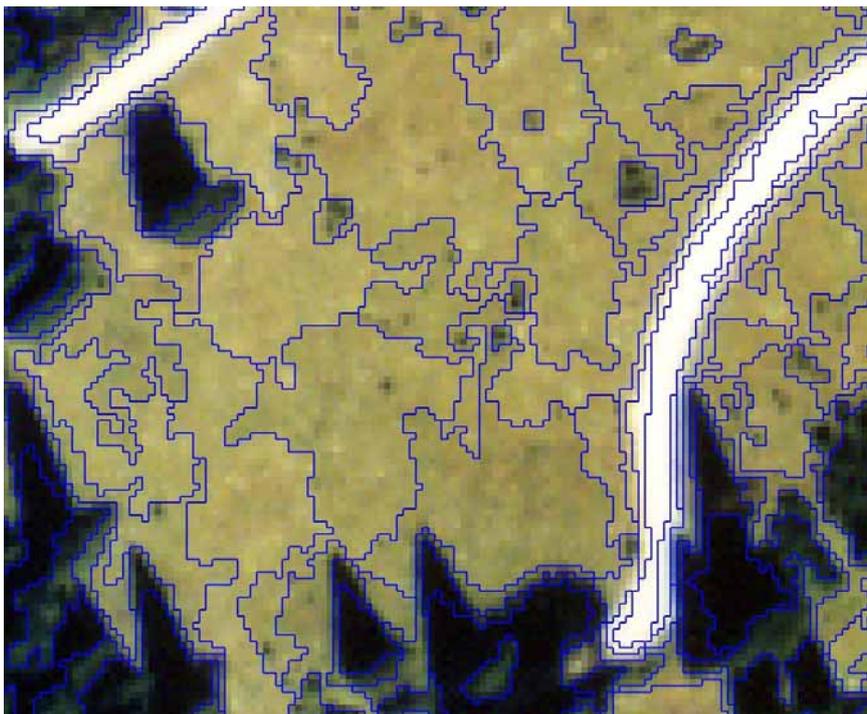
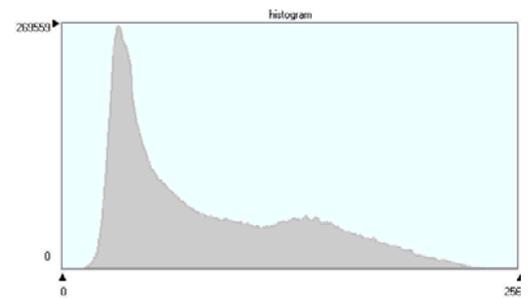


Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali



c) - cubic convolution



d) - bicubic spline interpolation

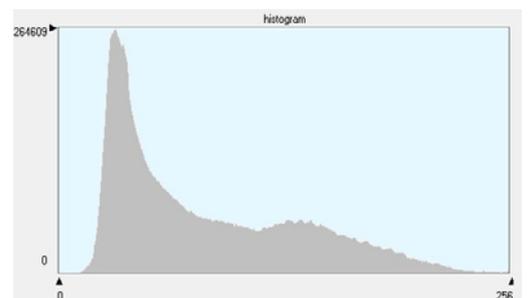


Figura 40 a-b-c-d. Effetti dei diversi metodi di ricampionamento sui risultati della segmentazione e sull'istogramma dell'immagine

Da questi test si è potuto evincere che il ricampionamento che garantisce una più eterogenea (maggior numero di oggetti), ma non sensibilmente più precisa,

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali - Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

delimitazione degli oggetti, è quello eseguito con il metodo *nearest neighbor*. L'applicazione di questo metodo ha il vantaggio di mantenere inalterato il valore dei *DN*, produrre un più marcato effetto di scalinatura dei pixel, che, tuttavia, è stato corretto in fase di post-classificazione (pp.131). Gli altri metodi di campionamento determinano una differente definizione delle geometrie degli oggetti dovuta all'effetto di *smoothing*, che è generato dall'assegnazione di un valore sintetico ai pixel dell'immagine ortorettificata a partire dai valori dei *digital number* di una serie di pixel circostanti a quello da ricampionare. Questi metodi, pertanto, alterano i valori spettrali misurati nell'immagine originale e sono, quindi, consigliabili esclusivamente quando l'immagine viene successivamente destinata alla fotointerpretazione. Gli algoritmi di resampling come *bilinear interpolation*, *cubic convolution*, *spline bicubic interpolation* o altri ancora, implementati in altri software, quali *IDW (Inverse Distance Weighted)*, un metodo di interpolazione multivariata) o ancora il *kriging* (molto usato in geostatistica), effettuando una interpolazione dei valori dei pixel all'intorno di quello in esame, sono invece adatti a dati di tipo continuo: è il caso di dati che descrivono la morfologia del terreno (DTM/DEM) o altre informazioni le cui variazioni si vogliono rappresentare spazialmente in maniera appunto continua.

Tutte le immagini, di conseguenza, sono state ricampionate con il metodo *nearest neighbor*, che è l'unico a mantenere inalterati i valori dei *DN*, quindi a consentire la successiva applicazione di regole di classificazione dell'immagine basate sulle sue proprietà tessiture e a garantire l'integrità della fonte nell'analisi degli attributi statistici spettrali degli oggetti da associare a ciascuna classe di copertura del suolo. In tal modo il dominio di valori complessivo dell'immagine corretta sarà identico a quella di partenza e non ci saranno, dunque, valori interpolati che possano portare ad un deterioramento del dato.

Mentre con il metodo bilineare il valore del pixel viene calcolato considerando i 4 pixel circostanti (una matrice 2X2), il metodo *cubic convolution* utilizza una matrice di interpolazione 4X4. Una variante della *cubic convolution* è la *bicubic spline interpolation*, che utilizza una funzione *spline*. Rispetto alla *bilinear interpolation*, gli ultimi due metodi consentono di ottenere immagini più contrastate (*sharpened*), ma più sfocate rispetto a *nearest neighbor*. Come evidenziano gli **istogrammi** sopra riportati, tutte queste funzioni di ricampionamento hanno la caratteristica di "smussare" le differenze tra le frequenze dei valori dei *DN* e di eliminare i valori estremi.

Test di classificazione eseguiti sui fotogrammi del volo GAI hanno evidenziato una sensibile variabilità delle prestazioni delle *features* di tessitura basate sulle matrici di co-occorrenza in funzione del metodo di ricampionamento adottato. Il metodo *nearest neighbor* è quello che consente di ottenere i valori più elevati di *separation distance* tra le classi.

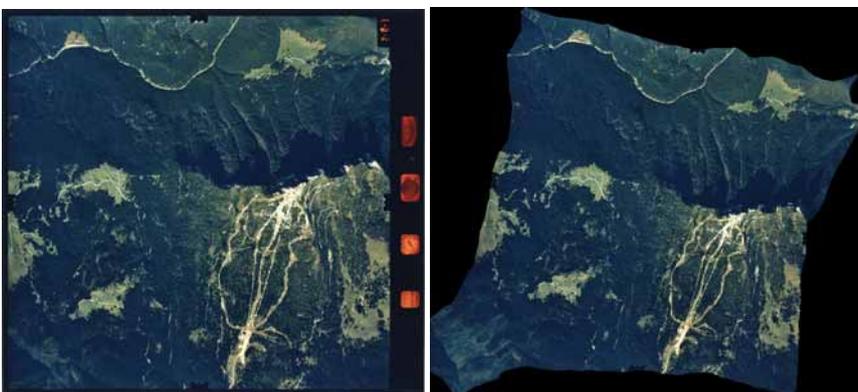


Figura 41. Un fotogramma (6B_132) prima e dopo l'ortorettifica

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

In fase di ricampionamento, per non degradare l'informazione spettrale, ogni fotogramma è stato salvato in formato TIFF (Tagged Image File Format) non compresso.

La buona qualità dell'ortorettifica è stata verificata anche a video, sovrapponendo, con un adeguato grado di trasparenza, alle immagini ortorettificate il mosaico dell'ortofoto TERRAITALY™ 2007. In particolare è stata verificata la precisione della coregistrazione geometrica in corrispondenza dei bordi dei fotogrammi per garantire una corretta giunzione tra fotogrammi adiacenti nella successiva fase di mosaicatura. Nei pochi casi in cui a questo controllo sono emerse incongruenze superiori a 4 m, la procedura di ortorettifica è stata reiterata acquisendo ulteriori *GCP* ed eliminando quelli con residui più elevati, fino a rientrare nelle tolleranze precedentemente definite.

I residui ottenuti rientrano negli standard definiti dal CNIPA per le Carte dell'Uso del suolo delle Regioni, che prevedono tolleranze planimetriche $\leq 3\text{m}$ per le applicazioni cartografiche e $\leq 4\text{m}$ per applicazioni tematiche e di comparazione con altri datasets cartografici.

7.1.2 Mosaicatura

Il processo di mosaicatura ha consentito di ottenere un'unica immagine dalle 64 singole immagini risultanti dall'ortorettifica dei fotogrammi del volo Montagna Veneta del '91.

La creazione di una visione d'insieme dell'intera area di studio comporta evidenti vantaggi per la successiva estrazione dei limiti del bosco, che, in questo modo, può essere eseguita impostando procedure semi-automatiche di classificazione su superfici di molto superiori a quelle del singolo fotogramma. Inoltre, grazie a questa procedura, che è stata sviluppata utilizzando il modulo *MosaicPro* di ERDAS IMAGINE v.9.3, è possibile eliminare parzialmente i bordi dei singoli fotogrammi, ovvero le porzioni dell'immagine maggiormente affette da distorsioni e deformazioni geometriche e aberrazioni cromatiche, che rendono spesso problematica anche la fotointerpretazione manuale. Il prerequisito della sovrapposizione tra immagini contigue è stato garantito su tutto il mosaico con percentuali di *sidelap* del 10-40% e di *overlap* del 20-40%; fa eccezione un'area compresa tra i comuni di Rotzo e Asiago, in corrispondenza della quale non sono disponibili alcuni fotogrammi, che genera una lacuna nell'ortofoto finale di circa 8 km².

Il primo fondamentale passaggio della procedura consiste, pertanto, nell'individuazione delle linee di giunzione tra i fotogrammi, che di fatto individuano per ciascuna immagine l'area utile che concorre alla composizione dell'ortofoto finale.

Le *seamlines* possono essere definite manualmente o essere generate automaticamente secondo tre differenti modalità:

- *most nadir*: le *seamlines* vengono generate in modo da ottenere per ciascun pixel dell'area di sovrapposizione la minima distanza dal centro nadirale dei fotogrammi;
- *geometry-based*: nel caso di mosaicatura di sue sole immagini, la *seamline* divide la area di sovrapposizione in due parti uguali;
- *overlay-based*: questa opzione consente di basare la generazione della *seamline* direttamente sull'intera superficie dell'immagine selezionata al livello superiore; l'area di sovrapposizione dell'immagine sottoposta viene esclusa dalla mosaicatura.

Ogni fotogramma del volo "Montagna Veneta 1991-92" copre una superficie territoriale di circa 16 Km².

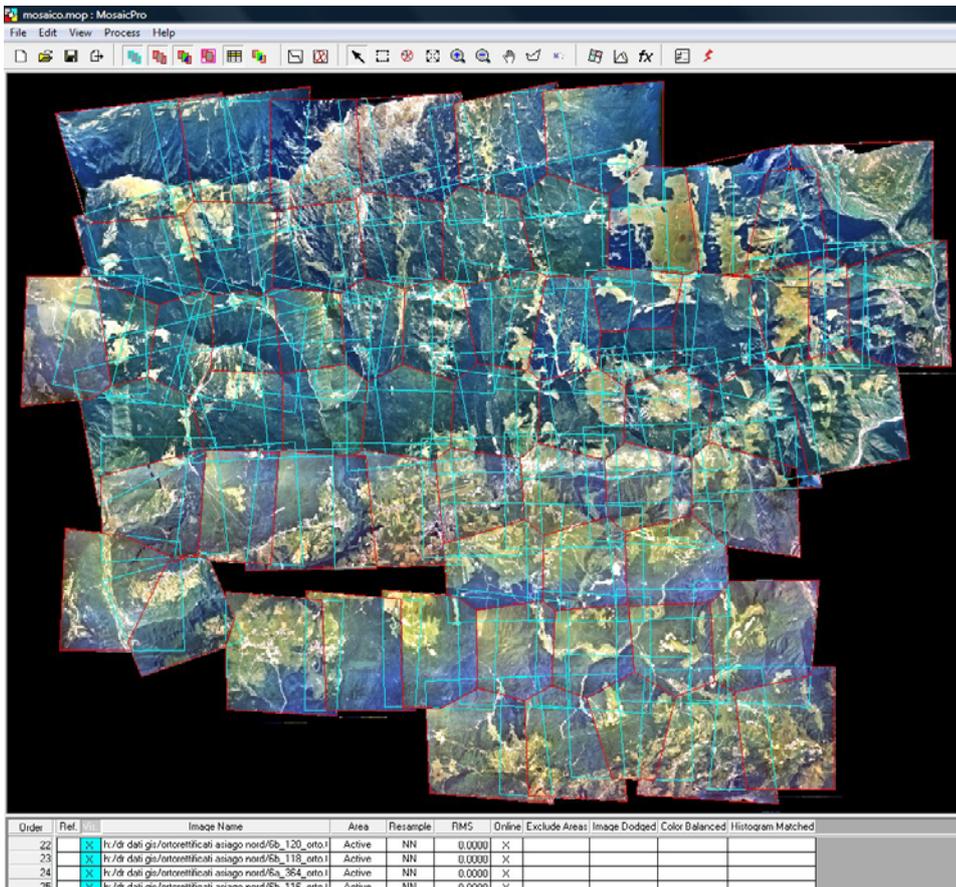


Figura 42. Definizione delle seamlines in MosaicPro di ERDAS

Esclusa a priori la modalità di generazione *overlay-based*, che non consente di eliminare la porzione marginale dei fotogrammi, è stato adottato il metodo *most nadir*, in quanto la modalità *geometry-based*, applicata ad un elevato numero di fotogrammi non disposti sulla medesima strisciata, produce geometrie irregolari ed angoli acuti che interrompono l'uniformità delle giunzioni nell'immagine mosaicata. Il metodo *most nadir*, inoltre, si è mostrato indicato per congiungere regioni con copertura del suolo omogenea, come zone erbose e soprassuoli forestali. La tecnica di *weighted seamline generation* è, invece, consigliabile qualora ci si ponga l'obiettivo di limitare la visibilità delle *seamlines* in aree urbanizzate o comunque in territori caratterizzati da una forte frammentazione.

In alcuni casi, laddove l'area di sovrapposizione tra due fotogrammi risultava molto ristretta, il metodo *most nadir* ha prodotto delle lacune nella mosaicazione. E' stato, pertanto, necessario correggere manualmente queste situazioni esportando le *seamlines* in formato *shape*, per editarle in ambiente ArcGIS. Il vettoriale corretto, successivamente, è stato importato nuovamente in *MosaicPro*.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

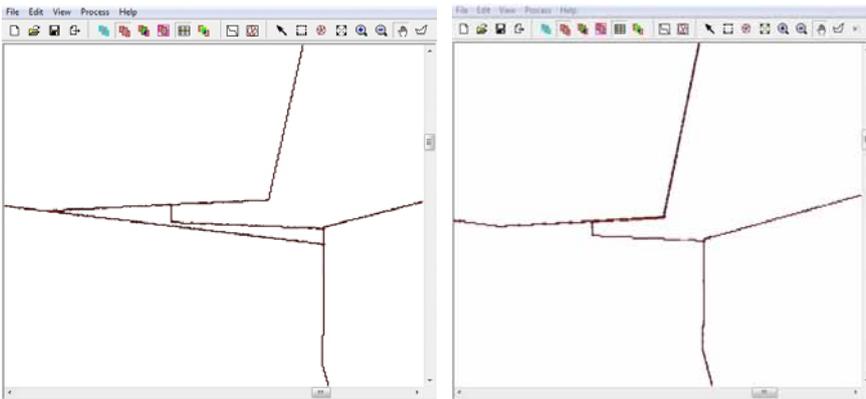


Figura 43. Correzione manuale delle seamlines

Nella più semplice delle ipotesi la mosaicatura si concretizza nella giunzione sequenziale di più fotogrammi senza alcuna correzione radiometrica. Procedendo in questo modo, tuttavia, si ottengono delle discontinuità di colore, luminosità e contrasto lungo le linee di passaggio tra un'immagine e quella contigua dovute al diverso angolo di riflessione dei raggi solari delle superfici omologhe dei due fotogrammi rispetto al centro della presa.

In linea teorica i processi che comportano una rielaborazione radiometrica delle immagini non sono consigliabili se queste devono essere successivamente sottoposte a classificazione ed, infatti, in generale la procedura più corretta è quella che prevede la classificazione delle singole immagini e la successiva mosaicatura delle classificazioni ottenute (Chirici, Corona, 2006).

Questo principio vale sicuramente per immagini multispettrali che non risentono delle problematiche (analizzate nel dettaglio nel capitolo successivo) da cui sono affette queste immagini aerofotogrammetriche, pertanto la classificazione per singolo fotogramma non necessariamente produrrebbe risultati più accurati e nel contempo, considerato l'elevato numero di immagini da trattare, dilaterrebbe notevolmente i tempi di elaborazione.

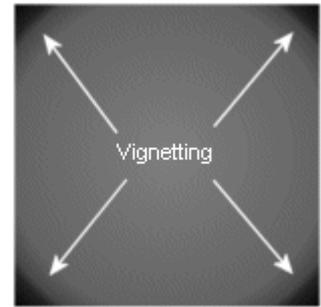
Si è cercato, pertanto, di individuare quelle funzioni di correzione radiometrica implementate nel modulo *MosaicPro* di ERDAS IMAGINE che garantissero i migliori risultati di correzione dei valori dei *DN* nelle aree di sovrapposizione, minimizzando il gradino radiometrico tra i fotogrammi. Allo scopo state prese in considerazione le tre opzioni di *color correction* presenti nel software:

- *image dodging*
- *color balancing*
- *histogram matching*.

La funzione di *image dodging* applica un filtro che appiana leggeri squilibri nella luminosità e può risultare utile per ridurre la “vignettatura” causata da imperfezioni nell’ottica dell’obiettivo. Questo filtro utilizza una tecnica di analisi convolutiva (normalmente viene computato un pixel su tre, ma è possibile impostare un’analisi più o meno approfondita) su di una griglia la cui ampiezza è definita dall’utente (di *default* 10 pixel) e de-enfatizza le frequenze basse, come accade nell’applicazione dei filtri *high pass* (Sun, Zhang, 2008). Il risultato di questa operazione è quello di ridurre le variazioni di luminosità rispetto alla media della singola cella. L’utilizzo di questa funzione produce una sensibile riduzione delle discontinuità di luminosità, ma introduce anche un appiattimento dei contrasti che determina la perdita di molti dettagli. Di conseguenza, per evitare il deterioramento radiometrico dell’intera immagine, si preferito non applicare questo filtro, compensando in parte le discontinuità della *brightness* con utilizzando la funzione di *color balancing* con metodo esponenziale, che consente di ridurre le differenze di luminosità secondo gradienti che presentano un andamento non uniforme dal centro dell’immagine ai lati.

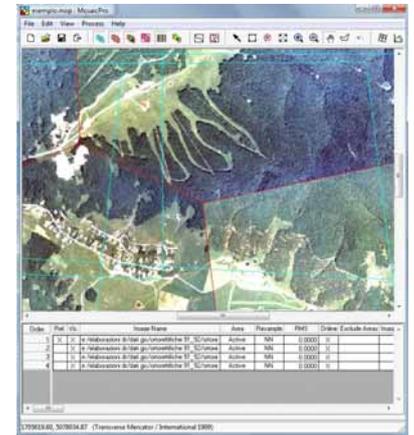
Nel miglioramento della qualità del mosaico determinante è stata l’implementazione nella procedura di *color correction* della funzione di *histogram matching* ovvero della modifica degli istogrammi delle immagini, che può essere eseguita manualmente per ciascuna immagine o in modo automatico. L’obiettivo dell’applicazione di questa procedura, che prevede il ricalcolo dei valori di *DN*, è stato quello di avvicinare le risposte radiometriche delle diverse immagini per rendere meno percettibile il “gradino” lungo le fasce di sovrapposizione e di garantire una maggiore univocità cromatica, che successivamente consentisse di utilizzare l’informazione spettrale nell’estrazione semi-automatica delle classi di uso del suolo. La modifica degli istogrammi è stata eseguita attraverso un processo automatico che utilizza come riferimento i valori di *digital number* di un’immagine *master*. Come *master* è stato selezionato il fotogramma n.49 della strisciata 2a, in quanto presenta una ripartizione dei tipi di copertura del suolo ritenuta rappresentativa per l’intera area di studio e, più in generale, un bilanciamento cromatico ideale che si è voluto replicare su tutto il mosaico. Il nuovo valore dei pixel è stato calcolato secondo l’equazione:

$$X_c = (X - M_s) \frac{SD_m}{SD_s} + M_m$$



La vignettatura indica la graduale riduzione della luminosità dell’immagine alla periferia rispetto al centro.

dove X_c è il valore del pixel dell'immagine da mosaicare (denominata *slave*) dopo la normalizzazione ed X quello prima della normalizzazione, M_s e M_m le medie dei valori dei pixel rispettivamente dell'immagine *slave* e dell'immagine *master*, SD_m e SD_s la deviazione standard dei valori di DV dei pixel dell'immagine *master* e *slave* (Chirici, 2001).



Zona di unione dei fotogrammi:

- 1A_78
- 1A_80
- 2A_49
- 2A_51



Figura 44a-b. Effetti della procedura di color correction: (a) iniziale, (b) dopo color balancing + histogram matching

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

Tecniche di filtraggio di *smoothing* o di *feathering* lungo una predefinita fascia di sovrapposizione delle immagini, che possono essere utilizzate per rendere più omogeneo e graduale l'accostamento tra le immagini oggetto della mosaicatura, in questa circostanza non sono state applicate, in quanto nei test eseguiti si è notato un ulteriore peggioramento della percezione dei pattern tessiturali in zone (i bordi dei fotogrammi) già fortemente deteriorate.

La procedura è stata eseguita in un unico passaggio ad ottenere l'unione di tutte le ortofoto dell'area, generando un *output* ad 8 bit per canale salvato in formato TIFF non compresso e mantenendo invariata la dimensione del pixel a terra (*Ground Sample Distance*).

7.1.3 *Classificazione object-oriented*

Solo nel corso degli ultimi anni, nel rilevamento delle risorse forestali, i metodi di classificazione semi-automatica stanno trovando effettiva diffusione nella pratica operativa, sostituendo la fotointerpretazione manuale anche nell'elaborazione di immagini telerilevate ad alta risoluzione. Tuttavia da ben più di un decennio sono stati sviluppati e sperimentati diversi approcci metodologici tra loro molto diversificati, che permettono, attraverso analisi logiche con o senza l'ausilio della logica *fuzzy* o delle reti neurali, di derivare l'informazione tematica ricercata con il minimo contributo manuale del fotointerprete.

I motivi di questo *gap* tra progressi della ricerca e trasferimento tecnologico operativo sono da attribuirsi in primo luogo al fatto che l'approccio *pixel-oriented* applicato alla classificazione della complessità strutturale e compositiva degli ambienti naturali e semi-naturali produce *output* finali difficilmente gestibili con i pacchetti *software* di analisi GIS. Questo primo ostacolo è stato superato con l'applicazione di efficaci tecniche di segmentazione delle immagini e successiva classificazione *object-oriented*.

Un ulteriore motivo che ha rallentato il diffondersi di tali tecnologie, in particolare nell'ambito della interpretazione di immagini aerofotogrammetriche, sta nella difficoltà di perfezionare una procedura di classificazione *object-oriented* in grado di generare un prodotto caratterizzato da una buona accuratezza tematica che sia applicabile a foto aeree realizzate con camere fotografiche tradizionali. Il passaggio dalle fotocamere tradizionali alle attuali camere fotogrammetriche digitali non riguarda, infatti, una evoluzione puramente tecnologica, ma segna anche un significativo progresso per quanto riguarda l'univocità cromatica e la conservazione della metricità dell'immagine (Galletto, 2004).

I fattori di deterioramento della qualità del fotogrammi da classificare, non imputabili ad un inappropriato pre-processamento delle immagini, sono molteplici e sono dovuti sia alle caratteristiche degli obiettivi, sia al processo di sviluppo fotografico e ad altri fattori ancora. Nel momento della presa nell'emulsione della pellicola si forma un'immagine latente che costituisce una discretizzazione della realtà sul tessuto irregolare dei granuli di alogenuro d'argento secondo un rapporto di scala che dipende dalla focale dell'obiettivo e dalla distanza della scena dall'obiettivo stesso. L'immagine latente viene

deformata, rispetto a quella che sarebbe una rigorosa prospettiva centrale, dalla distorsione prodotta dall'obiettivo, che è causata anche dalle aberrazioni cromatiche rilevabili ai margini dei fotogrammi. Ulteriori alterazioni dell'immagine latente possono essere indotti da effetti termici o meccanici sulla pellicola negativa prima dello sviluppo. Nel procedimento fotografico tradizionale accade, inoltre, che la radiometria dell'immagine venga alterata dal processo di sviluppo e che le stampe prodotte siano soggette ad alterazioni dovute alla loro conservazione nel tempo.

Pertanto, mentre nell'aerofotogrammetria digitale le immagini vengono codificate direttamente in formato numerico e conservate nel tempo senza alterazioni, il procedimento aerofotogrammetrico tradizionale si caratterizza per la mancanza di corrispondenza tra l'immagine proiettata sul piano focale all'istante della presa e la sua materializzazione sul supporto fotografico (stampa o diapositiva).

Ma altri due passaggi che alterano in modo ancor più significativo la radiometria dell'immagine prima che essa sia sottoposta alla procedura di analisi sono la scansione e l'ortorettifica.

La procedura di scansione adottata dalla Regione del Veneto per l'acquisizione in formato digitale dei fotogrammi del volo 1991-92 REVEN Montagna Veneta e del volo GAI 1954-55 è stata conforme al protocollo definito nel documento *Ortofoto digitali alla scala nominale 1:10.000 - Standard di riferimento*, prodotto dal gruppo di lavoro costituito dall'Istituto Geografico Militare, dall'Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura, dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e dal Centro Interregionale di Coordinamento e Documentazione per le Informazioni Territoriali, approvato dal Comitato tecnico nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali il 31/03/2006. È stato utilizzato, pertanto, uno scanner di tipo fotogrammetrico ad elevata precisione e risoluzione geometrica adatto alla scansione unitaria dell'intero fotogramma. Durante l'acquisizione dell'immagine è stata eseguita una verifica radiometrica (*dodging*), finalizzata a mantenere il più possibile la corrispondenza radiometrica tra l'originale e l'immagine digitale prodotta. I valori radiometrici dell'immagine digitale, tuttavia, vanno ugualmente incontro ad una deviazione dai valori originali a causa del processo di interpolazione dei valori di luminosità che avviene contestualmente alla scansione. Anche il trasferimento del contenuto informativo dei fotogrammi in formato numerico, pertanto, condiziona e modifica ulteriormente la radiometria dell'immagine.

Queste specifiche sono state recentemente aggiornate dal documento approvato l'11 giugno 2009 dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali nelle pubbliche amministrazioni (consultabile sul sito del Centro Nazionale per l'Informatica nella Pubblica Amministrazione - CNIPA: www.gov.cnipa.it).

Un processo che può degradare fortemente la qualità dell'immagine, alterandone la densità, i contrasti e la definizione, secondo un andamento anisotropo e fondamentalmente dipendente dall'orografia del terreno è quello dell'ortorettifica. In corrispondenza di zone caratterizzate da forti acclività, in particolare se localizzate ai margini del fotogramma, la rettifica delle distorsioni geometriche dell'immagine dovute ai rilievi genera drastiche deformazioni dei pixel dovute alla correzione del *relief displacement*. Ne consegue che, mentre da un lato si correggono le distorsioni dovute all'altimetria rendendo l'immagine utilizzabile a fini metrici, dall'altro si introducono forti "stiramenti" dei pixel in corrispondenza di brusche variazioni di quota che la rendono localmente poco leggibile.

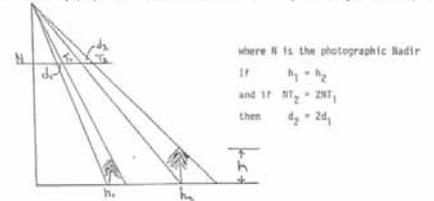


Area interessata da una brusca variazione altimetrica

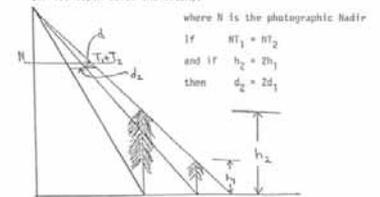
Figura 45. Particolare di un fotogramma prima dell'ortorettifica

Relief Displacement

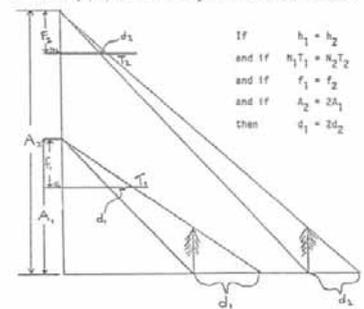
A. directly proportional to the distance of the displaced image from the photo nadir.



B. directly proportional to the height of the displaced image above the datum (or its depth below the datum).



C. Inversely proportional to flight altitude above the datum.



Relief displacement: spostamento, dalla sua posizione reale, subito da un punto per effetto del rilievo (altimetria o altezza del punto rispetto al suolo).



Figura 46. Deformazione introdotta dalla correzione del relief displacement

A questo punto si può comprendere la difficoltà nel predisporre un processo di classificazione semi-automatica che possa ovviare alle numerose cause di deviazione dalla radiometria dell'immagine reale e che consenta ugualmente, superando anche l'ulteriore elemento di confusione costituito dalle differenze tonali e di contrasto tra fotogrammi continui non completamente appianabili attraverso la procedura di correzione radiometrica descritta nel precedente paragrafo, di ottenere risultati in termini di accuratezza tematica paragonabili a quella della fotointerpretazione manuale con tempi di analisi sensibilmente inferiori. Risulta evidente che siffatto processo non può basarsi esclusivamente sulle informazioni spettrali contenute nei pixel (questo vale anche se l'analisi è riferita ai dati statistici dei valori dei *digital number* dei pixel contenuti negli oggetti). Occorre piuttosto un approccio che riesca ad associare ed interpretare diversi elementi di informazione.

Un approccio di questa natura è stato sviluppato ed implementato nel software della Definiens Imaging di Monaco *Definiens Professional*, che simula le modalità in cui gli esseri umani percepiscono ed interpretano le immagini, ovvero in base alle caratteristiche cromatiche (informazione spettrale), alla geometria, alla tessitura, alle relazioni tra oggetti e all'esperienza acquisita (riprodotta attraverso l'introduzione di informazioni derivabili da strati informativi accessori, ancillari a quelle contenute nell'immagine telerilevata oggetto di analisi). Da un punto di vista neurofisiologico il sistema visivo umano

Software più noto con il nome *e-Cognition*, attribuito alle versioni precedenti. In questo lavoro è stato utilizzato *Definiens Professional (v.5)*, ma attualmente sono in commercio anche le versioni 7 e 8 di *Definiens Developer* che includono strumenti di analisi aggiuntivi.

risponde a meccanismi molto complessi, che implicano la trasduzione del segnale luminoso e la simultanea interpretazione dell'immagine attraverso l'estrazione di informazioni parziali relative ai singoli oggetti, l'individuazione della forma/dimensione/relazioni degli oggetti e la costruzione di una rappresentazione sintetica basata su concetti. Per rendere semi-automatico il riconoscimento delle immagini è, pertanto, necessario sviluppare degli algoritmi che sappiano distinguere gli oggetti (segmentazione) e che sappiano assegnare loro un significato (classificazione *object-oriented*) (Signorile, 2005).

Nelle pagine che seguono si approfondiscono le fasi successive della costruzione di questo processo (Figura 47), introducendo soluzioni innovative e calibrate sulle problematiche specifiche delle immagini analizzate, ma in buona parte implementabili in una procedura standardizzata per lo studio delle dinamiche del paesaggio forestale tramite foto aeree, a prescindere dall'epoca e dalle caratteristiche delle immagini trattate.

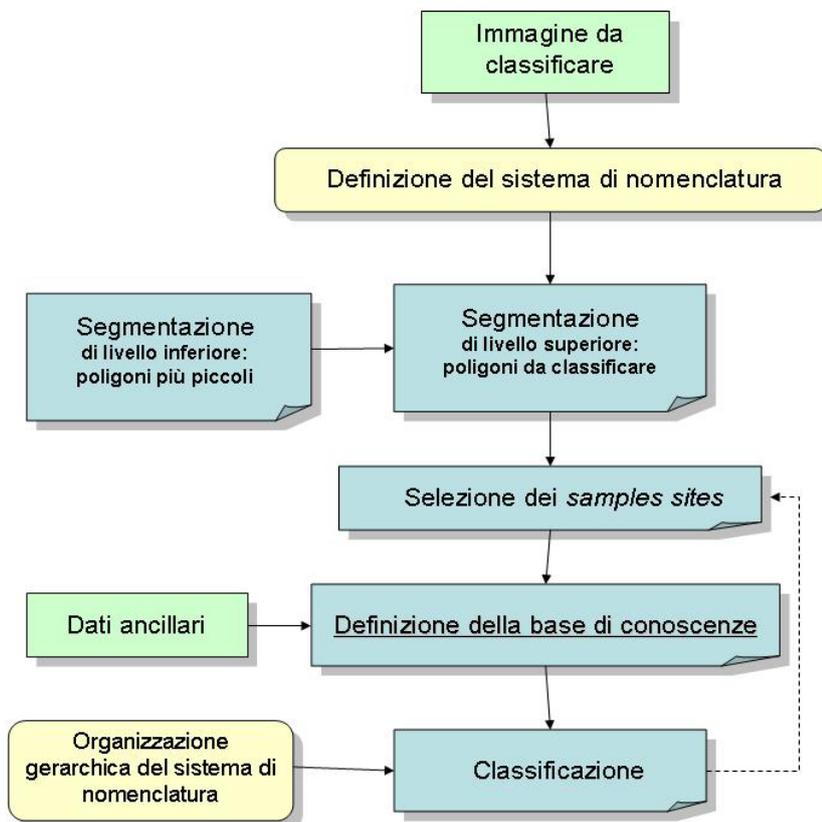


Figura 47. Diagramma di flusso del processo di classificazione dei fotogrammi del volo Montagna Veneta del 1991 implementato in *Definiens Professional*

Informazioni di tipo **geometrico**: sono derivate dalle caratteristiche geometriche dei poligoni, tra cui l'area, il perimetro, la dimensione frattale o altri coefficienti di forma e le informazioni sulla localizzazione spaziale dei poligoni.

Informazioni di tipo **tessiturale**: sono desunte dall'analisi della struttura spaziale interna ai poligoni e possono essere derivate dall'analisi di gruppi di pixel attraverso finestre mobili e l'applicazione di differenti algoritmi.

Segmentazione

Il processo di segmentazione può considerarsi a tutti gli effetti una pre-classificazione dell'immagine generata in base alle caratteristiche di omogeneità spettrale della stessa. La procedura implementata nel software della Definiens Imaging è di tipo *bottom up*: prevede l'aggregazione di pixel in una serie di passaggi successivi fino a quando i poligoni generati non hanno le caratteristiche volute dall'operatore. L'aggregazione ha luogo, secondo una procedura di *region merging*, a partire da punti di "seme" (*seed pixel*) che il software di segmentazione può scegliere fra i singoli pixel o tra regioni elementari dell'immagine. Per ottenere risultati accettabili bisogna introdurre delle costrizioni al processo di crescita, alcune delle quali molto complesse. In genere i criteri in base ai quali governare il processo di accrescimento sono di tipo locale (intensità, colore, tessitura, ecc.), e di tipo spaziale, ovvero tengono conto della forma della regione (Signorile, 2005; De Giglio, 2008). Queste procedure di *clustering* rispondono al criterio della minimizzazione dell'eterogeneità spettrale di ciascun poligono, calcolata sulla base dei *digital number* dei pixel inclusi, e dell'eterogeneità geometrica dipendente dalla forma dei poligoni generati (Baatz et al., 2001). L'unione delle frazioni segmentate procede fintantoché la minimizzazione dell'eterogeneità non supera una soglia arbitraria definita dall'operatore; a quel punto il processo di accrescimento del poligono si arresta.

Le immagini aerofotogrammetriche a colori reali sono il risultato della composizione di tre bande spettrali (*red, green, blue*), pertanto nel processo di segmentazione l'eterogeneità spettrale di ciascun poligono è calcolata come somma pesata delle deviazioni standard dei valori dei *DN* dei pixel inclusi nel poligono rilevati per ciascuna delle tre bande spettrali.

Il peso attribuito alle bande spettrali è arbitrario e viene stabilito contestualmente agli altri parametri di segmentazione sulla base delle caratteristiche dell'immagine multispettrale e degli oggetti che dovranno essere identificati in ragione della tematizzazione che si vuole ottenere. Nel caso specifico è stato attribuito un peso pari a 1 a tutte e tre le bande spettrali.

I parametri coinvolti nel processo di segmentazione multirisoluzione, che l'utente deve settare, sono tre e sono tra loro interconnessi:

- *scale*
- *shape* (complementare di *color*)
- *compactness* (complementare di *smoothness*).

h_s = eterogeneità spettrale del poligono

$$h_s = \sum_{c=1}^n w_c \sigma_c$$

n = numero di bande spettrali (nei fotogrammi del volo Montagna Veneta del 1991 è uguale a 3);
 w_c = peso attribuito alla c -esima banda spettrale;
 σ_c = deviazione standard dei valori dei *DN* della c -esima banda spettrale all'interno del poligono.

Il primo di questi parametri, il fattore di scala, serve a calibrare la grandezza media dei poligoni generati con la segmentazione e in linea teorica corrisponde al numero minimo di pixel che saranno raggruppati a formare un oggetto. In realtà non sussiste una relazione diretta tra *scale* e numero di pixel contenuti in un oggetto, tuttavia sussiste una dipendenza lineare, stabilito il fattore di scala, tra eterogeneità dell'immagine e dimensione degli oggetti (Navulur, 2007). Ne consegue che, ad un determinato fattore di scala, in una parte di immagine caratterizzata da bassa eterogeneità, come nel caso di un prato, si genereranno oggetti relativamente grandi, mentre dove è presente una bassa omogeneità, come in una foresta, si produrranno oggetti relativamente più piccoli (Mognol, 2006). Il parametro *scale* definisce anche un criterio di rottura. Durante il processo di segmentazione, quando l'algoritmo valuta la possibilità di fondere due oggetti, il fattore di scala quadratico viene confrontato con l'*overall fusion value*, ossia la misura della massima variazione di eterogeneità che si verifica quando due oggetti vengono fusi in uno unico: se questo valore è superiore al quadrato dello *scale*, i due oggetti rimangono separati ed il processo di segmentazione si arresta.

L' *overall fusion value* è determinato dagli altri parametri di segmentazione, in quanto risulta:

$$f = w_f \Delta h_s + (1 - w_f) \Delta h_g$$

dove w_f è il peso attribuito all'importanza relativa dell'eterogeneità spettrale rispetto all'eterogeneità geometrica (Chirici, Corona, 2005). Questo peso viene determinato dal parametro *shape* che può variare da 0 a 1: per *shape* = 1 (*color*=0) viene considerata solo l'eterogeneità geometrica; per *shape* = 0 (*color*=1) viene considerata solo l'eterogeneità spettrale.

La differenza di eterogeneità geometrica tra il poligono potenzialmente fuso e i due poligoni originari a sua volta è data da:

$$\Delta h_g = w_g \Delta h_{g_compactness} + (1 - w_g) \Delta h_{g_smoothness}$$

Dove w_g è il peso attribuito all'importanza relativa del fattore di compattezza (*compactness*) rispetto al fattore frattale (*smoothness*). Anche in questo caso *smoothness* può variare da 0 a 1: per *smoothness* pari a 1 (*compactness*=0) viene considerato solo il fattore frattale; per *smoothness* pari a 0 (*compactness*=1) viene considerato solo il fattore di compattezza.

Il **fattore frattale** o *smoothness* ($h_{g_smoothness}$) definisce la complessità del perimetro del poligono in relazione alla sua area:

$$h_{g_smoothness} = \frac{l}{\sqrt{n}}$$

n_{pixel} = numero di pixel di cui è costituito il poligono;
 l = lunghezza del perimetro del poligono.

Il **fattore di compattezza** o *compactness* ($h_{g_compactness}$) definisce il rapporto tra gli assi del poligono:

$$h_{g_compactness} = \frac{l}{b}$$

l = lunghezza del lato minore del più piccolo rettangolo in cui è inscrivibile il poligono.

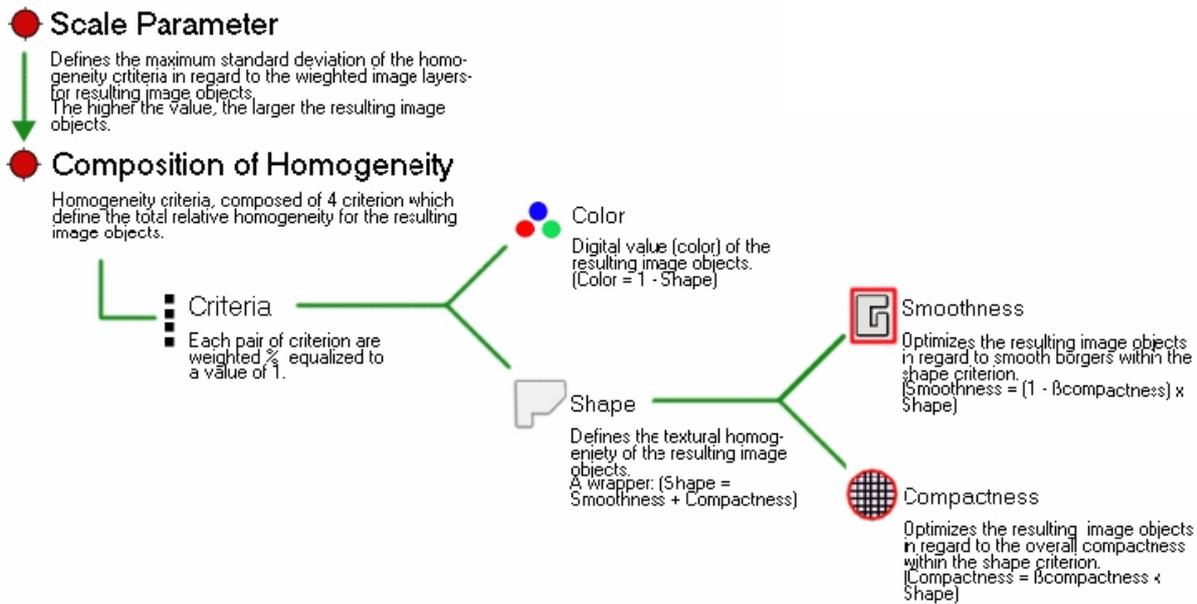


Figura 48. Relazioni tra i parametri coinvolti nella segmentazione multirisoluzione

Il peso da attribuire ai parametri che entrano nel calcolo del criterio di omogeneità e, pertanto, altrettanto importante, per ottenere una buona segmentazione, della scelta del fattore di scala. Attribuendo un elevato peso allo *shape*, si attribuisce maggiore importanza alla componente geometrica che può essere controllata calibrando opportunamente *compactness* e *smoothness*. Tuttavia va ricordato che quella spettrale è l'informazione primaria contenuta in un'immagine, di conseguenza attribuendo valori bassi al parametro *color*, si riduce la qualità dei risultati della segmentazione.

Ottenere una buona segmentazione è molto importante per estrarre correttamente informazioni tematiche da un'immagine, pur tuttavia non esiste una procedura standardizzata per la scelta dei parametri di segmentazione e il software non fornisce strumenti per valutarne a posteriori la qualità dei risultati. Alcuni Autori propongono un metodo di valutazione basato sul confronto tra poligoni campione digitalizzati manualmente e gli oggetti risultanti da diverse segmentazioni, procedendo poi, attraverso un'analisi multicriteriale, a determinare i parametri che hanno generato la segmentazione migliore (Gennaretti et al., 2009). L'applicazione di questo metodo non sembra, tuttavia, fornire indicazioni rigorose utili a determinare i parametri più idonei alla segmentazione di superfici boscate, in particolare laddove la copertura forestale è rada ed il passaggio ad altre classi di uso del suolo appare sfumato, in quanto la digitalizzazione manuale del limite del bosco sarebbe pur sempre il risultato di un'interpretazione soggettiva. Si può concludere, pertanto, che nel caso

specifico non è possibile sviluppare un metodo univoco per valutare la qualità della segmentazione. Il criterio seguito per generare il primo livello di segmentazione, di conseguenza, si è basato su una valutazione visuale dei risultati, considerando, nella scelta dei parametri guida, le caratteristiche spettrali e geometriche dell'immagine, il sistema di nomenclatura da adottare nella classificazione e le specifiche scelte per distinguere il bosco dalle altre classi di copertura del suolo. Su un'area test sufficientemente ampia da rappresentare la variabilità tematica dell'intera immagine la segmentazione è stata ripetuta più volte, con un metodo reiterativo per prova ed errore, variando di volta in volta la combinazione dei parametri guida. Il risultato ritenuto adeguato ad un'ideale classificazione dell'immagine è quello che ha consentito di evitare un'eccessiva frammentazione e che nel contempo ha prodotto un dettaglio sufficiente a differenziare il bosco dai prati e dai pascoli in base al grado di copertura ed all'estensione del singolo oggetto.

Si riportano alcuni test di segmentazione eseguiti su un'area di 1000x1000 m.

