

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE****Sede Amministrativa di Trieste**

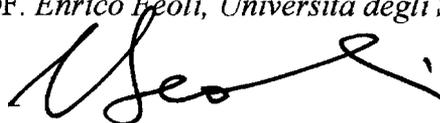
XVII CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN  
METODOLOGIE DI BIOMONITORAGGIO DELL'ALTERAZIONE  
AMBIENTALE

**Analisi delle metodologie per la stima della biomassa in aree  
temperate e tropicali.**

**DOTTORANDA**

Rossella Napolitano '75

CS

**COORDINATORE DEL COLLEGIO DEI DOCENTI**CHIAR.MO PROF. *Enrico Feoli, Università degli Studi di Trieste***RELATORE**DOTT. *Alfredo Altobelli, Università degli Studi di Trieste***CORRELATORE**CHIAR.MO PROF. *Enrico Feoli, Università degli Studi di Trieste*

# Analisi delle metodologie per la stima della biomassa in aree temperate e tropicali.

1. INTRODUZIONE.....	0
1.1 Premessa.....	0
1.2 Scopo del lavoro .....	2
2. LA BIOMASSA .....	3
2.1 La biomassa forestale.....	4
2.2 La struttura della vegetazione.....	6
2.2.1 Descrizione della struttura della vegetazione .....	7
2.2.2 La frazione delle aperture ( <i>gap fraction</i> ) .....	9
2.2.3 L'indice di area fogliare (LAI).....	10
2.3 Metodologie per lo studio della struttura della vegetazione.....	14
2.3.1 Altezza della vegetazione .....	15
2.3.2 Area fogliare.....	15
2.3.3 Biomassa .....	18
2.3.4 Strumenti del telerilevamento .....	19
2.4 Modelli per la stima della produzione primaria netta (NPP).....	20
2.4.1 Il modello PHYTOMASS di Box.....	21
2.4.2 Il modello di Miami.....	22
2.4.3 Il modello Memorial di Thornwaite.....	22
2.4.4 Il modello di Chikugo.....	22
2.4.5 Il modello 3-PG.....	23
3. AREA DI STUDIO .....	25
3.1 Friuli Venezia Giulia .....	25
3.1.1 Caratteristiche climatiche.....	25
3.1.2 Caratteristiche litologiche .....	28
3.1.3 Vegetazione .....	31
3.1.4 Scelta delle stazioni.....	50
3.2 Bacino del <i>Rio Cachoeira</i> , Bahia, Brasile.....	53
3.2.1 Localizzazione.....	53
3.2.2 Caratteristiche idrografiche .....	55
3.2.3 Caratteristiche geologiche.....	55
3.2.4 Caratteristiche climatiche.....	55
3.2.5 La vegetazione dell'area di studio.....	56
3.2.6 Gli " <i>hot spots</i> " .....	63
3.2.7 Misure in campo .....	65
4 MATERIALI E METODI: I RILIEVI DI CAMPO.....	66
4.1 Il LAICOR-2000 Plant Canopy Analyzer.....	66
4.1.1 Presupposti.....	66
4.1.2 Teoria .....	67
4.2 La fotografia emisferica.....	76
4.2.1 Acquisizione delle fotografie.....	77
4.2.2 Geometria della foto emisferica.....	77
4.2.3 Distorsione dell'immagine .....	79
4.2.4 Il software per l'elaborazione delle foto emisferiche: HEMIVIEW 2.1.....	80
4.2.5 Elaborazione delle fotografie.....	88