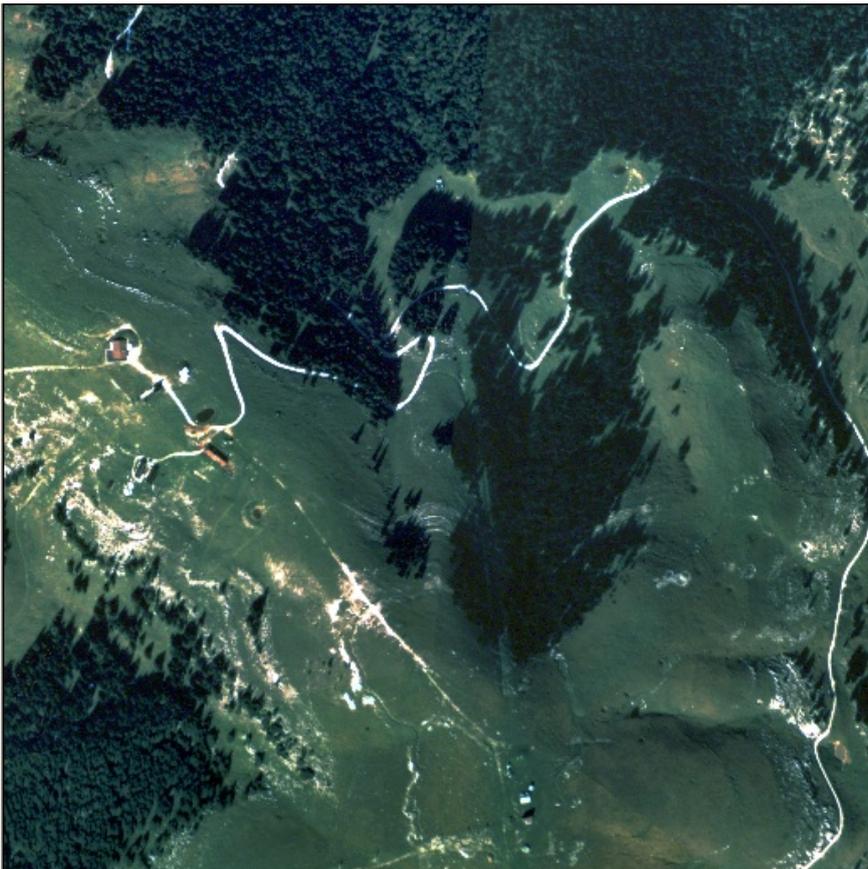


Immagine non segmentata

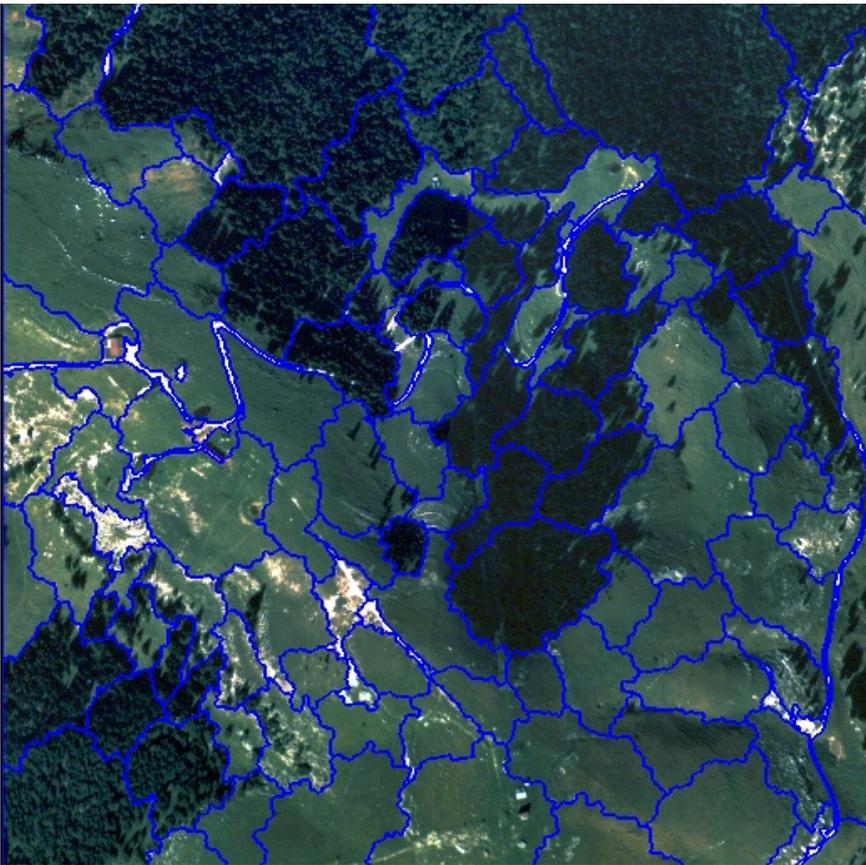


Immagine segmentata utilizzando i seguenti parametri:

scale = 100
shape = 0.7
compactness = 0.5.

L'elevato peso assegnato al parametro *shape*, che tende a minimizzare l'eterogeneità geometrica, congiuntamente al fattore di scala assegnato, determina in numerosi poligoni l'instabilità dei bordi.

N. di oggetti generati = 131.

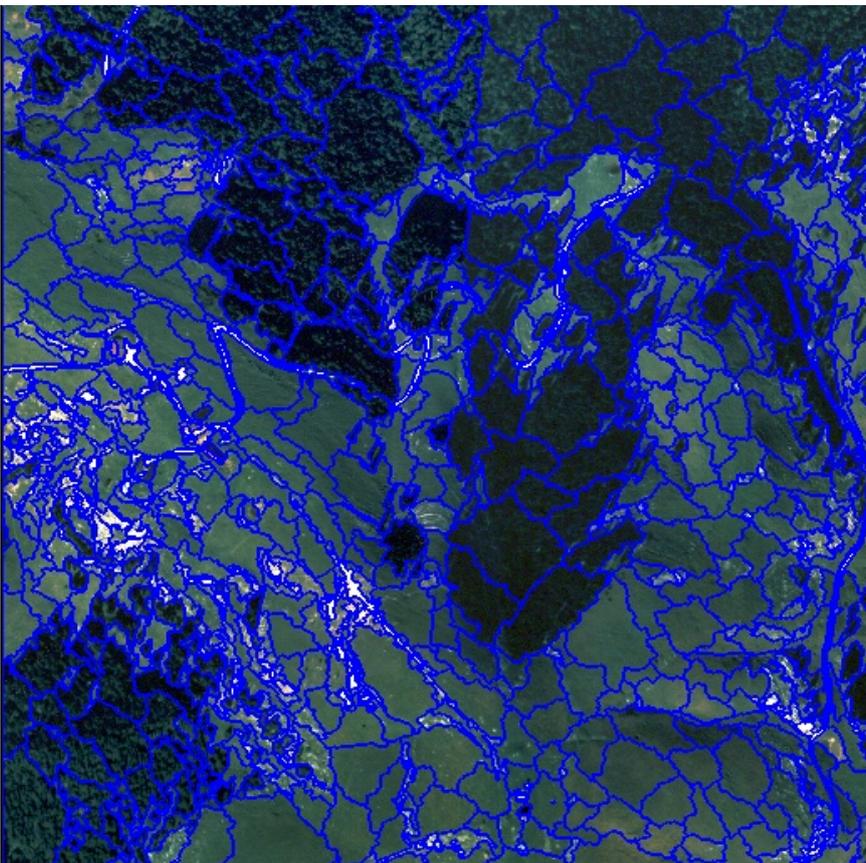


Immagine segmentata utilizzando i seguenti parametri:

scale = 40
shape = 0.3
compactness = 0.5.

Il risultato caratterizza fedelmente le differenti classi di uso del suolo, ma si è prodotta un'eccessiva frammentazione.

N. di oggetti generati = 942.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

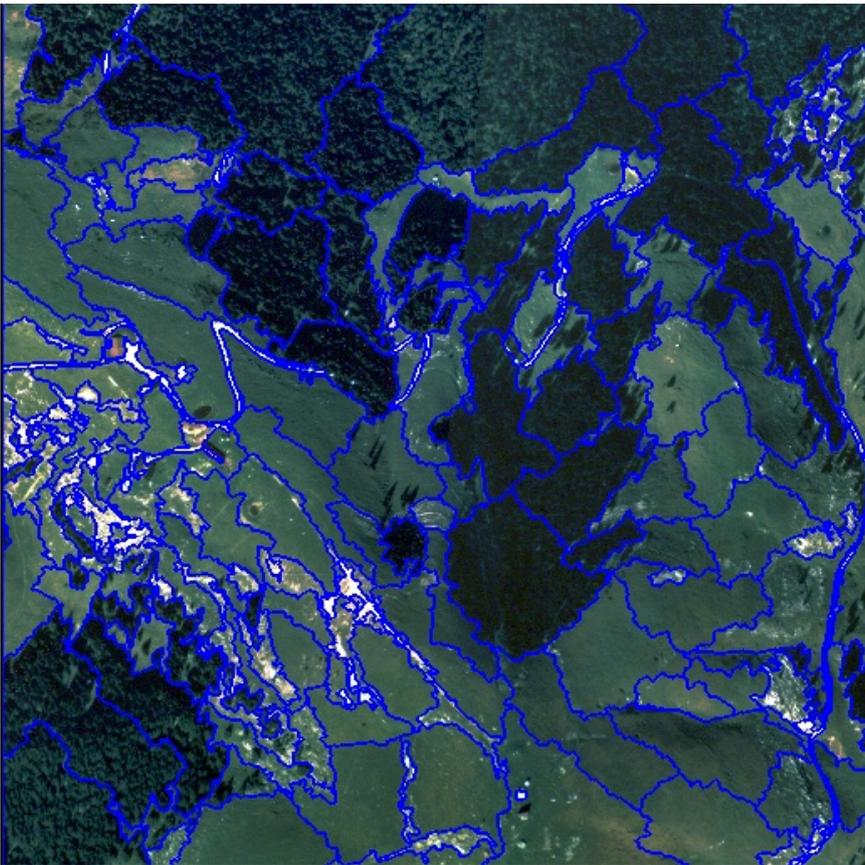


Figura 49a-b-c-d. Test di segmentazione

Segmentazione eseguita utilizzando:

scale = 100

shape = 0.3

compactness = 0.5.

Questi sono i parametri adottati per segmentare l'intera immagine. Hanno generato poligoni sufficientemente grandi e coerenti con il sistema di classificazione prescelto.

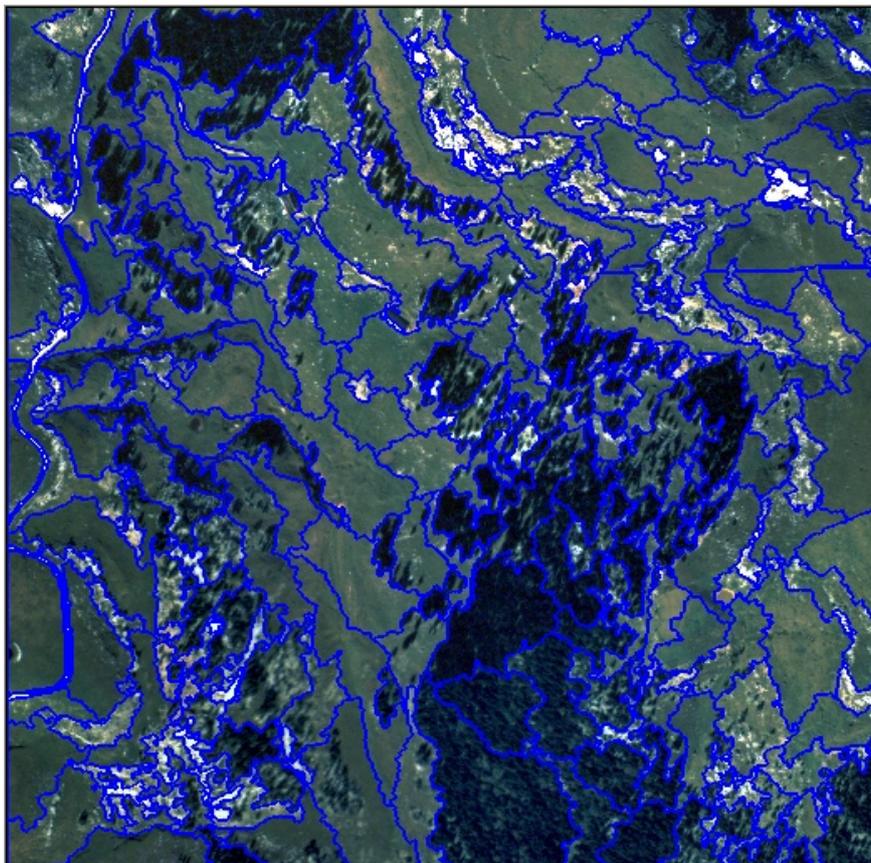
N. di oggetti generati = 142.

Successivamente è stato generato un secondo livello di segmentazione gerarchicamente inferiore al primo, non tanto allo scopo di classificare l'immagine con un livello tematico maggiore, come avviene tipicamente quando si adotta una strategia di classificazione *in serie*, quanto piuttosto per utilizzare le informazioni derivabili da una più dettagliata definizione della variabilità spettrale dell'immagine e da un livello di scala inferiore come ulteriori elementi per affinare la classificazione dei poligoni generati al primo livello di segmentazione, secondo la metodologia che si descriverà nel dettaglio nelle pagine seguenti. In questo secondo livello di segmentazione è stato adottato un fattore di scala pari a 20, sufficiente ad identificare le singole chiome arboree, ed uno *shape* = 0.1, per massimizzare l'importanza dell'eterogeneità spettrale nella determinazione degli oggetti, al fine di evidenziare le variazioni tessuturali all'interno dell'immagine.

Con l'approccio **in serie** si sviluppa un processo di classificazione dal generico allo specifico: l'immagine viene classificata con un dettaglio tematico crescente in seguito ad una segmentazione post-classificazione di livello inferiore.

Si differenzia dall'approccio **in parallelo**, in cui tutte le classi vengono definite contemporaneamente e la classificazione avviene in un unico processo.

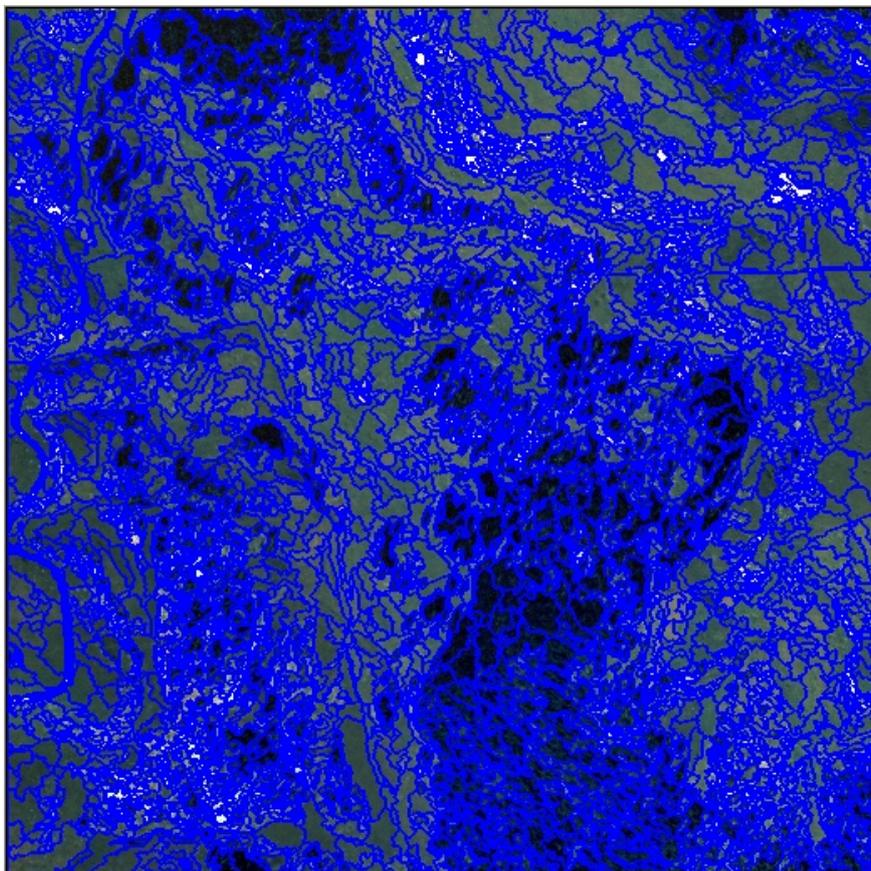
Le informazioni tessuturali possono essere derivate dall'analisi della struttura interna dei poligoni (attraverso un processo che prende in esame i singoli pixel contenuti nei poligoni) o dall'analisi dei poligoni derivanti da un processo di segmentazione di livello inferiore (Chirici, Corona, 2006).



Segmentazione di primo livello
(definisce gli oggetti da classificare).
Applicazione ad una scena di
1000x1000 m caratterizzata da una
copertura forestale frammentata, con
presenza di alberi isolati.

Parametri di segmentazione:
scale = 100
shape = 0.3
compactness = 0.5.

N. di oggetti generati = 258.



Segmentazione di secondo livello (di
ausilio alla classificazione degli
oggetti generati attraverso la
segmentazione di livello superiore).

Parametri di segmentazione:
scale = 20
shape = 0.1
compactness = 0.5.

N. di oggetti generati = 4443.

Figura 50a-b-c. Segmentazione di secondo livello

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali - Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

Eseguendo questo secondo processo di segmentazione, pertanto, sono stati ottenuti due risultati:

- l'estrazione di aree di ridotta dimensione che mostrano una deviazione nei valori di tonalità rispetto ai pixel circostanti;
- la distinzione di oggetti omogenei su piccole superfici (boschi) da oggetti omogenei di dimensioni maggiori (prati), anche quando possiedono caratteristiche spettrali simili (nell'immagine da classificare spesso le distanze spettrali tra prati e boschi non sono elevate).

Operativamente è stato necessario considerare anche l'aspetto dell'ottimizzazione delle risorse hardware, valutando i tempi necessari all'esecuzione dei singoli processi in relazione alle dimensioni dell'immagine da classificare ed ai parametri di segmentazione adottati. Il software Definiens, durante la segmentazione, crea numerosi files temporanei, le cui dimensioni sono linearmente proporzionali al numero di oggetti generati e, pertanto, sono dipendenti da:

- il numero di pixel dell'immagine da segmentare (è dato dal rapporto tra la superficie territoriale coperta dall'immagine ed il quadrato della risoluzione geometrica dell'immagine stessa);
- l'eterogeneità spettrale dell'immagine analizzata
- il numero di livelli di segmentazione e i parametri di segmentazione adottati per ciascun livello (in particolare il fattore di scala).

L'efficienza nella gestione dei files temporanei e la velocità di esecuzione dei singoli processi di analisi da parte del software è dipendente da questi fattori. Inoltre, in relazione alle caratteristiche dell'immagine analizzata ed alla strategia adottata per la sua segmentazione, sono stati individuati dei limiti dimensionali, solo in parte legati alle caratteristiche hardware dell'elaboratore impiegato, oltre i quali il sistema diviene instabile. Blocchi del sistema si sono verificati per elaborazioni avviate su superfici superiori a 15.000 ha. Questi limiti dimensionali si pongono ben al di sotto dell'estensione dell'intero mosaico di fotogrammi, che ricopre una superficie territoriale di circa 57.000 ha, di conseguenza si è reso opportuno suddividere l'area di studio in 9 scene.

I due livelli di segmentazione, utilizzando i parametri definiti in precedenza, sono stati eseguiti singolarmente per ciascuna scena.

Il processo di segmentazione è stato eseguito utilizzando una workstation con processore Intel Core2 Duo E6550, 2 Gb di RAM, 350 Gb di spazio libero su disco e sistema operativo Windows XP Professional.

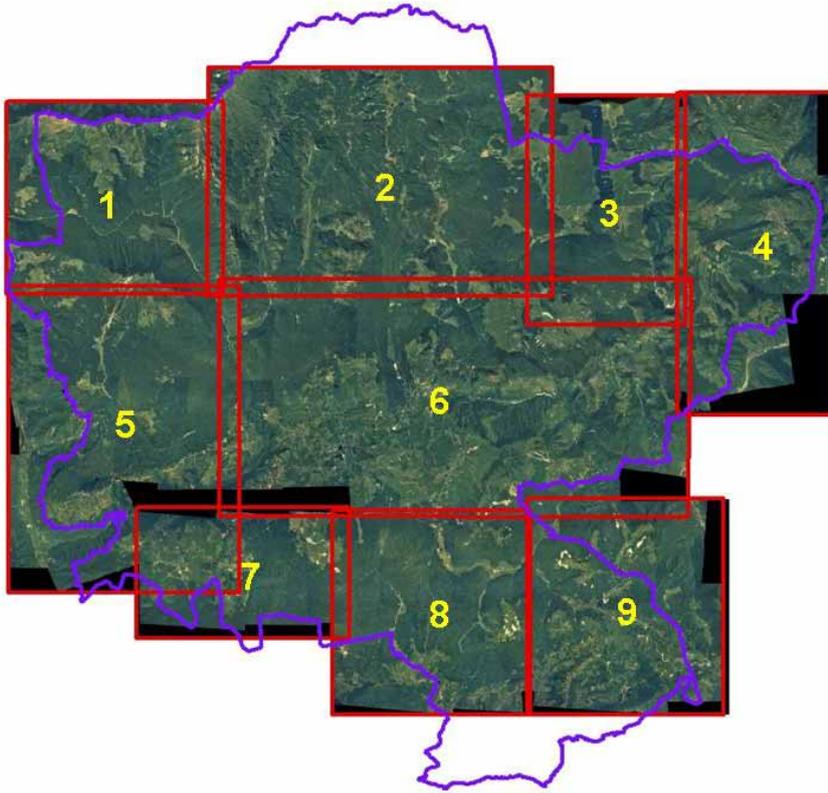


Figura 51. Suddivisione in settori dell'area di studio

Definizione del sistema di nomenclatura

Contestualmente alla selezione dei parametri di segmentazione, è stato definito il numero e la tipologia di classi di uso del suolo.

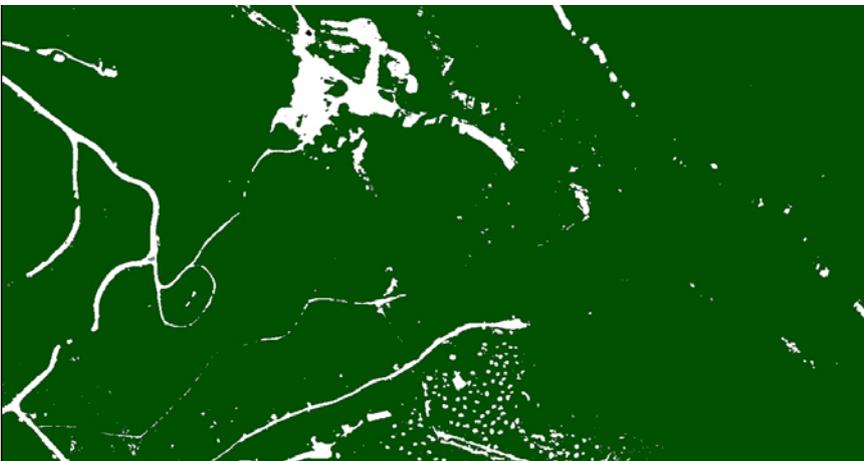
La definizione del sistema di nomenclatura deve essere, in primo luogo, rispondente agli obiettivi della classificazione. Nel caso specifico gli obiettivi consistono nel tematizzare il territorio dell'area di studio con una precisione geometrica comparabile o superiore a quella raggiunta nella *Carta regionale dei tipi forestali* per consentire l'estrazione delle coperture forestali dalle altre classi di uso del suolo. La classificazione di un'immagine telerilevata su base spettrale, tuttavia, ha maggiori probabilità di successo quanto più il numero e la tipologia di classi definite dall'utente trova corrispondenza nelle categorie spettrali che caratterizzano l'immagine stessa. L'adozione di un sistema nomenclaturale molto semplificato che preveda due sole classi, *bosco* e *non bosco*, pur essendo sufficiente agli obiettivi che ci si è prefissati, può generare una classificazione poco stabile se le distanze spettrali all'interno di ciascuna delle due classi sono più significative della distanza tra i *cluster*. In questo caso è opportuno

umentare la complessità del sistema nomenclaturale, adattandolo alle categorie spettrali effettivamente rappresentate.

Per definire il numero di classi minimo in grado di rappresentare la variabilità spettrale si è fatto ricorso a stratificazioni automatiche dell'immagine con numero di classi crescente. L'approccio adottato è quello caratteristico della classificazione *unsupervised*, che prevede la scomposizione dei pixel dell'immagine in un determinato numero, definito arbitrariamente dall'utente, di gruppi (o *cluster*) tali che i pixel appartenenti ad un gruppo siano "più simili", conformemente ad una data misura di similarità, rispetto ai pixel appartenenti ad un altro *cluster*. Gli algoritmi utilizzati per questo tipo di analisi comunemente sono di tipo iterativo, ossia ripetono per un determinato numero di volte il processo di attribuzione dei pixel e di ridefinizione delle caratteristiche dei *cluster*, fintanto che i gruppi risultanti non corrispondano agli aspetti più marcati presenti nell'immagine. La procedura adottata si rifà, pertanto, alla nota tecnica I.S.O.D.A.T.A. (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique A*), imponendo all'algoritmo un numero crescente di classi, per valutare comparativamente a posteriori i risultati.



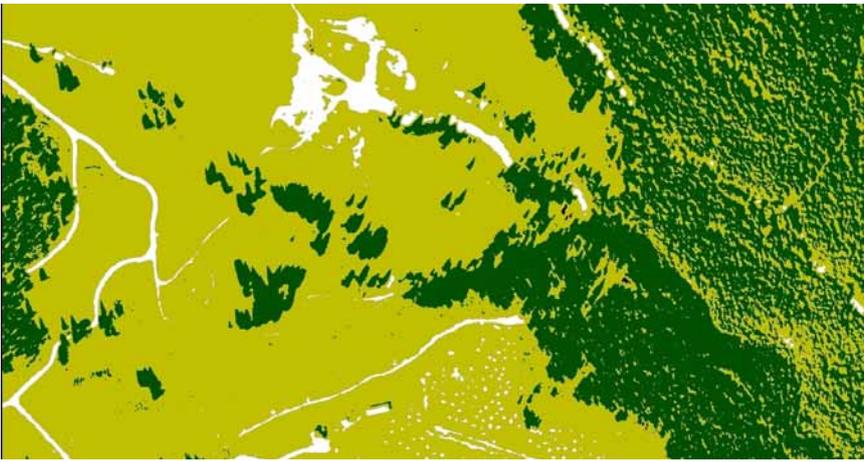
Immagine di partenza



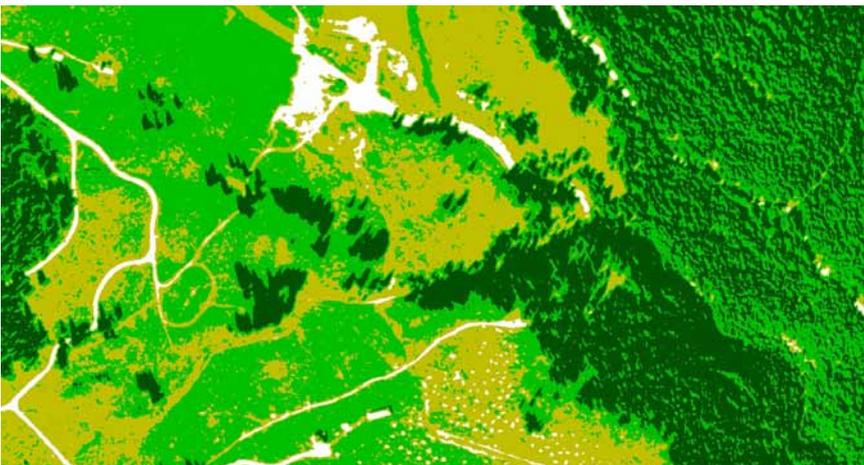
Stratificazione su due classi

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali



Stratificazione su tre classi



Stratificazione su quattro classi

Figura 52a-b-c-d. *Classificazione esplorativa unsupervised*

La classificazione così ottenuta ha consentito di individuare i limiti di interpretazione in funzione della sola informazione spettrale ipotizzando una legenda con complessità crescente. Si può notare come la prima ipotesi, che prevede una stratificazione su due classi, non produca un risultato rispondente all'obiettivo di discriminare il bosco dalle altre classi di copertura del suolo, mentre l'ultima ipotesi (4 classi) produce una categorizzazione che non rispecchia tipi di copertura differenti.

Da questa semplice analisi condotta su un'area test rappresentativa dell'intera immagine, si è optato per un sistema di nomenclatura basato su tre classi corrispondenti a:

- bosco;
- prato o pascolo;
- terreno nudo o area urbanizzata.

Per la classificazione di alcune scene è stata introdotta una quarta classe al solo scopo di "mascherare" i margini neri esterni ai fotogrammi mosaicati.

Questo sistema di nomenclatura si può identificare con quello adottato nell'Inventario Nazionale Forestale e del Carbonio, che prevede le classi:

- bosco
- produttivo non boscato
- improduttivo.

Classificazione object-oriented

Dopo aver definito il sistema di nomenclatura ed eseguiti i due livelli di segmentazione, si è proceduto alla classificazione dei poligoni generati al livello superiore.

Dal punto di vista delle possibili soluzioni operative, si possono considerare due alternative estreme: la fotointerpretazione manuale e la classificazione automatica (*supervised*). Nel primo caso la segmentazione sostituisce la digitalizzazione manuale e il fotointerprete si basa esclusivamente sulla propria capacità di discriminare visivamente le diverse classi del sistema di nomenclatura per assegnare ciascun oggetto alla classe più appropriata. Tale procedura, basandosi esclusivamente sulla valutazione soggettiva dell'operatore, non è ripetibile e non è applicabile, se non con tempi (e costi) insostenibili, su grandi *data sets*. Nel caso della classificazione automatica si definisce una base di conoscenze e si applica un algoritmo che consente di estrarre i tematismi desiderati in modo completamente automatico.

Di fatto questa distinzione è più teorica che effettiva, in quanto nella pratica operativa si ricorre alla classificazione automatica per produrre una base di conoscenze intermedia che il fotointerprete utilizza come "suggerimento" per la tematizzazione definitiva. Questo approccio è stato impiegato anche per la classificazione delle 9 scene in cui è stata suddivisa l'area di studio. La particolare procedura che è stata messa a punto mira a massimizzare la componente automatica del processo di classificazione (questo consente la sua ripetibilità), limitando l'operato del fotointerprete ad una verifica intermedia a campione e ad un controllo finale speditivo.

In generale nell'ambiente Definiens la classificazione avviene applicando ad una serie di attributi un algoritmo di classificazione *k-Nearest Neighbor (k-NN) fuzzy* ed eventualmente creando delle funzioni di appartenenza (*membership functions*) *fuzzy* per determinate categorie da classificare in relazione alle informazioni disponibili.

Il metodo non parametrico *k-NN* è stato utilizzato in diverse applicazioni in campo forestale per spazializzare tramite immagini multispettrali i valori puntuali di variabili rilevate a terra (Chirici, 2001). Il metodo si basa sull'ipotesi che nell'area analizzata la risposta radiometrica dei soprassuoli forestali sia in qualche misura dipendente dalle variabili misurate a terra nell'ambito dei soprassuoli stessi, ma consente di spazializzare dati ambientali anche in assenza di relazioni statisticamente molto significative. I metodi di spazializzazione

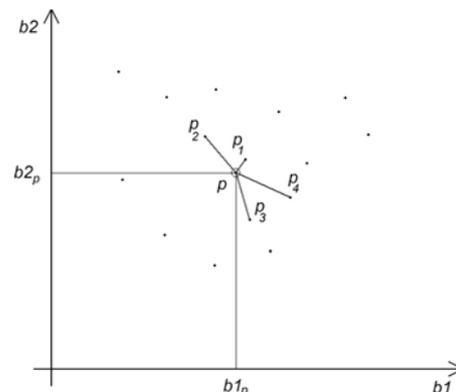
basati sulla teoria geostatistica secondo cui la varianza di una determinata variabile tende ad aumentare tanto più aumenta la distanza geografica dal punto di misurazione (*kriging* o *co-kriging*) sono poco adatti ad applicazioni in campo forestale, in quanto le variabili d'interesse tendono a distribuirsi in modo spazialmente eterogeneo e non secondo gradienti continui (Chirici, Corona, 2006). Inoltre, le tecniche di spazializzazione non parametriche e, nel caso specifico, il *k*-NN si sono dimostrate più indicate rispetto a quelle regressive di tipo parametrico, in quanto sono in grado di produrre stime dell'attributo nei pixel incogniti contenute nell'intervallo di variazione dell'attributo medesimo rilevato nei pixel campione senza richiedere il rispetto di alcun assunto nella distribuzione di questi ultimi. Nel caso della spazializzazione di attributi quantitativi con l'ausilio di immagini multispettrali (in letteratura sono documentate numerose sperimentazioni finalizzate alla spazializzazione della provvigione legnosa), l'algoritmo *k*-NN stima l'attributo per ogni tessera con valore incognito p_o ricercando le *k* tessere p_i più vicine (simili) tra quelle corrispondenti alle unità di rilevamento a terra. Questa operazione richiede il calcolo della distanza tra le tessere con valori noti dell'attributo e ciascuna tessera con valore incognito misurata nello spazio multidimensionale definito dal numero di bande spettrali del sensore utilizzato (o da indici ottenuti per combinazioni tra bande). Per la stima della tessera con valore incognito sono utilizzati i valori dell'attributo m_{p_i} delle *k* tessere più vicine attraverso il calcolo della media M_{p_o} dei *k* valori pesati sull'inverso della distanza misurata nel suddetto spazio multidimensionale, in modo che alle tessere più vicine sia assegnato un peso maggiore:

$$M_{p_o} = \frac{\sum_{i=1}^k w_{p_i p_o} m_{p_i}}{\sum_{i=1}^k w_{p_i p_o}}$$

dove $w_{p_i p_o}$ è il peso attribuito alla tessera con valore noto p_i rispetto alla tessera p_o in funzione della distanza multidimensionale tra le due tessere (Chirici, 2001; Chirici, Corona, 2006; Bestini et al., 2007).

L'implementazione dell'algoritmo *k-nearest neighbor* in ambiente di lavoro Definiens consente di ampliare lo spazio multidimensionale entro il quale l'algoritmo può operare ad un numero di attributi ben più ampio del numero di bande spettrali dell'immagine da analizzare. Virtualmente è possibile generare un numero illimitato di attributi (*features*) dipendenti dalla geometria o dalla

La distanza considerata nel *k*-NN più frequentemente è quella Euclidea. E', tuttavia, possibile sviluppare procedure basate sulla distanza di Mahalanobis o sulla distanza pesata con pesi *fuzzy*.



Esempio di applicazione del metodo *k*-NN ad un ipotetico spazio spettrale con due sole bande.

tessitura degli oggetti, dalle statistiche derivabili dalle loro proprietà spettrali, o derivanti da altri strati informativi accessori (modelli digitali del terreno, mappe tematiche) ed associarli ai poligoni derivati dalla segmentazione nella procedura di classificazione k -NN.

Come si vedrà tra breve, nella sperimentazione in oggetto il numero di attributi è stato limitato a quelli il cui potenziale discriminante in relazione al dettaglio tematico e geometrico prescelto fosse più evidente.

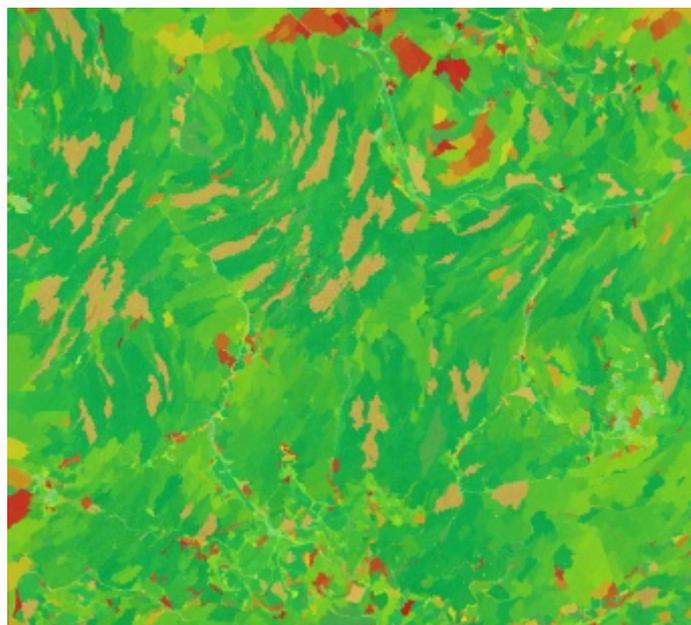
Nel caso specifico dell'applicazione alla classificazione di immagini telerilevate, l'algoritmo k -NN attribuisce a ciascun poligono la classe del poligono di *training* la cui firma spettrale è più prossima al poligono da classificare (il fattore k , pertanto è uguale a 1). In Definiens, dal momento che lo spazio multidimensionale entro cui vengono valutate le distanze non è determinato esclusivamente dalle proprietà spettrali, ad ogni oggetto da classificare in teoria verrebbe attribuita la classe del poligono di *training* più prossimo sulla base delle *features* selezionate. In realtà, a causa dell'implementazione *fuzzy* nel classificatore *nearest neighbor* di Definiens, a ciascun oggetto da classificare viene assegnato un valore (probabilità) di appartenenza a ciascuna delle classi di copertura del suolo. La classificazione con il più elevato valore di appartenenza determina l'assegnazione dell'oggetto a quella classe. Tanto maggiore è la differenza tra il valore del grado di appartenenza tra la prima classe (quella con il grado di appartenenza più elevato) e quelli delle altre classi e tanto più la classificazione può considerarsi stabile.

Nella sperimentazione condotta l'analisi della *Classification Stability*, condotta attraverso l'esame della sua rappresentazione grafica e statistica, è servita come riferimento per individuare le *features* in grado di produrre una migliore discriminazione tra le classi.

	Value
Current Classification	
Bosco	1.000
Prati e pascoli	0.783
Urbanizzato e rocce nude	0.729

Valori di appartenenza alle diverse classi di un oggetto selezionato.

Secondo la suggestiva interpretazione di Bart Kosko, *la probabilità è l'intero nella parte*, ossia la misura di quanto la parte contiene l'intero. La parte può, in effetti, contenere l'intero nella misura in cui la sua estensione può sovrapporsi a quella dell'insieme universale. Questa concezione comporta un'affermazione apparentemente singolare, quella per cui la parte può contenere l'intero, non soltanto nel caso banale in cui la parte coincide con l'intero (Kosko, 2000). L'operatore di appartenenza non è bivalente, ma è esso stesso sfumato e può pertanto assumere un qualunque valore reale compreso tra 0 (non contenimento) e 1 (contenimento completo o, al limite, coincidenza). Ne consegue che la somma degli operatori di appartenenza *fuzzy* a ciascuna classe di copertura del suolo calcolata per ogni poligono sarà >1 .



Class	Objects	Mean	StdDev	Minimum	Maximum
Bosco	3034	0.3657702	0.188	1.853704453e-005	1
Prati e pascoli	1590	0.3564738	0.2574024	0.0005486011505	1
Urbanizzato e rocce nude	834	0.4096480	0.2693525	0.0001638829708	1
out	21	0.5	0	0.5	0.5

Figura 53. Output grafico e statistico della classification stability

Nella procedura di classificazione di fondamentale importanza è la fase che prevede la selezione manuale di un certo numero di poligoni di *training* (*samples areas*). La distribuzione delle *samples areas*, come si è accennato in precedenza, non deve essere rispondente a particolari criteri geometrici, poiché l'algoritmo *k*-NN non valuta le distanze in uno spazio geografico. È, tuttavia, determinante che per ciascuna classe la selezione delle *samples areas* sia attuata in modo da che esse risultino il più possibile rappresentative della variabilità all'interno delle classi medesime delle *features* implementate nel classificatore. Questo principio determina l'esistenza di una relazione non lineare, a prescindere dalla procedura di classificazione messa a punto, tra la numerosità delle *samples* e l'accuratezza del risultato finale. Alcuni Autori (Mognol, 2006; Rego, 2003) osservano che i valori di *accuracy* tendono a stabilizzarsi per un numero di *samples* superiore a 3 per ciascuna classe. È necessario, tuttavia, considerare le caratteristiche e le problematiche specifiche dell'immagine da analizzare. In questo contesto si rammenta che la mosaicatura dei fotogrammi del volo Montagna Veneta del 1991 non realizza una perfetta omogeneizzazione tonale lungo le *seamlines* ed anche i singoli fotogrammi sono localmente affetti da aberrazioni cromatiche, le cui cause sono state in precedenza descritte. La scelta dei poligoni di *training* per ciascuna classe di

La **Classification stability** esprime la differenza tra il primo e il secondo miglior risultato di assegnazione ad una classe.

L'*output* grafico riporta i poligoni colorati con una tonalità che va dal verde (differenza massima = maggior stabilità) al rosso (differenza minima = minor stabilità).

L'*output* tabellare riporta per ciascuna classe le principali statistiche (media, *standard deviation*, minimo, massimo) calcolate tra il primo ed il secondo miglior risultato.

copertura del suolo, pertanto, è stata condotta in modo da dare rappresentatività anche a queste anomalie, oltre che all'eterogeneità caratteristica di ciascuna classe e a quella indotta dalla morfologia del terreno (diversi gradi di ombreggiatura). Questo criterio nella selezione delle *samples* può ridurre la stabilità della classificazione, ma garantisce un miglior risultato in termini di accuratezza.

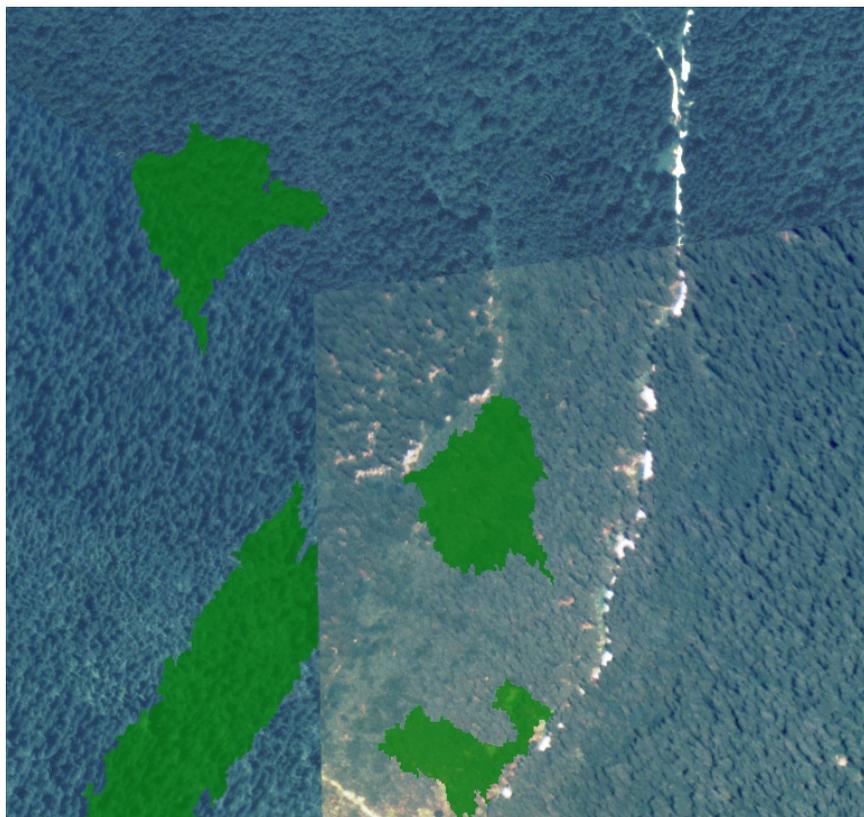
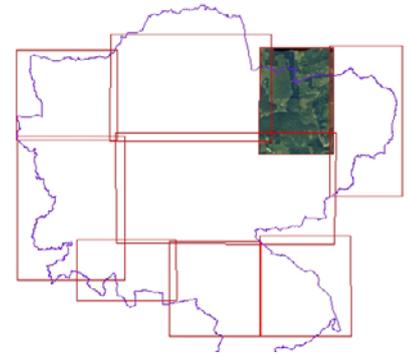
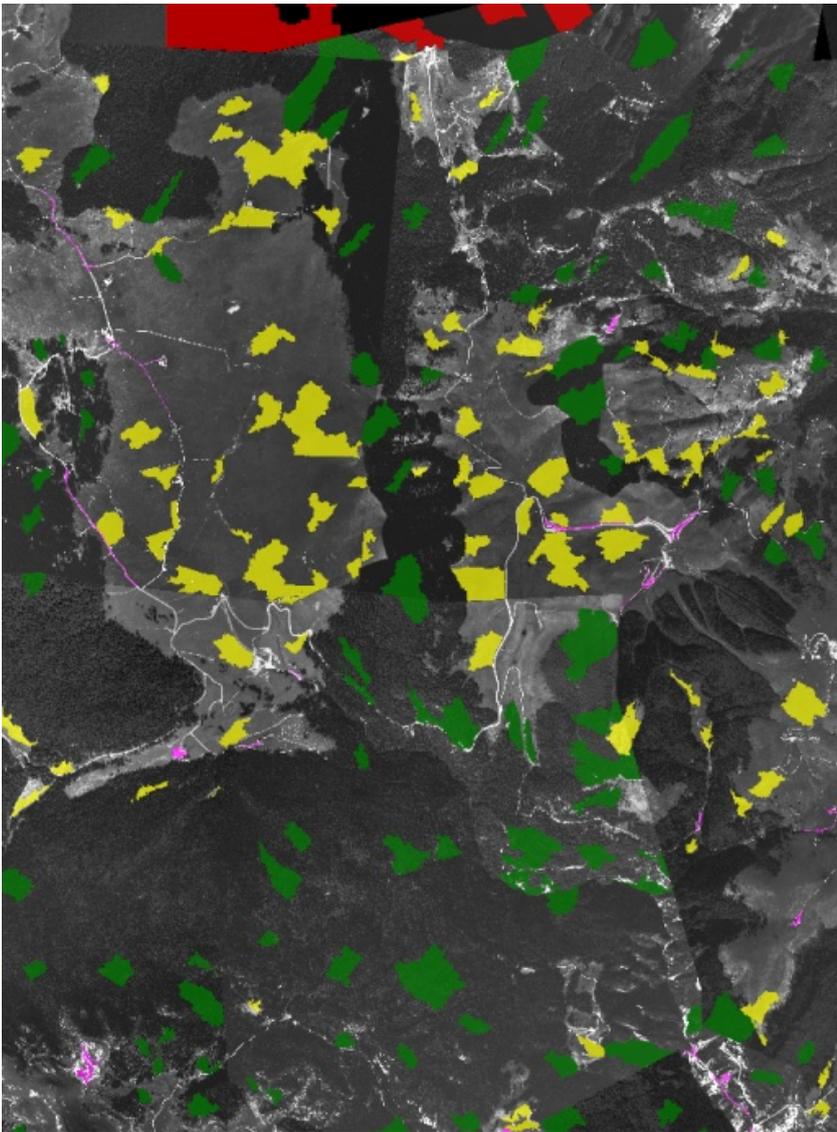


Figura 54. Criterio di selezione delle *samples areas*

Particolare di una scena in cui la selezione dei poligoni *training* rappresentativi della classe "bosco" ha preso in considerazione i salti cromatici, in corrispondenza delle *seamlines* fra tre fotogrammi, che aumentano la variabilità spettrale all'interno della classe.

La numerosità degli oggetti generati con il primo livello di segmentazione selezionati come *samples areas* è tale da rappresentare per ciascuna classe almeno il 3-4% della superficie dell'intera scena da classificare (Figura 55), valori percentuali in linea con quelli adottati in altre sperimentazioni (Lamonaca, 2006; Giuliarelli et al., 2007).

Per migliorare il risultato della classificazione, il processo che prevede l'acquisizione di poligoni di *training* e l'applicazione dell'algoritmo di classificazione è stato reiterato, selezionando nuove *samples* aggiuntive, scelte tra gli oggetti che non erano stati assegnati a nessuna classe o tra quelli che erano stati classificati non correttamente.



Scena n.3	
Classe	N. samples
Bosco	131
Prati e pascoli	119
Urbanizzato e rocce nude	29
Out (margini esterni)	7

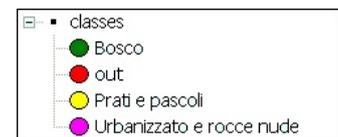
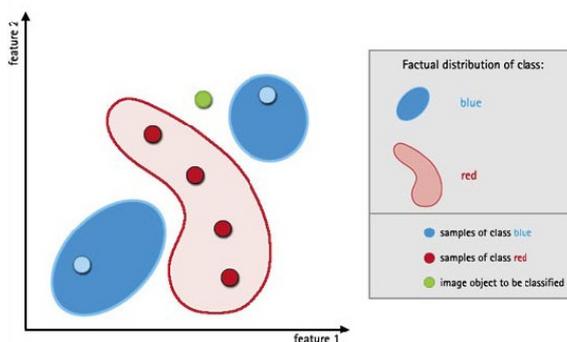


Figura 55. Poligoni di training selezionati in un'intera scena

Questa procedura ridefinisce, nel dominio delle *features* in cui opera il classificatore *nearest neighbor*, le distanze di ciascun oggetto da classificare dai poligoni *training*. Riapplicando l'algoritmo all'intera immagine, gli oggetti non classificati o che si trovano al limite di una classe potranno essere integrati nella classificazione in modo più corretto.



L'oggetto incognito rappresentato dal cerchio verde verrà associato alla classe rossa o alla classe blu in relazione alla sua distanza dagli oggetti *training* rappresentativi delle due classi o rimarrà non classificato se il suo grado di appartenenza alle due classi risulterà inferiore alla soglia definita dal *minimum membership value*.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

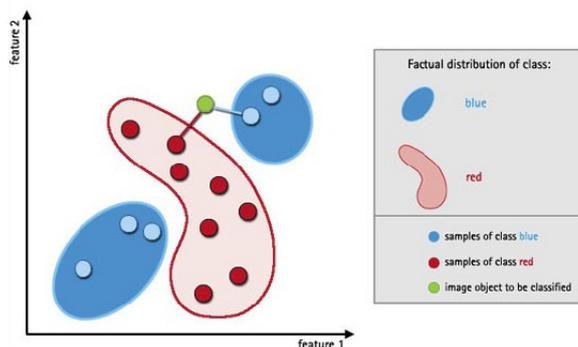


Figura 56a-b. Affinamento della classificazione nearest neighbor

La selezione di *samples* aggiuntivi, modificando le distanze dagli oggetti incogniti, può determinare la ri-assegnazione dell'oggetto verde ad una delle due classi.

La procedura utilizzata per la classificazione dei poligoni generati con il primo livello di segmentazione prevede in una prima fase la definizione di una base di conoscenze che raccolga ed integri tutte le informazioni ritenute utili a discriminare le classi di copertura del suolo in relazione al sistema di nomenclatura prescelto; in una fase successiva l'imposizione di una serie di condizioni (regole) che permetta di adeguare il prodotto della classificazione alle specifiche tecniche di riferimento adottate.

Il set iniziale di informazioni utilizzate per definire la base di conoscenze si compone innanzitutto di attributi che esprimono le proprietà spettrali degli oggetti in base a parametri statistici calcolati sui valori dei DN dei pixel in essi contenuti. In particolare sono state prese in considerazione le seguenti *features*:

- *mean* (per ciascuna banda spettrale): media dei valori dei pixel che compongono l'oggetto;
- *brightness*: media pesata dei valori dei DN dei pixel afferenti all'oggetto per ciascuna banda spettrale o per le bande selezionate;
- *maximum difference*: i valori di *mean* di ciascuna banda spettrale vengono confrontati a coppie e per ogni coppia viene calcolata la differenza; vengono scelti i due valori di *mean* che producono la differenza maggiore e tale valore viene diviso per il valore della *brightness*;
- *standard deviation* (per ciascuna banda spettrale): calcolata a partire da tutti i valori dei DN dei pixel che compongono l'oggetto.

$$brightness = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n DN_m}{m \cdot n}$$

DN_m è il valore di *digital number* della m -esima banda; la media è calcolata per ogni r -esimo pixel che compone l'oggetto.

Sempre sfruttando le proprietà spettrali dell'immagine, è stato definito un "indice di vegetazione" utilizzando il *tool* specifico messo a disposizione dal software che dà la possibilità all'utente di creare attributi personalizzati,

attraverso la definizione di una funzione relazionale o generando una *arithmetic feature* attraverso l'utilizzo del *feature calculator*. In questo caso è stato utilizzato il *feature calculator* per definire la seguente combinazione di bande:

$$NDVI_{RB} = \frac{\text{mean_red} - \text{mean_blue}}{\text{mean_red} + \text{mean_blue}}$$

Si tratta, in definitiva, di un *Normalised Difference Vegetation Index* calcolato sulle bande del rosso e del blu, che presenta valori prossimi a 0.5 per i suoli nudi e a -0.5 per le aree densamente vegetate.

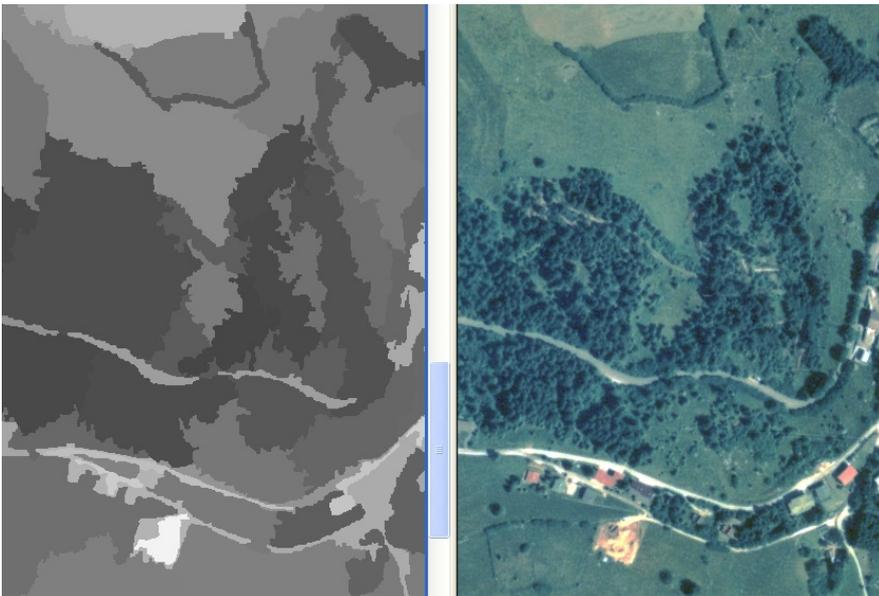


Figura 57. Esempio di applicazione del Normalised Difference Vegetation Index sulle bande del rosso e del blu

Le caratteristiche spettrali degli oggetti non sempre, tuttavia, sono in grado di garantire da sole la discriminazione di classi che per loro natura (o per anomalie dell'immagine) hanno risposte radiometriche simili. In questi casi può essere utilmente condotta un'analisi delle caratteristiche tessiturali utilizzando le *features* implementate in Definiens. L'analisi della tessitura comporta una quantificazione della variazione spaziale dei valori dei toni dell'immagine e per questo può essere utilizzata per discriminare le aree forestali, in cui questa variabilità è più marcata, dalle superfici produttive non boscate, generalmente più omogenee rispetto alle prime. Un aspetto critico dell'applicazione in questo specifico contesto dell'analisi della tessitura basata su matrici di co-occorrenza

L'NDVI normalmente è calcolato come:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Il suo intervallo di esistenza varia tra -1 e +1. I valori effettivi normalmente sono compresi tra -0.1 e +0.6 e sono direttamente correlati alle condizioni fisiologiche della vegetazione e al livello di biomassa (Gomarasca, 2007).

Come per l'*NDVI*, anche questo indice in linea teorica può variare da -1 a 1.

caratteristica di Definiens è che i tempi necessari per la sua elaborazione su tutte le tre bande dell'immagine oggetto di classificazione possono essere notevolmente lunghi. Un'alternativa empirica per parametrizzare indirettamente la deviazione spaziale dei valori di tonalità dei pixel consiste nel porre in relazione due livelli di segmentazione generati utilizzando differenti valori di scala e di *shape*. Nel caso specifico la segmentazione di ordine inferiore è stata prodotta settando il fattore di scala pari a 20 e lo *shape* a 0.1, per dare massimo risalto alla eterogeneità spettrale. Si rammenta, inoltre, che un'importante caratteristica della segmentazione multirisoluzione consiste nel collegamento geometrico tra i poligoni di livelli gerarchici diversi. Ciò significa che ogni poligono del livello gerarchico inferiore appartiene ad uno ed uno solo poligono del livello gerarchico superiore. Sfruttando queste proprietà della segmentazione multirisoluzione è stata creata la *feature* "indice di omogeneità spettrale", anche in questo caso utilizzando il *tool* di "customizzazione". La *feature* aritmetica è stata calcolata come rapporto tra la superficie di un poligono di primo livello ed il numero di poligoni di secondo livello in esso contenuti normalizzato in relazione alla compattezza degli oggetti di ordine gerarchico superiore.

$$i_o = \frac{\text{area} \times \text{compactness}}{n_{\text{sub_objects}}}$$

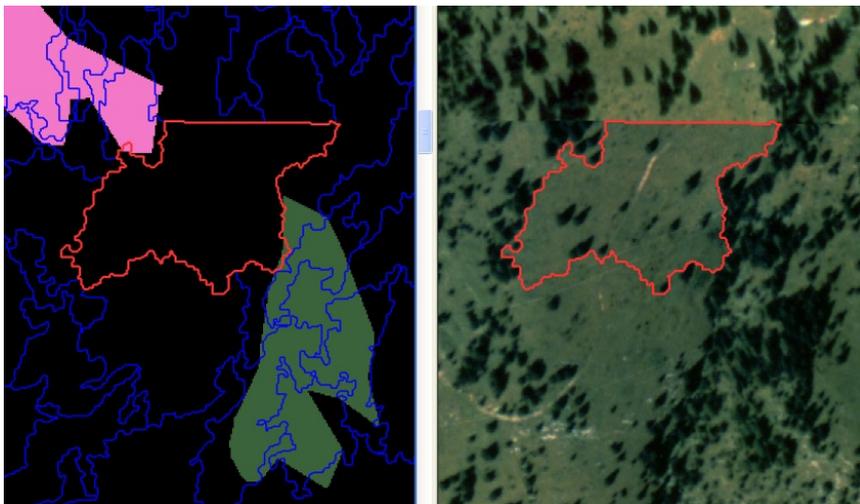
Il set di attributi potenzialmente utilizzabili nella classificazione è stato completato integrando la base di conoscenze con le informazioni sul territorio fornite dai dati ancillari. In generale la selezione di informazioni ancillari che possano risultare effettivamente vantaggiose al processo di classificazione va effettuata non solo considerando la disponibilità di *dataset* cartografici per il territorio di interesse, ma anche e soprattutto verificando la congruità del dettaglio geometrico del dato geolocalizzato da applicare in relazione ai requisiti del prodotto che si intende realizzare e valutando il ruolo che può rivestire il suo contenuto informativo per l'estrazione tematica. In particolare un giudizio sull'opportunità di integrazione di dati ancillari nel processo di classificazione non può prescindere dalla considerazione delle seguenti caratteristiche:

- scala e minima unità mappabile
- specifiche tecniche di produzione
- data di acquisizione

- formato di rappresentazione
- contenuto informativo.

L'unico strato informativo disponibile che risponde a queste caratteristiche e che risulta utilmente integrabile per migliorare l'accuratezza nell'estrazione delle coperture forestali dalle 9 scene da classificare è rappresentato dalla Carta Regionale dei tipi forestali. Per la sua implementazione nel processo di classificazione, considerate le finalità contestuali, che non richiedono un'ulteriore tematizzazione della classe "bosco", non si ricorre all'utilizzo delle informazioni contenute nel *dataset* associato, ma ci si limita semplicemente a considerare l'eventuale sovrapposizione tra i poligoni di questo *layer* e gli oggetti prodotti dalla segmentazione di primo livello. La prossimità temporale tra l'esecuzione del volo Montagna Veneta del '91 e l'acquisizione delle ortofoto digitali del volo IT2000, servite per la redazione della Carta Regionale dei tipi forestali, consente di costruire un modello di appartenenza *fuzzy* secondo il quale un oggetto prodotto dalla segmentazione completamente o per la maggior parte sovrapposto ad un poligono della Carta Regionale dei tipi forestali ha un'elevata probabilità di appartenere alla classe "bosco". Si può, inoltre, presumere che tale probabilità sia tanto più elevata quanto maggiore è la superficie percentuale dell'oggetto interessata dall'*overlay*. Un'attribuzione probabilistica del grado di appartenenza alla classe "bosco" in relazione alla percentuale di sovrapposizione con il *layer* tematico non è, tuttavia, attuabile in Definiens, in quanto il software non offre questa possibilità, ma permette unicamente di disporre della *feature* "number of overlapping thematic objects". Questo attributo è espresso da un numero intero, che per ciascun oggetto, può variare in un *range* da 0 a 4 (tale valore potrebbe essere superiore a 4 se uno o più poligoni della Carta Regionale dei tipi forestali fossero completamente contenuti in un oggetto generato dalla segmentazione e nel contempo altri 4 fossero intersecanti, tuttavia, considerate le dimensioni degli oggetti prodotti dalla segmentazione, di fatto questa casistica non si presenta). Appare subito evidente che l'utilizzo di questa *feature* può influenzare negativamente la classificazione di quegli oggetti che sono interessati solo marginalmente dalla sovrapposizione con il *layer* tematico.

In teoria anche il DTM del Veneto "Digitalia", già utilizzato nell'ortorettifica dei fotogrammi del volo Montagna Veneta e del volo GAI, potrebbe essere implementato per la classificazione delle aree forestali, in particolare configurando un'adeguata *membership function* in relazione alla quota con l'obiettivo di escludere le zone poste al di sopra del limite superiore del bosco. Si fa notare, tuttavia, che l'area di studio non raggiunge un'altimetria tale da motivare l'applicazione di una funzione di appartenenza basata sulla quota.



Nell'esempio riportato a fianco un oggetto da attribuirsi alla classe "prati e pascoli" presenta una sovrapposizione con due poligoni della Carta Regionale dei tipi forestali (*Num. of overlap = 2*) e, pertanto, porta con sé un'elevata probabilità di essere classificato "bosco".

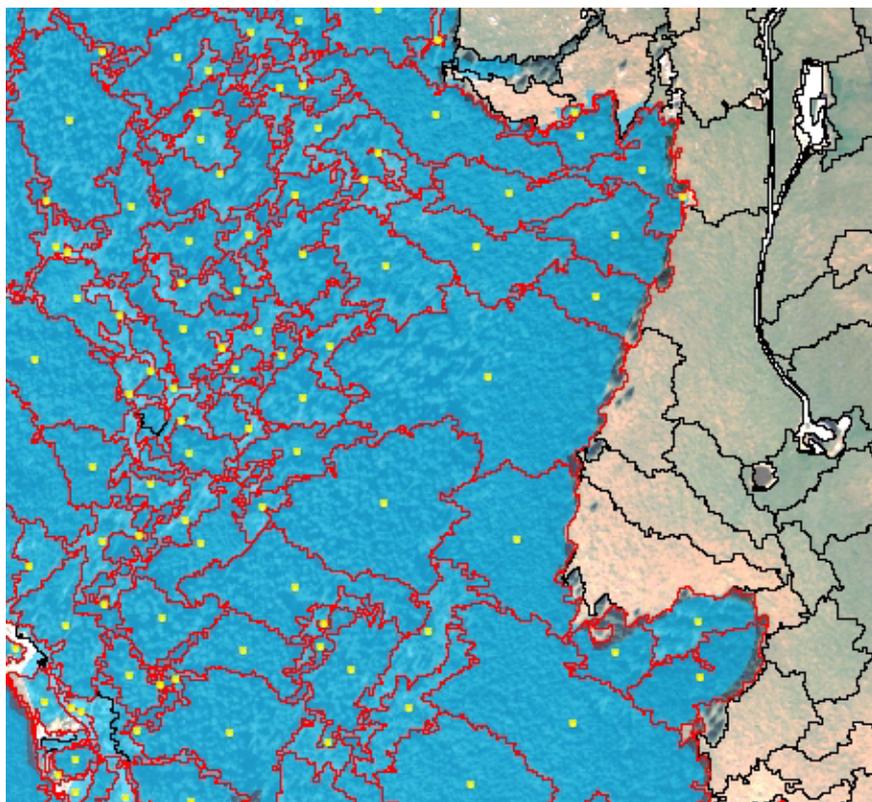
Figura 58. Esempio di overlap marginale

Dal momento che queste anomalie rendono instabile la classificazione proprio lungo i margini del bosco, ossia laddove si attende possa osservarsi l'eventuale espansione del bosco, per integrare correttamente la Carta Regionale dei tipi forestali nel processo di classificazione è stata messa a punto una particolare procedura che prevede i seguenti passaggi:

1. Sono stati esportati in formato *shape* i centroidi di tutti gli oggetti prodotti dalla segmentazione di primo livello.
2. I punti che si sovrappongono alla Carta Regionale dei tipi forestali sono stati selezionati in ambiente ArcGIS utilizzando il *tool "select by location"* e successivamente salvati come nuovo *shape*.
3. Lo *shape* così prodotto è stato importato in Definiens ed utilizzato come *thematic layer* da implementare nella *feature "number of overlapping thematic objects"*.

L'applicazione di questa procedura da un lato garantisce l'attribuzione dell'*overlap* ai soli oggetti che sono effettivamente interessati da una totale o prevalente sovrapposizione con la Carta Regionale dei tipi forestali, dall'altro consente di limitare la variabilità della *feature* a due valori (0 = sovrapposizione assente o non prevalente; 1 = sovrapposizione completa o prevalente).

La procedura di integrazione naturalmente non si limita alla trasformazione del *layer* tematico, ma prosegue con l'individuazione della migliori modalità di implementazione della *feature* nel processo di classificazione in grado di produrre migliori risultati in termini di accuratezza.



Integrando nella feature "number of overlapping thematic objects" lo shape prodotto con la procedura descritta, si ottiene per quell'attributo l'assegnazione agli oggetti del valore 1 (in rosso) o 0 (in nero).

Figura 59. Centroidi utilizzati come thematic layer

La procedura di integrazione naturalmente non si limita alla trasformazione del *layer* tematico, ma prosegue con l'individuazione della migliori modalità di implementazione della *feature* nel processo di classificazione in grado di produrre migliori risultati in termini di accuratezza. L'obiettivo che ci si prefigge nell'utilizzo di questo dato ancillare è quello di dare risoluzione a tutte quelle situazioni in cui l'attribuzione semi-automatica di un oggetto ad una classe di uso del suolo risulta particolarmente problematica ed in cui anche l'interpretazione a video lascia margini di incertezza, come nel caso delle zone in ombra e delle aree fortemente affette da *relief displacement*. I tentativi di implementare la *feature* attraverso l'attribuzione alla classe "bosco" di una *membership function* si scontra con le difficoltà nel determinare:

- il tipo di funzione di appartenenza *fuzzy* da applicare;
- il massimo valore di appartenenza;
- l'operatore logico più idoneo.

Dal momento che, tuttavia, non è possibile definire concettualmente delle condizioni di appartenenza univoche, anche la costruzione di un modello logico risulterebbe inevitabilmente viziata da scelte soggettive. Si è, pertanto, preferito optare per l'implementazione della *feature* nello *standard nearest neighbor*. Di conseguenza anche questo attributo entra nello spazio

Discreti risultati sono stati ottenuti combinando all'operatore logico *or* la funzione *full range* con massimo valore di appartenenza = 0.5.

multidimensionale in cui opera l'algoritmo ed il suo peso nel determinare l'esito della classificazione degli oggetti incogniti dipende dalla sua distanza, determinata dalle *samples* selezionate, da questi ultimi rispetto alle altre *features* integrate nel *nearest neighbor*.

Conferme sull'efficacia della procedura adottata sono venute dal calcolo delle matrici di confusione.

Per ottimizzare i tempi di elaborazione, nell'ambito del *set* degli 11 attributi sopra descritti, il numero di quelli effettivamente impiegati nella classificazione è stato limitato a quelli con maggiore potenziale discriminante. Per ciascuna delle 9 scene in cui è stata suddivisa l'immagine da classificare, l'individuazione della combinazione di *features* che meglio contribuisce a differenziare le classi di interesse ha avuto luogo adottando il processo automatico di ottimizzazione *Feature Space Optimization (FSO)* implementato nel software. Questo processo misura lo spazio tra le classi nello spazio multidimensionale degli attributi inizialmente considerati e individua quelli in grado di determinare una migliore separazione (Grignetti et al., 2009).

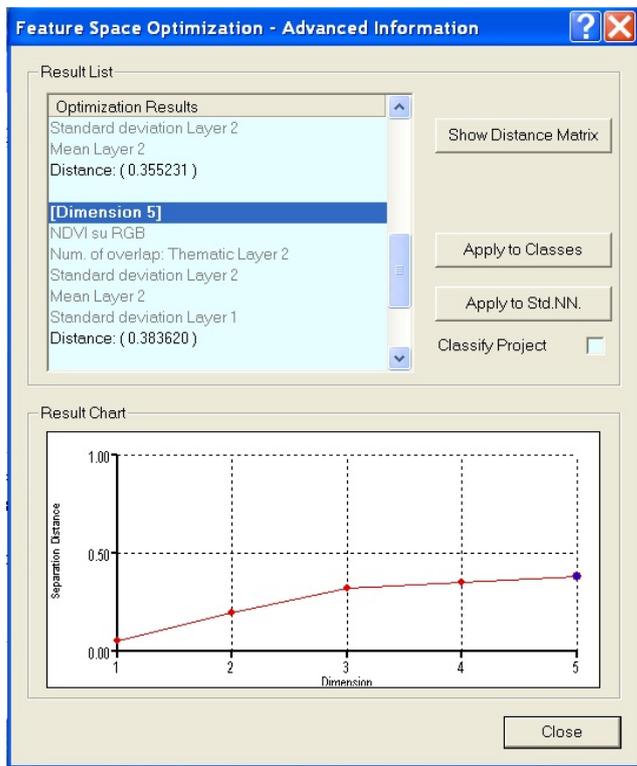


Figura 60. Esempio di applicazione del tool Feature Space Optimization

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

Il potenziale discriminante delle *features* può essere apprezzato anche esaminando gli istogrammi che rappresentano la distribuzione delle *samples* nell'intervallo di valori di ciascun attributo. Questa visualizzazione e le statistiche associate agli istogrammi (particolare significatività ha il valore di *overlap*) consente, tuttavia, di porre in comparazione solo due classi per volta.

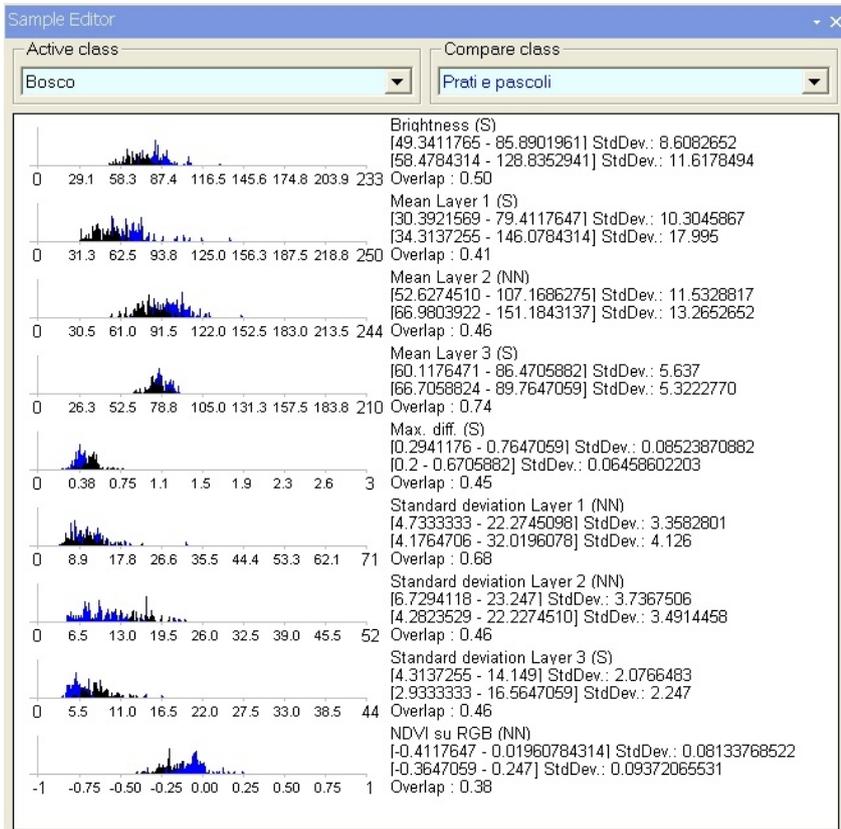


Figura 61. Visualizzazione del Sample editor per le classi "bosco" e "prati e pascoli"

Inoltre la separazione delle classi dell'immagine classificata nello spazio bidimensionale definito da due *features* può essere verificata graficamente attraverso il *2d plot* (Figura 62).

Le prove di *FSO* eseguite per ognuna delle 9 scene in taluni casi hanno prodotto risultati tra loro diversi a causa delle diverse caratteristiche del territorio analizzato. Le *features* migliori (quelle che realizzano la maggior separazione tra le classi) sono state applicate allo *standard nearest neighbor*.

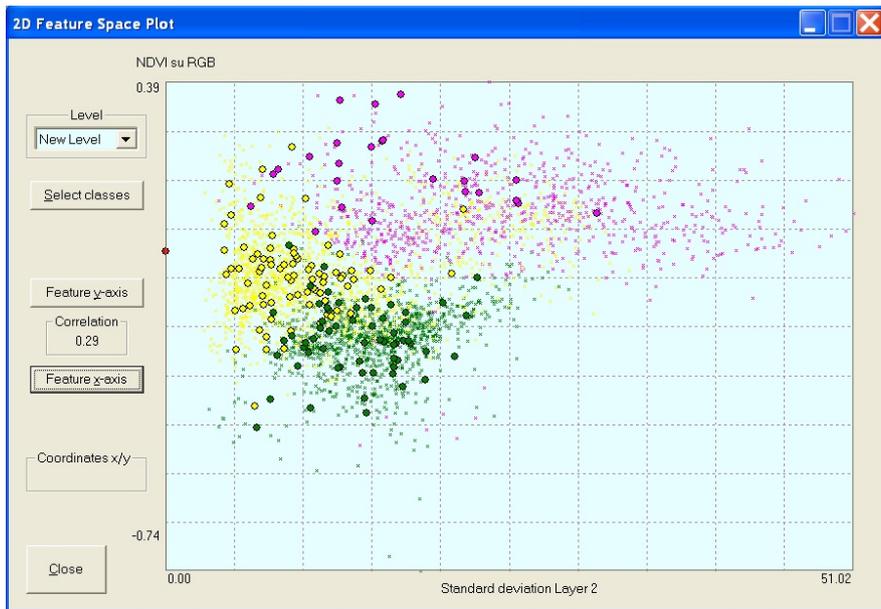
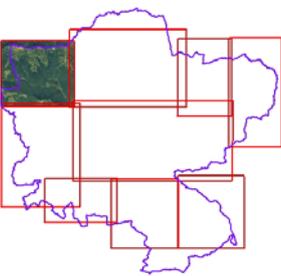
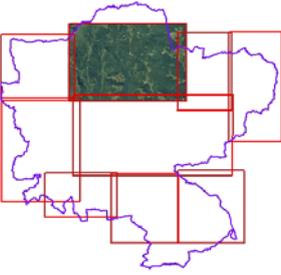


Figura 62. 2d feature space plot dei due attributi spettrali che realizzano la migliore separazione tra le classi

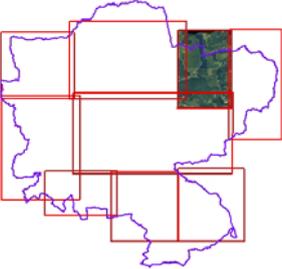
Nelle tabelle che seguono si riportano, in ordine di potenziale risolutivo, gli attributi utilizzati per la classificazione dei poligoni di primo livello per ciascuna scena in cui è stato suddiviso il mosaico dei fotogrammi che coprono l'area di studio.

SCENA 1		
N. oggetti I livello: 7.345	N. oggetti II livello: 187.561	
<i>Attributo dell'oggetto</i>	<i>Tipo di attributo</i>	
1. <i>Mean</i> (banda del verde)	Spettrale	
2. <i>NDVI_{RB}</i>	Spettrale	
3. <i>Maximum difference</i>	Spettrale	
4. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico	
5. Indice di omogeneità	Geometrico/Gerarchico	

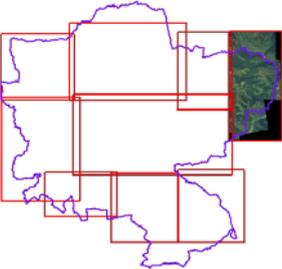
SCENA 2		
N. oggetti I livello: 7.345	N. oggetti II livello: 187.561	
<i>Attributo dell'oggetto</i>	<i>Tipo di attributo</i>	
1. <i>Mean</i> (banda del verde)	Spettrale	
2. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico	
3. <i>NDVI_{RB}</i>	Spettrale	
4. Indice di omogeneità	Geometrico/Gerarchico	
5. <i>Maximum difference</i>	Spettrale	

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

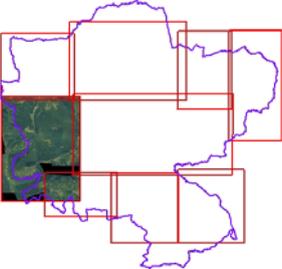
SCENA 3	
N. oggetti I livello: 5.404	N. oggetti II livello: 146.182
Attributo dell'oggetto	Tipo di attributo
1. $NDVI_{RB}$	Spettrale
2. <i>Maximum difference</i>	Spettrale
3. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico
4. Indice di omogeneità	Geometrico/Gerarchico
5. ---	---



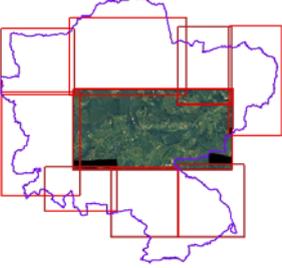
SCENA 4	
N. oggetti I livello: 7.438	N. oggetti II livello: 151.877
Attributo dell'oggetto	Tipo di attributo
1. <i>Mean</i> (banda del rosso)	Spettrale
2. <i>Maximum difference</i>	Spettrale
3. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico
4. <i>Standard deviation</i> (banda del verde)	Spettrale
5. $NDVI_{RB}$	Spettrale



SCENA 5	
N. oggetti I livello: 10.868	N. oggetti II livello: 280.141
Attributo dell'oggetto	Tipo di attributo
1. $NDVI_{RB}$	Spettrale
2. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico
3. <i>Maximum difference</i>	Spettrale
4. <i>Standard deviation</i> (banda del verde)	Spettrale
5. Indice di omogeneità	Geometrico/Gerarchico



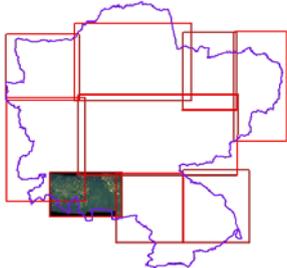
SCENA 6	
N. oggetti I livello: 17.934	N. oggetti II livello: 404.085
Attributo dell'oggetto	Tipo di attributo
1. $NDVI_{RB}$	Spettrale
2. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico
3. Indice di omogeneità	Geometrico/Gerarchico
4. <i>Maximum difference</i>	Spettrale
5. <i>Mean</i> (banda del verde)	Spettrale



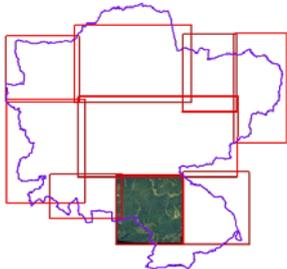
Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

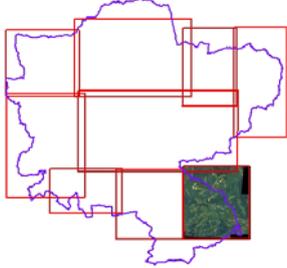
SCENA 7	
N. oggetti I livello: 3.588	N. oggetti II livello: 103.582
<i>Attributo dell'oggetto</i>	<i>Tipo di attributo</i>
1. $NDVI_{RB}$	Spettrale
2. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico
3. <i>Standard deviation (banda del verde)</i>	Spettrale
4. <i>Mean (banda del verde)</i>	Spettrale
5. <i>Standard deviation (banda del rosso)</i>	Spettrale



SCENA 8	
N. oggetti I livello: 5.480	N. oggetti II livello: 199.580
<i>Attributo dell'oggetto</i>	<i>Tipo di attributo</i>
1. $NDVI_{RB}$	Spettrale
2. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico
3. <i>Standard deviation (banda del verde)</i>	Spettrale
4. <i>Maximum difference</i>	Spettrale
5. ---	---



SCENA 9	
N. oggetti I livello: 6.099	N. oggetti II livello: 159.647
<i>Attributo dell'oggetto</i>	<i>Tipo di attributo</i>
1. $NDVI_{RB}$	Spettrale
2. <i>Maximum difference</i>	Spettrale
3. <i>Standard deviation (banda del verde)</i>	Spettrale
4. <i>Num. of overlapping thematic objects</i>	Tematico
5. ---	---



Adeguamento della classificazione alla definizione di bosco adottata

L'applicazione degli attributi definiti con attraverso le modalità descritte allo *standard nearest neighbor* ha prodotto una classificazione che presenta un ottimo grado di accuratezza (per tutte le scene KIA > 0.98). E' necessario, tuttavia, rammentare che la carta delle aree boscate, prodotto conclusivo di questo lavoro, viene successivamente impiegata per analizzare i fenomeni di ricolonizzazione forestale (o eventuale, ma meno frequente, regressione) a distanze temporali non superiori ai 20 anni e, pertanto, l'individuazione delle

linee di confine fra bosco e non bosco deve essere caratterizzata da un'elevata precisione. E' sempre opportuno, pertanto, procedere sempre ad un accurata revisione tramite fotointerpretazione e correzione manuale delle attribuzioni non appropriate.

Nell'esecuzione questo controllo è innanzitutto necessario garantire l'adeguamento agli standard della definizione di bosco cui si intende far riferimento. Si è detto, in precedenza, che la definizione di bosco da adottarsi in questo contesto deve essere conforme a quella che caratterizza tutti gli altri strati informativi e, pertanto, in termini di unità minima mappabile e di densità di copertura delle chiome, si considera bosco quel territorio in cui è presente una copertura arborea maggiore del 10% (secondo la definizione *FRA2000*) e avente un'estensione minima di 2000 mq (prevista dalla L.R. n.52/78 e successive modifiche).

Il controllo della classificazione e l'adeguamento alle specifiche adottate prevedono, pertanto, tre fasi successive:

- correzione degli errori di attribuzione
- verifica del grado di copertura arborea
- verifica della superficie minima.

La verifica della correttezza della classificazione, nell'ambito del sistema di nomenclatura adottato è avvenuta tramite fotointerpretazione. Completata la classificazione automatica, pertanto, è stata controllata l'attribuzione tematica di ogni oggetto prodotto dalla segmentazione di primo livello, procedendo alla correzione manuale, sempre in ambiente di lavoro Definiens, dei poligoni classificati in modo non corretto, con particolare attenzione alla distinzione della classe bosco dalle altre tipologie di copertura del suolo. Questa fase di verifica visiva dei 79.450 oggetti di primo livello complessivi delle 9 scene segmentate ha inciso per non più del 20% nei tempi dell'intera procedura, in quanto i pochi errori di classificazione si sono riscontrati soprattutto lungo i margini del bosco in corrispondenza delle giunzioni tra i fotogrammi.

Alcuni casi dubbi hanno riguardato gli oggetti che comprendevano passaggi sfumati tra il bosco rado e la classe "prati e pascoli". Come anticipato, un oggetto deve essere classificato "bosco" solo se la copertura esercitata dalle chiome è superiore al 10% della sua superficie; in caso contrario sarà considerato contenente alberi sparsi ed attribuito alla classe adeguata. Per la verifica della percentuale di copertura e l'eventuale attribuzione alla classe

“bosco” di questi poligoni è stata adottata una procedura automatica che prevede:

- la classificazione automatica degli oggetti generati con la segmentazione di secondo livello;
- il calcolo in termini percentuali della superficie degli oggetti di livello gerarchico inferiore classificati “bosco” in relazione alla superficie dell’oggetto di ordine gerarchico superiore in cui sono contenuti;
- l’assegnazione alla classe “bosco” dell’oggetto prodotto dalla segmentazione di primo livello se la percentuale definita al punto precedente è superiore al minimo di copertura prefissato.

Nella sua concreta applicazione, questa procedura ha trovato un ostacolo nella sovrastima della copertura delle chiome dovuta all’erronea classificazione a bosco dell’ombra prodotta dalle stesse. Purtroppo non è possibile calcolare con precisione di quanto l’ombra possa incidere su questa sovrastima, in quanto nella stessa immagine la superficie delle ombre dipende da variabili quali: l’altezza della pianta, la forma della chioma, l’inclinazione del terreno, l’esposizione del versante. Un’ulteriore elemento di errore nella valutazione della copertura delle chiome è indotto dall’effetto del *relief displacement*, che, sommandosi alla superficie delle ombre, porta ad individuare una copertura apparente, nel caso di alberi isolati, mediamente pari al 300% di quella effettiva.

Considerando, inoltre, che la risoluzione geometrica e la scarsa qualità dell’immagine talvolta rendono la segmentazione di secondo livello imprecisa, è evidente che l’applicazione di questa procedura di verifica automatica della copertura non possa essere adottata in modo sistematico. Tuttavia la sua applicazione, con una soglia di copertura percentuale opportunamente aumentata al fine di compensare le forti sovrastime, in alcuni casi dubbi è stata di utile supporto all’interpretazione visiva.

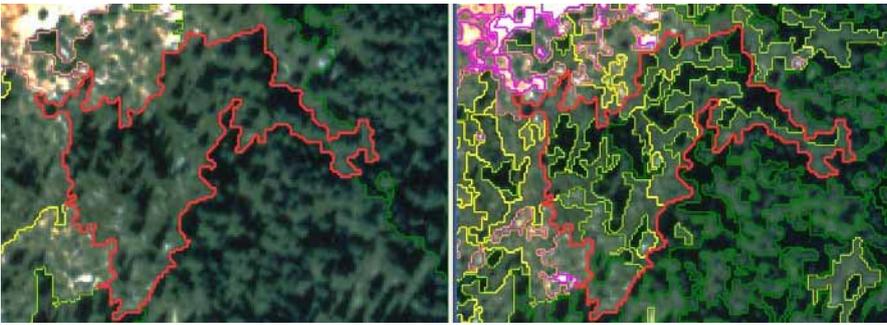


Figura 63. Modalità di classificazione in un caso dubbio

L'incidenza delle ombre e del *relief displacement* sugli errori di stima della copertura arborea è linearmente dipendente, oltre che dalle variabili ricordate in precedenza, dal grado di frammentazione del soprassuolo forestale. Questi fattori hanno un peso minimo nell'estrazione cartografica di superfici forestali continue superiori ai 10 ha, al contrario, come si è appena osservato, possono indurre a forti sovrastime nel caso di alberi isolati, quando l'analisi è spinta alla scala di dettaglio definita dagli oggetti prodotti dal secondo livello di segmentazione. Per gli oggetti di superficie prossima a 2000 mq, per i quali si rende necessaria la verifica del requisito della superficie minima, l'incidenza di questi fattori varia anche in relazione alla conformazione più o meno allungata del singolo oggetto e dalla sua orientazione rispetto alla direzione dei raggi solari, tuttavia, la predisposizione della procedura automatica di controllo della superficie minima si è basata su una quantificazione media della sovrastima della copertura arborea, non essendo possibile attuare una stratificazione che rappresenti tutte le variabili in gioco.

Operativamente, prima di impostare i processi di verifica della superficie, è stato necessario riorganizzare il sistema di nomenclatura adottato in una struttura gerarchica su due livelli, che prevedesse, al livello gerarchico superiore, le due sole classi "bosco" e "non bosco".



Figura 64. Riorganizzazione gerarchica del sistema di nomenclatura

La procedura di assegnazione ad una classe attraverso la verifica automatica del grado di copertura arborea, in questo caso, è stata applicata adottando una soglia di appartenenza alla classe "bosco" pari a 0.3 (anziché 0.1) per compensare la forte sovrastima indotta dal *relief displacement*, dalle ombre delle chiome e dall'insufficiente precisione della segmentazione di secondo livello.

Dall'osservazione di un campione rappresentativo di poligoni di superficie prossima a 2000 mq, è stato possibile, in seguito ad una valutazione eseguita con l'ausilio degli oggetti di secondo livello, approssimare mediamente una sovrastima della copertura effettiva del 25% nel caso di piccole aree boscate isolate ed una sottostima del 25% nel caso di piccole radure nel bosco.

Questa semplificazione del sistema di nomenclatura ha preceduto un processo di *merge* che ha prodotto la fusione dei poligoni contigui appartenenti alla stessa classe ("bosco" o "non bosco"). Si ottiene in questo modo una drastica riduzione del numero dei poligoni. Gli oggetti risultanti da questa fusione non sono più il risultato della discretizzazione spettrale e geometrica definita attraverso il processo di segmentazione, ma rappresentano la continuità spaziale delle aree boscate rispetto alle altre classi di copertura del suolo.

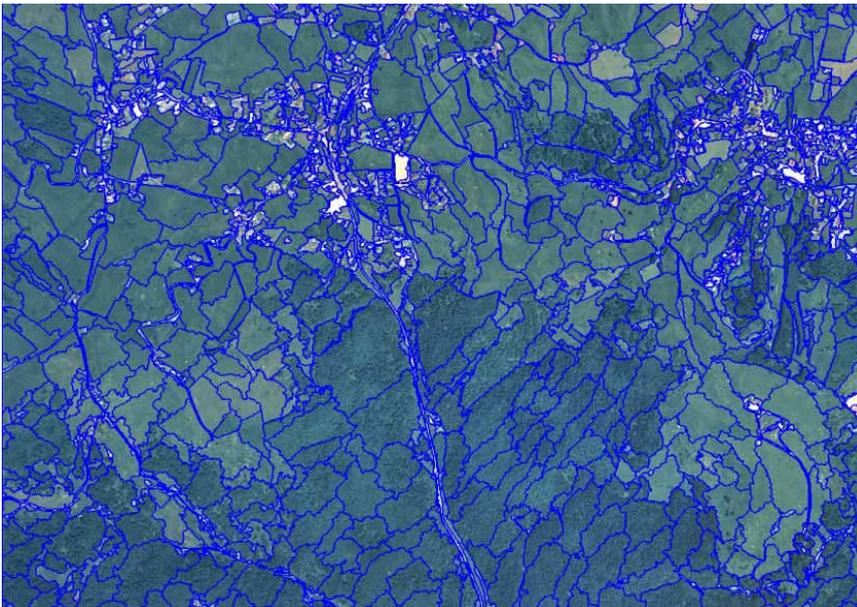


Figura 65. Effetti del processo di merge sull'output vettoriale

Da questo prodotto intermedio, pertanto, è possibile analizzare i *pattern* spaziali delle due classi ed individuare le tessere isolate di piccola superficie da sottoporre a verifica. Con procedura automatica è stato, quindi, possibile riassegnare alla classe “non bosco” ed alla classe “bosco” rispettivamente i gruppi di alberi e gli inclusi non boscati di superficie inferiore all’unità minima cartografabile, a cui è stato applicato un fattore di correzione per compensare gli errori in eccesso o in difetto mediamente rilevati nella determinazione della copertura effettiva.

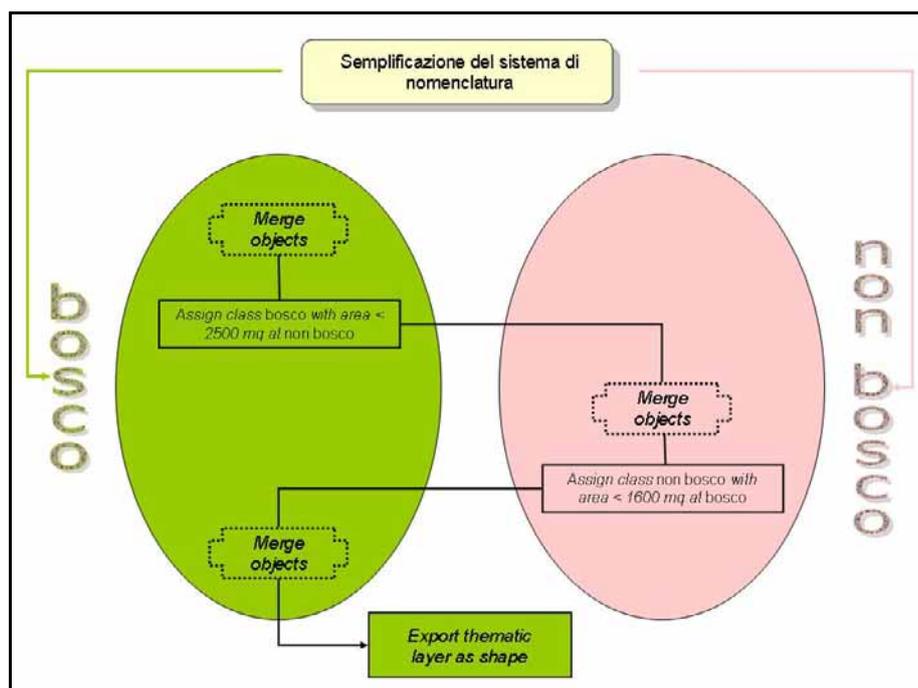


Figura 66. Adeguamento della classificazione ai requisiti di superficie minima

Al termine del processo di controllo delle superfici e riattribuzione tematica degli oggetti con superficie inferiore all’unità minima cartografabile, il *layer* tematico è risultato conforme alla definizione di bosco adottata anche per il requisito dimensionale. Si è proceduto, quindi, all’esportazione dei poligoni appartenenti alla sola classe “bosco” nel formato vettoriale *shape* selezionando l’opzione “*smoothed (non-overlapping)*”, che permette di smussare l’effetto di scalinatura dei pixel.

Risultati

La metodologia proposta ha consentito di verificare l’efficacia di un *set* di 11 *features* (8 spettrali, due customizzate ed una tematica) nella classificazione di

un'immagine che presenta numerose problematiche. Applicando il processo di ottimizzazione *FSO* a questi attributi, inoltre, è emerso che le *features* in grado di discriminare meglio le diverse classi possono variare da scena a scena in relazione all'entità e alla distribuzione locale delle alterazioni radiometriche e geometriche da cui ciascuna scena è affetta ed al tipo di uso del suolo prevalente. Per individuare, all'interno di questa variabilità, le *features* che hanno maggiormente contribuito alla separazione delle classi, per ogni scena è stato attribuito a ciascuna di esse un punteggio che ne esprime il potenziale risolutivo. Dalla somma di questi punteggi si ottengono indicazioni riferiti all'intera immagine sul potenziale discriminante delle *features* analizzate per il livello geometrico e tematico prescelto.

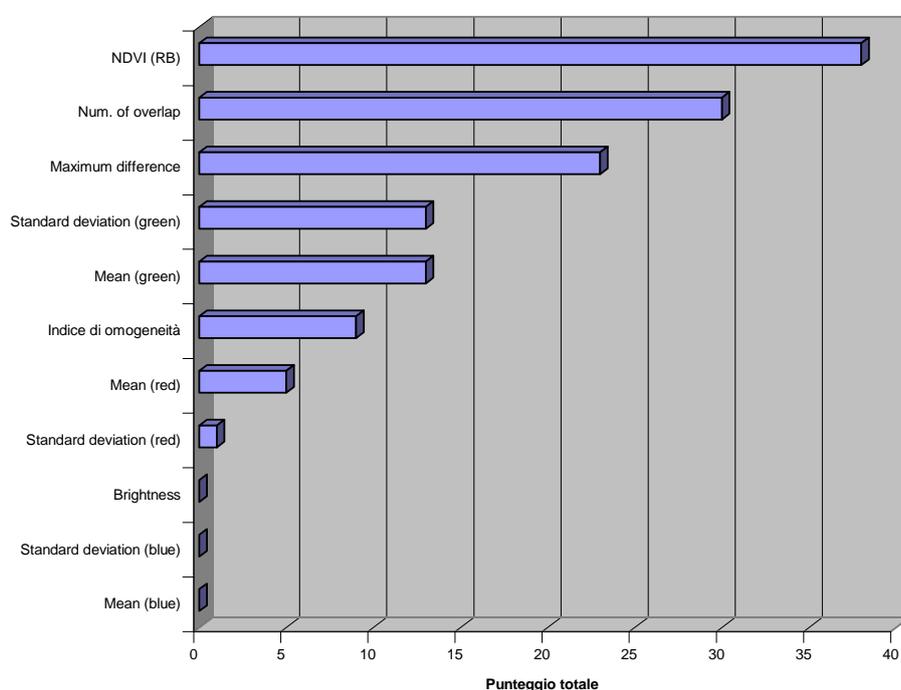


Grafico 1. Potenziale discriminante delle features implementate

Tra gli attributi spettrali di *default*, i più efficaci nel determinare la separazione delle classi si sono dimostrati la massima differenza, assieme alla media ed alla deviazione standard nella banda del verde. Prevedibilmente la banda del blu è risultata poco significativa, dal momento che a tale lunghezza d'onda la radiazione viene quasi totalmente assorbita sia dalla vegetazione arborea che da quella erbacea (Gomasca, 1997). Molto utile, invece, è risultata la composizione dell'indice $NDVI_{RB}$, che consente di mettere in evidenza le differenze tra le relazioni dell'assorbimento spettrale tra la banda del rosso e la

banda del blu nelle aree con vegetazione arborea rispetto ai prati o ai suoli nudi. Nel complesso delle 9 scene analizzate questo indice si è dimostrato la *feature* più performante. L'indice di omogeneità, invece, è stato implementato nel processo di classificazione solo di alcune scene, in particolare laddove sono più diffusi soprassuoli arborei radi (o comunque caratterizzati da copertura discontinua), fasce ecotonali, incolti in transizione. In queste formazioni, infatti, la segmentazione di secondo livello tende a generare oggetti più piccoli rispetto ad altri tipi di copertura del suolo, pertanto questa *feature* ha un buon potere discriminante. E' interessante, infine, osservare lo scarso potere risolutivo della *brightness*, presumibilmente in parte imputabile alle brusche variazioni di illuminazione in corrispondenza delle *seamlines* tra i fotogrammi mosaicati, ma soprattutto alla forte variabilità all'interno di ciascuna classe di questo attributo in relazione alla morfologia del terreno.

I parametri di segmentazione prescelti e la procedura semi-automatica di classificazione adottata, cui è seguita una sistematica revisione dei risultati per fotointerpretazione manuale, hanno consentito, nonostante tutte le difficoltà messe in luce, di ottenere in tempi sostenibili un prodotto di precisione geometrica coerente con la scala di analisi adottata e praticamente esente da errori di classificazione.

Solo su un'area di circa 1 km² sul versante meridionale di Cima Manderiolo e su una superficie di circa 450 ha tra Cima Portule e Cima Dodici non è stato possibile, per la scarsa qualità dell'immagine, valutare con sufficiente certezza tramite fotointerpretazione l'effettiva densità della copertura arborea e, pertanto, si è ritenuto opportuno escludere tale superficie dal confronto multitemporale. Sono altresì escluse quelle aree per le quali non è disponibile la copertura aerofotogrammetrica del volo Montagna Veneta del '91. L'area di analisi, pertanto, assume la conformazione riportata in Figura 67 (b) e copre una superficie di 41.298 ha su un totale di 46.652 ha dell'intera Comunità Montana.

Anche l'applicazione del metodo statistico-inventariale per la stima delle variazioni di superficie delle classi di uso/copertura del suolo nell'intervallo temporale 1991-2007 prevede una distribuzione dei punti di campionamento entro i limiti dell'area di analisi, quindi su una superficie pari al 88,5% dell'intera Comunità Montana.

E' stata sperimentata anche la composizione dell'indice con la banda del verde con risultati non altrettanto positivi.

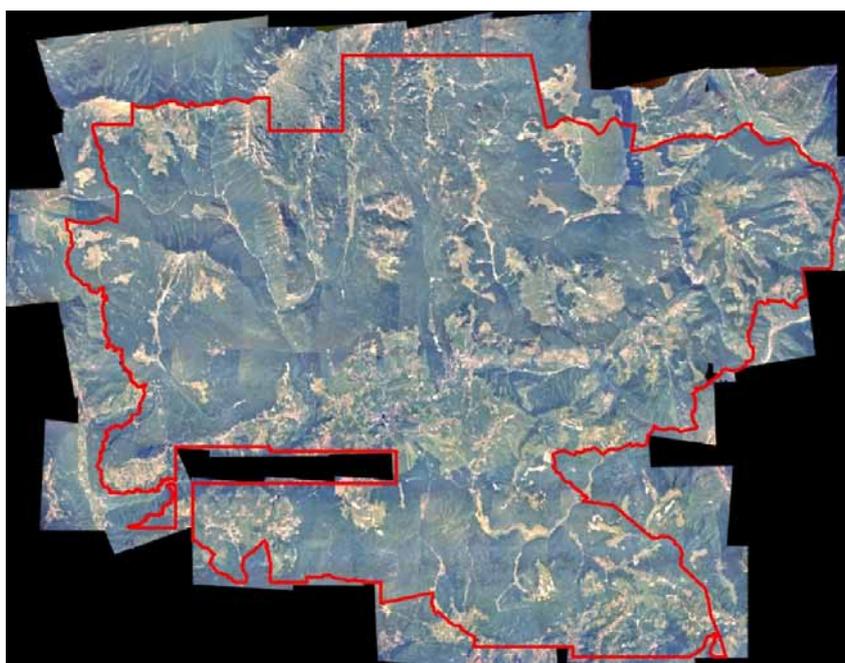
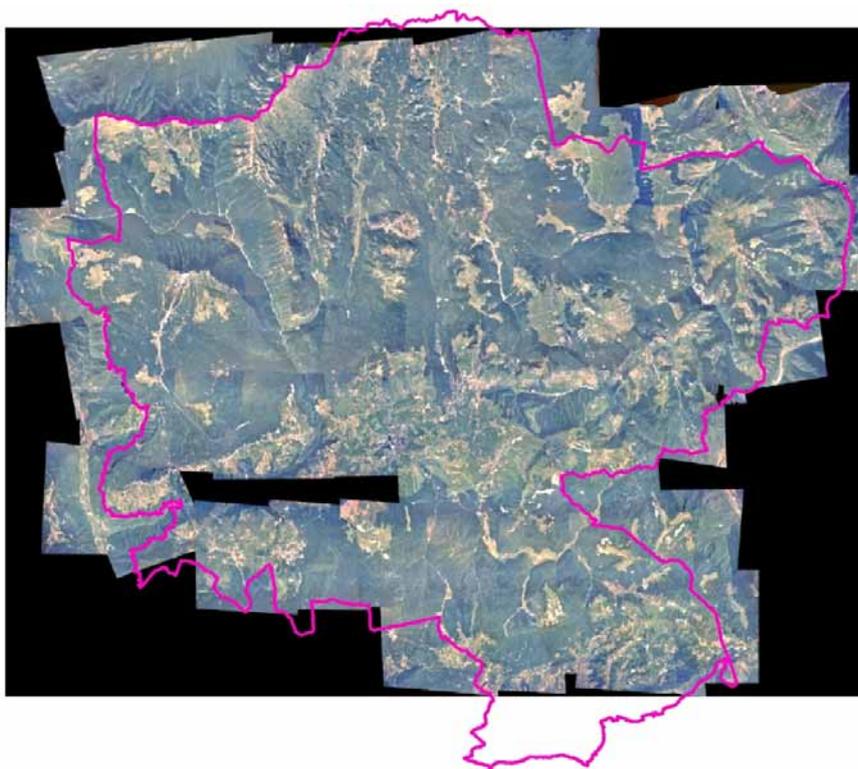


Figura 67a-b. Confine amministrativo della CM dei Sette Comuni (a) e delimitazione dell'area di analisi (b).

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

7.1.4 **Classificazione con approccio inventariale**

Gli inventari forestali impiegano procedure statistiche per l'ottenimento di stime quantitative e qualitative sulle risorse forestali a partire da dati riferiti ad unità campionarie (puntuali o lineari, *transects*) con prefissati livelli di incertezza. Le informazioni inventariali possono essere ottenute attraverso osservazioni e misure condotte esclusivamente al suolo oppure utilizzare immagini acquisite con attività di telerilevamento da satellite o da piattaforma aerea (De Natale et al., 2003). Modalità di analisi campionarie che si basano sull'utilizzo di immagini telerilevate sono considerate molto efficienti per la classificazione dell'uso del suolo su territori molto vasti, come quelli di una regione o di un'intera nazione, e sono state adottate per la predisposizione dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC). Il fondamento concettuale è molto semplice ed è basato sulla conta dei punti, per cui, nota l'estensione complessiva dell'area da inventariare, la superficie da attribuirsi a ciascuna classe di uso del suolo è espressa dalla proporzione di punti campionari classificati tramite fotointerpretazione nell'ambito di ciascuna classe. Questo procedimento si è dimostrato uno strumento efficace per stime estremamente precise delle superfici di classi di uso del suolo a scala regionale e comprensoriale (Cullotta et al. 2006) ed in Veneto è già stato applicato per stimare le variazioni di superficie forestale negli ambiti territoriali delle Comunità Montane del Grappa (Salvadori, 2005; Anfodillo et al., 2006), Agordina e della Valle del Boite (Lamedica, 2007; Anfodillo et al., 2007).

Nella sua applicazione alla Comunità Montana dei Sette Comuni si è scelto di adottare lo schema di campionamento a due stadi, in conformità alla metodologia adottata per le Comunità Montane Agordina e della Valle del Boite (Lamedica, 2007; Anfodillo et al., 2007), che consente di ottenere risultati di elevata significatività statistica, riducendo la numerosità dei punti campione su cui rilevare le informazioni di interesse. Per ottenere una stima più rigorosa dell'intervallo fiduciario delle variabili analizzate, si è scelto di adottare uno schema di distribuzione dei punti di tipo casuale (Corona 2000, Anfodillo et al., 2006), generando, con il *software* statistico SASTM, coppie di variabili casuali x - y , corrispondenti alle coordinate N-E di ciascun punto entro il territorio dell'area di analisi.

Con le modalità indicate da Salvadori (2005), è stata definita una dimensione della popolazione di punti di 1931 unità, corrispondenti, in relazione all'estensione dell'area di analisi, ad una densità di 1 punto/21,3 ha.

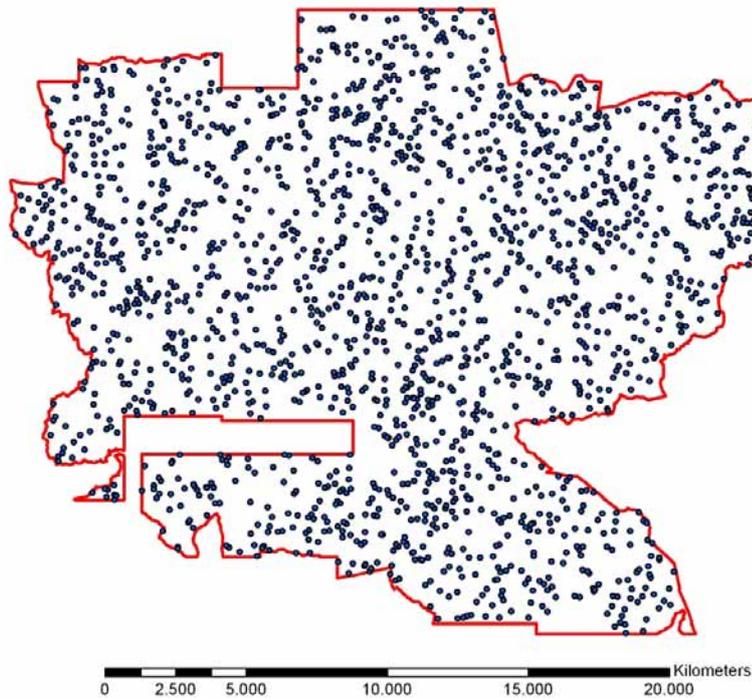


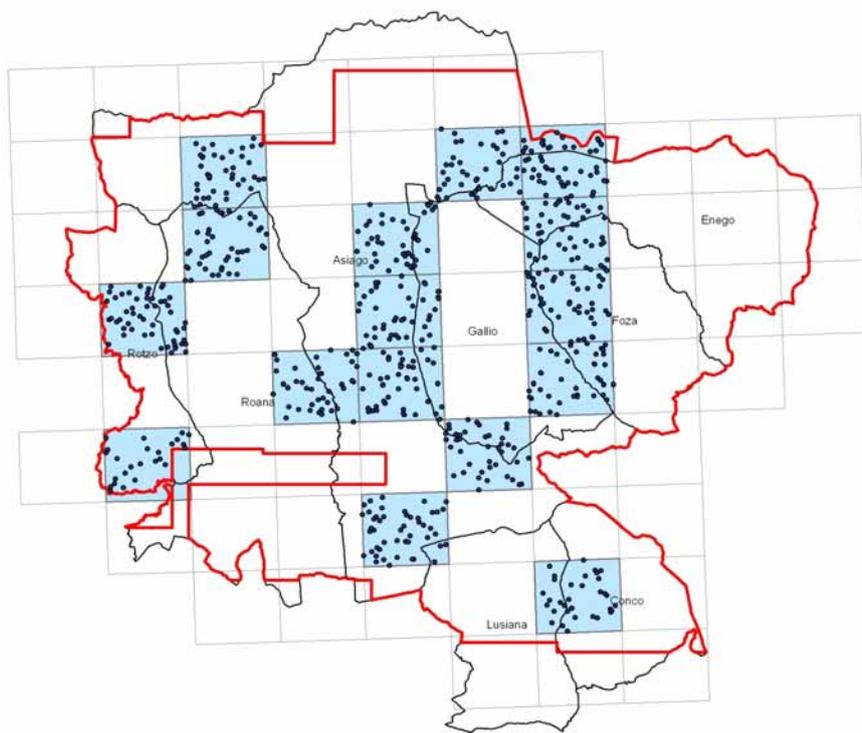
Figura 68. Distribuzione casuale dei punti nell'area di analisi.

Successivamente è stata seguita la procedura di estrazione del campione multistadio con il metodo proposto da Corona (2000), che prevede:

- La suddivisione della popolazione in unità primarie (sezioni quadrate a maglia regolare), fatte corrispondere alle aree coperte dagli elementi della CTRN 1:5.000 (69 elementi della CTRN a coprire l'intera area d'analisi).
- Estrazione dal totale delle 69 unità primarie di un campione di 16 unità selezionate casualmente tra quelle rientranti per almeno il 30% della superficie nell'area di analisi.
- Classificazione tramite fotointerpretazione di tutti i punti di indagine (unità secondarie) che rientrano nelle 16 unità primarie estratte.

Con questa procedura è stato classificato un campione estratto casualmente di 680 punti, pari al 41% del totale dei punti distribuiti nell'area di analisi. La classificazione tramite fotointerpretazione è stata eseguita in parallelo sulle foto aeree del volo Montagna Veneta del '91 e sulle ortofoto digitali TERRAITALY del

2007, per consentire la stima delle variazioni degli usi del suolo nell'intervallo temporale 1991-2007.



L'estrazione casuale delle unità primarie, alle quali è stato associato un *ID number*, è stata effettuata utilizzando un generatore di numeri *random online* (www.random.org).

Figura 69. Elementi della CTRN utilizzati per la selezione dei punti da classificare.

Il sistema di classificazione dell'uso e della copertura del suolo adottato prevede la distinzione delle tre classi "bosco", "produttivo non boscato" ed "improduttivo". Per quanto riguarda la compatibilità con altri archivi territoriali, nella definizione delle ultime due classi si è fatto riferimento ad una semplificazione del primo livello del sistema di classificazione CORINE, mentre per la classe "bosco" è stata adottata la definizione FAO nella versione Kotka 3 utilizzata per il Forest Resource Assessment dell'anno 2000 (FRA2000) e riconfermata per FRA2010 (vedasi paragrafo 6.1.3). Le coperture/usi del suolo rientranti nella definizione FAO di "altre terre boscate" sono state ricondotte nella classe "produttivo non boscato".

Si è resa, pertanto, necessaria la verifica dei 4 parametri oggettivi previsti dalla definizione di bosco FRA2000, ossia la superficie minima, la larghezza minima, il grado di copertura minimo e l'altezza minima a maturità.

L'attribuzione dei punti in relazione all'altezza minima a maturità nel territorio in esame riguarda essenzialmente le formazioni a *Pinus mugo* (Turra) ed è avvenuta sia attraverso fotointerpretazione, sia avvalendosi delle indicazioni tematiche della Carta Regionale dei Tipi forestali.

Altre terre boscate: territorio con copertura arborea del 5-10% di alberi in grado di raggiungere un'altezza minima di 5 m a maturità *in situ* oppure territorio con una copertura maggiore del 10% costituita da alberi che non raggiungono un'altezza di 5 m a maturità *in situ* o da arbusti e cespugli.

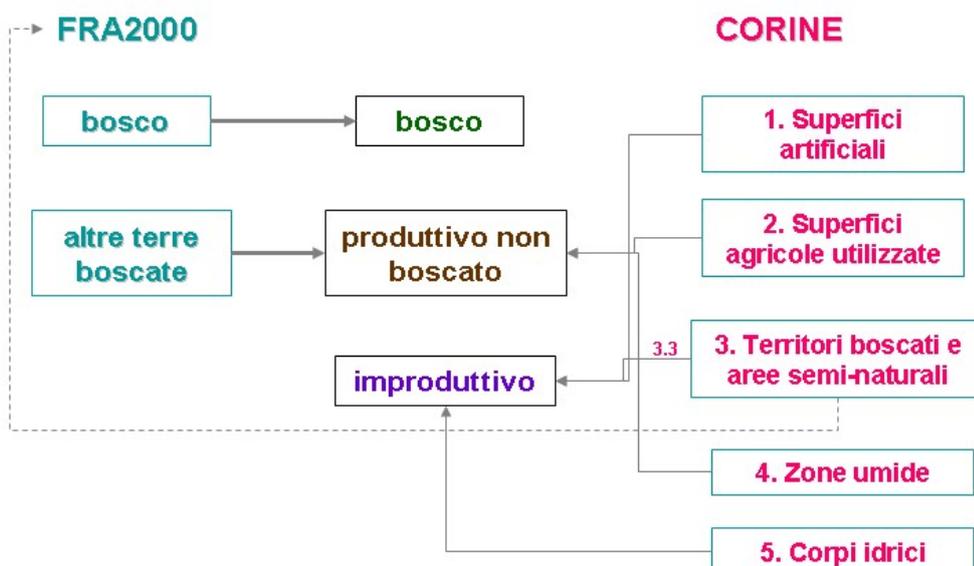


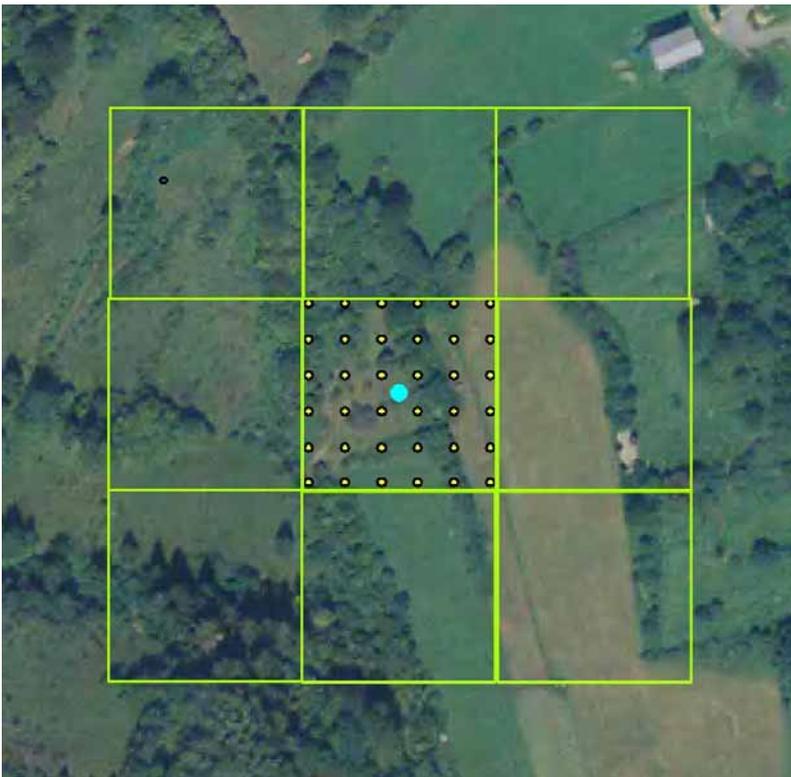
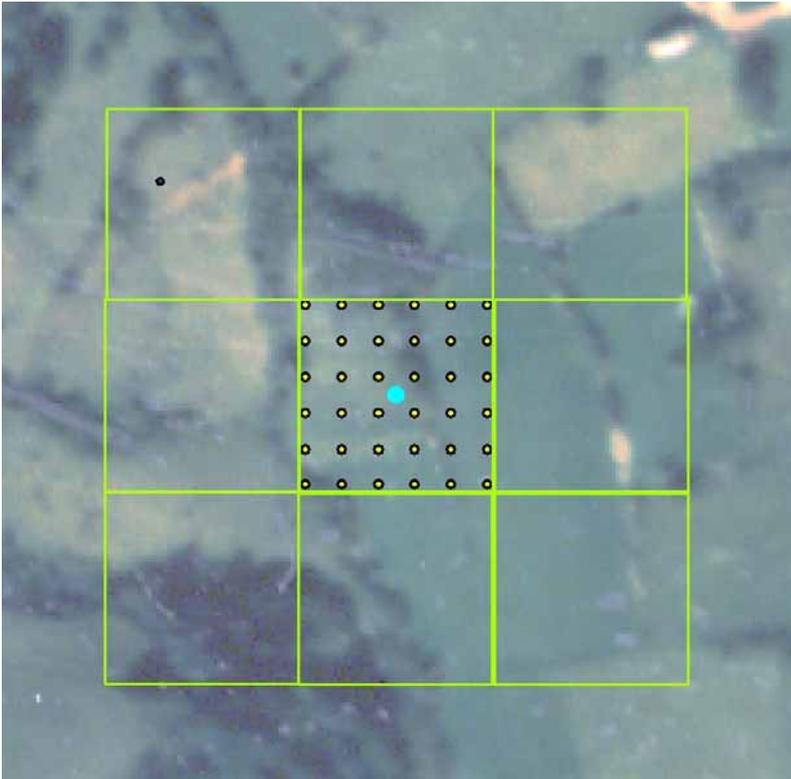
Figura 70. Relazioni tra le classi adottate ed altri sistemi di classificazione.

Il requisito della larghezza minima è stato verificato, nei casi dubbi, con il *tool* di misurazione delle distanze in ambiente ArcGIS.

Più complessa è la procedura di stima del grado di copertura delle chiome e della superficie minima. Per facilitare questa operazione si ricorre ad una valutazione dell'intorno del punto da classificare e si utilizzano griglie di punti opportunamente configurate da sovrapporre alle ortofoto (De Natale, Gasparini, 2003).

Più precisamente, per verificare il requisito della superficie minima, si costruisce un intorno di analisi costituito da nove quadrati di 50 m di lato al centro del quale si colloca il punto campione. Nel caso in cui, oltre al quadrato centrale (in cui cade il punto), un altro quadrato dei nove visualizzati sia coperto da vegetazione forestale, la soglia minima di 5000 m² può considerarsi rispettata ed il punto viene assegnato alla classe bosco.

Se i dubbi riguardano il raggiungimento della percentuale di copertura arborea (almeno il 10%), si sovrappone una griglia di punti quadrata di 50 m di lato distanziati tra loro 10 m, centrata sul punto di campionamento e disegnata sull'intorno di analisi. Il grado di copertura si calcola come rapporto tra il numero di punti con copertura arborea e numero totale di punti. E' sufficiente, pertanto, che 4 punti sui 36 totali intercettino le chiome, perché si consideri superato il limite minimo di copertura. Se tale condizione è verificata su un altro dei nove quadranti dell'intorno, il punto viene assegnato alla classe bosco.



Il caso delle 2 immagini riportate come esempio, che rappresentano la situazione nel 1991 (a) e nel 2007 (b) nell'intorno di un punto campione, è particolarmente problematico, in quanto, in questa fattispecie, l'attribuzione alla classe "bosco" o "produttivo non boscato" deve attenersi, oltre che ai requisiti di copertura e dimensioni minime, anche alla distanza del punto dal nucleo di bosco più denso ed alla larghezza del medesimo (in entrambi i casi almeno 20 m). Sulla base di queste valutazioni, il punto è stato classificato "produttivo non boscato" nel 1991 e "bosco" nel 2007.

Figura 71a-b. Griglia di punti e quadranti per la valutazione della copertura e delle dimensioni minime.

Applicando questa procedura rigorosa è stato possibile classificare l'intero campione estratto. Nessuno dei 680 punti oggetto di fotointerpretazione, infatti,

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

è risultato ricadente in corrispondenza di coperture nuvolose o in zone in ombra per cui non fosse possibile interpretare la situazione.

I risultati della classificazione e le elaborazioni statistiche per la stima delle variazioni di superficie delle singole classi sono descritti nel paragrafo 8.3.

7.2 *Trattamento dei fotogrammi del volo GAI*

7.2.1 *Ortorettifica e mosaicatura*

L'ortorettifica dei 10 fotogrammi del volo GAI utilizzati nei test descritti nel successivo paragrafo è stata eseguita dal GdL di UniSky, lo spin-off dell'Università IUAV di Venezia. Poiché la definizione e l'applicazione della procedura di recupero metrico di questi fotogrammi non rientra in questo lavoro di tesi, se ne descrivono solo i caratteri salienti, rimandando ai riferimenti citati in bibliografia per approfondimenti sul processo di orientamento.

Alle immagini fotogrammetriche del volo GAI, nella generalità dei casi, non è possibile applicare la procedura di ortorettifica, basata su un modello rigoroso, adottata per i fotogrammi del volo "1991-92 REVEN Montagna Veneta", poiché non si dispone (ad eccezione di alcune aree della pianura veneta) dei certificati di calibrazione della camera (Pulighe, 2009). Una soluzione al problema della mancanza dei parametri di orientamento interno della camera è venuta mediante autocalibrazione dei fotogrammi con modelli a parametri addizionali, a partire da un valore approssimato della focale e della quota di volo e da punti di coordinate note identificabili sui fotogrammi. Si è operato, pertanto, con una triangolazione aerea, avvalendosi di un elevato numero di GCP riferiti ad elementi ancora riconoscibili sul territorio riconoscibili dalle ortofoto digitali del volo IT2000, e contestuale autocalibrazione, per orientare blocchi di fotogrammi e risalire ai parametri di orientamento interno della camera. Il modello che ha dato migliori risultati è quello proposto da D.C. Brown a 14 parametri incogniti che compensano la maggior parte degli errori di tipo lineare e non lineare dovuti alla distorsione delle lenti e a cause fisiche di deterioramento dei fotogrammi (Giorgini, 2006). Per l'applicazione del modello è stata utilizzata la procedura *SCBA (Self-Calibrating Bundle Adjustment)* implementata nel modulo *Leica Photogrammetric Suite (LPS)* di Erdas Imagine 9.3.

La procedura di mosaicatura non si differenzia da quella già descritta e adottata per fotogrammi del volo "1991-92 REVEN Montagna Veneta". Anche in questo caso i migliori risultati sono stati conseguiti attraverso l'adattamento tramite *histogram matching* degli istogrammi dei fotogrammi da mosaicare ad un fotogramma selezionato ed applicando la funzione di *color balancing* con metodo esponenziale.

Per non alterarne i valori spettrali e non compromettere le prestazioni dell'analisi tessiturale, le immagini sono state ricampionate con il metodo *nearest neighbor*, uniformando i pixel ad una *GSD* pari a 2 m.

7.2.2 *Classificazione object-oriented*

La definizione di una procedura semi-automatica per la classificazione delle coperture boschive a partire dalle immagini del volo GAI pone senza dubbio diverse problematiche e maggiori difficoltà rispetto all'analisi di immagini più recenti in relazione alle caratteristiche dei fotogrammi stessi ed alla disponibilità di dati ancillari utilmente implementabili nella procedura. A differenza del caso delle immagini multi banda, ricche di informazione spettrale, l'approccio all'analisi delle immagini pancromatiche, per rivelarsi efficace ai fini della classificazione, deve adeguarsi ad un contenuto semantico non più estraibile dalla misurazione della risposta radiometrica del singolo pixel o da statistiche, calcolate pur sempre con riferimento ai valori dei *digital number*, riferite agli oggetti generati in un approccio *object-oriented*. L'interpretazione semi-automatica di queste immagini a 256 livelli di grigio deve, pertanto, affrontare elevatissimi livelli di incertezza, in quanto ad un determinato valore di *DN* possono corrispondere differenti classi di copertura del suolo. Questa incertezza aumenta ancor più in territori ad orografia accidentata, nei quali i diversi gradi di ombreggiatura, determinati da differenti condizioni di pendenza ed esposizione, rendono ancor meno univoca e, pertanto, attendibile una classificazione su base spettrale. A questi fattori intrinseci alle immagini, si aggiunge la mancanza di dati ancillari integrabili nella procedura di classificazione ed effettivamente utili a supportare la discriminazione delle coperture boschive. L'epoca di acquisizione di queste immagini non consente una comparazione con ortofoto o cartografie tematiche recenti. L'obiettivo della classificazione consiste, infatti, proprio nella valutazione delle variazioni, che si presumono significative, della copertura forestale dal '54-55 all'attualità, pertanto l'impiego in una procedura semi-automatica di dati cartografici o aerofotogrammetrici recenti come ausilio per l'estrazione dei limiti del bosco, oltre ad aggiungere elementi di errore, contraddirebbe l'ipotesi che sta all'origine dell'analisi diacronica che si intende attuare.

Considerate le difficoltà sopra esposte, non stupisce l'esiguo numero di studi condotti nel nostro paese sulle possibilità di sviluppare, per la classificazione di queste immagini, una procedura standardizzata semi-automatica, mentre in molti altri lavori, sviluppati su aree di interesse di modesta estensione, le classi da rappresentare sono state ottenute attraverso fotointerpretazione e digitalizzazione manuale. Le poche ricerche che propongono metodologie

oggettive e speditive per l'estrazione delle informazioni relative al *land cover* dalle foto aeree del volo GAI si basano tutte sull'approccio *object-oriented*, in quanto dalle analisi orientate ai pixel non è possibile estrarre informazioni attendibili. Questo perché, come si è detto, le tonalità di grigio dipendono da molti fattori, alcuni dei quali non sono direttamente correlabili alla copertura del suolo, come ad esempio l'esposizione, l'ombreggiatura, la riflessione, l'angolo di elevazione del sole e la quota di volo (Gennaretti *et al.*, 2009). Gli studi in argomento hanno in comune la caratteristica di non precisare quali attributi vengono implementati nel processo di classificazione, ma al più si limitano ad esplicitare i criteri di scelta dei parametri di segmentazione, ritenendo che l'ottenimento di una buona segmentazione rappresenti già un notevole vantaggio sia in termini di tempo che di oggettività del metodo, consentendo la produzione, secondo criteri oggettivi e riproducibili, di cartografie di uso del suolo da immagini aerofotogrammetriche storiche e recenti in modo da consentire un'analisi molto accurata delle dinamiche del paesaggio. In realtà la definizione dei parametri di segmentazione deve essere adeguata oltre che alle caratteristiche dell'immagine da analizzare ed al sistema di nomenclatura adottato, anche alla scala di analisi, compatibilmente con i tempi e le risorse economiche disponibili. Con questo non si vuol mettere in discussione l'importanza della definizione di linee guida per una corretta segmentazione, ma si ritiene che l'individuazione delle *features* più performanti per l'estrazione dell'informazione tematica da queste immagini sia altrettanto importante e decisiva per rendere l'intera procedura di classificazione effettivamente scalabile e applicabile su area vasta. Il miglioramento dell'accuratezza raggiungibile attraverso l'algoritmo di classificazione diviene, pertanto, determinante nel rendere preferibile la scelta di una procedura semi-automatica di estrazione delle classi tematiche rispetto alle classiche metodiche di digitalizzazione manuale e fotointerpretazione, in quanto contribuisce a rendere meno ingente il successivo lavoro di controllo e modifica delle attribuzioni da parte del fotointerprete necessario per correggere gli errori nella assegnazione tematica del classificatore. Le ricadute positive di una maggiore accuratezza in fase di classificazione automatica si traducono in una significativa riduzione dei tempi della successiva revisione manuale delle attribuzioni, in particolare qualora, come nel caso argomento, la procedura debba essere replicata su scala regionale.

Nello specifico, sono stati sperimentati algoritmi per l'estrazione di parametri statistici di tessitura basati sulle matrici di co-occorrenza.

Introduzione di statistiche tessiturali

La tessitura di un'immagine si può definire come la variazione spaziale dei valori dei toni di grigio secondo una disposizione ricorsiva e geometricamente identificabile. Le caratteristiche di tessitura consentono di analizzare l'omogeneità, la dipendenza lineare dei toni di grigio, il contrasto, il numero e la natura dei confini presenti e la complessità dell'immagine (Haralik et al., 1973). Sebbene per un osservatore umano sia intuitiva ed immediata l'associazione ad una superficie di un particolare concetto di tessitura, le definizioni che se ne danno sono tipicamente qualitative (pertanto soggettive) e legate al suo carattere percettivo. Le tecniche per descrivere le caratteristiche tessiturali in modo oggettivo possono essere di tipo strutturale o statistico. L'approccio strutturale descrive il posizionamento di *textel* deterministici attraverso concetti di adiacenza, vicinanza o periodicità, pertanto è più adatto all'analisi di immagini di strutture artificiali che alla descrizione di scene naturali. Nelle immagini aeree queste ultime sono caratterizzate da tessiture composte da primitive elementari molto piccole con caratteristiche irregolari e per descriverne la variabilità sono più appropriati i metodi basati sull'analisi di parametri statistici. Le matrici di co-occorrenza proposte da Haralick (1973) si basano su statistiche del secondo ordine, ovvero sul calcolo di un istogramma bidimensionale dei livelli di grigio misurati ai capi di un segmento posizionato in modo random nell'immagine con una determinata orientazione. La *grey level co-occurrence matrix (GLCM)*, pertanto, esprime la probabilità congiunta che una coppia di pixel con determinate relazioni spaziali (distanza d e direzione θ) abbiano rispettivamente valori $L_1=l(i,j)$ ed $L_2=l(l,k)$. Per una data relazione spaziale tra coppie di pixel, la matrice di co-occorrenza ha dimensioni quadrate pari ad $N=2^n$, dove n è il numero di bit di quantizzazione dell'immagine (per immagini ad 8 bit come quelle pancromatiche del volo GAI, la matrice di calcolo ha dimensioni di 256×256).

Gli elementi diagonali della matrice rappresentano le coppie di pixel con gli stessi valori di livello di grigio, le celle adiacenti alla diagonale rappresentano le coppie di pixel con una differenza di solo un livello di grigio e via via che ci si allontana dalla diagonale, maggiore sarà la differenza di DN delle coppie di pixel rappresentate.

Generalmente la tessitura si riferisce ad una ripetizione di elementi di base di tessitura chiamati *textel* (TEXTure ELEMENT), definiti da primitive quali il livello di grigio, la forma, la dimensione e l'orientazione.

Il software Definiens Professional, nel calcolo delle statistiche tessiturali, quantizza le immagini da analizzare ad 8 bit (anche se hanno una risoluzione radiometrica maggiore), pertanto pone un limite massimo alle dimensioni della matrice di calcolo.

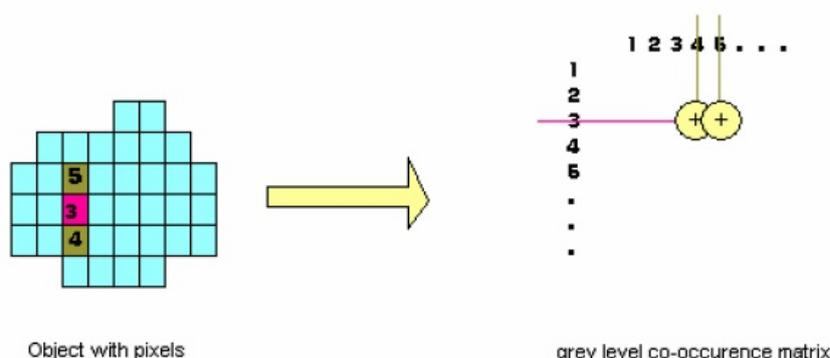
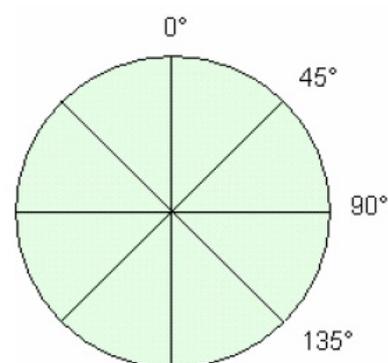


Figura 72. Costruzione della Grey Level Co-occurrence Matrix (Definiens AG, 2006).

Il *software* Definiens Professional offre la possibilità di calcolare le statistiche relative alla tessitura in una sola delle quattro direzioni possibili (0°, ovvero in direzione verticale, 45°, 90°, ossia in direzione orizzontale, 135°) o contemporaneamente in tutte e quattro le direzioni. In quest'ultimo caso il *software* opera su quattro matrici di calcolo ed i tempi di elaborazione si allungano sensibilmente. Gli attributi di tessitura vengono calcolati per ogni pixel appartenente a ciascun oggetto generato dalla segmentazione, ma per ridurre gli effetti di bordo il software prende in considerazione anche i pixel circostanti all'oggetto con una distanza di uno.

Un approccio alternativo per definire statisticamente la tessitura di un'immagine (in Definiens di un oggetto generato dalla segmentazione) consiste nell'utilizzare il *Grey Level Difference Vector (GLDV)*. Questo vettore rappresenta la somma delle diagonali della matrice di co-occorrenza.

L'approccio di co-occorrenza spaziale ha lo svantaggio di generare una grande mole di dati e ciò comporta che, in relazione al tipo e al numero di *features* utilizzate, alla dimensione dell'immagine da analizzare ed alle capacità computazionali del processore impiegato, i tempi di elaborazione possono essere anche estremamente lunghi. E' molto importante, per contenere la durata di processamento ottimizzandone i risultati, attuare tra le *features* tessiturali disponibili la scelta di quelle che meglio descrivono la natura delle classi rappresentate. Alcune di queste *features* riguardano caratteristiche specifiche dell'immagine e la presenza di strutture organizzate all'interno dell'immagine. Altri parametri caratterizzano la complessità e la natura delle transizioni dei toni di grigio. Anche se queste *features* contengono informazioni sulle caratteristiche di tessitura dell'immagine, è, tuttavia, molto difficile individuare quale specifica caratteristica tessiturale possa essere meglio rappresentata da ciascuna di queste *features*, in particolare nelle immagini che



Per ciascun pixel di un oggetto dell'immagine viene considerata la co-occorrenza tra il pixel più vicino in una delle quattro direzioni sopra rappresentate e il pixel più vicino nel verso opposto (Navulur, 2007).

rappresentano scene naturali (foto aeree), nelle quali le caratteristiche di tessitura possono variare da zona a zona con modalità stocastiche. E' senz'altro utile, tuttavia, conoscere orientativamente il significato di questi indicatori di analisi statistica implementati nel *software* Definiens Professional.

Il momento angolare di secondo ordine (*ASM*) è un indicatore dell'omogeneità dell'immagine. In un'immagine omogenea ci sono poche transizioni dominanti di toni di grigio, pertanto nella matrice di questa immagine vi saranno maggiori valori di frequenza elevati ed il secondo momento angolare (che è la somma dei quadrati dei valori delle frequenze) sarà più alto rispetto ad un'immagine più eterogenea (Haralik et al., 1973). E' espresso dalla formula:

$$GLCM\ ASM = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2$$

dove i: numero di riga;

j: numero di colonna;

$P_{i,j}$: valore normalizzato nella cella i,j;

N: numero di righe o di colonne.

Al contrario, quando l'immagine presenta coppie di livelli di grigio dominanti spazialmente per una certa direzione e distanza, l'entropia ha valori bassi. Questa *feature* ha valori elevati quando ogni elemento della matrice ha valori simili, ovvero quando le frequenze delle co-occorrenze sono equidistribuite.

$$GLCM\ Entropy = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\ln P_{i,j})$$

Se l'immagine è localmente omogenea, i valori più elevati della matrice di co-occorrenza sono concentrati lungo le diagonal. L'omogeneità diminuisce in modo esponenziale in funzione della distanza dei valori della matrice dalla sua diagonale. E' espressa dalla formula:

$$GLCM\ Homogeneity = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2}$$

Il contrario dell'omogeneità, il contrasto, esprime la misura delle variazioni locali di intensità, pertanto presenta valori alti per immagini con tessitura molto pronunciata:

$$GLCM\ Contrast = \sum_{i,j}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2$$

Simile al contrasto è la dissomiglianza, che aumenta in modo lineare in relazione alla presenza all'interno dell'immagine di porzioni con alto contrasto:

$$GLCM\ Dissimilarity = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} |i - j|$$

La media misura il valore di un pixel ponderato con la frequenza della sua comparsa in combinazione con determinato valore del pixel vicino:

$$\mu_{i,j} = \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}}{N^2}$$

Analogamente la *GLCM Standard Deviation* misura la dispersione dei valori della matrice di co-occorrenza attorno alla media:

$$\sigma_{i,j}^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i, j - \mu_{i,j})$$

La correlazione, infine, misura il grado di dipendenza lineare dei livelli di grigio di pixels adiacenti:

$$GLCM\ Correlation = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \left[\frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{\sigma_i^2 \times \sigma_j^2}} \right]$$

Le statistiche di tessitura per alcune *features* possono produrre risultati fortemente correlati. I seguenti coefficienti r di correlazione possono variare leggermente da immagine ad immagine e in relazione alla scala di segmentazione, ma delineano una tendenza generale (Hall-Beyer, 2007. www.fp.ucalgary.ca/mhallbey/tutorial.htm) che è servita come riferimento per la selezione delle *features* da implementare nell'algoritmo di classificazione:

GLCM Homogeneity è correlata con *GLCM Contrast*: $r = - 0.80$

GLCM Homogeneity è correlata con *GLCM Dissimilarity*: $r = - 0.95$

GLCM StdDev è correlata con *GLCM Contrast*: $r = 0.89$

GLCM StdDev è correlata con *GLCM Dissimilarity*: $r = 0.91$

GLCM StdDev è correlata con *GLCM Homogeneity*: $r = - 0.83$

GLCM Entropy è correlata con *GLCM ASM*, $r = - 0.87$

GLCM Mean e *GLCM Correlation* sono le più indipendenti:

GLCM Mean ha una correlazione $r < 0.1$ rispetto a qualsiasi altra *feature* tessiturale

GLCM Correlation ha $r < 0.5$ rispetto alle altre *features* di tessitura.

Ulteriori indicazioni nella scelta delle *features* da adottare sono venute da esempi applicativi documentati in letteratura.

Un primo riferimento viene da un progetto pilota finanziato dal Ministero per l'Agricoltura della Repubblica Ceca finalizzato a delineare una metodologia di classificazione automatica per distinguere boschi di latifoglie e di conifere e le aree deforestate a partire da foto aeree in bianco e nero con risoluzione al suolo di 50 cm (Halounová, 2003). Le *features* che in questo studio sono risultate più efficaci nel migliorare l'accuratezza della classificazione sono *GLCM Mean*, *GLCM Dissimilarity* e *GLCM StdDev*. Le prove eseguite (Halounová, 2004) hanno, inoltre, mostrato non esservi tendenze in una particolare direzione, pertanto la *Grey Level Co-occurrence Matrix* è stata calcolata in tutte le direzioni.

Un'ulteriore indicazione viene dai test eseguiti da Laliberte e Rango (2009) su immagini aeree a risoluzione sub-decimetrica segmentate con diversi fattori di scala per la classificazione di pascoli ed arbusteti. Gli autori indicano la *GLCM Entropy* come la caratteristica tessiturale in grado di realizzare una buona separazione dimensionale tra le classi a tutte le scale di segmentazione, mentre altre *features* si mostrano efficaci solo entro certe soglie di scala. Risultati analoghi sono stati ottenuti da Coburn e Roberts (2004).

Lavorando a scale di segmentazione molto piccole (inferiori a 20) le correlazioni tra coppie di *features* di *texture* possono variare notevolmente (Laliberte, Rango, 2009). Questo accade perché oggetti troppo piccoli non sono rappresentativi dell'organizzazione spaziale dei toni di grigio di regioni più ampie dell'immagine, pertanto in questi casi le statistiche tessiturali possono non essere adeguate a migliorare le *performances* dell'algoritmo di classificazione.

Test di classificazione

Le esperienze citate offrono solo un primo riferimento per realizzare una selezione delle caratteristiche tessiturali, da applicare alla classificazione dei fotogrammi del volo GAI, che garantisca un rapporto ottimale su area vasta tra capacità risolutiva e tempi di elaborazione. Il potere risolutivo di queste *features*, infatti, va testato in relazione alle caratteristiche spettrali delle immagini utilizzate, alla loro risoluzione geometrica (che nel caso del volo GAI è di 2 m) ed alle classi da rappresentare. Sono stati, pertanto, eseguiti due test: il primo, sul versante occidentale del Monte Cavallo, riguarda una superficie territoriale di soli 1.600 ha ed è finalizzato alla determinazione dei parametri di segmentazione più idonei ed alla comparazione dei tempi di processamento in relazione all'utilizzo di diverse combinazioni di *features*; la seconda area di studio comprende una superficie territoriale di 30.000 ha situata nella parte settentrionale dell'Altopiano dei Sette Comuni. Le finalità del secondo test è quella di esaminare le particolarità e le problematiche che emergono a seguito dell'applicazione della procedura su superfici molto estese, pertanto consente di perfezionare la procedura stessa per renderla scalabile su ampi comprensori (l'intero territorio regionale).

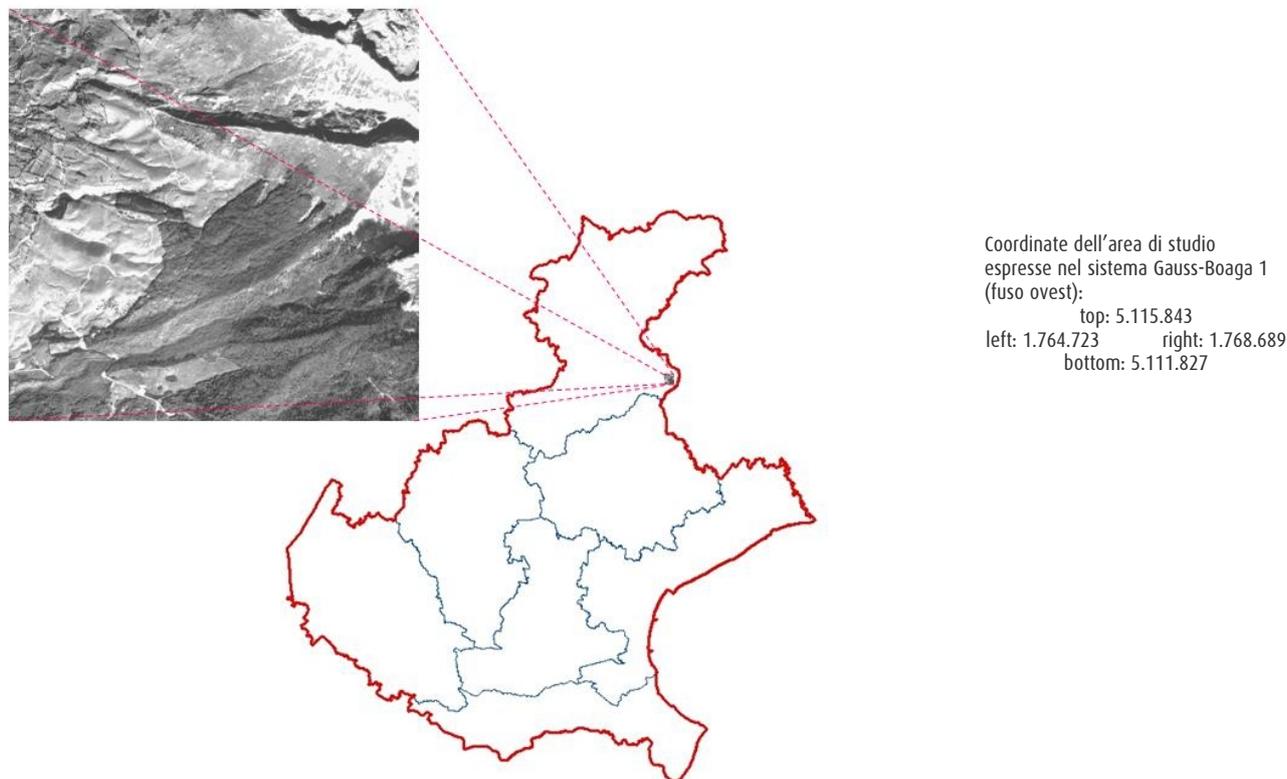


Figura 73. Prima area test: versante occidentale del Monte Cavallo.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

La prima superficie analizzata, situata sul versante occidentale del Monte Cavallo, interessa un'area di 16 Km² rientrante nei comuni di Tambre e Chies D'Alpago (Provincia di Belluno), che presenta un'altitudine media di 1317 m s.l.m., con quote che si distribuiscono da un minimo di 893 m s.l.m. ad un massimo di 2184 m s.l.m.

Nella scelta dei migliori parametri di segmentazione da utilizzare, inizialmente sono stati adottati quelli indicati come ottimali da Gennaretti e al. (2009), ossia 40 come fattore di scala, 0,7 di *shape* e 0,5 di *compactness*. Il risultato della segmentazione, tuttavia, è apparso subito inadeguato ad un'applicazione su vasta scala per l'eccessiva frammentazione prodotta dal basso valore del parametro *scale*. Gli oggetti generati adottando questi parametri rappresentano in modo accurato l'eterogeneità della copertura del suolo esclusivamente in relazione alle loro ridotte dimensioni, in quanto lo scarso peso assegnato all'eterogeneità spettrale produce oggetti per lo più di forma compatta. Aumentando il fattore di scala, per ottenere ugualmente oggetti coerenti con le classi di copertura da rappresentare e rispondenti ai requisiti relativi alla minima unità cartografabile, è stato necessario ridurre il valore del fattore di forma, determinando un innalzamento del *overall fusion value*. Una minor frammentazione ed oggetti rispondenti a suddette caratteristiche sono stati ottenuti utilizzando i seguenti parametri:

- *scale*: 80
- *shape*: 0.3
- *compactness*: 0.5.

Con questa procedura, infatti, è stato possibile ridurre il numero degli oggetti da 4.169 a 1.907.

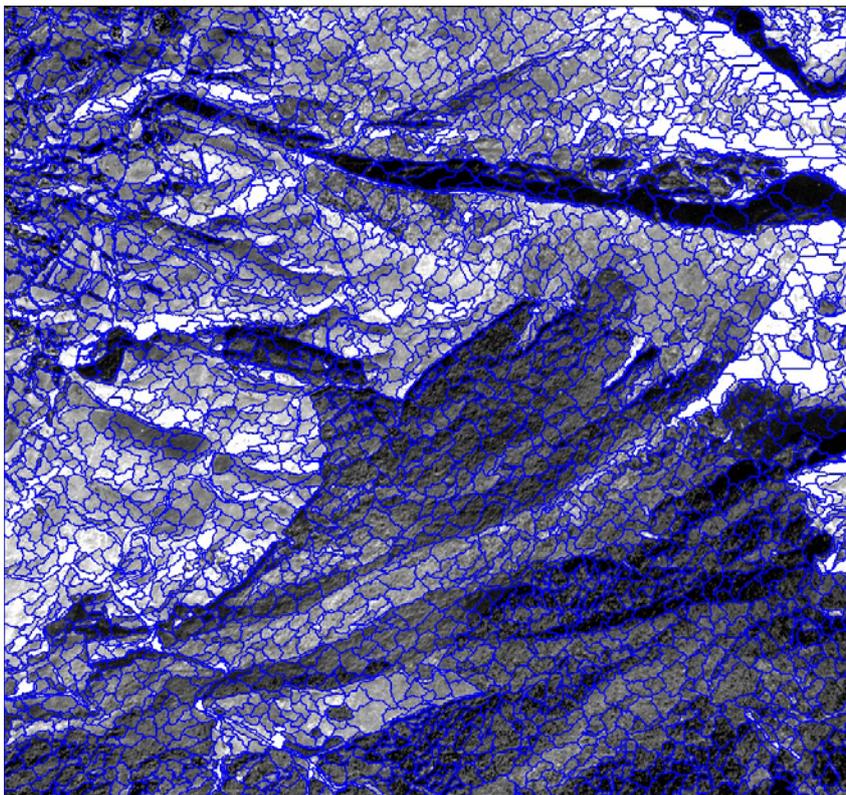


Figura 74. Segmentazione ottenuta con i parametri: scale 40, shape 0.7, compactness 0.5 (4.169 oggetti).

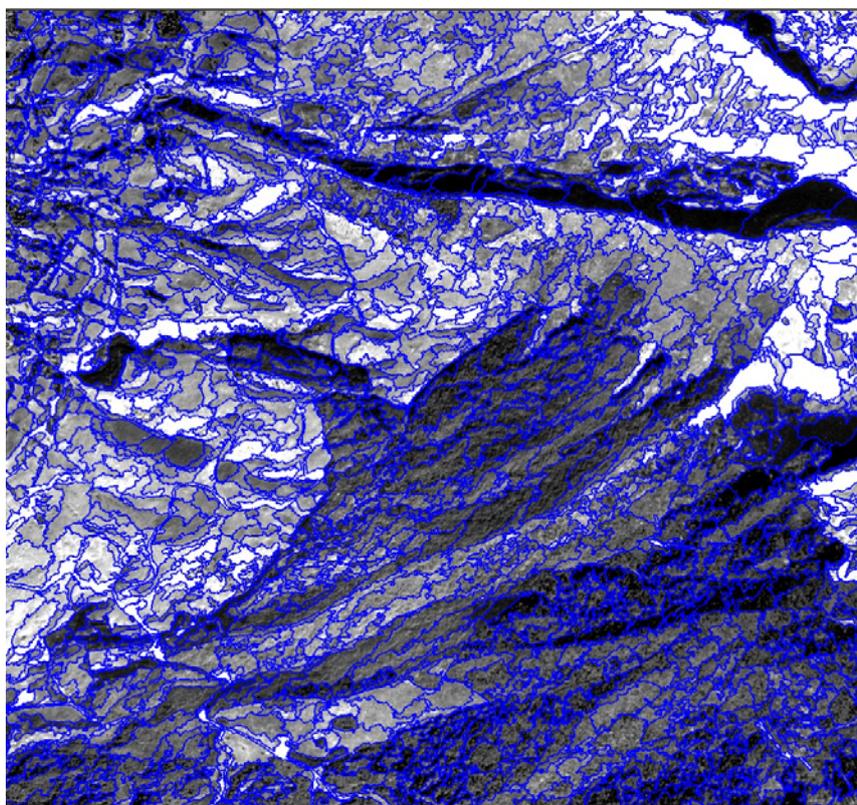


Figura 75. Segmentazione ottenuta con i parametri: scale 80, shape 0.3, compactness 0.5 (1.907 oggetti).

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

Come accennato in precedenza, l'utilizzo delle sola informazione spettrale produce una classificazione estremamente instabile. Ad integrazione di quanto premesso con riferimento alle difficoltà di estrarre informazioni tematiche da immagini pancromatiche, è opportuno evidenziare che, rispetto ad immagini *RGB*, anche il numero di *features* spettrali utilizzabili nella classificazione si riduce drasticamente dal momento che:

nelle immagini mono-banda i valori di *mean* sono eguali ai valori di *brightness*, in quanto si realizza l'eguaglianza

$$\frac{\sum_{i=1}^n DN_m}{n} = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^n DN_m}{n}}{m};$$

in virtù dell'eguaglianza di cui sopra, la *maximum difference* per ogni oggetto è pari a 0.

Nell'algoritmo di classificazione possono, pertanto, essere implementate solo due statistiche calcolate sui valori dei *DN* degli oggetti: la *mean* e la *standard deviation*. Una prima significativa quantificazione del contributo della sola informazione spettrale alla discriminazione delle classi di copertura del suolo è espressa dalla *maximum separation distance* misurata con il *tool FSO*, che evidenzia come queste due *features* realizzino separazione tra le classi relativamente modesta (*maximum separation*: 0.629). Introducendo le seguenti statistiche di tessitura, selezionate in base alle risultanze test eseguiti utilizzando il *FSO*, la distanza tra le classi aumenta in misura significativa (*maximum separation*: 1.385):

Feature	Progressive separation distance
GLCM Entropy (all. dir.)	0.361
GLCM Mean (all. dir.)	1.031
GLCM Dissimilarity (all.dir)	1.075
Mean	1.267
GLCM Correlation (all. dir.)	1.372
Standard deviation	1.385

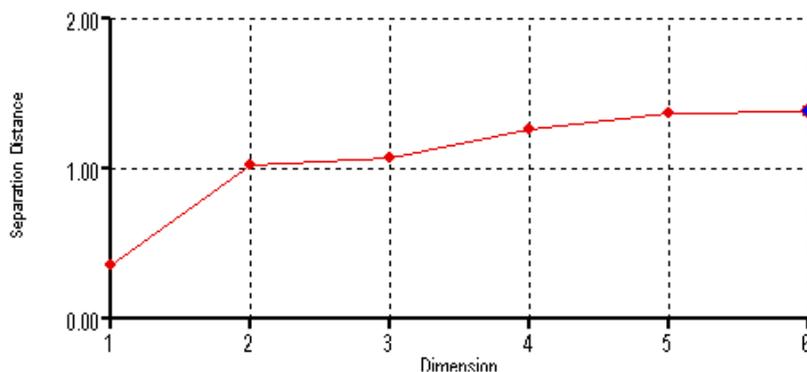


Figura 76. Separabilità minima tra le classi "bosco" e "non bosco" al crescere della dimensionalità delle features considerate.

I tempi di calcolo, introducendo queste 4 statistiche tessiturali calcolate secondo le matrici di co-occorrenza, si dilatano considerevolmente rispetto ad un'elaborazione che consideri le sole caratteristiche spettrali (il rapporto è di 2.700:1).

La valutazione dell'accuratezza delle classificazioni eseguite con o senza l'ausilio delle *features* di tessitura è stata successivamente determinata tramite matrice di contingenza tra classificazioni e *test sites* (*TTA Mask*). Sulla base della matrice generata è stato calcolato l'indice *KIA* (*Kappa Index of Agreement*) per la valutazione sintetica della *performance* dei classificatori.

La classificazione eseguita utilizzando le sole caratteristiche spettrali ha prodotto un *KIA*=0,81, mentre quella che ha visto l'implementazione delle *features* tessiturali ha fornito un *KIA* pari a 0,87. Dal modesto miglioramento dell'accuratezza tematica ottenuto, si potrebbe ritenere poco significativo il contributo delle statistiche tessiturali ed optare per una classificazione sulla base dei soli attributi spettrali, immancabilmente seguita da un collaudo manuale tramite fotointerpretazione. Questo risultato e le considerazioni che ne derivano devono, tuttavia, essere contestualizzati alla scala di analisi adottata e all'estensione dell'area di studio. L'indice *KIA*, infatti, è una misura statistica, non assoluta, dell'accuratezza della classificazione e sulla stessa immagine classificata il suo valore può variare in relazione alla scala di segmentazione adottata (qualora le *test areas* facciano riferimento ad oggetti generati dalla segmentazione), nonché alla numerosità ed alla distribuzione delle aree test. Si può, inoltre, presumere che vi sia una maggior correlazione tra gli attributi spettrali e le classi di copertura del suolo all'interno di una superficie territoriale di dimensioni ridotte rispetto a classificazioni automatiche eseguite su estensioni più ampie, in cui interviene una maggiore eterogeneità di situazioni

Le *TTA Mask* (*Training and Test Area Mask*) possono essere utilizzate come *samples* e trasferite su altri *dataset* mantenendo le informazioni sulle classi di riferimento. Nel contesto di questa ricerca le *TTA* sono state utilizzate come aree test e selezionate con distribuzione casuale ed omogenea, evitando la sovrapposizione con le *samples areas*.

Concettualmente l'indice *KIA* rappresenta il rapporto tra la concordanza non dovuta al caso e la discordanza che ci si aspetta qualora vi sia un'attribuzione casuale dei pixel campione alle diverse classi tematiche.

e fattori di criticità, quali i gradini radiometrici residui in corrispondenza delle linee di giunzione tra fotogrammi contigui, che possono rendere la classificazione meno stabile.

Al fine di perfezionare la procedura di classificazione in risposta a queste problematiche e di ottimizzarla in relazione alla necessità di rendere sostenibile la sua applicazione su scala regionale, la seconda sperimentazione è stata condotta su un ambito territoriale molto più esteso, che comprende parte dei comuni di Pedemonte, Valdastico, Roana, Asiago, Gallio, Foza, Enego, Valstagna, San Nazario, Cismon del Grappa (Provincia di Vicenza), e copre una superficie complessiva di circa 30.000 ha.

Coordinate dell'area di studio
esprese nel sistema Gauss-Boaga 1
(fuso ovest):
top: 5.095.486
left: 1.682.074 right: 1.711.374
bottom: 5.083.841

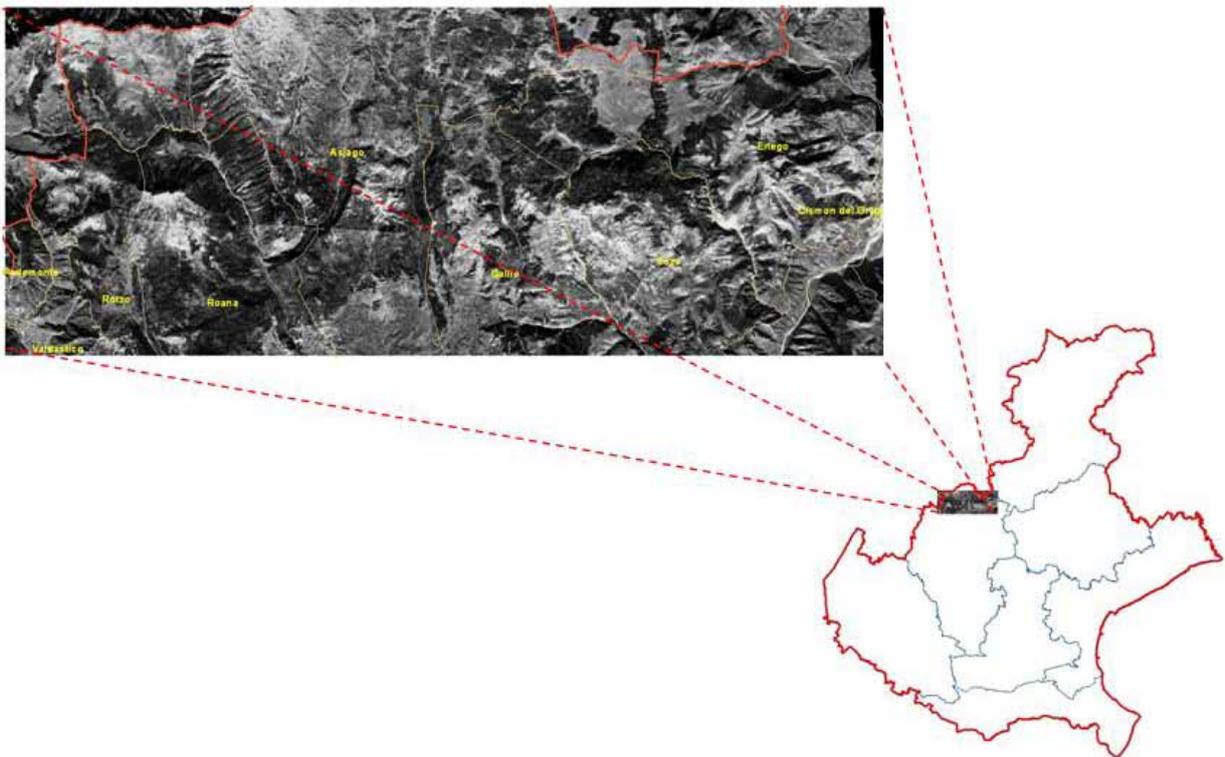


Figura 77. Seconda area test: Altopiano dei Sette Comuni (parte settentrionale).

La segmentazione, in questo caso, è stata eseguita, sempre attraverso un approccio iterativo, con una diversa ottimizzazione dei parametri, che ha visto aumentare il fattore di scala da 80 a 120, mantenendo invariate *shape* e *compactness* (che assumono rispettivamente i valori 0.3 e 0.7), perseguendo l'obiettivo di ridurre ulteriormente il numero degli oggetti generati per consentire una maggiore spedività nella verifica ed eventuale correzione delle attribuzioni tematiche. Comparando questo risultato con il prodotto della segmentazione eseguita nella prima area test, si è potuto verificare che gli

oggetti generati con *scale* pari a 120, pur di dimensioni mediamente maggiori, garantiscono ugualmente il requisito della coerenza con le diverse coperture del suolo e dell'adeguatezza alla scala di rappresentazione, delimitando superfici omogenee di area anche inferiore ai 2000 m² (Savio, 2010).

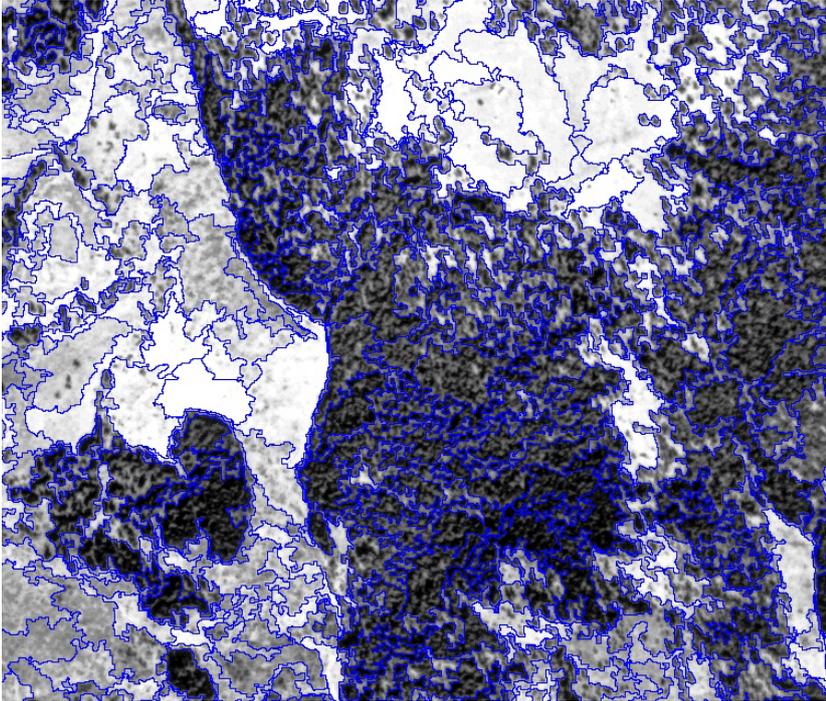


Figura 78. Segmentazione ottenuta con: scale 80, shape 0.3, compactness 0.5 (oggetti generati per l'intera area di studio: 53.957)

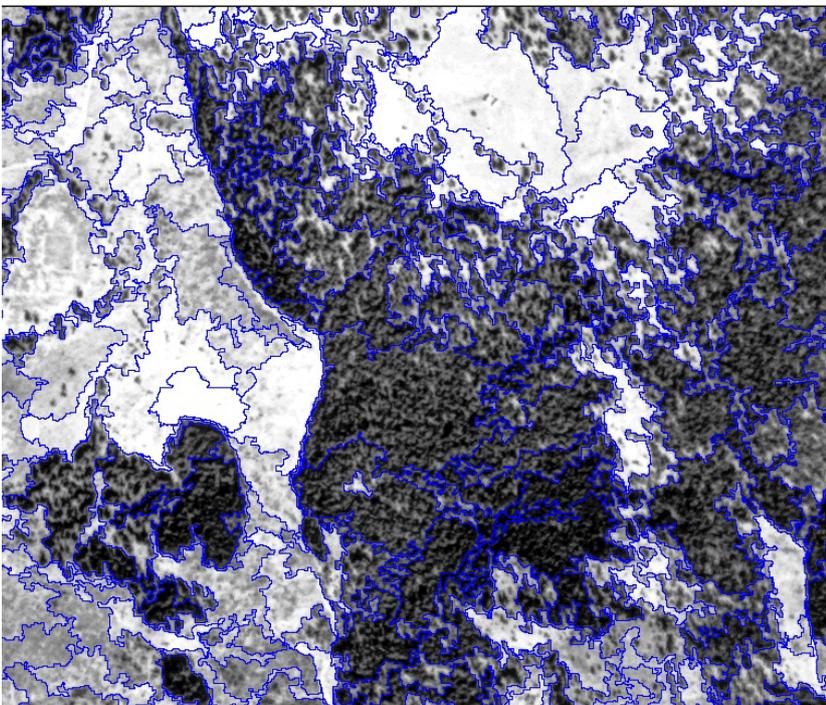


Figura 79. Segmentazione ottenuta con: scale 120, shape 0.3, compactness 0.5 (oggetti generati per l'intera area di studio: 25.312)

Come si può osservare nei due particolari a confronto, l'incremento del fattore di scala a 120 non ha determinato un degrado nella differenziazione geometrica tra le classi "bosco" e "non bosco", ma ha prodotto una minor frammentazione degli oggetti all'interno di ciascuna classe, preservando il requisito di unità minima cartografabile adottato..

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

Anche per questa area di studio è stato avviato il processo automatico di ottimizzazione delle *features* per individuare quelle in grado di determinare la migliore separazione tra le classi. In un primo test è stato utilizzato l'insieme delle due *features* spettrali disponibili per immagini monobanda, ovvero la *mean* e la *standard deviation*, ed un sottoinsieme di cinque *features* tessiturali selezionate, tra le otto disponibili, a partire da quelle indicate in letteratura, in modo da escludere a priori quelle che presentano una forte correlazione. Si è potuto, infatti, verificare che l'introduzione di statistiche tessiturali correlate nel processo di *features space optimization* produce un'apparente maggior distanza tra le classi (in questo caso i risultati di *FSO* sono fuorvianti), ma un loro utilizzo nell'algoritmo di classificazione aumenta i tempi di calcolo e non contribuisce ad un effettivo miglioramento dell'accuratezza della classificazione.

Introducendo *GLCM Mean*, *GLCM Dissimilarity*, *GLCM Entropy*, *GLCM Contrast*, *GLCM Correlation*, la distanza tra le classi, nello spazio multidimensionale ottimizzato di 7 *features*, viene più che raddoppiata rispetto alle sole statistiche spettrali. Questi risultati sono stati ottenuti applicando le statistiche di *texture* calcolate nelle quattro direzioni.

Utilizzando le sole statistiche spettrali (*mean* e *standard deviation*), si ottiene una *best separation distance* pari a 0.919.

Feature	Progressive separation distance
GLCM Mean (all. dir.)	0.263
GLCM Dissimilarity (all. dir.)	1.316
GLCM Entropy (all. dir.)	1.521
Mean	1.818
GLCM Correlation (all.dir)	1.962
GLCM Contrast (all. dir.)	2.068
Standard deviation	2.116

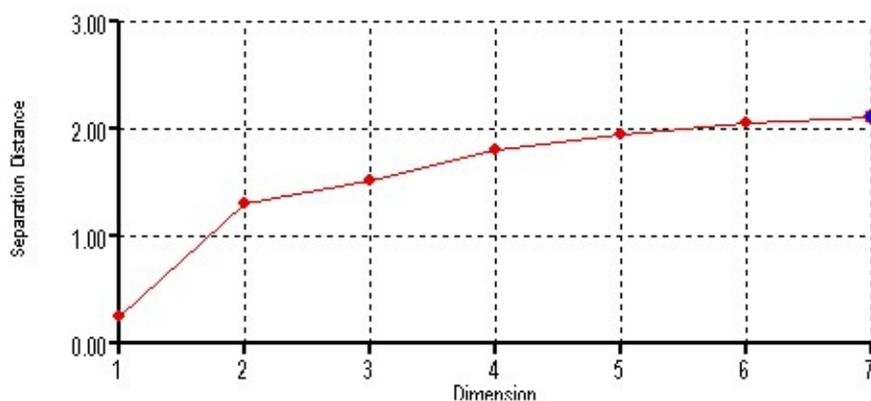


Figura 80. Ottimizzazione ottenuta considerando le *features* di tessitura calcolate nelle quattro direzioni.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

Alla selezione finale delle *features* da implementare nell'algoritmo di classificazione hanno contribuito anche considerazioni sull'opportunità di contenere l'onere computazionale a tempi di elaborazione compatibili con l'esigenza di replicare la procedura senza tempi di attesa. L'organizzazione ottimale del lavoro è quella che prevede l'esecuzione del processo di classificazione nelle ore notturne, pertanto i tempi di processamento necessari a classificare questa seconda area test possono essere indicativi per un dimensionamento ottimale dei *tiles*.

Il grafico in Figura 80 conferma quanto dimostrato da studi precedenti (Trianni, 2005), ovvero che l'impiego di più di quattro *features* tessiturali, a fronte di tempi di calcolo più lunghi, non produce alcun miglioramento nell'accuratezza della classificazione. Considerando l'andamento del grafico e bilanciando i tempi di calcolo con il risultato espresso in termini di *separation distance*, la classificazione è stata eseguita selezionando le tre migliori *features* tessiturali, ovvero *GLCM Mean*, *GLCM Dissimilarity*, *GLCM Entropy*, e due spettrali, *Mean* e *Standard deviation* (Savio, 2010), ottenendo una separazione tra le classi = 1.912. L'elaborazione, eseguita su una workstation dotata di processore Intel Core2 Duo CPU E6550 con 2 Gb di RAM, ha richiesto approssimativamente 19 ore.

Con riferimento all'angolo θ di calcolo della *grey level co-occurrence matrix*, le strategie suggerite in letteratura sono diverse. Haralik et al. (1973), oltre ad Halounovà (2004), propongono di estrarre le *features* di tessitura in tutte le quattro possibili direzioni e poi calcolarne il valore medio. Peddle e Franklin (1989) sostengono invece che in molti casi le *features* di *GCLM* calcolate considerando una appropriata direzione possono essere più idonee nella discriminazione di alcune classi di copertura del suolo.

In un secondo test eseguito con l'ausilio del *tool FSO*, le cinque *features* tessiturali sono state implementate singolarmente nelle quattro direzioni, al fine di determinare, per ciascuna *feature*, la direzione che contribuisce con maggior efficacia alla separazione delle classi.

Feature	Progressive separation distance
GLCM Mean (45°)	0.276
GLCM Dissimilarity (0°)	1.479
GLCM Entropy (135°)	1.666
Mean	1.990
GLCM Correlation (135°)	2.160
Standard deviation	2.245

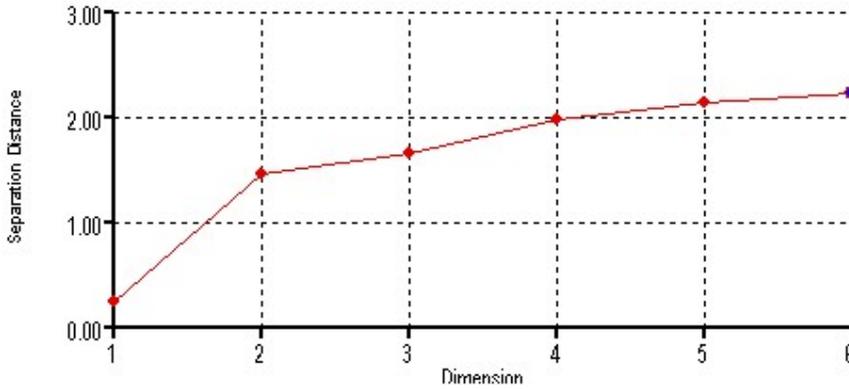


Figura 81. Separazione tra le classi ottenuta considerando le features di tessitura calcolate in una direzione.

Dai risultati riportati in tabella, si nota che le *features* di tessitura calcolate in una sola direzione (la più efficace) sono in grado di separare le classi in misura comparabile (o addirittura lievemente superiore) alle medesime statistiche calcolate per tutte le direzioni. Per ciascuna di esse la direzione di calcolo più appropriata è stata determinata empiricamente, dal momento che non sussistono elementi percettibili di relazione con le caratteristiche dell'immagine. Si è potuto, inoltre, appurare che le direzioni di calcolo delle co-occorrenze utilizzate per classificare quest'area test non necessariamente sono altrettanto efficaci in altre situazioni, in cui le variazioni delle condizioni di illuminazione, delle pendenze e delle esposizioni dominanti interferiscono sulle *performances*, per cui altre direzioni di calcolo possono risultare più indicate ai fini della discriminazione delle classi di uso del suolo.

In termini di accuratezza della classificazione, adottando gli stessi poligoni di training, i risultati ottenuti applicando l'algoritmo che implementa il calcolo del valor medio delle *features* tessiturali estratte nelle quattro direzioni sono del tutto analoghi a quelli ottenuti attraverso l'impiego delle medesime statistiche calcolate nella direzione che è risultata la più idonea per quest'area di studio. La seconda metodologia ha mostrato il significativo vantaggio di dimezzare i tempi di calcolo, ma richiede un'analisi preliminare per l'individuazione dell'angolo θ più efficace nel contesto specifico alla separazione delle classi.

Problematiche interpretative

Analogamente a quanto svolto per l'area test sul versante occidentale del Monte Cavallo, anche sull'area di studio sull'Altopiano dei Sette Comuni è stata

effettuata una valutazione del contributo delle *features* di tessitura al miglioramento dell'accuratezza della classificazione, confrontando i valori di *KIA* della classificazione ottenuta attraverso l'implementazione dei soli attributi spettrali con quella risultante dall' algoritmo composto da 3 statistiche tessiturali + 2 spettrali. In questo caso la classificazione realizzata con le sole statistiche spettrali ha riportato un valore di *KIA* pari a 0,84, mentre l'algoritmo che implementa le *features* tessiturali realizza un valore di *KIA* pari a 0,91 (Savio, 2010).

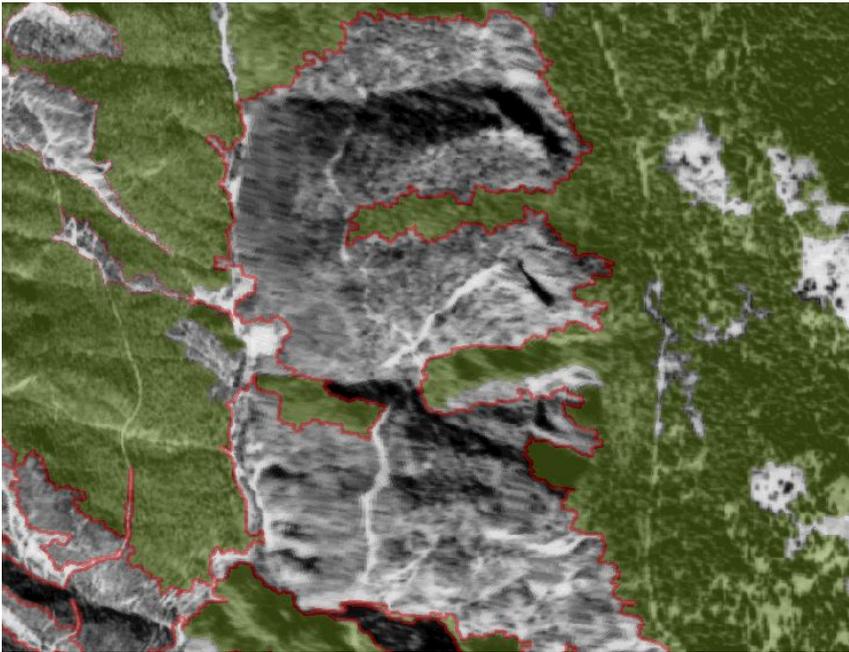
La matrice di contingenza tra classificazione e *test sites* (*TTA Mask*) generata in questo secondo caso mostra una *user's accuracy* della classe bosco pari ad 1 e la mancanza di aree *test* con attribuzione *unclassified*.

Classificazione	Riferimento			
		<i>Non bosco</i>	<i>Bosco</i>	<i>Totale</i>
Non bosco	442.461	46.667	489.128	
Bosco	0	602.470	602.470	
Unclassified	0	0	0	
Totale	442.461	649.137		
Producer accuracy	1	0,928		
User's accuracy	0,904	1		
Overall accuracy	0,957			
KIA	0,912			

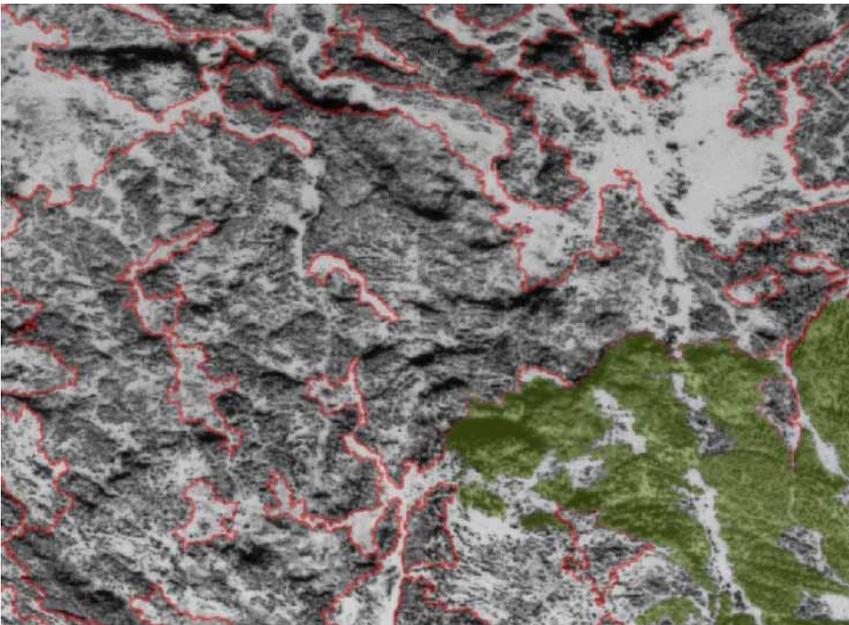
Questa analisi mostra innanzitutto l'adeguatezza e la precisione del classificatore nel discriminare le aree boscate, mentre qualche incertezza permane per la classe non bosco. Ma i risultati vanno interpretati anche alla luce della strategia complessiva adottata nella classificazione di un'area tanto vasta che ha condizionato i criteri di selezione delle *samples areas* e delle aree di verità a terra.

A differenza del territorio classificato in prossimità del Monte Cavallo, in questa circostanza si sono rilevate molte situazioni non interpretabili a video sull'immagine aerea, sia per l'insufficiente risoluzione geometrica delle immagini, sia per motivi riconducibili alla fase vegetativa al momento della ripresa aerea. Le immagini della strisciata 22-A sono state acquisite il 2 ottobre 1954, pertanto, in presenza di vegetazione forestale decidua, le chiome possono risultare difficilmente rilevabili, soprattutto in particolari condizioni di illuminazione. È il caso degli orno-ostrieti e delle faggete nei Comuni di

Pedemonte, Valdastico, Foza Enego e Valstagna, che è stato possibile attribuire alla classe bosco solo dopo aver integrato l'interpretazione a video con valutazioni sulla vegetazione attuale, informazioni sulla gestione forestale pregressa tratte dai piani di riassetto forestale ed alcune osservazioni sul campo. La stessa procedura è stata adottata per l'attribuzione alla classe bosco delle mughete in Comune di Asiago, le quali, al pari di altre formazioni a portamento arbustivo, non staccano un'ombra ben definita e pertanto sono difficilmente distinguibili dalla vegetazione erbacea o da micro rilievi del terreno che generano variazioni locali della luminosità dell'immagine.



L'interpretazione a video delle faggete delimitate in rosso (in verde gli altri soprassuoli forestali classificati con la procedura semi-automatica) è resa ancor più difficoltosa per gli effetti di distorsione geometrica indotti dal *relief displacement*.



I poligoni interessati dalle formazioni a Pino mugo sono stati classificati bosco se la copertura stimata raggiunge il 30% (L.R. n.52/78 art.14). Per i soprassuoli forestali a portamento arboreo, invece, il grado minimo di copertura è del 10% (FRA2000). In entrambi i casi è stata assunta l'unità minima di 2000 mq.

Figura 82a-b. Casi di difficile interpretazione: faggeta in Comune di Valdastico (a); mugheta in Comune di Asiago (b).

E' evidente che le casistiche sopra esposte non possono essere risolte attraverso la classificazione automatica, pertanto l'eventuale assegnazione alla classe bosco di tutte le situazioni di difficile interpretazione è avvenuta nella fase di correzione manuale delle attribuzioni tematiche successiva alla classificazione automatica, esaminando ciascun caso sulla base dell'insieme delle informazioni disponibili. Le aree di training processate dall'algoritmo *nearest neighbor*, di conseguenza, sono state selezionate, come è buona norma, in modo da rappresentare esaustivamente per ciascuna classe le variazioni degli attributi implementati nell'algoritmo di classificazione, escludendo, tuttavia, quelle porzioni di immagine che presentavano dubbi interpretativi. Analogamente questi settori dell'immagine sono stati estromessi dall'individuazione dei *test sites* impiegati per generare la matrice di errore. Gli indicatori di accuratezza e i valori di *K/A* sono, pertanto, rappresentativi dell'intera immagine ad esclusione delle aree evidenziate in giallo.

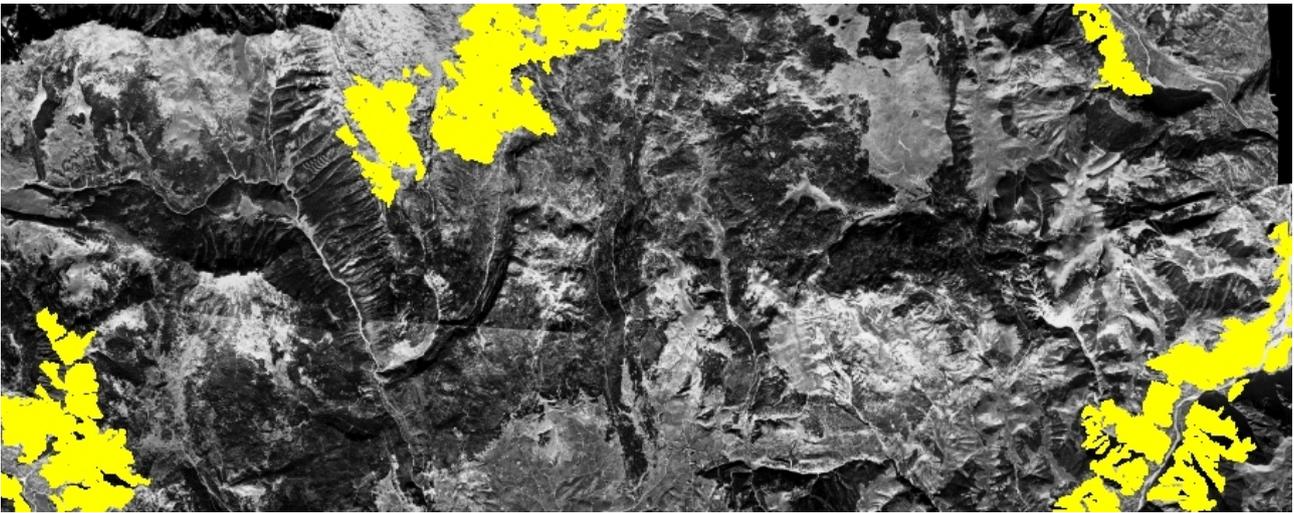


Figura 83. Superfici escluse dalla selezione dei poligoni di training e dalla valutazione dell'accuratezza.

La classificazione in entrambi i casi studio ha previsto, oltre alle classi tematiche "bosco" e "non bosco", l'introduzione di una terza classe "non classificabile", che comprende le ombre dovute all'orografia, le coperture nuvolose e le superfici di dubbia interpretazione che non risultano risolvibili con le modalità sopra esposte. L'attribuzione degli oggetti a questa classe è avvenuta tramite fotointerpretazione manuale, valutando di caso in caso l'effettiva impossibilità di inquadramento nelle altre due classi. Complessivamente la superficie territoriale non classificabile rispetto a quella totale si è potuta limitare al 3,3% nell'area studio ad ovest del Monte Cavallo e al 4,6% nell'area studio comprendente il settore settentrionale dell'Altopiano dei Sette Comuni. Tali percentuali, tuttavia, possono diversificarsi sensibilmente in rapporto alle caratteristiche dell'immagine. In particolare l'aliquota di zone d'ombra varia in relazione all'elevazione solare e alle caratteristiche del territorio, pertanto nelle regioni dolomitiche, caratterizzate da valli impervie e frequenti rotture di pendio, sono riscontrabili percentuali di superfici non classificabili molto superiori. Per la scarsa profondità radiometrica di queste immagini, anche i comuni metodi di correzione topografica si sono dimostrati inadeguati a consentire l'identificazione, anche solo parziale, delle caratteristiche degli oggetti presenti all'interno delle zone d'ombra.

A differenza delle ultime fasi del procedimento di classificazione delle immagini aerofotogrammetriche del volo Montagna Veneta del '91, che prevede l'adeguamento delle attribuzioni tematiche ai requisiti dimensionali e di copertura che caratterizzano la definizione di bosco adottata, alle immagini del volo GAI è stato possibile applicare solo la procedura automatica di verifica della

superficie minima. La risoluzione geometrica, spettrale e radiometrica di queste immagini, infatti, non consente di supportare la verifica del grado di copertura arborea con procedure automatiche di controllo. Di conseguenza, per la validazione della soglia minima di copertura, ci si è affidati alla sola interpretazione visiva.

Anche in questo caso l'effetto *stepwise* dell'*output* finale è stato corretto contestualmente all'esportazione nel formato *shape* di ESRI applicando opportuni algoritmi di *smoothing*.

Osservazioni conclusive

Dai due test eseguiti si è potuto notare che al variare dei parametri di segmentazione, cambia anche il contributo delle singole *features* tessiturali nel determinare la *best separation distance*. Per studiare meglio il fenomeno, l'immagine che copre la parte settentrionale dell'Altopiano dei Sette Comuni è stata nuovamente segmentata mantenendo inalterato il fattore di scala e la *compactness* ed aumentando il valore di *shape* a 0.7. Gli oggetti generati applicando questi parametri hanno dimensioni mediamente doppie rispetto a quelli ottenuti con *scale*=120, *shape*=0.3, *compactness*=0.5. L'analisi eseguita attraverso il *tool FSO*, in comparazione con i risultati ottenuti nei due test precedenti, conferma la tendenza della *GLCM Entropy* ad assumere un'importanza sempre minore nella separazione delle classi all'aumentare della dimensione degli oggetti, mentre rimane invariato il contributo delle *features GLCM Mean* e *GLCM Dissimilarity*.

Feature	Progressive separation distance
GLCM Mean (all. dir.)	0.721
GLCM Dissimilarity (all. dir.)	1.616
GLCM Correlation (all.dir)	2.028
Mean	2.311
GLCM Entropy (all. dir.)	2.564
GLCM Contrast (all. dir.)	2.638

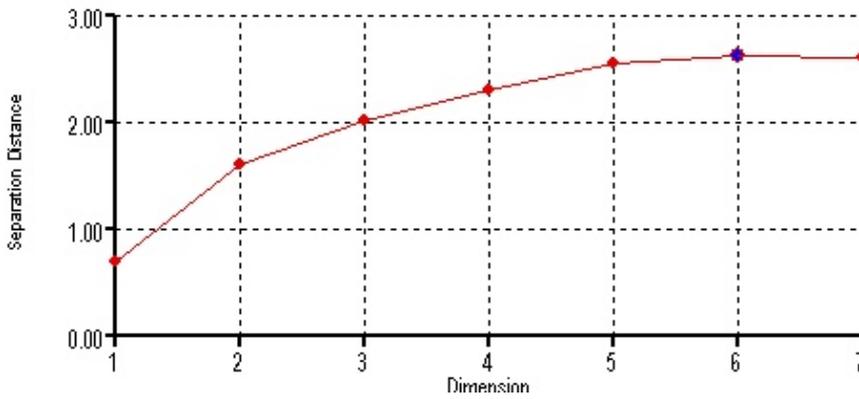


Figura 84. Separation distance ottenuta adottando i parametri di segmentazione $scale=120$, $shape=0.7$, $compactness=0.5$.

Questo andamento rispecchia i cambiamenti dei punteggi assegnati alle *features* tessiturali da Laliberte e Rango (2009) al variare del fattore di scala. Gli stessi Autori rilevano, inoltre, una correlazione tra valori di *KIA* e scala di segmentazione. In questo contesto, sulla base delle sperimentazioni condotte, insufficienti a comprovare tale *trend*, ci si limita ad osservare che, utilizzando le stesse *features*, si assiste ad un tendenziale incremento della separazione tra le classi in relazione all'aumento delle dimensioni medie degli oggetti.

Infine si è potuto osservare che risultati in termini di accuratezza i due test eseguiti sono coerenti con la correlazione tra *overall accuracy* (e *KIA*) e *best separation distance*, rilevata da Laliberte e Rango (2008) su immagini aeree RGB ad altissima risoluzione.

L'indice *KIA* è derivato dalla *overall accuracy* e si calcola con il rapporto:

$$KIA = \frac{OA - \sum_{j=1}^C r_j c_j}{1 - \sum_{j=1}^C r_j c_j}$$

dove OA (*overall accuracy*) =

$$\frac{\sum_{j=1}^C n_j}{n}$$

n_j = numero di pixel attribuiti correttamente alla j -esima classe;
 n = numero totale dei pixel;
 C = numero di classi tematiche;
 r_j = numero totale di pixel sulla j -esima riga della matrice di errore;
 c_j = numero totale di pixel sulla j -esima colonna della matrice di errore.

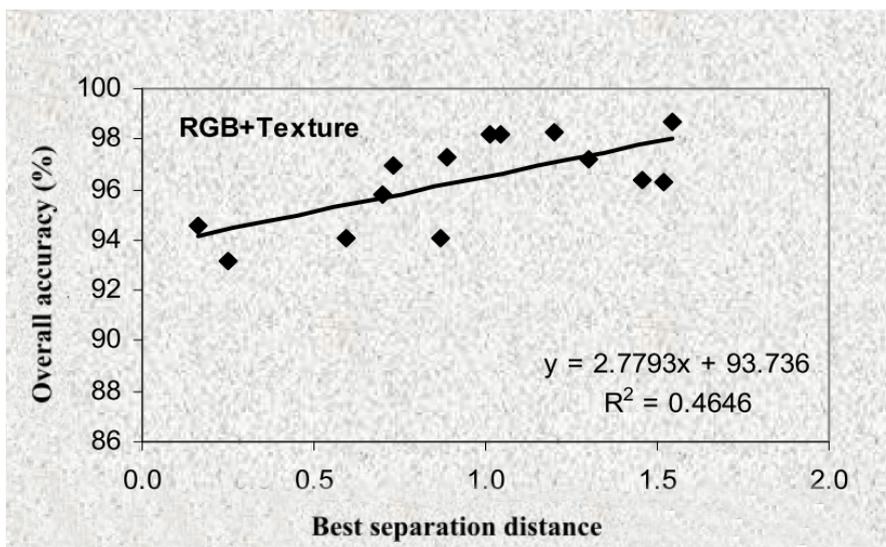


Figura 85. Correlazione tra *overall accuracy* e *best separation distance* su immagini RGB con risoluzione geometrica di 5 cm (Laliberte, Rango, 2008).

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali - Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

7 - Modalità di pre-processing e di classificazione delle foto aeree per la determinazione delle superfici forestali

Per conseguire risultati significativi sulla natura della dipendenza tra questi due valori sulle immagini pancromatiche del volo GAI, sarebbe necessario eseguire numerosi test di classificazione analizzando la tendenza su raggruppamenti di *features* (solo spettrali o spettrali + tessiturali). Ad ogni modo questa correlazione ci porta a concludere che la distanza di separazione tra le classi possa essere assunta come indicatore dell'accuratezza della classificazione ed, indirettamente, possa servire quale ausilio per definire i parametri ottimali di segmentazione, fermo restando che la variabilità di essi deve comunque rientrare entro i limiti che garantiscano il requisito della coerenza della segmentazione con la rappresentatività del sistema di nomenclatura adottato e con le specifiche tecniche della cartografia di riferimento, in particolare per quanto concerne l'unità minima mappabile. E' di facile intuizione, infatti, che l'accuratezza della classificazione è anche correlata ad una segmentazione accurata, che è quella in grado di generare oggetti che coincidono con precisione con le classi da rappresentare (Martelli, 2009).

Ancora con riferimento ai parametri di segmentazione, attraverso la sperimentazione condotta nel secondo caso studio, si è conseguita una migliore calibrazione del fattore di scala, che ha consentito di ridurre sensibilmente il numero degli oggetti, contribuendo, assieme al miglioramento dell'accuratezza della classificazione automatica ottenuto con l'applicazione delle *features* tessiturali, ad un sensibile contenimento dei tempi della successiva revisione tramite fotointerpretazione manuale.

Sono anche stati presi in considerazione i tempi di elaborazione necessari all'esecuzione del processo di classificazione, che si è visto essere legati, oltre che alle caratteristiche dell'*hardware* impiegato e alla numerosità e tipologia delle *features*, anche alla numerosità delle *samples areas* selezionate, da cui in una certa misura dipende l'accuratezza della classificazione. L'algoritmo di classificazione costruito sulle *features* tessiturali calcolate in una direzione consente di contenere in tempi compatibili con l'organizzazione del lavoro il computo del classificatore *nearest neighbor* eseguito su un numero maggiore di *samples*, pertanto, a parità di tempi di elaborazione, di ottenere migliori *performances* in termini di accuratezza.

La numerosità di poligoni di *training* selezionati risponde ai criteri adottati per la classificazione del volo Montagna Veneta del '91, esposti a pagina 115.

8 INTEGRAZIONE DEI DATI ED ANALISI MULTITEMPORALE

8.1 Comparabilità dei livelli informativi

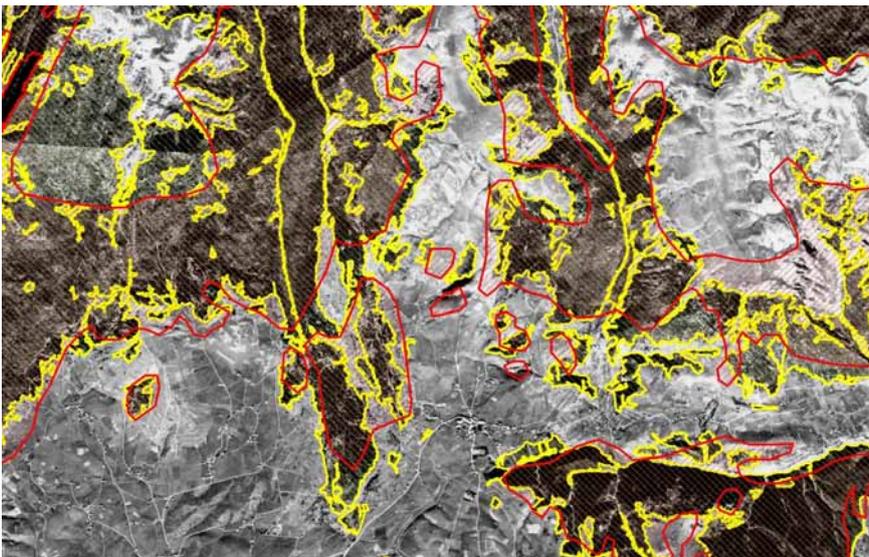
Le possibilità di utilizzo delle basi informative ufficiali descritte nei paragrafi precedenti per spazializzare le variazioni delle superfici forestali nel tempo sono soggette a limitazioni determinate, oltre che dal dettaglio di rappresentazione, dalla rispondenza a determinati standard tematici.

8.1.1 Comparabilità tematica

Il dato di superficie nelle statistiche forestali è quello più richiesto e comune. Oltre ad essere di immediata comprensione e, pertanto, facilmente comunicabile, è anche fondamentale per qualsiasi analisi territoriale. In realtà il dato di superficie, nel contesto di uno studio multitemporale, può porre notevoli difficoltà di stima dipendenti, oltre che dalla scala rappresentazione e dal metodo di restituzione cartografica, dai mutamenti occorsi nel tempo al concetto di bosco ed ai criteri di attribuzione, basati sulla sola misurazione di parametri oggettivi (altezza minima, superficie minima, grado minimo di copertura arborea) o estesi alla valutazione del quadro territoriale di uso del suolo. La stima delle superfici forestali, infatti, è spesso caratterizzata da equivoci interpretativi legati alla commistione tra caratteri fisionomici e destinazione d'uso, criticità che solo in parte il complesso delle definizioni ha affrontato e risolto. Un esempio sono le incertezze interpretative cui si va incontro quando le foreste entrano a far parte degli spazi rurali (è il caso dei rimboschimenti di pianura e dell'arboricoltura da legno) o rappresentano popolamenti da frutto (castagneti, corileti) o, ancora, quando costituiscono contesti evolutivi di incerta destinazione, come le neoformazioni e gli arbusteti, che a seconda degli interessi economici e dei condizionamenti politici, vengono considerati bosco o terreni recuperabili ad altra destinazione.

In definitiva non stupisce la difficoltà che si incontra storicamente nel contesto nazionale di dare al bosco una definizione univoca, indipendente dalla funzione

che si attribuisce allo stesso e al contesto territoriale ed economico in cui insiste. Si citano ad esempio le leggi forestali del 1877 e del 1923, che, pur occupandosi ampiamente del bosco e delle sue funzioni eteroprotettive, non ne hanno fornito una definizione specifica (Cerofolini, 2005). Il legislatore dell'epoca ha ritenuto più opportuno lasciare che fosse l'Autorità forestale ad individuare di volta in volta *"i terreni di qualsiasi natura (anche boschivi) che per effetto di utilizzazioni contrastanti con le norme ... potessero con danno pubblico subire denudazioni, perdere stabilità o turbare il regime delle acque"* (art.1 del R.D.L. 3267/1923) per sottoporli a vincolo per scopi idrogeologici. In questo contesto di indeterminatezza giuridica si colloca la Carta forestale del Regno d'Italia del 1936, il cui oggetto di rappresentazione non risponde ad alcun parametro oggettivo definito. Lo stesso sistema di nomenclatura adottato raggruppa le formazioni che non rientrano nelle principali formazioni, contraddistinte dal nome della specie dominante, in classi comprensive di soprassuoli misti ed eterogenei (*"altre specie e formazioni miste"*, *"boschi degradati e da ricostituire"*) che non lasciano adito ad interpretazioni univoche.



Sull'Altopiano dei Sette Comuni, dal confronto tra le coperture forestali estratte dal volo GAI e la Carta forestale del Regno d'Italia, in termini complessivi non sono risultate significative variazioni di superficie boscata tra il 1936 e il 1954.

Figura 86. Overlay tra la Carta forestale del Regno d'Italia (in rosso) e le coperture forestali estratte dal volo GAI.

E' evidente, pertanto, che il confronto tra questo prodotto, che pur rappresenta un documento di inventariazione di notevole interesse storico, e le fonti informative più recenti può restituire indicazioni sulla tendenza alla variazione della superficie forestale nel lungo periodo che devono considerarsi puramente orientative, in quanto affette da errori di restituzione (dovuti ai metodi di rilievo

in uso all'epoca) e discrepanze dovute alla diversa definizione di bosco la cui entità non può essere stimata.

Nel panorama giuridico italiano la necessità di adottare una definizione univoca di bosco si è avvertita in modo particolare dopo l'entrata in vigore della L. n.431/1985 recante disposizioni in materia di tutela paesaggistica, che ha sottoposto la trasformazione dei terreni boscati ad altre destinazioni d'uso ad un preciso sistema di autorizzazioni. Nel frattempo alcune Regioni, tra cui la Regione del Veneto, si erano dotate, per i territori di competenza, di una propria definizione di bosco. La Carta Forestale Regionale del 1983 fa riferimento alla definizione riportata all'art. 14 della L.R. n.52/1978, con l'inclusione di alcune casistiche particolari (paragrafo 6.1.2) che ampliano il contesto rappresentativo di questo strumento informativo. Successive specificazioni alla definizione regionale di bosco sono state apportate dalla L.R. n. 25/1997, che ha fornito indicazioni sul tipo di soprassuolo, sull'estensione minima e sul grado minimo di copertura, specificando anche le modalità tecniche di stima di questi parametri. Nel 2001 è intervenuto il decreto legislativo n.227, contenente disposizioni per l'orientamento e la modernizzazione del settore forestale, il quale, anziché optare per una definizione univoca di bosco su tutto il territorio nazionale, ha rinviato ad un successivo atto normativo delle singole regioni, che già non abbiano provveduto, l'esatta definizione giuridica di bosco, fatte salve alcune norme di salvaguardia volte ad evitare troppe difformità tra regione e regione (Cerofolini, 2005). Di conseguenza oggi in Italia ci sono definizioni diverse per indicare lo stesso bene giuridico, pur entro certi limiti che evitano eccessive disparità di trattamento sul territorio nazionale per quanto attiene a situazioni che siano invece sostanzialmente identiche.

A questo quadro già articolato si aggiungono, nello scenario dei monitoraggi forestali nazionali, le definizioni di bosco dell'Inventario Forestale Nazionale Italiano del 1985 e quella adottata dall'ISTAT (paragrafo 2.3). Di conseguenza non sussiste il requisito dell'omogeneità tematica tra le cartografie forestali prodotte dalle singole regioni ed anche le statistiche prodotte a livello nazionale da autorevoli soggetti istituzionali non sono tra loro comparabili.

Ai fini dei confronti multitemporali proposti nei paragrafi successivi, si è adottata una definizione di bosco in linea con gli standard internazionali individuati dalla FAO con il *Global Forest Resource Assessment 2000* (FRA2000) (paragrafo 6.1.3), che consentono di comparare i risultati con i dati dell'INFC e

La legge regionale n.5/2005 ha modificato l'art.14 della L.R. n.52/1978, esplicitando, in ottemperanza al dettato del D.lgs. n.227/2001, i valori minimi di larghezza, estensione e copertura, le dimensioni dei vuoti e delle radure che interrompono la continuità del bosco, le fattispecie che per la loro particolare natura non sono da considerarsi bosco.

con gli esiti della maggior parte delle attività di monitoraggio forestale prodotte dalla comunità scientifica nell'ultimo decennio.

L'adeguamento a questo standard determina una prima selezione delle basi cartografiche ufficiali in relazione ad una serie di requisiti essenziali, sintetizzabili nei seguenti punti:

- possibilità di identificare superfici boscate e *patch* non boscate di almeno 5000 m² di superficie;
- presenza di indicazioni sul grado di copertura arborea con riferimento alla soglia del 10%;
- possibilità di identificare quelle formazioni che a maturità non raggiungono l'altezza di 5 m (ad esempio, le mughete).

Queste caratteristiche sono presenti nella Carta Regionale dei Tipi forestali del 2006, nella CCF2007 derivata dalla Carta della Copertura del Suolo del Veneto e nella carta di uso del suolo prodotta nell'ambito del progetto *GSE Forest Monitoring* (che fa riferimento allo standard FRA2000, anche se il *dataset* non esplicita informazioni relative al grado di copertura ed alle tipologie vegetazionali).

Diversamente, non rispondono a tali requisiti le CTRN storiche (livello 5, codice 3) e la Carta Forestale Regionale del 1983, a prescindere dall'inadeguatezza geometrica di quest'ultima per analisi metriche di paesaggio e per valutazioni diacroniche su intervalli temporali decennali.

8.1.2 Comparabilità geometrica

Verificata la conformità tematica con lo standard adottato di tre basi cartografiche ufficiali, la Carta Regionale dei Tipi forestali, la Carta delle Coperture Forestali del 2007 ed il *dataset GSE Forest Monitoring*, se ne valutano, a cominciare da quest'ultimo, le caratteristiche geometriche nella prospettiva di utilizzarle nell'analisi multitemporale in comparazione (o in sostituzione) con i *layers* delle coperture forestali estratti dai fotogrammi del 1954 e del 1991.

Il *dataset GSE Forest Monitoring*, come descritto nel paragrafo 3.1, eredita la risoluzione geometrica delle immagini da cui è stato estratto (*Ground Sample Distance* pari a 30 m). L'*overlay* di questo prodotto con la CCF1991 evidenzia, soprattutto laddove la matrice territoriale è rappresentata da tessere di dimensioni ridotte, i limiti posti dalla risoluzione geometrica nel rappresentare correttamente le dinamiche spaziali. *Patch* non boscate di piccole dimensioni non sono rappresentate o vengono sistematicamente sottostimate.

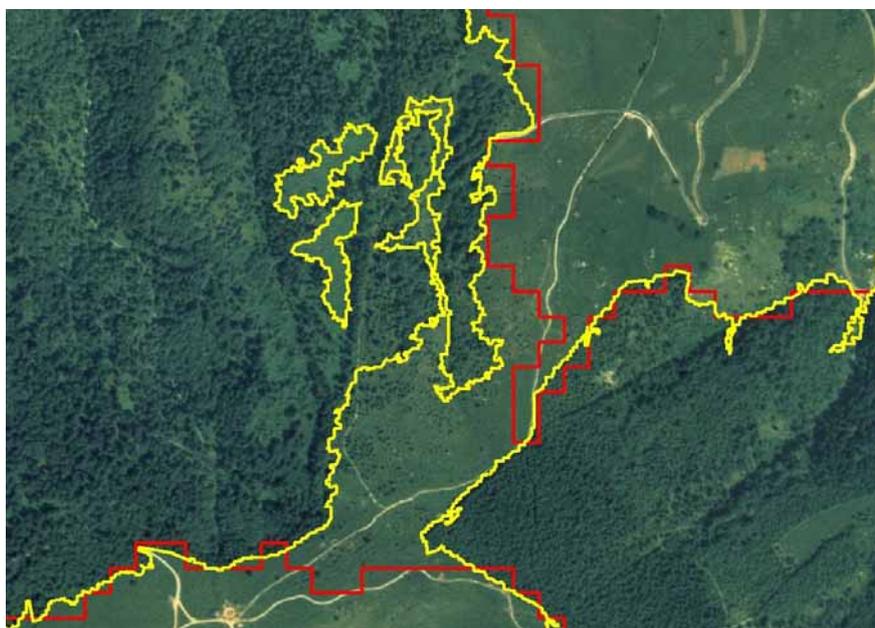


Figura 87. Diversa rappresentazione del mosaico territoriale di GSE FM (in rosso) e rispetto alla CCF1991 (in giallo).

Complessivamente, per l'area di analisi, *GSE FM* restituisce una copertura forestale pari a 27.675 ha, ovvero superiore di 750 ha rispetto a quella

registrata dalla CCF1991. Le differenze tra i due prodotti sono tanto più evidenti quanto è maggiore la scala di analisi e, per questo motivo, *GSE FM* non costituisce uno strumento adeguato per analizzare le dinamiche di paesaggio in comparazione con prodotti derivati da immagini con risoluzione metrica.

Le geometrie della Carta Regionale dei Tipi forestali sono il risultato di un processo di lavoro che ha previsto la fotointerpretazione a video e la digitalizzazione manuale, pertanto l'*output* finale è caratterizzato da disomogeneità della precisione di restituzione dei limiti delle coperture boschive tra le diverse parti del territorio d'indagine. L'aggiornamento delle geometrie delle coperture forestali eseguito contestualmente alla realizzazione della Carta della Copertura del Suolo del Veneto ha consentito di contenere gli errori di posizionamento geometrico entro i limiti di accuratezza previsti dalla C.T.R.N. (5 m), condizione necessaria a garantire l'integrazione topologica tra i due quadri conoscitivi. L'armonizzazione temporale e il miglioramento dell'accuratezza geometrica della CCF2007 rispetto al prodotto precedente sono il risultato dell'applicazione di tecniche di segmentazione e classificazione semi-automatica dell'immagine alle ortofoto digitali a colori e *FCIR* TERRAITALY 2007 con risoluzione geometrica di 0,5 m.

Da una analisi a video del primo di questi due prodotti, si è notato che le ombreggiature delle chiome, peraltro molto pronunciate nelle ortofoto digitali IT2000, spesso inducono il fotointerprete a restituire il limite delle formazioni arboree con criteri soggettivi orientati ad un'interpretazione prudenziale che, talvolta, porta a sottostimare la reale entità di queste.

La copertura TERRAITALY™ 2007 è stata acquisita con la camera metrica digitale Leica ADS40, che ha registrato contemporaneamente le tre bande del colore e dell'infrarosso vicino. Le immagini *FCIR* (*False Color Infra-Red*) di ADS40 derivano dalla composizione dei tre canali del rosso, del verde e dell'infrarosso vicino con risoluzione radiometrica di 12 bit e consentono applicazioni orientate allo studio della vegetazione (ad esempio l'elaborazione dell'indice *NDVI*).



In azzurro la Carta Regionale dei Tipi forestali sovrapposta all'ortofoto digitale del volo IT2000, in giallo l'*output* vettoriale della CCF2007 su ortofoto digitale Terraitaly 2007.

Figura 88. Diversità tra gli output vettoriali.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

La semplificazione del tratto, inoltre, non consente di rappresentare fedelmente la variabilità dei contorni, con inevitabili errori di omissione e commistione, ed induce ad ignorare *patch* boscate o non boscate di superficie di poco superiore a quella minima prevista dalle specifiche di acquisizione.

In definitiva come base di dati da utilizzare nel confronto diacronico è stata selezionata la CCF2007 sia per la maggiore accuratezza geometrica di questo prodotto, sia in considerazione della migliore distribuzione temporale che ne risulta e della maggiore stabilità delle stime si ottengono in relazione alla natura del fenomeno analizzato. Risulterebbe, infatti, assai complesso evidenziare i processi di ricolonizzazione forestale in un intervallo temporale di soli 7-8 anni (dal 1991 al 1998-99, anni in cui è stata realizzata la copertura del volo IT2000, o dal 1998-99 al 2007) e, soprattutto, i dati che se ne ricaverrebbero sarebbero scarsamente significativi, potendo disporre di un ulteriore ravvicinato riferimento temporale.

8.2 Overlay ed elaborazioni di sintesi

8.2.1 Variazioni tra il 1954 e il 1991

La stima della variazione delle superficie forestale avvenuta nell'intervallo temporale 1954-1991 è stata condotta su un ambito territoriale di 26.986 ha e si basa sul confronto tra i *layers* tematici prodotti nell'ambito di questo lavoro di tesi, che è andato incontro ad alcune restrizioni dovute alla limitata disponibilità del software di classificazione. Si tratta di un'area che rappresenta il 58% della superficie complessiva della Comunità Montana ed è, pertanto, più ridotta rispetto a quella che si esamina nel confronto multitemporale 1991-2007. La configurazione di questa regione è il risultato della sovrapposizione dei limiti amministrativi della Comunità Montana con la finestra di classificazione delle riprese aeree del 1954 (Figura 77) e la perimetrazione della superficie classificata del volo Montagna Veneta del '91 (Figura 67).

La carta delle coperture del suolo del 1954 (secondo sistema di nomenclatura binario bosco/non bosco), prodotta con la procedura descritta nel paragrafo 7.2.2, presenta, inoltre, superfici alle quali non è stato possibile assegnare un'attribuzione tematica a causa delle ombreggiature dovute all'orografia o a dubbi interpretativi non risolvibili. I casi dubbi sono rappresentati da formazioni a pino mugo localizzate nella parte settentrionale del Comune di Asiago, che non staccano un'ombra netta e, pertanto, sono difficilmente distinguibili dalle praterie in quota, e dagli orno-ostrieti distribuiti sui pendii orientali del Monte Spitz e del Corno Rosso, degradanti verso la Valle del Brenta, che al momento della ripresa aerea (2 ottobre 1954) risultano parzialmente privi della copertura fogliare. Sono, queste, casistiche le cui delimitazioni non possono essere determinate dall'interpretazione delle foto aree del volo GAI, ma può esserne presunta l'esistenza o rilevata l'entità solo attraverso l'analisi delle fonti aerofotogrammetriche recenti.

Queste superfici non classificabili devono sottratte dal computo delle variazioni di superficie boscata da entrambi i *layers* posti a confronto, pertanto l'area di analisi effettiva si riduce di 1.255 ha ed assume la conformazione rappresentata in Figura 90.

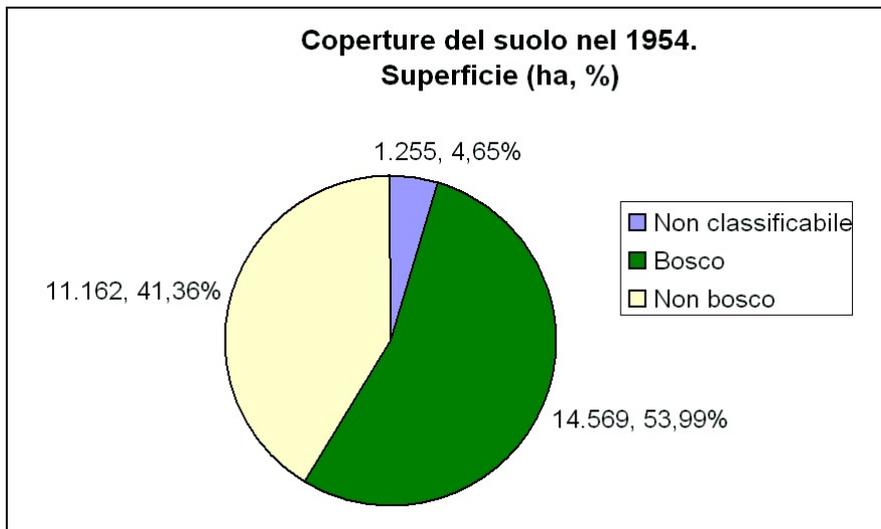


Figura 89. Incidenza delle superfici non classificabili sulla superficie complessiva dell'area di analisi.



Figura 90. Limiti amministrativi della Comunità Montana dei Sette Comuni ed area di analisi delle variazioni di superficie boscata nel periodo 1954-1991.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali - Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

I Comuni di Lusiana e Conco sono completamente esclusi dal confronto multitemporale, mentre gli altri Comuni sono coperti dall'area di analisi nei rapporti percentuali espressi dal seguente grafico.

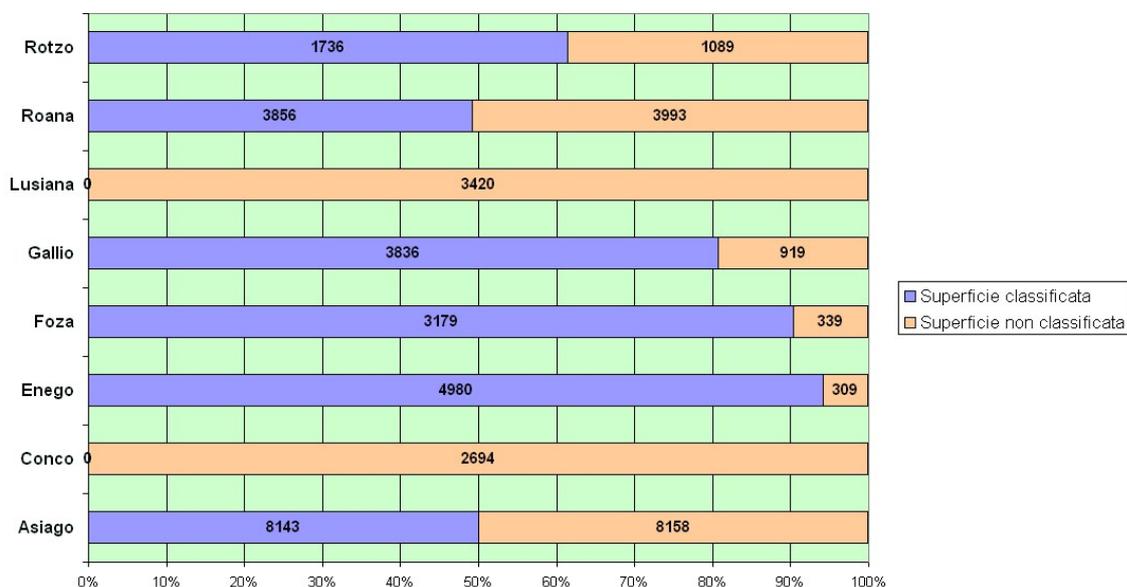


Figura 91. Superficie (ha e %) classificata per ciascun Comune.

Prima di procedere alla valutazione della variazione della superficie forestale all'interno dell'area di analisi, è necessario adeguare la carta delle coperture forestali del 1954 (CCF1954) e del 1991 (CCF1991) ad una definizione di bosco standard. Le specifiche adottate nel processo di produzione di questi *layers* fanno riferimento ad una superficie minima di 2000 m² e ad una densità di copertura delle chiome superiore al 10% e ciò consente di adeguare il prodotto della classificazione sia alla definizione di bosco prevista dalla Legge Forestale Regionale, sia allo standard definito nel processo FRA2000. La scelta è ricaduta su questa seconda definizione per i seguenti motivi:

- è conforme allo standard adottato nell'INFC;
- nel paragrafo successivo si adotta la definizione di bosco FRA2000 per la stima della variazione di superficie forestale nell'intervallo temporale 1991-2007, in quanto consente di comparare i risultati con analoghi studi condotti nelle Comunità Montane del Grappa, dell'Agordino e della Valle del Boite, che fanno riferimento allo stesso standard;
- consente, pertanto, di delineare un trend 1954→1991→2007 e di analizzarne l'andamento.

L'armonizzazione dei *layers* delle coperture forestali con la definizione di bosco FRA2000 è stata eseguita in ambiente ArcGIS attraverso fasi successive descritte in tabella.

Un eventuale adeguamento alla definizione di bosco prevista dalla L.R. n.52/78 prevede la discriminazione delle superfici con densità di copertura arborea compresa tra il 10 e il 30%. Questa operazione richiede un ulteriore passaggio fotointerpretativo tutt'altro che banale in considerazione delle caratteristiche di intelligibilità delle basi aerofotogrammetriche storiche.

Descrizione	Procedura ArcGIS
Assegnazione alla classe "non bosco" delle <i>patch</i> boscate di superficie minore a 5000 m ²	<i>Select by attributes: class="bosco", area <5000 m²;</i> <i>Field calculator: class="non bosco";</i> <i>Dissolve (geoprocessing)</i>
Assegnazione alla classe "bosco" delle <i>patch</i> non boscate di superficie compresa tra 2000 e 5000 m ²	<i>Select by attributes: class="non bosco", area 2000<>5000 m²;</i> <i>Field calculator: class="bosco";</i> <i>Dissolve (geoprocessing)</i>
Sottrazione delle formazioni che non raggiungono 5 m di altezza a maturità (mughete)	<i>Shape: CCF2007</i> <i>Select by attributes: categoria forestale = "mughete";</i> <i>Export data;</i> <i>Erase (geoprocessing)</i>

A questo punto è stato possibile eseguire un *overlay* tra la CCF1954 e la CCF1991 ed ottenere un immagine di *cross-classification* che evidenzia le superfici conservate, le aree di aumento e le aree di riduzione della superficie boscata.

Tramite la funzione di *geoprocessing "difference"* è stato generato un *layer* tematico dei cambiamenti (incrementi/riduzioni). Dal bilancio tra incrementi di superficie forestale e riduzioni si è ottenuto il valore della variazione di superficie forestale nell'intervallo temporale 1954-1991 per l'intera area di analisi, risultato che, successivamente, è stato disaggregato per Comune (Figura 92).

Complessivamente nell'area di analisi la superficie forestale è variata da 14.200 ha nel 1954 a 17.670 nel 1991, con un aumento di 3.470 ha, che corrispondono ad un incremento periodico del 24,4% e ad un tasso di variazione medio di 0,66%.

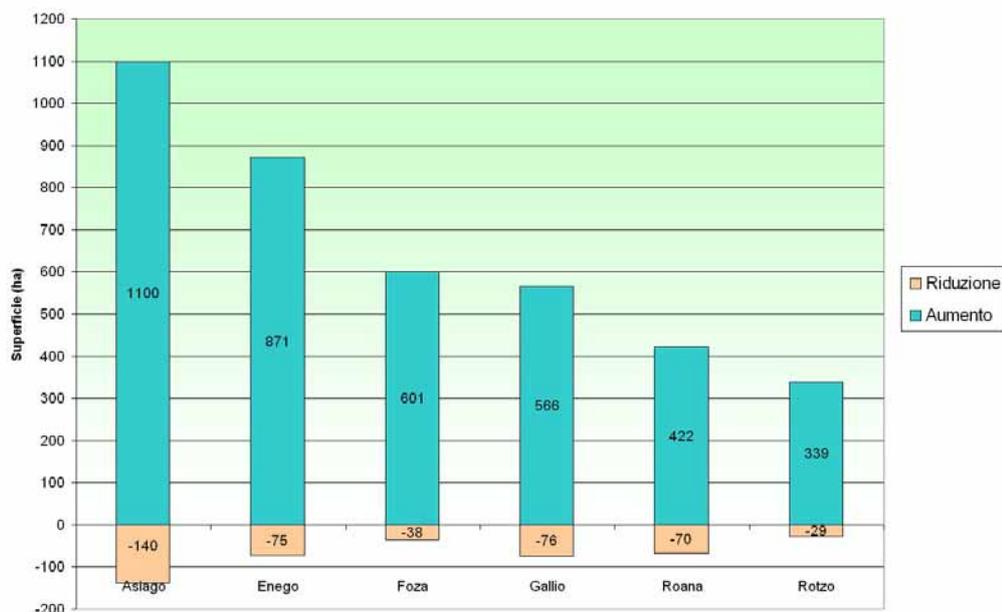


Figura 92. Aumenti e riduzioni delle superfici forestali nel periodo 1954-1991.

Come premesso, questo risultato è stato determinato su una superficie di inferiore al 60% dell'intero territorio della Comunità Montana, pertanto assume un valore solamente indicativo. Tuttavia, se si procede ad una disaggregazione dei risultati per Comune, il valore dell'aumento percentuale annuo assume differenti livelli di significatività in relazione alla percentuale di territorio comunale coperto dall'area di analisi. Per i Comuni di Enego, Foza e Gallio, coperti dall'area analizzata per oltre l'80% del loro territorio (Figura 91), i valori di variazione si possono ritenere particolarmente rappresentativi.

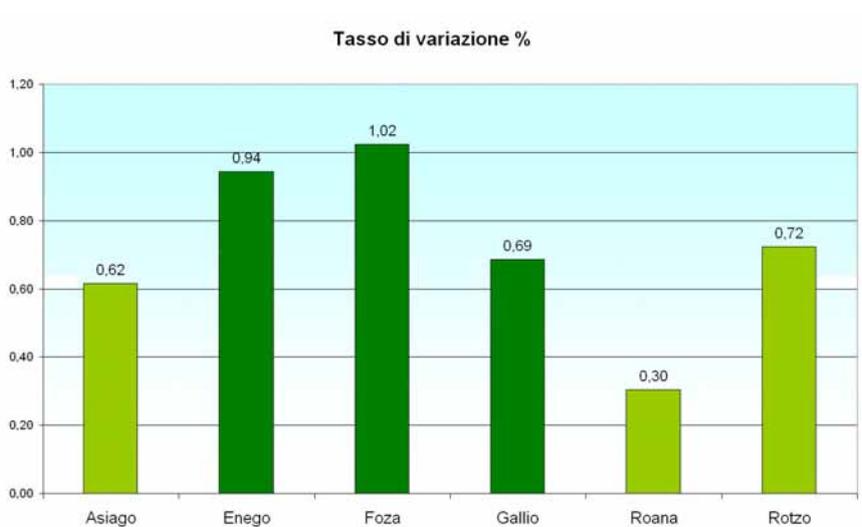


Figura 93. Aumento percentuale medio annuo di superficie forestale nel periodo 1954-1991.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

Il grafico evidenzia una tendenza estremamente eterogenea e colpisce, in particolare, l'elevato tasso di variazione rilevato nei Comuni di Foza ed Enego. Dalla consultazione dei piani di riassetto forestale ed eseguendo alcuni sopralluoghi è stato possibile trarre degli spunti per interpretare questi valori ed esaminare alcune situazioni di sensibile spostamento dei margini del bosco tra i due anni di riferimento.

Un notevole aumento della superficie forestale, evidenziato dall'*overlay* tra la CCF1991 e la CCF1954 (Figura 94), è localizzato all'interno delle particelle n. 22, 23, 24, 25, 33 e 34 del piano di riassetto forestale del Comune di Foza (Figura 97), interessando una superficie di oltre 125 ha.

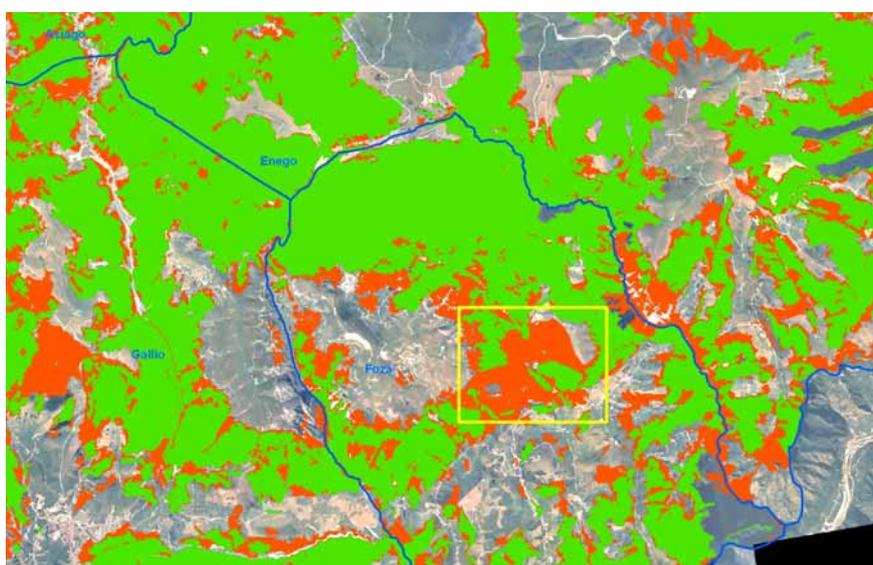


Figura 94. Risultato della cross-classification, da cui si evidenzia (nel riquadro) una zona di sensibile aumento della superficie forestale in Comune di Foza.

Queste sensibili variazioni vanno contestualizzate nel quadro delle dinamiche socio-economiche del secondo dopoguerra, che segnò un deciso declino della pastorizia ovina e caprina, già iniziato dopo la Grande Guerra. Questa attività, fino agli inizi del XIX secolo, fu motore del sistema economico e sociale dell'Altopiano e basata essenzialmente su una pratica della transumanza "mista", che vedeva l'insediamento delle famiglie dei pastori nella fascia coltivabile dell'Altopiano, compresa tra gli 800 e i 1200 m s.l.m., e il pascolamento sia nelle zone incolte della pianura, sia nei pascoli più magri, localizzati oltre i 1500 m s.l.m. fino alle zone accessibili al bestiame nei pressi delle vette, valorizzando economicamente uno spazio periferico altrimenti non utilizzato (Soave, 2005). Il suo graduale declino, seguito dall'abbandono

dell'attività transumante, fu determinato dal progressivo affermarsi dell'agricoltura in pianura e dall'aumento del grado di urbanizzazione, finché nel secondo dopoguerra, con l'ingresso delle lane australiane nel mercato italiano, regredisce in modo più marcato a beneficio dell'allevamento bovino.

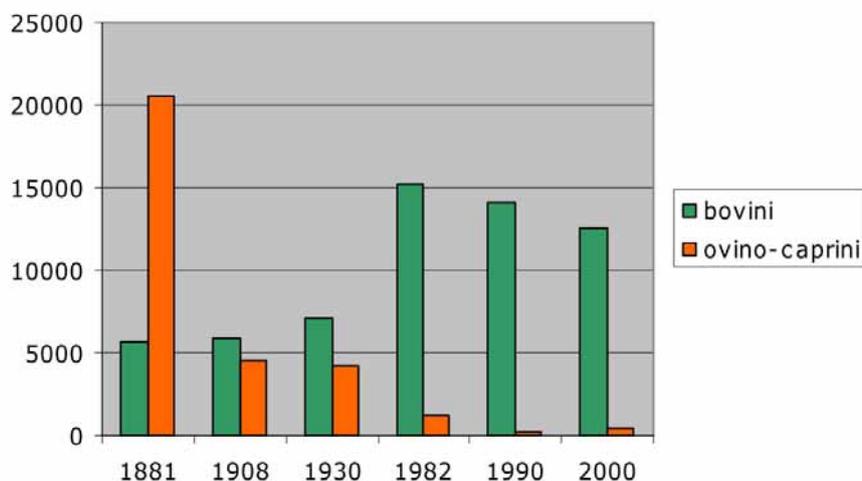


Figura 95. Andamento del numero di capi ovi-caprini e bovini dal 1881 (Pittoni, 1938) al 2000 (fonte ISTAT) nell'Altopiano dei Sette Comuni.

Le aziende zootecniche bovine concentrano in particolare nei Comuni di Asiago, Roana e Gallio, mentre negli altri Comuni l'allevamento bovino è relegato ad un ruolo meno rilevante.

Se nel secolo XIX il pascolo ovino fu l'elemento che maggiormente modellò i boschi ed il paesaggio dell'Altopiano, non altrettanto può dirsi dell'allevamento dei bovini, più selettivi nel pascolare e più stanziali. Nel secolo scorso il declino della pastorizia ovina indubbiamente favorì l'espansione delle resinose, ma ancor più determinanti nella modificazione del paesaggio forestale furono le estese opere di ricostituzione boschiva eseguite tra gli anni '50 e '60, che consentirono all'Altopiano di recuperare l'originaria fisionomia, dopo le ingenti distruzioni e i danneggiamenti subiti durante le due guerre. Se è vero che quantitativamente i boschi distrutti vennero pressoché recuperati, altrettanto non avvenne dal punto di vista qualitativo, per la scelta della tipologia di rimboscimento, che vide il quasi esclusivo uso negli impianti dell'abete rosso, preferito alle latifoglie per i maggiori macchiatici che se ne potevano trarre.

Quello eseguito tra Malga Xomo, l'anfiteatro della Futa e Col Capon è un caso emblematico e di ragguardevole estensione di rimboscimento monospecifico e monoplano di abete rosso, attualmente in fase di forteto o fustaia subadulta, che, per l'elevata densità, ha subito danni meteorici (frequenti schianti sono stati registrati nelle particelle 22, 23, 24, 25) e danneggiamenti da ghiro.

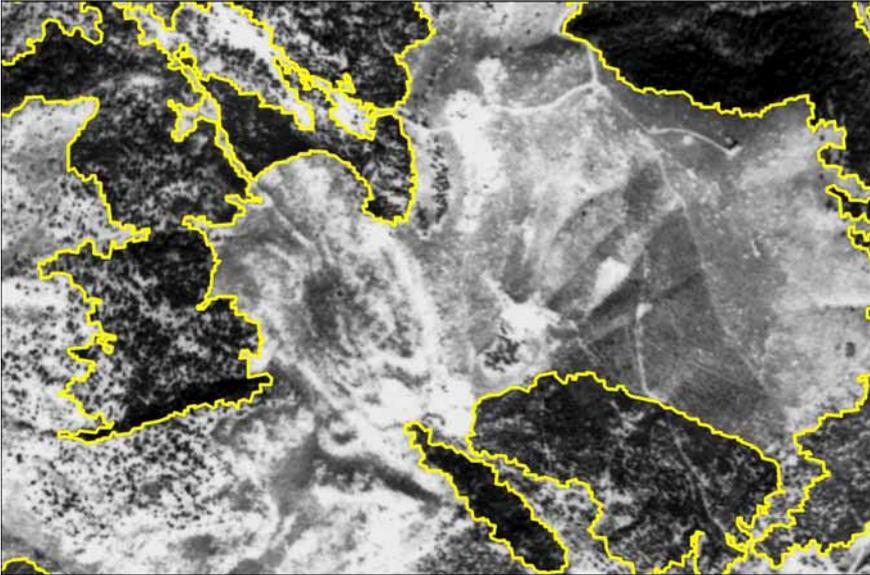


Figura 96. Limiti delle coperture forestali nel 1954 all'interno della zona evidenziata (tra Piana della Futa e Malga Xomo).

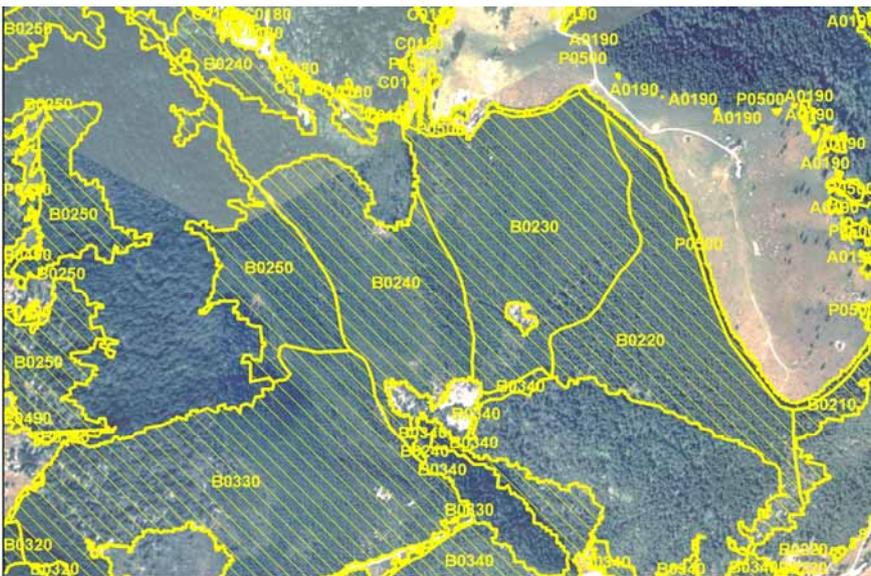


Figura 97. Coperture forestali nel 1991, con evidenziati i rimboschimenti eseguiti alla fine degli anni '50 tra Piana della Futa e Malga Xomo e la codifica del particellare assestamentale.

Per queste particelle sono previsti tagli fitosanitari e diradamenti, ma sarebbe auspicabile anche la reintroduzione del faggio.



Figura 98. Rimboschimento monospecifico di abete rosso presso Malga Xomo (Comune di Foza).



Figura 99. Sottobosco di pecceta antropogena densa a sesto d'impianto regolare (presso Malga Xomo).

Alle dinamiche di evidente matrice antropica, si aggiungono i processi di naturale espansione del bosco. Questi, nella generalità dei casi, attraverso la *cross-classification* sono distinguibili da quelli antropogeni in quanto interessano

superfici di minor ampiezza (Figura 100), localizzandosi lungo fasce di margine o conducendo alla graduale chiusura di piccole *patch* non boscate.

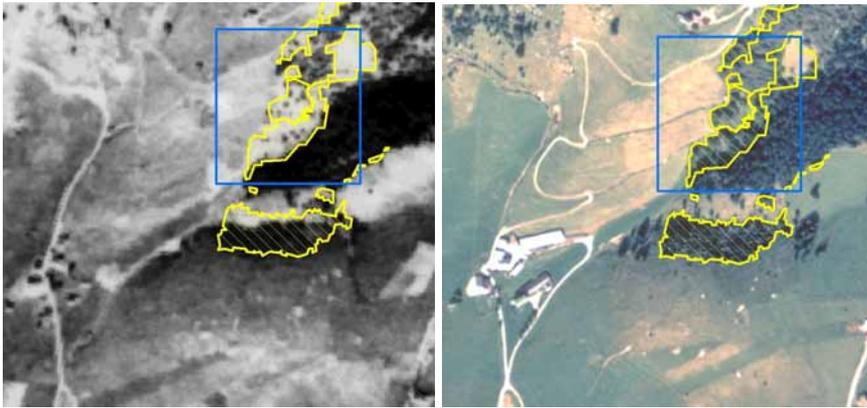


Figura 100a-b-c. Lenta espansione della faggeta verso Malga Xebbo (Comune di Gallio).

Si possono, tuttavia, riscontrare situazioni di spontanea ricolonizzazione del bosco su ampie superfici, che sono da ricondurre ad un graduale aumento di densità di formazioni preesistenti, ma caratterizzate da aliquote di copertura insufficienti per poter rientrare nella definizione di bosco (Figura 101).

Di conseguenza non è possibile differenziare, attraverso procedure di analisi GIS (ad esempio con la creazione di un *buffer*), le dinamiche spaziali imputabili a naturali tendenze evolutive da quelle di origine artificiale, pertanto per quantificare l'entità di queste ultime è necessario esaminare i diversi casi

singolarmente, integrando, ove necessario, la fotointerpretazione con fonti documentali o verifiche a terra.

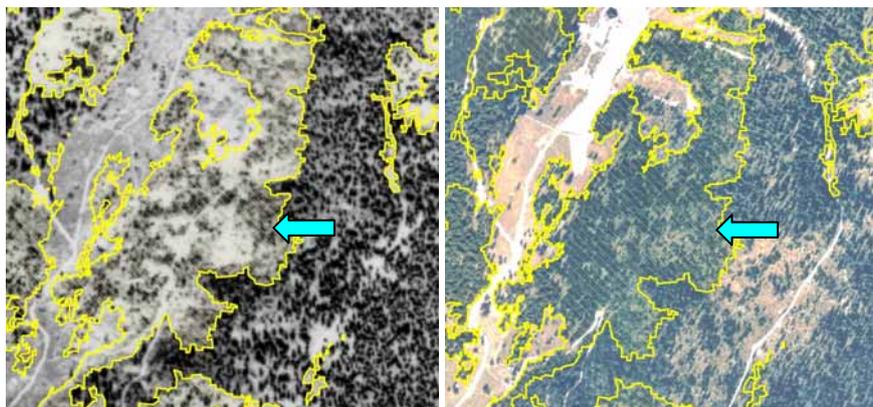


Figura 101. Passaggio alla classe "bosco" di una pecceta secondaria sul versante meridionale del Monte Verena (Comune di Roana).

Sebbene le opere di rimboscimento non siano quantificabili con precisione, un'indicazione significativa sulla loro incidenza nell'espansione della superficie forestale tra il 1954 e il 1991 può venire dalla sensibile variazione del *trend* di incremento che si delinea considerando il periodo 1991-2007.

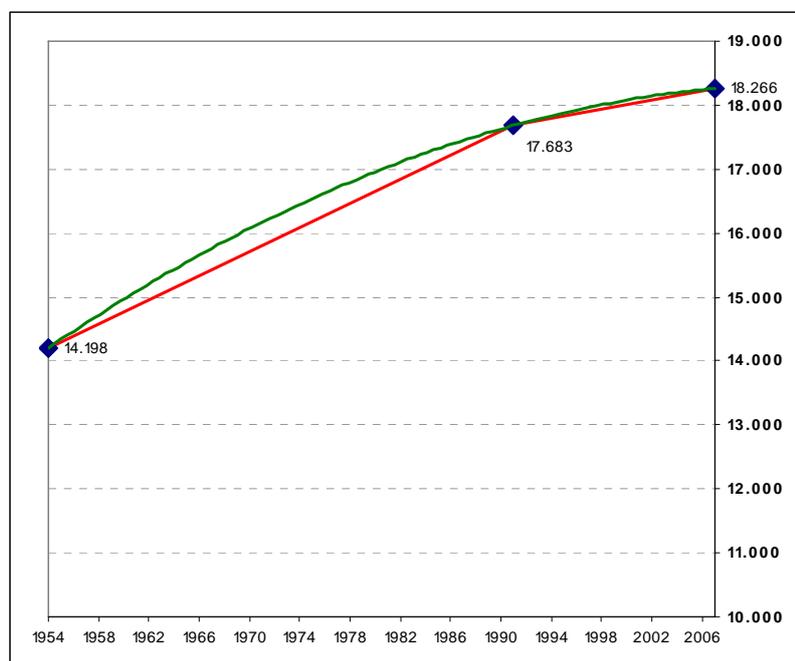


Figura 102. Variazione della superficie forestale dal 1954 al 2007 nell'area di analisi e linea di tendenza.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

Si passa, infatti, da un tasso di incremento medio pari a 0,36% tra il 1954 e il 1991 ad uno pari a 0,14% tra il 1991 ed il 2007.

Nei paragrafi successivo si esamineranno nel dettaglio le variazioni di superficie forestale avvenute in quest'ultimo intervallo temporale su un'area di analisi che rappresenta l'88% della superficie della Comunità Montana con stime rappresentative per l'intero territorio. Si valuterà, inoltre, l'eventuale esistenza di tendenze nei cambiamenti avvenuti nel breve periodo, ovvero di relazioni con una serie di variabili che possono influire sulle dinamiche naturali di espansione del bosco..

Questo tipo di approccio non è proponibile per le trasformazioni avvenute tra il 1954 e il 1991. In generale, infatti, quanto maggiore è il lasso di tempo che intercorre tra due monitoraggi, tanto più elevata è la probabilità che le variazioni di copertura del suolo siano direttamente correlate alle dinamiche delle trasformazioni sociali ed economiche del territorio investigato e tanto più complessa diventa l'individuazione di eventuali relazioni con fattori che incidono sull'ecologia dei popolamenti, tanto più che un ruolo di importante impatto nel plasmare il paesaggio forestale dell'Altopiano dei Sette Comuni, come si è visto, è stato assunto dalle imponenti opere postbelliche di rimboschimento e dalle trasformazioni dell'economia zootecnica.

I tassi di incremento in questo caso sono stati calcolati con riferimento alla superficie complessiva dell'area di analisi e non alla superficie boscata. Ciò consente di ottenere due valori assoluti e confrontabili.

8.2.2 Variazioni tra il 1991 e il 2007

L'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali nell'intervallo temporale 1991-2007 si è basata sul confronto tra due strati informativi: la Carta delle Coperture Forestali del 1991 (CCF1991) e la Carta delle Coperture Forestali del 2007 (CCF2007). La CCF2007 è stata tratta dalla Carta della Copertura del Suolo del Veneto ed è disponibile per tutto il territorio regionale. La CCF1991, prodotta nell'ambito di questa tesi, interessa una superficie di 41.297 ha che copre l'88% del territorio della Comunità Montana dei Sette Comuni. Il confronto multitemporale, pertanto, interesserà un'area di analisi definita dalla copertura territoriale di quest'ultimo *layer* tematico, che assume la fisionomia rappresentata in figura .

La CCF2007 è stata realizzata con tecniche di segmentazione delle immagini (a partire dalle ortofoto digitali TERRAITALY 2007) e di classificazione *object-oriented*, in analogia con le modalità di predisposizione della CCF1991. I due prodotti rispondono a regole di acquisizione comuni e sono caratterizzati da una elevata precisione geometrica, pertanto, si prestano ad analisi comparative in grado di cogliere variazioni anche di modesta entità.

Preliminarmente al processo di *cross-classification* ed alle elaborazioni di sintesi, tuttavia, è stato necessario armonizzare i due strati informativi in relazione alla definizione di bosco adottata e minimizzando alcune difformità geometriche derivate dal processo di formazione della Carta della Copertura del Suolo del Veneto (paragrafo 6.1.4). Queste difformità sono dovute all'adeguamento dell'output vettoriale delle coperture del suolo alle topologie dei livelli informativi della cartografia numerica regionale, con particolare rilevanza, per le coperture forestali, dell'adattamento al livello 2 (viabilità) della CTRN. La rappresentazione grafica degli assi viari secondari che determinano interruzioni della copertura arborea irrilevanti ai sensi della definizione di bosco (ovvero di larghezza inferiore a 20 m) determina nella CCF2007 una lieve sottostima della superficie boscata effettiva, che è stata corretta adeguando gli assi viari della CCF2007 alle geometrie della CCF1991 (Figura 103).

I due *layers* tematici, successivamente, sono stati adeguati alla definizione di bosco FRA2000, adottata come standard di riferimento, seguendo la procedura descritta nel paragrafo precedente.



Figura 103a-b. CCF2007 prima (a) e dopo (b) il processo di armonizzazione geometrica.

Attraverso il processo di *cross-classification* è stata generata la “carta delle variazioni di copertura” nell’intervallo temporale di riferimento, che evidenzia le variazioni in aumento e in riduzione della superficie forestale.

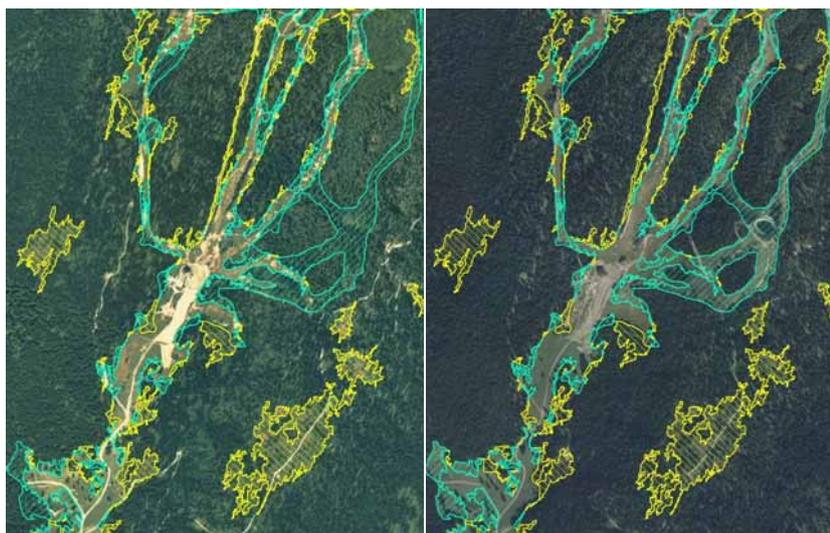


Figura 104a-b. Esempio di riduzione ed aumento della superficie forestale: nuove piste da sci sul versante meridionale del Monte Verena e diffusione spaziale della vegetazione arborea a chiusura delle patch non boscate.

Nell’immagine di esempio la “carta delle variazioni di superficie forestale” rappresenta in azzurro la riduzione e in giallo l’aumento della superficie boscata.

Le variazioni marginali di modesta entità (inferiori a 4 m) possono essere dovute ad errori residui di ortorettifica. Anche le diversità di ombreggiamento possono determinare leggeri scarti nella determinazione dei margini. Si tratta, tuttavia, di errori minimali e ineliminabili, con distribuzione casuale, e, pertanto, soggetti a compensazione.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l’analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell’Altopiano dei Sette Comuni

La variazione delle superficie forestale tra il 1991 e il 2007 è stata calcolata come risultato della differenza tra variazioni in aumento e in riduzione. Nell'area di analisi, in questo intervallo temporale di 16 anni, complessivamente è risultata una variazione in aumento della superficie boscata di 1.024 ha, corrispondente ad un tasso medio di espansione dello 0,237%.

Le variazioni di superficie ripartite per tipo forestale assumono la consistenza riportata in Figura 105.

I valori di incremento percentuale annuo riportati in questo paragrafo sono calcolati con riferimento alla superficie boscata nel 1991.

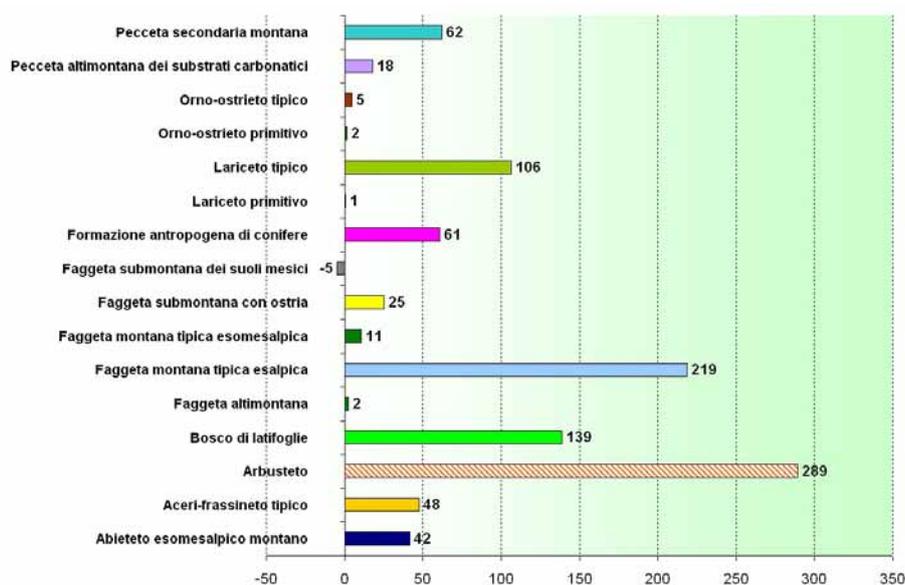


Figura 105. Variazioni di superficie per tipo forestale.

Da questo grafico emerge la notevole incidenza degli "arbusteti" nella quantificazione complessiva dell'aumento della superficie forestale e questo può apparire un aspetto contraddittorio in relazione alla definizione di bosco adottata. Per definizione, infatti, nella Carta Regionale dei Tipi forestali, gli arbusteti sono rappresentati da formazioni che non raggiungono i 5 m di altezza a maturità e, pertanto, dovrebbero essere esclusi dalla valutazione della superficie forestale secondo gli standard adottati nel processo FRA2000. In realtà la collocazione di quest'unità è controversa per le seguenti ragioni:

- il processo di formazione della Carta Regionale dei Tipi forestali è avvenuto principalmente per fotointerpretazione delle ortofoto digitali del volo IT2000, pertanto sono confluite fra gli arbusteti neoformazioni costituite da specie forestali a portamento arboreo (che a maturità raggiungono 5 m di altezza) che al momento del rilevamento assumevano un aspetto arbustivo. Lo stesso Autore ammette "potrebbero essere state classificate fra gli arbusteti anche eventuali altre formazioni attualmente in fase di

Gli arbusteti costituiscono un'unità eterogenea a prevalente portamento arbustivo, escluse le alnete di ontano verde e le mughete. In particolare confluiscono in questa unità i corileti, i pruneti e le neoformazioni di post-cultura variamente composte e ancora allo stato arbustivo (Del Favero, 2006).

rinnovazione che, quindi, apparivano “a portamento basso” simile a quello arbustivo” (Del Favero, 2006);

- a livello regionale la concordanza tematica di questa unità è dell’ordine del 50% e la sua determinazione implica in ogni caso una certo livello di soggettività (Del Favero, 2006);
- nella CCF2007 integrata nella Carta della Copertura del Suolo del Veneto la concordanza tematica degli “arbusteti” si riduce ulteriormente, in quanto spesso confluiscono in questa unità coperture forestali di classificazione indeterminata non rilevate nella Carta Regionale dei Tipi forestali.



Figura 106. Lariceto tipico sul versante meridionale del Monte Verena (Comune di Roana) attribuito dalla CCF2007 all'unità "arbusteti".



Figura 107. Rimboschimento di abete rosso nei pressi di Casera Frison (Comune di Enego) classificato "arbusteto" dalla CCF2007.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l’analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell’Altopiano dei Sette Comuni

Quest'ultima affermazione è confermata, oltre che da un attento esame fotointerpretativo dei poligoni assegnati a questa unità comparato con l'attribuzione dei poligoni contermini, da un anomalo aumento della loro numerosità. Si passa, infatti, nell'ambito dell'area di analisi, da 65 poligoni classificati "arbusteto" nella Carta Regionale dei Tipi forestali a 1.387 poligoni nella CCF2007.

Di conseguenza, nella fattispecie, l'esclusione degli "arbusteti" dal computo della variazione di superficie boscata ai sensi della definizione di bosco FRA2000 indurrebbe ad una forte sottostima dell'effettiva espansione del bosco, mentre la loro inclusione produce una lieve sovrastima la cui entità difficilmente potrà essere determinata con precisione anche ricorrendo ad una sistematica verifica a terra dei casi dubbi, in quanto i limiti che demarcano le formazioni che hanno i requisiti potenziali per rientrare tra i consorzi arborei e le formazioni propriamente arbustive spesso accade che siano sfumati e non individuabili con criteri oggettivi né con la fotointerpretazione, né sul terreno.

L'analisi multitemporale, successivamente, è stata disaggregata per unità amministrativa, evidenziando una sensibile variabilità del tasso di incremento da Comune a Comune (Figura 108).

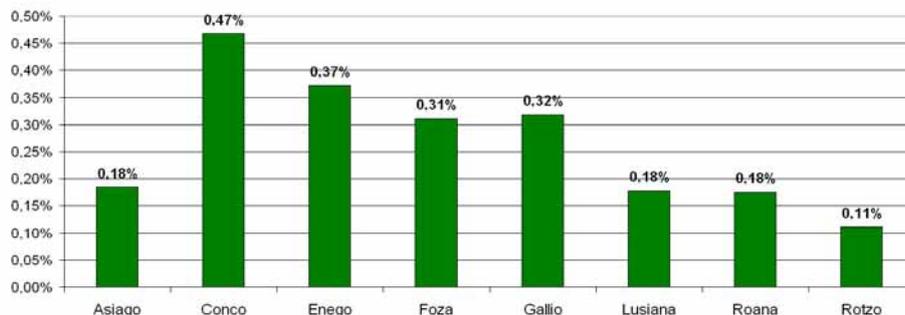


Figura 108. Tasso medio di incremento della superficie boscata nei Comuni dell'Altopiano.

Diversamente da quanto emerso dall'analisi delle variazioni di superficie forestale nell'intervallo temporale 1954-1991, le ragioni di questi *trends* non sono più da imputarsi ad una strategia forestale diretta al coniferamento di incolti e pascoli abbandonati. Le ultime consistenti opere di rimboschimento risalgono ai primi anni '70; successivamente questa pratica è stata abbandonata ed anche la selvicoltura ha adottato criteri improntati ad anteporre a quelle produttive funzioni ecologiche, paesaggistiche e di incremento della biodiversità. Non mancano, tuttavia, alcune eccezioni, rappresentate da tre

impianti di abete rosso, sul Monte di Val Bella (Comune di Gallio), sul Monte Lambara (Figura) e sul Monte Lisser (Comune di Enego), realizzati tra la fine degli anni '80 e i primi anni '90 e da pochi altri di minore entità. Si tratta, comunque, di interventi la cui superficie complessiva non supera i 40 ha e che, pertanto, non interferiscono in misura significativa sulla valutazione dei fattori di potenziale rilevanza funzionale nelle dinamiche di espansione del bosco.

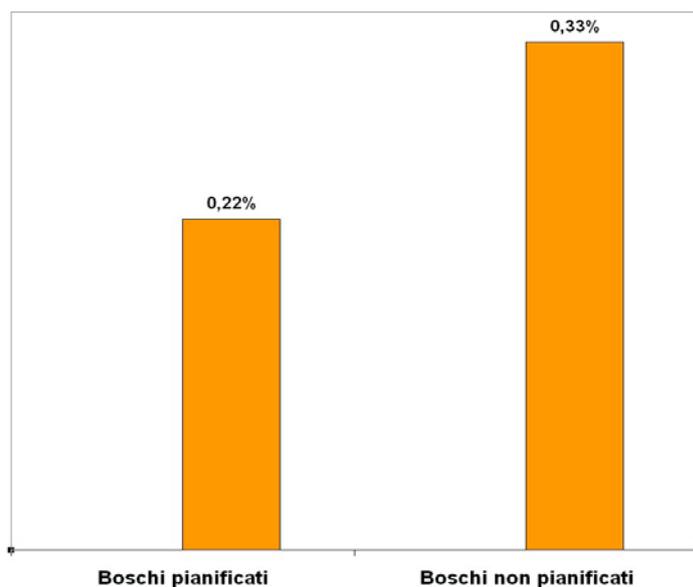


Il rimboscimento eseguito sul Monte Lambara risale alla fine degli anni '80 (come da documentazione depositata presso il Servizio Forestale Regionale di Vicenza). La classificazione semi-automatica dei fotogrammi aerei del '91, non ha consentito, tuttavia, di distinguere l'area interessata dall'impianto, classificata non boscata, in quanto le ridotte dimensioni dei soggetti messi a dimora non determinano nell'immagine uno stacco percepibile dalle circostanti coperture prative.

Figura 109. Impianto di abete rosso presso Malga Frison sul Monte Lambara.

I diversi valori di incremento della superficie boscata vanno, piuttosto, relazionati a condizionamenti di natura ambientale e gestionale.

Il modesto aumento della superficie boschiva registrato nel Comune di Rotzo, ad esempio, è probabilmente in parte determinato dall'alto valore economico delle malghe presenti sul territorio del demanio civico, come confermano le utilizzazioni previste dal piano di riassetto forestale, finalizzate al recupero delle superfici destinate a pascolo sottratte all'avanzamento del bosco (Corona et al., 2010). In generale si è potuto osservare che i boschi sottoposti a pianificazione forestale mediamente mostrano tassi di espansione più contenuti rispetto ai boschi non pianificati.



L'81% della superficie boscata dell'Altopiano dei Sette Comuni è soggetta a pianificazione forestale.

Figura 110. Incidenza della pianificazione forestale sul tasso di incremento.

Ulteriori elaborazioni hanno analizzato eventuali relazioni tra la velocità dei processi di successione ecologica secondaria di ricolonizzazione del bosco con fattori orografici di variabilità meso-microclimatica.

In primo luogo è stata valutata la dipendenza dalla quota, suddividendo il territorio dell'Altopiano in tre fasce altimetriche, in analogia con la stratificazione adottata nel paragrafo 8.3.1.

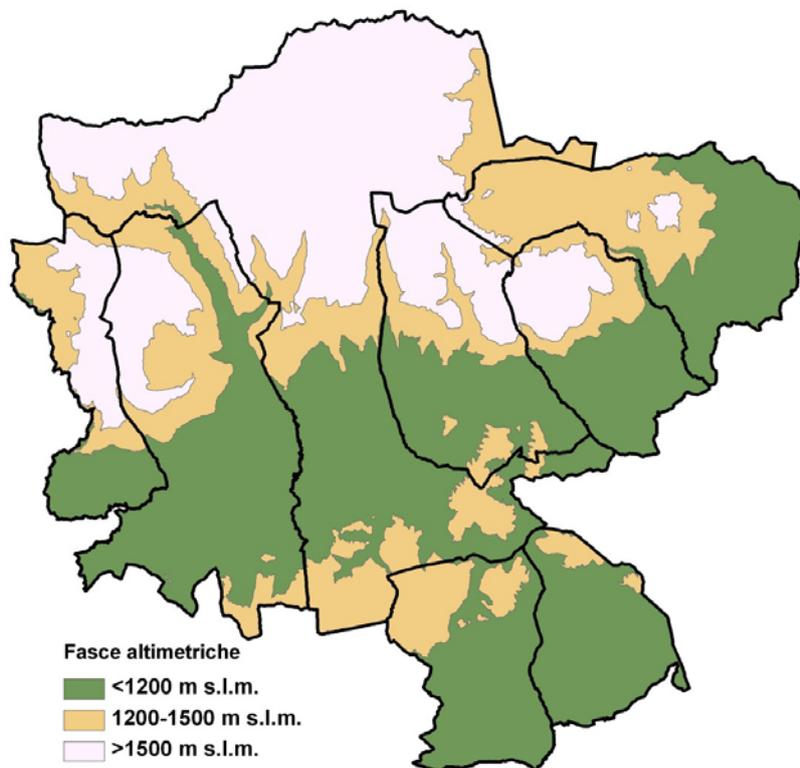


Figura 111. Riclassificazione del Digital Terrain Model in tre classi altimetriche.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

I risultati in parte confermano la prevedibile tendenza ad un rallentamento delle dinamiche che conducono alla costituzione di boschi di neoformazione con l'aumentare della quota. La riduzione della velocità di ricolonizzazione è da mettere in relazione alle difficoltà di germinazione e, più in generale, alle sfavorevoli condizioni di crescita (Tasser et al. 2007). Colpisce, tuttavia, la marcata contrazione del tasso di incremento nella fascia altimetrica tra 1200-1500 m s.l.m., che risulta addirittura inferiore a quello registrato alle quote superiori.

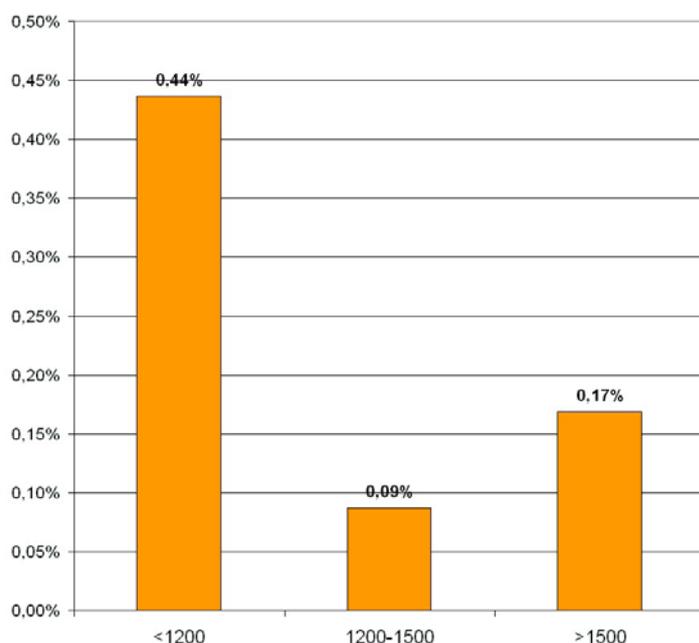


Figura 112. Tasso di espansione del bosco nelle diverse fasce altimetriche.

Questo andamento può trovare una sua coerenza se rapportato alla disponibilità di spazi potenzialmente colonizzabili da parte del bosco. Da un confronto tra le ripartizioni delle superfici nelle categorie di uso del suolo bosco/non bosco nelle porzioni di territorio delimitate dai piani altitudinali così determinati, appare evidente come nella fascia altimetrica intermedia le coperture non boscate, suscettibili di ricolonizzazione forestale, siano, infatti, rappresentate solo dal 20% della superficie complessiva. Questo effetto di "saturazione" può anche essere comprovato relazionando il fenomeno dell'espansione del bosco alla lunghezza delle fasce ecotonali, che, secondo quanto riportato in letteratura, è positivamente correlata presenza di boschi neoformazione (Sitzia, 2009).

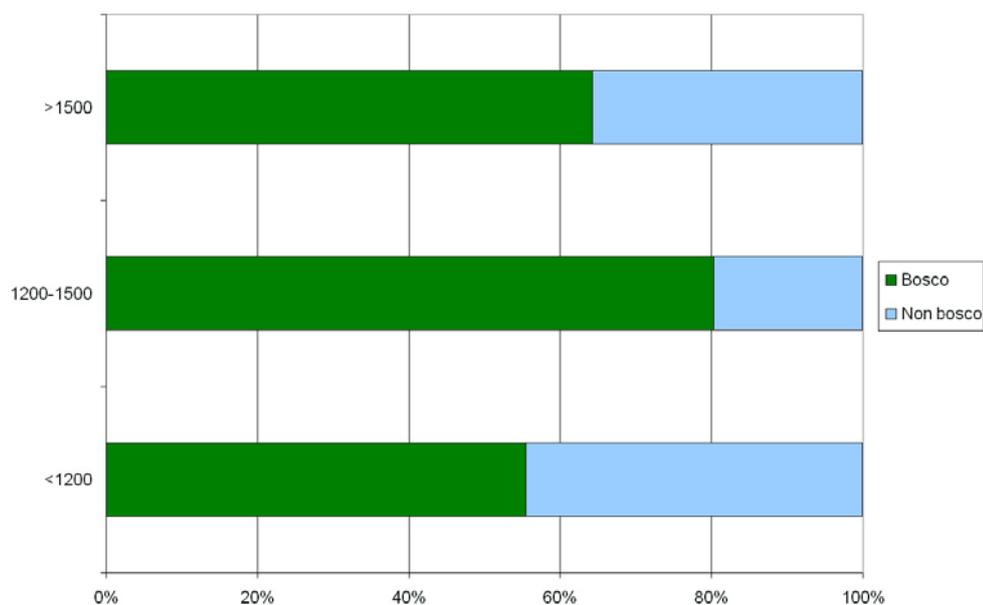


Figura 113. Rapporto percentuale bosco/non bosco nelle fasce altimetriche analizzate.

Un altro fattore che può incidere sulla velocità delle dinamiche successionali è l'esposizione, che determina, assieme all'inclinazione del terreno, la disponibilità potenziale di energia radiante (assolazione) per i processi di fotosintesi (Cerutti, 1997). Il territorio dell'Altopiano dei Sette Comuni è prevalentemente orientato a sud-est ed anche la distribuzione delle coperture forestali segue questo andamento.

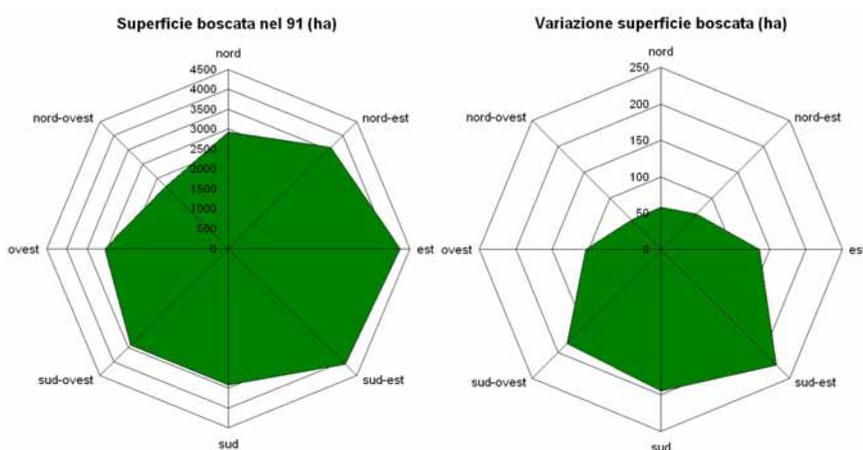


Figura 114. Distribuzione delle coperture forestali e delle variazioni di superficie boscata in relazione all'esposizione.

Rapportando questa distribuzione a quella delle variazioni di superficie boscata, è stato calcolato il tasso di espansione del bosco in funzione dell'esposizione.

Tasso di incremento (%)

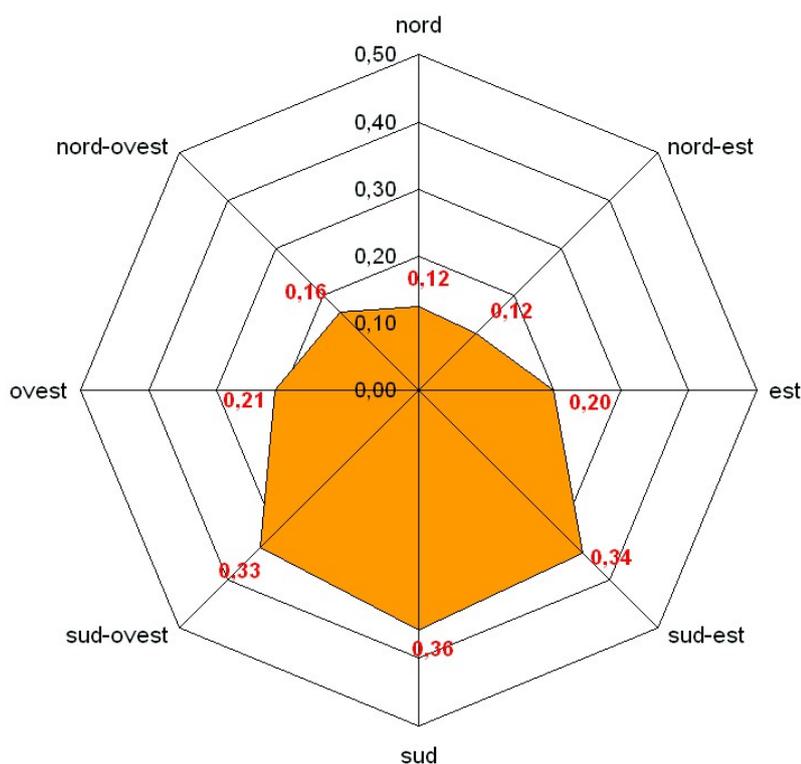


Figura 115. Tasso di espansione del bosco in funzione dell'esposizione.

Infine, come ulteriore fattore potenzialmente influente sulla velocità dei processi di colonizzazione secondaria del bosco, è stata considerata la pendenza. A partire dal *DTM* è stata derivata la carta delle pendenze (*slope*), successivamente riclassificata in 5 classi (Figura 117), dalla quale è stata, innanzitutto, calcolata la distribuzione delle coperture forestali per ciascuna classe.

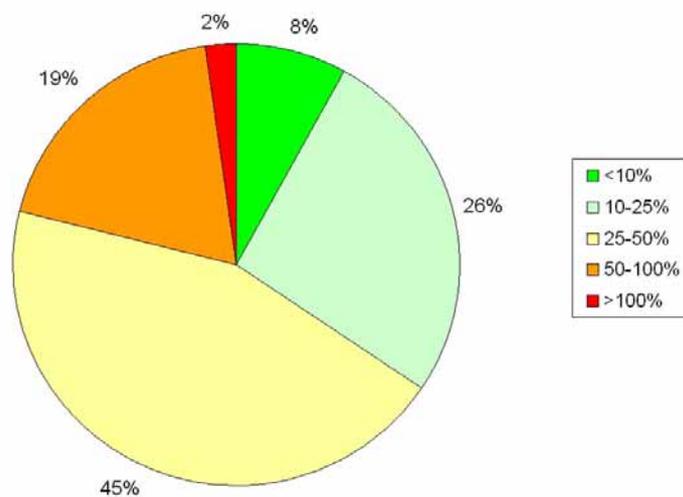


Figura 116. Distribuzione delle superfici forestali per classe di pendenza.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

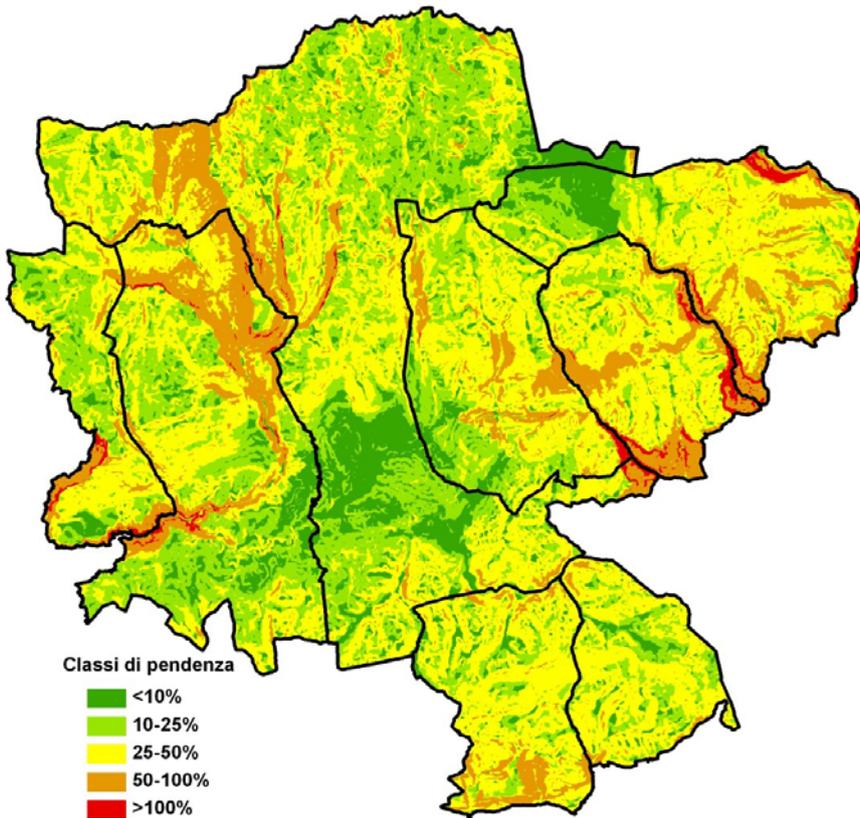


Figura 117. Carta delle pendenze riclassificata elaborata dal DTM.

Si riscontra che il territorio ricadente nella classe di pendenza tra il 25-50%, oltre ad essere quello in cui si concentra quasi la metà dei boschi dell'Altopiano, è anche caratterizzato da tassi di espansione più accentuati.

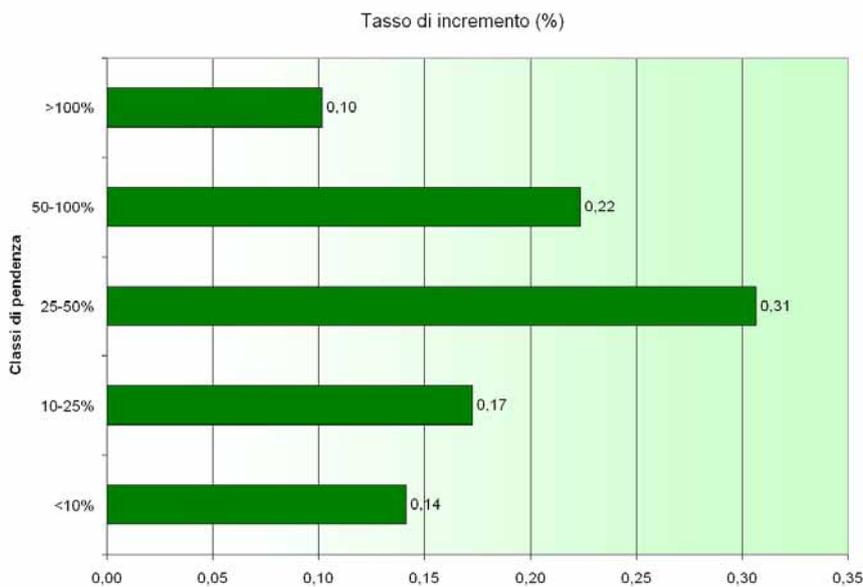


Figura 118. Tasso di espansione del bosco in funzione della pendenza.

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

In generale la pendenza del terreno, oltre ad incidere sull'assolazione, è un fattore che può generare fenomeni regressivi sulla pedogenesi. Pur non rappresentando un fattore completamente antitetico all'insediamento del bosco, ha un peso elevato in termini temporali: anche se l'affermazione del bosco non viene impedita, può venire rallentata dalla maggiore pendenza (Cerutti, 1997). L'acclività influenza anche la distribuzione degli insediamenti e delle attività economiche, che si concentrano principalmente nei terreni meno pendenti, sui quali è possibile estendere la meccanizzazione ed intensificare l'attività agricola. Questo spiega la contenuta espansione del bosco su terreni potenzialmente ospitali.

Quelle ora descritte sono alcune delle variabili che concorrono a determinare quell'insieme di fattori stazionali ed antropici in grado di rallentare o incrementare la progressione dei processi di insediamento delle neoformazioni boschive. I tassi di espansione registrati per ciascun Comune sono, pertanto, il risultato di sintesi dell'interazione tra queste ed altre variabili difficilmente spazializzabili (pressione turistica, pascolamento, conflitti d'uso del suolo, ecc.). Le indicazioni che se ne possono trarre per valutazioni predittive nel breve periodo devono essere intese come indicative e pur sempre rapportate ad una scala adeguata, in quanto a scala di dettaglio l'evoluzione degli stadi di una successione secondaria può assumere sviluppi inattesi in dipendenza di fattori stocastici non generalizzabili.

L'altimetria è un fattore limitante l'insediamento del bosco: in Veneto le mughete non salgono oltre i 2500 m s.l.m., le alnete di ontano verde oltre i 2350 m s.l.m., i lariceti e larici-cembreti oltre i 2280 m s.l.m. Diversamente, non si può definire un valore di acclività oltre il quale il bosco non riesce ad insediarsi (elaborazioni tratte dalla Carta Regionale dei Tipi forestali).

L'ipotesi che l'aumento della superficie boscata si mantenga costante è accettabile solo nel breve periodo (5-10 anni) (Zanchi et al., 2005).

8.3 Risultati a confronto: rappresentazione in continuo e metodo inventariale

8.3.1 Risultati della classificazione per punti ed elaborazione dei dati

La fotointerpretazione eseguita sui fotogrammi del volo REVEN Montagna Veneta 1991 e sulle ortofoto digitali TERRAITALY 2007 ha interessato un campione di 680 punti estratto casualmente su una popolazione di 1.931 punti. Sulla superficie dell'area di analisi che rappresenta l'88,5% del territorio della Comunità Montana dei Sette Comuni, nell'intervallo temporale considerato è stata registrata una variazione di uso del suolo su un totale di 32 punti, così ripartita:

- un aumento del bosco di 16 punti;
- una riduzione di *produttivo non boscato* di 11 punti;
- un aumento di *improduttivo* di 5 punti.

La ripartizione dei punti nelle tre classi di uso del suolo nel 1991 e nel 2007, infatti, risulta essere:

Anno/ uso del suolo	1991	2007
<i>Bosco</i>	433	449
<i>Produttivo non boscato</i>	227	206
<i>Improduttivo</i>	20	25

Per prima cosa, attraverso il test di Mc Nemar per dati appaiati, è stata valutata la significatività delle variazioni di superficie boscata tra il 1991 e il 2007. Il test prevede il calcolo della statistica (Salvadori 2005; Salvadori et al., 2006; Anfodillo et al., 2007):

$$\chi_c^2 = \frac{(|f_{12} - f_{21}| - 1)^2}{f_{12} + f_{21}}$$

dove f sono le frequenze osservate nella seguente tabella di contingenza, che accorpa i punti classificati come *produttivo non boscato* e *improduttivo* in un'unica classe *non bosco*.

1991 \ 2007	Bosco	Non bosco
Bosco	f_{11}	f_{12}
Non bosco	f_{21}	f_{22}

Le frequenze registrate per la Comunità Montana dei Sette Comuni sono:

1991 \ 2007	Bosco	Non bosco
Bosco	425	9
Non bosco	23	223

pertanto $\chi_c^2 = 5.28$.

Riportando tale valore nella tabella del chi-quadro con un grado di libertà, è risultata una probabilità che le variazioni tra i due gruppi non siano significative (cioè siano dovute al caso) minore a 0.025 e maggiore a 0.010.

A questo punto si è proceduto al calcolo dello stimatore campionario della proporzione di unità secondarie ricadenti in una determinata classe C in uno dei due momenti (1991 o 2007) all'interno della popolazione esaminata, che è espresso da (Corona, 2000):

$$P_{DSr} = \frac{\sum_{j=1}^m N_j p_j}{\sum_{j=1}^m N_j}$$

dove $p_j = \frac{n_{Cj}}{n_j}$

n_{Cj} = numero di unità secondarie campione comprese nella j -esima unità primaria campione appartenenti alla classe C ;

m = numero di unità primarie campione;

n_j = numero di unità secondarie campione comprese nella j -esima unità primaria campione;

N_j = numero totale di unità secondarie nella j -esima unità primaria campione.

Dal momento che nessuna delle 680 unità secondarie selezionate è risultata "indeterminabile", ossia ricadente in situazioni (zone d'ombra o coperture nuvolose) per cui fosse impossibile attribuire una classe di uso del suolo, N_j corrisponde a n_j .

Si riportano in tabella i risultati:

Anno / $p_{DSr(\text{classe})}$	1991	2007
<i>Bosco</i>	0,636	0,660
<i>Produttivo non boscato</i>	0,333	0,302
<i>Improduttivo</i>	0,029	0,036

Lo stimatore delle variazioni del cambiamento della proporzione di unità in una certa classe in due momenti successivi (1991-2007) è dato dalla differenza:

$$Z_{pc} = p_{DSr1991} - p_{DSr2007}$$

pertanto risulta:

Classe	$Z_{pc(1991-2007)}$
<i>Bosco</i>	0.024
<i>Produttivo non boscato</i>	-0.031
<i>Improduttivo</i>	0.007

Da questi valori si può facilmente calcolare lo stimatore di superficie e lo stimatore della variazione di superficie nella classe di copertura del suolo C tra il 1991 e il 2007. Quest'ultimo è pari a:

$$Z_c = AZ_{pc}$$

dove A è la superficie dell'area di analisi. Assumendo che questa variazione sia rappresentativa del fenomeno sulla superficie dell'intera Comunità Montana, il risultato può essere estrapolato a quest'ultima superficie, con conseguente aumento dell'errore standard.

Il calcolo dell'errore standard delle variazioni di superficie si effettua a partire dalla stima per ciascuna classe della varianza di p_{DSr} (Corona, 2000):

$$s_{P_{DSr}}^2 = \frac{m \left[(M - m) \frac{\sum_{j=1}^m N_j (p_j - P_{DSr})^2}{m - 1} + \sum_{j=1}^m \frac{N_j (N_j - n_j) p_j (1 - p_j)}{n_j - 1} \right]}{M \left(\sum_{j=1}^m N_j \right)^2}$$

dove M = numero totale di unità primarie.

L'errore standard di Z_{pc} si calcola con la formula:

$$s_{Z_{pc}} = \sqrt{s_{P_{DSr}(1991)}^2 + s_{P_{DSr}(2007)}^2 + 2s_{P_{c(2007)P_{c(1991)}}}}$$

dove $P_{c(2007)P_{c(1991)}}$ è lo stimatore conservativo della correlazione di $P_{c(2007)}$ e $P_{c(1991)}$ (Lamedica, 2007; Anfodillo et al., 2007).

In termini areali, l'errore standard della variazione di superficie nelle tre classi considerate è dato da:

$$s_{Z_c} = A s_{Z_{pc}}$$

Nelle successive tabelle di sintesi si riportano i risultati delle elaborazioni riferiti all'area di analisi:

	<i>Superficie nel 1991 (ha)</i>	<i>Superficie nel 2007 (ha)</i>	<i>Variazioni di sup. 1991-2007 (ha)</i>
<i>Bosco</i>	26.297,06	27.268,78	971,72
<i>Produttivo non boscato</i>	13.786,22	12.510,84	-1.275,38
<i>Improduttivo</i>	1.214,64	1.518,31	303,67

	<i>Incremento % periodo (1)</i>	<i>Incremento % annuo (1)</i>	<i>Incremento % periodo (2)</i>	<i>Incremento % annuo (2)</i>
<i>Bosco</i>	2,353	0,147	3,695	0,231
<i>Produttivo non boscato</i>	-3,088	-0,193	-9,251	-0,578
<i>Improduttivo</i>	0,735	0,046	25,000	1,563

(1) Incremento calcolato in relazione all'intera superficie dell'area di analisi;

(2) Incremento relativo alla superficie della classe C nel 1991.

L'intervallo fiduciario della stima della variazione può essere calcolato:

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

$$Z_C \pm ts_{Z_C}$$

dove t è il valore critico del t di Student (test a due code), stabilito in corrispondenza del prescelto livello di fiducia (o livello di confidenza) in corrispondenza degli appropriati gradi di libertà (Corona et al., 2005).

E poiché l'errore standard della variazione della superficie boscata nel periodo 1191-2007 è risultato pari a 0,248, la variazione della superficie boscata si può stimare pari a 971,72 ha con un intervallo fiduciario di $\pm 47,18$ ha per un livello di confidenza del 95%.

L'intervallo fiduciario per un livello di confidenza del 99% è pari a $\pm 62,1$ ha.

I 680 punti classificati si distribuiscono tra una quota minima di 580 m s.l.m. ad una quota massima di 2197 m s.l.m. con una ripartizione per fasce altimetriche rappresentata in Figura 119.

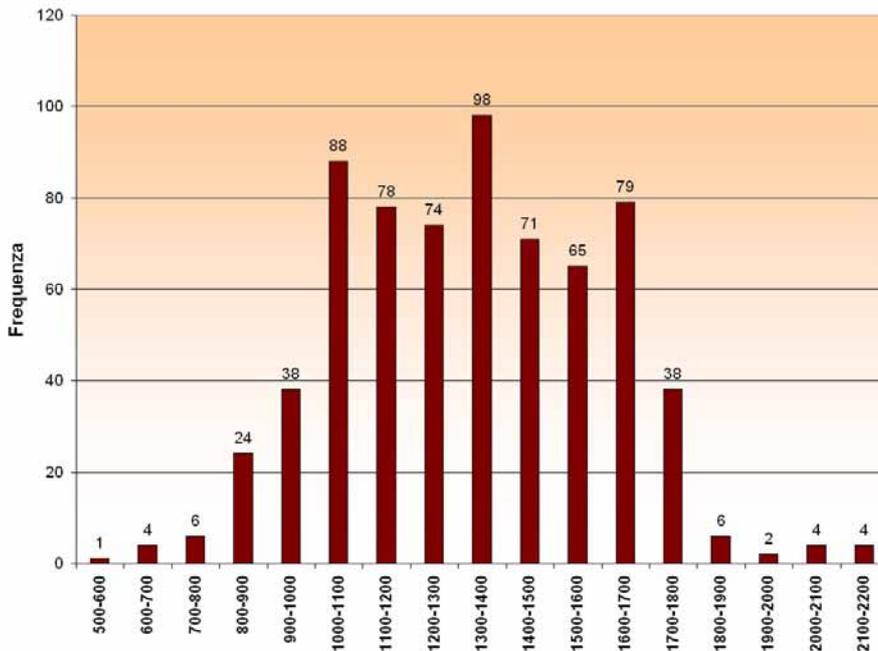


Figura 119. Distribuzione dei punti per fasce altimetriche.

Si sono poi cercate eventuali correlazioni tra le variazioni della superficie boscata e la quota in cui si trovano i punti campione classificati. A questo scopo i punti sono stati ripartiti in tre fasce altimetriche, definite in modo da ottenere una distribuzione della frequenza il più possibile equilibrata:

- < 1200 m s.l.m. (239 punti);
- 1200-1500 m s.l.m. (243 punti);
- >1500 m s.l.m. (198 punti).

Eseguendo il test di McNemar per ciascuna di queste fasce altimetriche, è emerso che al di sopra dei 1500 m s.l.m. le variazioni non sono significative. Ad di sotto di questa quota risulta un aumento dei punti classificati bosco di 14 unità nella fascia altimetrica <1200 m s.l.m. e di 3 unità tra i 1200 e i 1500 m s.l.m. A questo punto è stato ricalcolato il tasso medio di incremento di superficie boscata, che risulta essere dello 0,9% al di sotto dei 1200 m s.l.m. e dello 0,1% tra i 1200 e i 1500 m s.l.m.

E' importante ricordare che questi risultati sono stati ottenuti attraverso una ulteriore stratificazione del campione, pertanto, riducendosi la numerosità dei punti, l'errore standard e l'intervallo fiduciario aumentano sensibilmente. Ne emerge, tuttavia, un dato che delinea una tendenza e consente una comparazione con analoghe elaborazioni eseguite in altri territori montani della Regione.

8.3.2 Comparazione dei risultati

I risultati ottenuti dalle elaborazioni statistiche eseguite sul campione inventariale sono serviti per validare quanto emerso dall'analisi della variazione di superficie forestale eseguita tramite confronto tra la CCF1991 e la CCF2007.

Si riassumono in forma tabellare i valori di superficie e di variazione ottenuti applicando i due metodi.

Metodo inventariale			
<i>Sup. boscata 1991</i>	<i>Sup. boscata 2007</i>	<i>Variazione</i>	<i>Tasso di espansione</i>
26.297 ha	27.269 ha	972 ha	0,231%
Rappresentazione in continuo			
<i>Sup. boscata 1991</i>	<i>Sup. boscata 2007</i>	<i>Variazione</i>	<i>Tasso di espansione</i>
26.925 ha	27.949 ha	1.024 ha	0,237 %

La stima della variazione di superficie forestale ottenuta attraverso la *cross-classification* delle rappresentazioni in continuo delle coperture forestali (CCF1991 e CCF2007) differisce di 52 ha da quella stimata con il metodo inventariale. Tale differenza rientra nell'intervallo fiduciario calcolato per un livello di confidenza del 99%, pertanto i due risultati si possono considerare tra loro coerenti.

Questo risultato può essere comparato con quelli emersi da studi analoghi:

- nella Comunità Montana Agordina (Lamedica, 2007; Anfodillo et al., 2007) il tasso di espansione annua del bosco rispetto alla superficie forestale stimata al 1991 è pari allo 0,095%;
- nella Comunità Montana del Grappa (Anfodillo et al., 2006) il tasso di espansione annua del bosco rispetto alla superficie forestale stimata al 1991 è pari allo 0,54%;
- per la Regione Abruzzo, Corona et al. (2005) hanno stimato un tasso di espansione annua del bosco rispetto alla superficie forestale al 1990 dello 0,60%.

Il diverso tasso di espansione del bosco rilevato dai vari Autori è imputabile a diversità del contesto socio-economico, alla diversa morfologia del territorio ed alla differente ripartizione delle superfici territoriali nelle categorie di uso del suolo (Lamedica, 2007).

Alcuni di questi studi analizzano anche le tendenze all'espansione del bosco in funzione della quota:

- nella Comunità Montana Agordina, Lamedica (2007) ed Anfodillo et al. (2007) rilevano variazioni significative della superficie boscata a solo a quote inferiori a 1500 m s.l.m.;
- nella Provincia Autonoma di Trento, De Natale et al. (2006) rilevano due fasce altimetriche principali di espansione del bosco: una compresa tra 800 e 1200 m s.l.m. ed una superiore a 1600 m s.l.m.

Questi risultati presentano sostanziali analogie con i *trends* registrati sull'Altopiano dei Sette Comuni, in particolare con l'andamento rappresentato in Figura 112, che si ritiene più attendibile dei risultati ottenuti dall'elaborazione per punti, in quanto la stratificazione del campione riduce drasticamente la numerosità dei punti di variazione e, di conseguenza, la significatività statistica della stima.

Nella fascia altimetrica tra 1200-1500 m s.l.m., il calcolo dello stimatore delle variazioni della proporzione di unità della classe "bosco" si è basato sulla variazione di soli 3 punti.

9 CONSIDERAZIONI RIEPILOGATIVE E CONCLUSIVE

Gli ecosistemi forestali sono soggetti a dinamiche storiche che possono essere espressione di naturali tendenze evolutive o risultato di interventi di matrice antropica, che possono assumere, in relazione alle vicende storiche ed alle dinamiche socio-economiche, un ruolo dominante nell'indirizzare la direzione delle trasformazioni. La ricostruzione delle trasformazioni della matrice agro-silvo-pastorale, effettuata principalmente attraverso la predisposizione di carte delle coperture forestali per gli anni 1954 e 1991 prodotte sfruttando le potenzialità del paradigma *object-oriented*, ha consentito di contestualizzare l'analisi diacronica in uno scenario complesso e di spazializzare i processi, oltre che di produrre stime quantitative sulla loro consistenza.

L'applicazione di questo approccio si è subito scontrata con una serie di problematiche rilevanti sotto l'aspetto metodologico.

Sempre più numerose e sofisticate sono le applicazioni dei metodi di classificazione ad oggetti orientate al monitoraggio del territorio e dell'ambiente, grazie anche ai recenti sviluppi tecnologici nel settore della sensoristica, che hanno dato notevole impulso a queste soluzioni innovative, che incrementano notevolmente le potenzialità di estrazione semantica anche in ambito forestale. Queste opportunità diventano, tuttavia, meno attuabili quando si dispone di fotogrammi storici, che presentano evidenti limiti qualitativi e scarsa profondità spettrale, fattori che hanno scoraggiato la comunità dei ricercatori a migliorare le *performances* degli algoritmi di classificazione in tali condizioni. Dalle esperienze riportate in letteratura, lo sviluppo di procedure di classificazione *object-oriented* a queste immagini si limita all'ottimizzazione dei parametri di segmentazione, mentre l'estrazione delle informazioni relative al *land cover* dagli oggetti generati dalla segmentazione si basa essenzialmente sulla fotointerpretazione.

Tale scenario delinea importanti aspetti innovativi di questo lavoro di tesi, in cui si sviluppano algoritmi di classificazione semi-automatica che producono risultati caratterizzati da elevati valori di concordanza tematica (superiori al 90%), in grado di ridurre drasticamente i tempi di revisione manuale, consentendo la scalabilità della procedura su area vasta. Nell'ambiente di lavoro di *Definiens professional* è stato possibile adottare strategie diversificate in relazione alle caratteristiche dei fotogrammi da classificare (emulsioni pancromatiche o a colori), all'epoca di acquisizione ed alla disponibilità di cartografie tematiche

implementabili nel processo di classificazione. In questo contesto la Carta Regionale dei Tipi forestali (che rappresenta le coperture forestali nel 1998-99), pur non dimostrandosi geometricamente adeguata per rilevare l'entità delle dinamiche spaziali del bosco in un intervallo temporale di soli 7-8 anni (dal 1991 al 1998-99 e dal 1998-99 al 2007), è stata utilmente integrata nella procedura semi-automatica di formazione della CCF1991, risolvendo situazioni in cui piccole differenze tra i valori di appartenenza *fuzzy* di un oggetto alle classi definite dal sistema di nomenclatura adottato avrebbero reso la classificazione instabile.

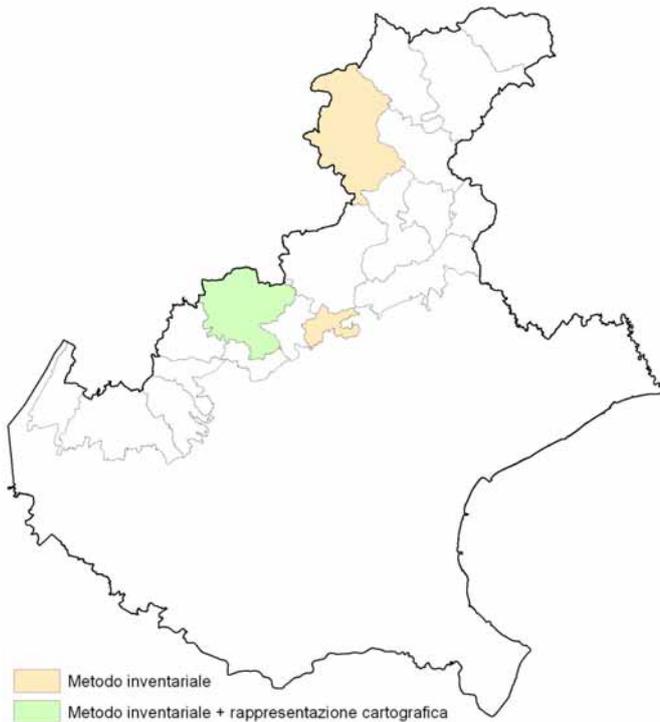
Restano insolute alcune problematiche legate all'adeguamento del processo di produzione delle carte delle coperture forestali storiche alla definizione di bosco adottata come standard di riferimento nei confronti multitemporali. La definizione di bosco FRA2000, pur incontrando un consenso sempre più ampio nella costituzione di quadri conoscitivi di supporto ai nuovi settori strategici in cui si trova ad interagire la gestione delle foreste (Protocollo di Kyoto, conservazione della biodiversità), appare, tuttavia, ottimizzata per il rilievo a terra e risulta di non semplice uso tramite immagini telerilevate. Se, di norma, la grandezza minima dell'area boscata di 0,5 ha ed il grado minimo di copertura delle chiome del 10% sono facilmente stimabili sulla base di immagini telerilevate con risoluzione metrica, appare invece complesso determinare se la vegetazione sia capace di raggiungere potenzialmente un'altezza di 5 m. Per ottenere questa informazione è indispensabile, in molti casi, ricorrere a rilievi a terra (Chirici et al., 2008), ma nel caso dell'interpretazione di situazioni dubbie rilevate nei fotogrammi del 1954 anche questa soluzione non può essere d'ausilio.

Le immagini pancromatiche del volo GAI, inoltre, presentano maggiori difficoltà anche quando si tratta di determinare il grado minimo di copertura delle chiome, poiché il valore spettrale delle ombre spesso non si differenzia da quello delle chiome che le proiettano. Questa criticità rende inapplicabile qualsiasi metodo "rigoroso" ed oggettivo (griglie di punti, segmentazione su due livelli) per la valutazione del grado di copertura arborea, che pertanto deve essere affidata all'esperienza del fotointerprete.

Queste difficoltà, tuttavia, non hanno impedito di conseguire l'obiettivo di produrre cartografie storiche delle coperture forestali fedeli alla realtà e confrontabili, da cui è stato possibile trarre importanti indicazioni sulle dinamiche territoriali della componente forestale nel lungo periodo.

Per la classificazione dei fotogrammi del volo "reventon Montagna Veneta 1991-92", a differenza del caso del volo GAI, non sono state utilizzate le *features* di texture, ma è stata adottata una diversa strategia che, oltre ad utilizzare le statistiche spettrali e ad analizzare le caratteristiche di struttura spaziale, ha integrato nell'algoritmo di classificazione l'informazione tematica della Carta Regionale dei Tipi forestali. L'impiego delle statistiche di *texture* implica, infatti, tempi di calcolo molto lunghi e pertanto è consigliato solo in casi particolari.

La stime della variazione della superficie boscata tra il 1991 e il 2007 nella Comunità Montana dei Sette Comuni ha prodotto risultati che vanno ad aggiungersi agli esiti degli studi condotti nelle Comunità Montane del Grappa e Agordina, ampliando il campione di indagine utile ad evidenziare il contributo complessivo che la Regione Veneto può offrire per l'implementazione del Protocollo di Kyoto a livello nazionale.



Anche la Comunità Montana della Valle del Boite è stata oggetto di campionamento inventariale (Anfodillo et al., 2007). Per limiti del materiale fotografico a disposizione, è stata, tuttavia, analizzata una piccola zona compresa tra i 1840 e i 3060 m s.l.m., con risultati ritenuti non rappresentativi dell'intera superficie della Comunità Montana.

Figura 120. Stato d'avanzamento degli studi sulla variazione di superficie boscata in Veneto dal 1991 e metodi di indagine adottati.

Da questi studi è stata ripresa la metodologia inventariale, utilizzata come strumento di validazione dei risultati ottenuti tramite procedure di *overlay* degli strati informativi prodotti attraverso l'applicazione dell'approccio *object-oriented*. I due approcci metodologici hanno in comune le fasi di pre-elaborazione delle immagini aerofotogrammetriche (ortorettifica e mosaicatura). La fase di ortorettifica è quella che ha inciso maggiormente sui tempi dell'intero processo di produzione del dato cartografico e statistico, ma tale operazione è indispensabile per eliminare quelle distorsioni geometriche che altrimenti renderebbero impossibile qualsiasi analisi metrica.

Sempre con riferimento ai tempi di applicazione, il metodo inventariale si dimostra efficace nell'analisi di territori molto vasti (ad esempio, un'intera Regione). L'esperienza condotta sulla Comunità Montana dei Sette Comuni ha mostrato che, a questa scala di analisi, i tempi necessari a produrre una

rappresentazione cartografica delle coperture forestali non differiscono in misura significativa da quelli occorrenti per l'applicazione di uno schema campionario a due stadi. Molto diverse, invece, sono le potenzialità applicative dei risultati dei due approcci al monitoraggio forestale di questo territorio.

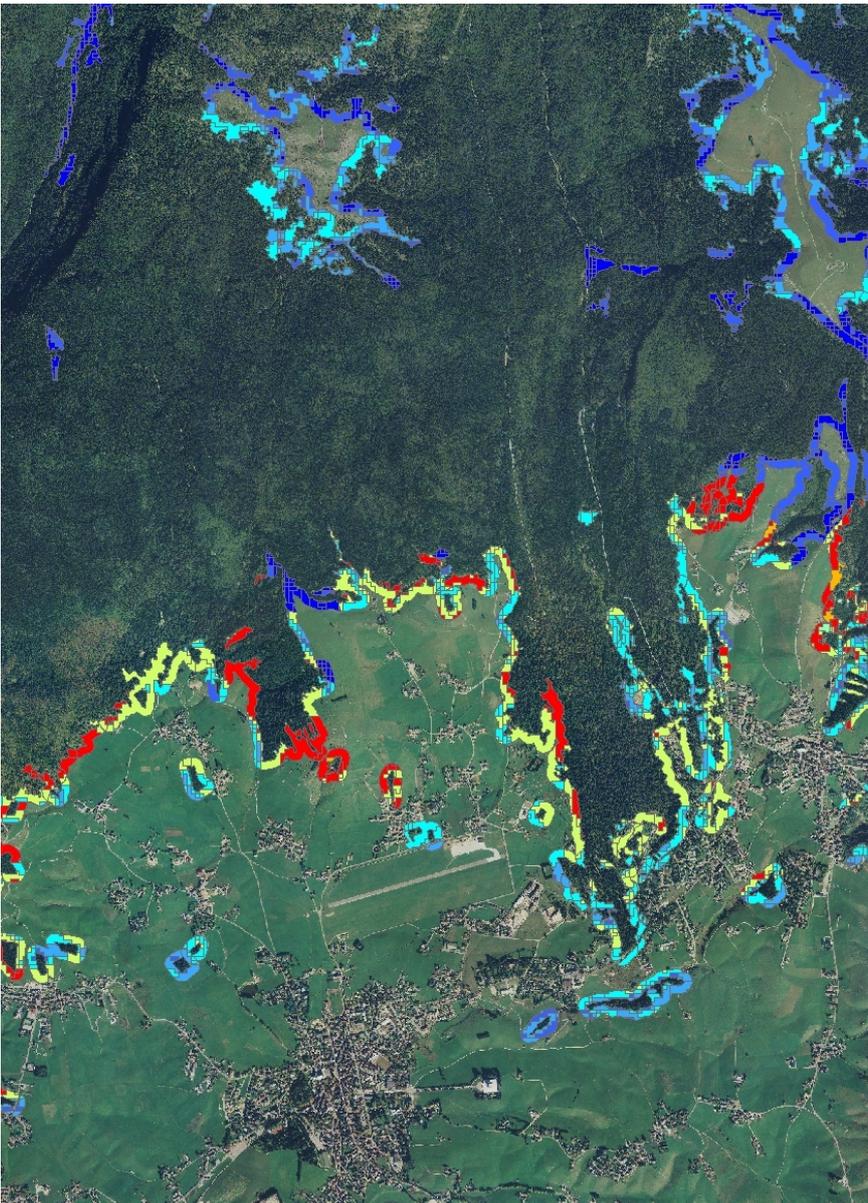
L'approccio inventariale è in grado di fornire informazioni di accuratezza statisticamente accertabile riguardanti l'entità di una componente territoriale e della sua variazione nel tempo, ma non consente di ottenere indicazioni adeguate sulla loro localizzazione (Collalti et al., 2009). Questo limite dell'approccio inventariale impedisce di relazionare le trasformazioni dell'uso del suolo ai fattori che le hanno determinate, pertanto l'informazione che se ne trae non contribuisce all'interpretazione dei meccanismi ecologici e socio-economici alla base dei processi di cambiamento.

Ben più ampie sono le ricadute applicative offerte dalle procedure di classificazione e di analisi presentate in questo lavoro di tesi, determinanti per superare incertezze sotto il profilo tecnico e tematico che usualmente rendono la restituzione cartografica inattendibile per precise stime quantitative e per il controllo delle dinamiche forestali, in particolare nel breve periodo. Il confronto tra cartografie omogenee per scala di rappresentazione e precisione geometrica ed armonizzate sotto l'aspetto definitorio ha consentito di evidenziare differenti velocità nei processi di ricolonizzazione forestale in relazione ad alcune variabili ambientali ed antropiche, la cui analisi può consentire lo sviluppo di modelli statistici per identificare i *driver factors* del cambiamento (Gennaretti et al., 2009). Migliorando questi modelli attraverso l'implementazione di ulteriori variabili naturali ed antropiche si possono produrre rappresentazioni cartografiche che esprimono la vocazione dei sistemi ecotonali ad essere interessati da processi di successione secondaria di ricolonizzazione del bosco (esempio: Figura 121), le quali, rapportate con gli usi del suolo e le forme di gestione attuali, consentono di formulare ipotesi previsionali che, nel breve periodo, possono raggiungere elevati gradi di predittività.

Il livello di rappresentazione, derivato da immagini con risoluzione metrica, fornisce, inoltre, elementi di valutazione strutturale del paesaggio. Ad esempio è possibile valutare l'origine artificiale o spontanea di coperture forestali recenti osservandone l'ampiezza e il grado di irregolarità dei margini. Analogamente si può cogliere la tendenza alla frammentazione, che si manifesta attraverso la chiusura o la graduale riduzione delle *patch* non boscate, che comporta una perdita di micro-habitat ed una diminuzione della biodiversità.

Per i limiti evidenziati, il metodo inventariale non ha consentito, nell'ambito delle analisi svolte nelle Comunità Montane del Grappa e Agordina, di distinguere quali processi fossero realmente *human induced*, cioè indotti o quantomeno gestiti dall'uomo (Anfodillo et al., 2007). Ciò non ha permesso di rispondere pienamente alle richieste formulate dal Protocollo di Kyoto.

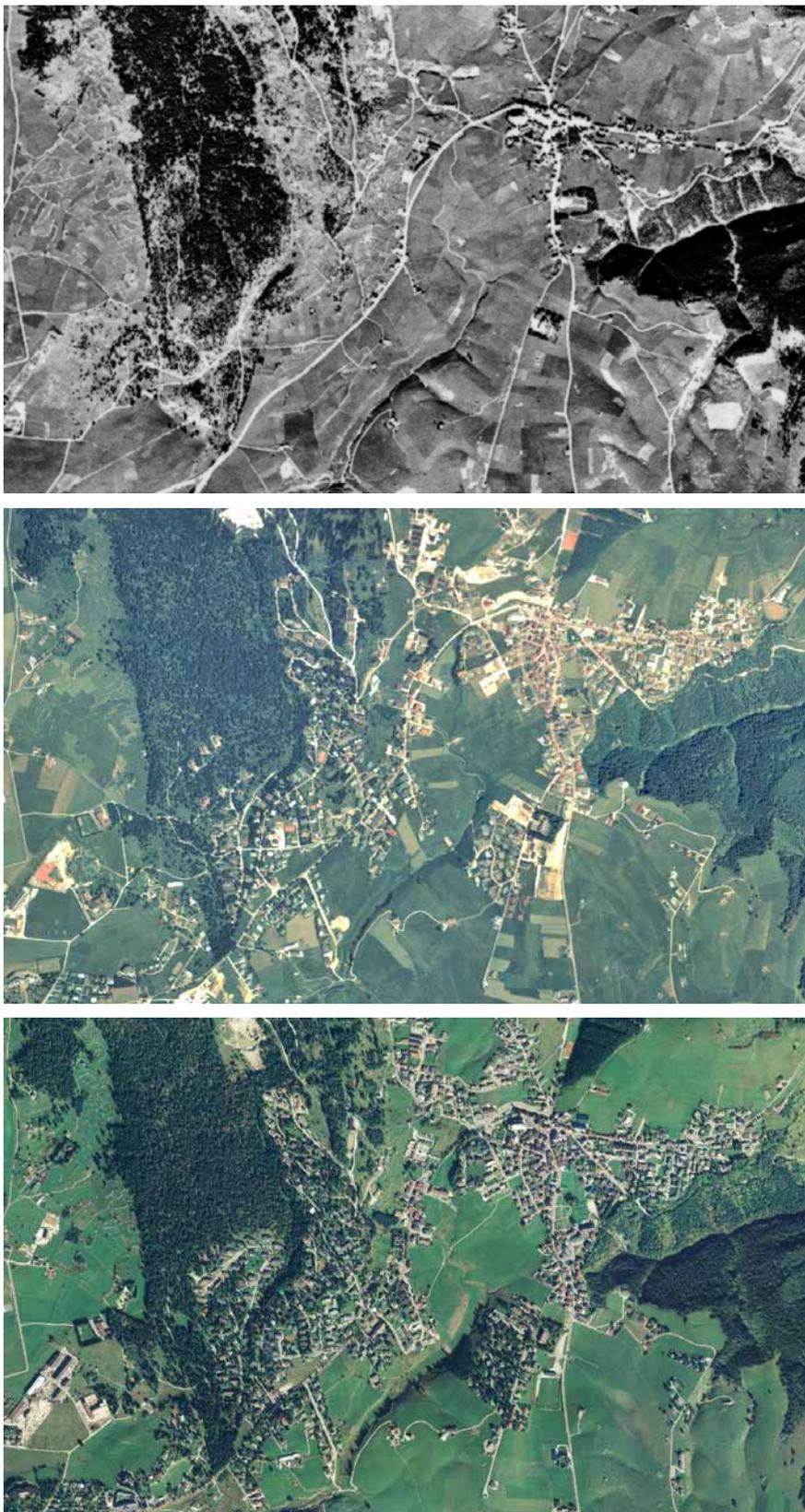
Parametri guida nella valutazione della frammentazione sono forma, dimensione, numero, arrangiamento spaziale e distanza tra le *patch* ed il livello di ostilità della matrice in cui sono inserite (Farina, 2001).



A partire dalle relazioni di ciascuna variabile con il tasso espansione del bosco (paragrafo 8.2.2) è stato costruito un modello di sintesi, esemplificativo di possibili sviluppi applicativi del metodo di analisi (molti altri, infatti, sono i fattori di cambiamento potenzialmente implementabili), che rappresenta in forma sintetica l'incidenza delle variabili orografiche sul processo di espansione del bosco. La vocazione delle fasce ecotonali ad essere soggette a processi di espansione del bosco è rappresentata con tonalità che vanno dal blu (bassa vocazione) al rosso (alta vocazione).

Figura 121. Propensione all'espansione del bosco in funzione delle variabili orografiche.

Monitorare ed interpretare le dinamiche spaziali del bosco significa conoscere in maniera più approfondita la complessa evoluzione storica di una componente, quella forestale, che da sempre riveste un ruolo dominante nei paesaggi culturali montani. Questi elementi di conoscenza potranno fornire una serie di indicazioni per una pianificazione integrata delle diverse componenti territoriali, soprattutto in relazione alle situazioni di conflittualità d'uso del suolo, che si prospettano più critiche soprattutto laddove il consumo del suolo ed il graduale abbandono rurale determinano una progressiva erosione di quella fascia connettiva tra insediamenti e foresta che è rappresentata dai campi, dai pascoli e dalle terre agricole meno produttive.



Un'indicazione sulla dimensione del consumo del suolo è emersa dalla stima inventariale, da cui è risultato un aumento della classe "improduttivo" del 25% (periodo 1991-2007).

Figura 122. Espansione del centro urbano di Gallio (1954, 1991 e 2007).

La percezione collettiva del fenomeno dell'espansione del bosco, non commisurata alla sua reale entità, è proprio sintomo della diffusione di queste

Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali – Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni

situazioni di conflitto, le cui cause sono da ricercarsi nel rapido sviluppo urbanistico e nel declino di importanti attività economiche tradizionali.

Queste cause di degrado minacciano la funzionalità stessa delle componenti del paesaggio montano nel garantire il mantenimento di fondamentali processi geoidrologici indispensabili per evitare dissesti ed eventi calamitosi nei territori di pianura (Farina, 1994). Da tempo è noto che la conservazione del paesaggio montano dipende dalla capacità di trovare soluzioni integrate di gestione dei sistemi complessi che, oltre agli amministratori, ai tecnici ed ai ricercatori, coinvolgono in un processo partecipativo anche le popolazioni locali, ma difficilmente questo equilibrio potrà essere raggiunto finché interessi particolari prevarranno sul bene comune.

Bibliografia

AA.VV., 2008. *L'uso del suolo delle regioni: verso una condivisione di standard*. Atti XII Conferenza Nazionale ASITA.

AA.VV., 2009. *Carta della copertura del suolo del Veneto*. Regione del Veneto, Unità di Progetto per il SIT e la Cartografia (DVD ROM).

Amadesi E., 1977. *Fotointerpretazione e aerofotogrammetria*. Pitagora Editrice, Bologna.

Anfodillo T., Pilli R., Salvadori I., 2006. *Indagine preliminare sullo stock di carbonio nelle foreste del Veneto*. Regione del Veneto, Direzione Foreste ed Economia Montana.

Anfodillo T., Dalla Valle E., Lamedica S., Pilli R., 2007. *Ruolo delle foreste del Veneto nella fissazione di CO₂ in relazione alle norme del protocollo di Kyoto*. Regione del Veneto, Direzione Foreste ed Economia Montana.

Anfodillo T., Dalla Valle E., Valesse E. (eds.) 2008. *Disturbi in foresta ed effetti sullo stock di carbonio: il problema della non permanenza*. Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 44° corso, Università di Padova.

Baatz M., Benz U., Deghani S., Heynen M., Höltje A., Hofmann P., Lingenfelder I., Mimler M., Sohlbach M., Weber M., Willhauck G., 2001. *eCognition user guide*. Definiens Imaging GmbH, Monaco.

Baggio P., 1994. *Interazioni sistemiche territoriali: metodologie e approccio dell'analisi, interpretazione di modelli interattivi per una pianificazione territoriale*. Atti del XXXI Corso di Cultura in Ecologia, 145-147.

Bertini R, Chirici G, Corona P, Travaglini D, 2007. *Confronto di metodi parametrici e non-parametrici per la spazializzazione della provvigione legnosa tramite integrazione di misure a terra, dati telerilevati e informazioni ancillari*. Forest@ 4 (1): 110-117.

- Brivio P.A., Lechi G.M., Zilioli E., 1992. *Il telerilevamento da aereo e da satellite*. Carlo Delfino Editore, Sassari.
- Cantile A., 2004. *Il territorio nella società dell'informazione dalla cartografia ai sistemi digitali*. Istituto Geografico Militare, Firenze.
- Carraro G., 1997. *Gestione integrata delle informazioni nella cartografia forestale regionale*. Regione del Veneto, Direzione Foreste ed Economia Montana.
- Carraro G., Dissegna M., Savio D., 2006. *L'utilizzo di dati telerilevati nella redazione della Carta dei tipi forestali del Veneto*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 37: 81-88.
- Carriero A., Wolynski A., 2005. *Boschi di neoformazione: una realtà in progressione*. Terra Trentina, n.5.
- Cerofolini A., 2005. *Brevi note sulla definizione giuridica di bosco nell'ordinamento italiano*. [online] url: www.sian.it .
- Cerutti P., 1997. *Analisi e valutazione delle potenzialità di ricolonizzazione del bosco in ecotoni di ambiente montano-alpino: applicazione GIS per un'indagine multitemporale nel Comune di Cortina d'Ampezzo (BL)*. Tesi di Laurea in Scienze Forestali, Università degli Studi di Padova.
- Chirici G., 2001. *Sviluppo di un protocollo di rilevamento con indicatori spazializzati per la pianificazione forestale*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Assestamento Forestale, Università degli Studi della Toscana.
- Chirici G., Corona P., Marchetti M., Travaglini D., 2003. *Rilevamento campionario e spazializzazione cartografica della necromassa legnosa in biocenosi forestali*. Monti e Boschi, 54 (6): 40-45.
- Chirici G., Corona P., 2006. *Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali*. Aracne Editrice, Roma.
- Chirici G., Di Martino P., Garfi V., Ottaviano M., Tonti D., Gioingo Alves M., Santopuoli G., Marchetti M., 2008. *Tecniche avanzate di cartografia degli*

- ambienti forestali su base tipologica in Italia centrale*. Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura, Taormina.
- Cilloccu F., Dequal S., Brovelli M.A., Crespi M., Lingua A., 2009. *Ortoimmagini 1:10.000 e modelli altimetrici. Linee Guida*. Centro Interregionale per i Sistemi informatici, geografici e statistici.
- Coburn C. A., A.C.B. Roberts, 2004. *A multiscale texture analysis procedure for improved forest stand classification*. International Journal of Remote Sensing, vol. 25 (20), 4287-4308.
- Collalti D., D'Alessandro L., Marchetti M., Sebastiani A., 2009. *La carta tipologico-forestale della Regione Abruzzo*. Regione Abruzzo - Direzione Politiche Agricole e di Sviluppo Rurale, Forestale, Caccia e Pesca, Emigrazione.
- Corona P., 2000. *Introduzione al rilevamento campionario delle risorse forestali*. Edizioni CUSL, Firenze.
- Corona P., 2010. *Integration of forest mapping and inventory to support forest management*. iForest 3: 59-64.
- Corona P., Pompei E., Scarascia Mugnozza G., 2005. *Stima probabilistica del tasso di espansione annua e del valore al 1990 della superficie forestale nella Regione Abruzzo*. Forest@ 2 (2): 178-184.
- Corona P., Carraro G., Portoghesi L., Bertani R., Dissegna M., Ferrari B., Marchetti M., Fincati G., Alivernini A., 2010. *Pianificazione forestale di indirizzo territoriale, metodologia e applicazione sperimentale all'altopiano di Asiago*. Regione del Veneto, Università degli Studi della Tuscia, Piccoli Giganti Edizioni, Castrovillari.
- De Capua EL., Nigro C., Labriola F., 2005. *Boschi, biodiversità, territorio e variazioni ambientali. Interventi e attività della provincia di Matera*. Forest@ 2 (1): 110-129.
- De Gennaro M., Foccardi M., Giaggio C., Nordio M., 2007. *Dal progetto GSE LAND alla Base di Dati di Copertura del Suolo: utilizzo delle banche dati territoriali del SIT della Regione del Veneto*. Atti XI Conferenza Nazionale ASITA.

De Giglio M., 2008. *Monitoraggio di colture agricole mediante dati satellitari ASTER: problematiche e applicazioni*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Geodetiche e Topografiche, Università degli Studi di Bologna.

De Natale F., Floris A., Gasparini P., Scrinzi G., Tabacchi G., Tosi V., 2003. *Linee generali del progetto per il secondo inventario forestale nazionale italiano*. Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura.

De Natale F., Gasparini P., 2003. *Manuale di fotointerpretazione per la classificazione delle unità di campionamento di prima fase*. Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura.

De Natale F., Gasparini P., Carriero A., 2006. *A study on the tree colonization of abandoned land in the Italian Alps: extent and some characteristics of new forest stand in Trentino*. [online] url: <http://mpf.entecra.it>.

Definiens, AG, 2006. *Definiens Professional 5 Reference Book*. Definiens AG, Munich, Germany.

Del Favero R., Andrich O., De Mas G., Lasen C., Poldini L., 1990. *La vegetazione forestale del Veneto. Prodromi di tipologia forestale*. Regione del Veneto, Dipartimento per le Foreste e l'Economia Montana.

Del Favero R. (e altri), 2000. *Biodiversità e indicatori nei tipi forestali del Veneto*. Regione del Veneto - Direzione Foreste ed Economia Montana, Accademia Italiana di Scienze Forestali.

Del Favero R., Abramo E., Andrich O., Carraro G., Disegna M., Giaggio C., Lasen C., Savio D., Zen S., 2001. *Sintesi del sistema informativo forestale del Veneto*. Regione del Veneto - Direzione Foreste ed Economia Montana (CD Rom, seconda edizione).

Del Favero R., 2004. *I boschi delle regioni alpine italiane*. CLEUP, Padova.

Del Favero R., 2006. *Carta regionale dei tipi forestali – documento base*. Regione del Veneto - Direzione Foreste ed Economia Montana, Accademia Italiana di Scienze Forestali.

Dissegna M., Marchetti M., Vannicelli Casoni L., 1997. *I sistemi di terre nei paesaggi forestali del Veneto*. Regione del Veneto - Dipartimento per le Foreste e l'Economia Montana.

Farina A., 1994. *L'abbandono rurale e suoi effetti sul paesaggio*. Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 31° corso, Università di Padova: 149-163.

Farina A., 2001. *Ecologia del paesaggio*. UTET Libreria, Torino.

Galetto R., 2004. *Camere digitali per riprese aeree e terrestri*. Bollettino SIFET, n.4, pp.45-85.

Gennaretti F., Pelorosso R., Ripa M. N., Recanatesi F., Leone A., 2009. *Mappe di copertura delle terre da foto aeree: metodologia object-oriented per lo studio delle dinamiche del paesaggio*. Memorie del IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria.

Geri F., Giordano M., Nucci A., Rocchini D., Chiarucci A., 2008. *Analisi multitemporale del paesaggio forestale della Provincia di Siena mediante l'utilizzo di cartografie storiche*. Forest@ 5: 82-91.

Giorgini G., 2006. *Recupero a fini metrici di fotogrammi storici nell'analisi dell'evoluzione in ambito urbano*. Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, DISTART, Università degli Studi di Bologna.

Giuliarelli D, Corona P, Lamonaca A, 2007. *Sperimentazione di tecniche object oriented per la classificazione di uso/copertura del suolo Corine Land Cover da immagini satellitari a media risoluzione*. Forest@ 4 (3): 272-282.

Gomasca M. A., 1997. *Introduzione a telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e forestali*. Edizioni AIT, Firenze.

Grignetti A, Coaloa D, Niccolini G, 2009. *Classificazioni delle superfici coltivate a pioppo mediante immagini satellitari ad elevata risoluzione spaziale*. Forest@ 6: 299-311

Halounová L., 2003. *Textural classification of B&W aerial photos for the forest classification*. Remote sensing laboratory, CTU Prague, Czech Republic.

Halounová L., 2004. *The automatic classification of B&W aerial photos*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX.

Haralik R.M., Shannugam K, Dinstein I., 1973. *Textural features for images classification*. IEEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. 6.

Hellrigl B., 1981. *Manuale per il rilevamento di campagna per la compilazione della carta forestale del Veneto*. Istituto di ecologia e selvicoltura dell'Università di Padova, Regione del Veneto - Dipartimento per le Foreste e l'Economia Montana.

Kosko B., 2000. *Il fuzzy-pensiero. Teoria e applicazioni della logica fuzzy*. Baldini & Castoldi, Milano.

Laliberte A., Rango A., 2008. *Incorporation of texture, intensity, hue and saturation for rangeland monitoring with unmanned aircraft imagery*. GEOBIA, Calgary.

Laliberte A., Rango A., 2009. *Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 47: 761-770.

Lamedica S., 2007. *Variazione di superficie e fissazione del carbonio in foreste del bellunese in riferimento all'applicazione del Protocollo di Kyoto*. Tesi di Laurea specialistica in Scienze Forestali e Ambientali, Università degli Studi di Padova.

Lamonaca A., 2006. *Utilizzo di immagini Quickbird per il monitoraggio annuale della superficie forestale*. L'Italia Forestale e Montana, 61 (2): 119-132.

Lombroso P., 2004. "Il contributo dei dati geografici per il governo del territorio nell'esperienza del Veneto", *Il territorio nella società dell'informazione dalla cartografia ai sistemi digitali*. Istituto Geografico Militare, Firenze.

Martelli C., 2009. *Estrazione di features con tecniche di classificazione pixel e object-oriented*. Tesi di laurea in Telerilevamento, Università degli Studi di Bologna.

Masutti L., Battisti A. (a cura di), 2007. *La gestione forestale per la conservazione degli habitat della Rete Natura 2000*. Regione del Veneto, Accademia Italiana di Scienze Forestali, (Venezia).

Mognol A., 2006. *Analisi di immagini aerofotogrammetriche e telerilevate per la caratterizzazione qualitativa e quantitativa di ecosistemi forestali e della loro evoluzione*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Geodetiche e Topografiche, Università degli Studi di Bologna.

Monacci F., Lucchesi F., 2007. *Individuazione descrizione e interpretazione dei paesaggi forestali*. Atti del XII Convegno Internazionale Interdisciplinare: "Volontà, libertà e necessità nella creazione del mosaico paesistico-culturale", Cividale del Friuli.

Morandini R., 1976. *Cenni sulla cartografia forestale in Italia*. L'Italia forestale e Montana, n.36, Accademia Italiana di Scienze Forestali.

Navulur K., 2007. *Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm*. CRC Press, Taylor & Francis Group.

Peddle D. R., Franklin S. E., 1989. *High resolution satellite image texture for moderate relief terrain analysis*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symp., Vancouver, Canada, vol. 2.

Pettenella D., Zanchi G., 2006. *Inquadramento generale del protocollo di Kyoto. Opportunità e limiti per il settore forestale*. Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 42° corso, Università di Padova.

Pittoni G., 1938. *Lo spopolamento montano in Italia*. In: Stella A. (a cura di), 1996. *Storia dell'Altipiano dei Sette Comuni. Economia e cultura*. Vol. I, Neri Pozza Editore, Vicenza.

Pompei E., Scarascia-Mugnozza G., 2008. *L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi di Carbonio e le variazioni di superficie forestale nel tempo*. Atti del III Congresso Nazionale di Selvicoltura, Accademia Italiana di Scienze Forestali.

Preto G., 1985. *Inventario dei boschi non pubblici*. Regione del Veneto, Dipartimento per le Foreste e l'Economia Montana.

Pulighe G., 2009. *Ortorettifica di foto aeree storiche per lo studio delle dinamiche ambientali in regioni montane*. Geomedia, n.3: 18-21.

Rego L.F.G., 2003. *Automatic land-cover classification derived from highresolution ikonos satellite image in the urban atlantic forest in Rio de Janeiro, Brasil, by means of objects-oriented approach*. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg.

Salvadori I., 2005. *Analisi della variazione di superficie boscata tramite foto aeree nella Comunità Montana del Grappa (TV) in riferimento all'applicazione del Protocollo di Kyoto*. Tesi di Laurea specialistica in Scienze Forestali e Ambientali, Università degli Studi di Padova.

Salvadori I., Pilli R., Anfodillo T., 2006. *Proposta di una metodologia di analisi della variazione di superficie boscata tramite foto aeree per l'applicazione del protocollo di Kyoto: il caso della Comunità Montana del Grappa (TV)*. Forest@ 3 (3): 339-350.

Savio D., 2001. *La natura nell'arte. Un percorso tra realtà ed immagine*. Soprintendenza ai Beni Artistici e Storici di Venezia.

Savio D., 2010. *Tecniche object-oriented per la classificazione delle coperture forestali su fotogrammi storici pancromatici*. Atti XIV Conferenza Nazionale ASITA.

Signorile G., 2005. *Automatizzazione dell'uso di dati ancillari nel processo di classificazione object-oriented di dati satellitari*. Tesi di laurea in Sistemi Informativi Territoriali, Università IUAV di Venezia.

Sitzia T., 2009. *Ecologia e gestione dei boschi di neoformazione nel paesaggio trentino*. Provincia Autonoma di Trento, Servizio Foreste e Fauna, Trento.

Soave T., 2005. *Il paesaggio e il territorio montano veneto: strategie di pianificazione e gestione ambientale per la sostenibilità integrata*. Tesi di laurea specialistica in Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari di Venezia.

Sun M.W., Zhang J.Q., 2008. *Dodging research for digital aerial images*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing

Susmel L., 1994. *I rovereti di pianura della Serenissima*. CLEUP, Padova.

Tasser E., Walde J., Tappeiner U., Teutsch A., Noggler W., 2007. *Land-use changes and natural reforestation in the Eastern Central Alps*. Agric. Ecosyst. Environ. 118: 115-129.

Trianni G., 2005. *Definizione automatica della scala spaziale per la segmentazione di immagini SAR in ambiente urbano*. Atti della Scuola di Dottorato in Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Napoli.

Vitale A., 1928. *La carta forestale del Regno*. L'Alpe, Rivista forestale italiana, Confederazione Turistica Italiana.

Zalin G., 1996. *Trasformazioni strutturali, difficoltà economiche e diaspora migratoria dell'800 e primo '900*. In: Stella A. (a cura di), 1996. *Storia dell'Altipiano dei Sette Comuni. Economia e cultura*. Vol. II, Neri Pozza Editore, Vicenza.

Zanchi G., Pettenella D., Ciccarese L., 2005. *Revegetation activities in the mediterranean areas as influenced by the definition of forest*. Workshop: Land-use choices under the Kyoto Protocol. Graz, Austria, 2-4 May 2005.

Sitografia

CNIPA - Centro Nazionale per l'Informatica nella Pubblica Amministrazione

www.gov.cnipa.it

ERDAS Inc.

www.erdas.com

FAO - Forest Resource Assessment 2005

<http://www.fao.org/forestry/FRA2005>

Hall-Beyer M., (2007). *GLCM tutorial home page*.

www.fp.ucalgary.ca/mhallbey/tutorial.htm

Random.org

www.random.org

Regione del Veneto

www.regione.veneto.it

RINGRAZIAMENTI

I miei primi ringraziamenti vanno al Prof. Domenico Patassini dell'Università IUAV di Venezia ed al Prof. Tommaso Anfodillo dell'Università degli Studi di Padova, per aver accettato la proposta di un tutorato interateneo, permettendomi di personalizzare questo progetto di ricerca secondo le mie convinzioni, senza mai farmi mancare validi consigli.

Alla Dott.ssa Elena Dalla Valle e al Dott. Emanuele Lingua, collaboratori del Prof. Anfodillo e revisori di questa tesi, desidero dedicare un particolare ringraziamento, oltre che per gli utili commenti al testo, per la loro eccezionale disponibilità nel condividere conoscenze risultate preziose per impostare nel modo più corretto importanti capitoli di questa tesi.

Sono riconoscente al Prof. Gherardo Chirici dell'Università degli Studi del Molise per la disponibilità ad un confronto foriero di spunti sempre utilissimi.

Anche ai colleghi della Regione del Veneto che hanno positivamente interagito con suggerimenti e consigli va la mia sentita riconoscenza. In particolare ringrazio il Dott. Maurizio Dissegna e il Dott. Giovanni Carraro per l'utile confronto e la sempre pronta disponibilità, il Dott. Maurizio Minuzzo per il prezioso aiuto nell'esecuzione dei sopralluoghi, Carlo Giaggio per la risoluzione di problematiche legate al trattamento delle basi di dati geografiche e il Dott. Pierpaolo Milan per la paziente collaborazione nella collazione dei dati aerofotogrammetrici.

Ringrazio anche il gruppo di lavoro dello spin-off dell'Università IUAV di Venezia, che ha eseguito l'ortorettifica dei fotogrammi del volo GAI utilizzati in questa tesi, e tutti i compagni di corso, ai quali auguro di conseguire i riconoscimenti professionali che meritano.

Più di tutti ringrazio la persona a cui dedico questa tesi, che mai mi ha fatto mancare il suo affettuoso sostegno durante questi anni di lavoro e in tutta la mia vita; a lei devo ciò che sono ed i traguardi che ho raggiunto. A mio padre, infine, rivolgo un pensiero particolare. Il suo ricordo di persona tenace e libera di pensiero è sempre vivo in me e mi aiuta ad affrontare ogni difficoltà; a lui devo insegnamenti che nessun libro può contenere.