4.3	Misure allometriche.....	89
4.3.1	Applicazione nel Friuli Venezia Giulia.....	90
4.3.2	Applicazione nel bacino del <i>Rio Cachoera</i> .....	90
5.	IL TELERILEVAMENTO (O <i>REMOTE SENSING</i> ).....	93
5.1	Tipi di sensori utilizzati nel telerilevamento.....	95
5.1.2	Risoluzione degli strumenti.....	96
5.2	La firma spettrale.....	98
5.2.1	Caratteristiche spettrali della vegetazione.....	99
5.3	Tecniche di elaborazione delle immagini.....	100
5.3.1	La correzione atmosferica o radiometrica.....	101
5.3.2	La correzione geometrica. ....	102
5.3.3	Il miglioramento delle immagini.....	102
5.3.4	L'integrazione nei Sistemi Informativi Geografici (G.I.S).....	103
5.4	Gli indici di vegetazione .....	104
5.5	I diversi tipi di sensori.....	107
5.6	Il satellite MODIS .....	108
5.6.1	Caratteristiche delle 36 bande del sensore MODIS.....	109
	Lunghezza d'onda .....	109
5.6.2	I prodotti del MODIS.....	111
5.6.3	Procedura di acquisizione dei dati.....	113
5.6.4	MODIS <i>Reprojecting Tool</i> (MRP).....	116
5.7	I satelliti LANDSAT .....	119
5.8	Il sensore aerotrasportato MIVIS.....	121
5.8.1	Caratteristiche spettrali .....	123
5.8.2	Caratteristiche della ripresa .....	125
5.8.3	Georeferenziazione .....	126
5.8.4	Elaborazione delle immagini .....	126
5.9	Dati satellitari utilizzati.....	128
5.10	Integrazione dei dati di biomassa a terra e del telerilevamento.....	129
6.	RISULTATI.....	131
6.1	I risultati ottenuti per il Friuli Venezia Giulia.....	131
6.1.1	Le misure di LAI con il LAI-2000 <i>Plant Canopy Analyzer</i> .....	131
6.1.2	Le misure di LAI con la fotografia emisferica .....	134
6.1.3	Correlazione tra le misure di LAI in campo con i due strumenti.....	138
6.1.4	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI del satellite Landsat.....	141
6.1.5	Correlazione tra il LAI della foto emisferica e l'NDVI del satellite Landsat. .....	143
6.1.6	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'RSR del satellite Landsat.....	144
6.1.7	Correlazione tra il LAI della foto emisferica e l'RSR del satellite Landsat.....	146
6.1.8	Correlazione tra il LAI e i dati del sensore MODIS. ....	146
6.1.9	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI del MODIS.....	147
6.1.9	Correlazione tra il LAI della foto emisferica e l'NDVI del MODIS.....	148
6.1.10	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'EVI del MODIS. ....	149
6.1.12	Correlazione tra il LAI della foto emisferica e l'EVI del MODIS.....	150
6.1.13	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI delle immagini MIVIS. ...	151
6.1.14	Correlazione tra il LAI e le misure di biomassa legnosa. ....	153
6.1.15	I risultati ottenuti nella foresta Cecconi. ....	154

6.1.16	Le mappe di LAI.....	156
6.1.18	La mappa di LAI dall'RSR ( <i>Reduced Simple Ratio</i> ) del Landsat.....	158
6.1.19	La mappa di LAI dall'NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ) del MODIS.....	159
6.1.20	La mappa di LAI dall'EVI ( <i>Enhanced Vegetation Index</i> ) del MODIS.....	160
6.2	I risultati ottenuti per il Brasile.....	161
6.2.1	Le misure di LAI con il LAI-2000 <i>Plant Canopy Analyzer</i> .....	161
6.2.2	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI del satellite Landsat.....	161
6.2.3	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'RSR del satellite Landsat.....	162
6.2.3	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI del satellite MODIS.....	163
6.2.3	Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'EVI del satellite MODIS.....	163
6.2.4	Le misure di biomassa legnosa negli hot-spot.....	164
6.2.5	Le mappe di LAI.....	167
6.2.6	La mappa di LAI dall'NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ) del Landsat.....	168
6.2.7	La mappa di LAI dall'RSR ( <i>Reduced Simple Ratio</i> ) del Landsat.....	169
6.2.8	La mappa di LAI dall'NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ) del MODIS.....	170
6.2.8	La mappa di LAI dall'EVI ( <i>Enhanced Vegetation Index</i> ) del MODIS.....	171
7.	DISCUSSIONE.....	172
7.1	Il LAI.....	172
7.2	Il LAI-2000.....	173
7.3	La foto emisferica.....	174
7.4	L'allometria.....	176
7.4	Il telerilevamento.....	177
7.5	Relazione tra la biomassa e gli indici di vegetazione.....	178
8.	CONCLUSIONI.....	180
9.	BIBLIOGRAFIA.....	181

# 1. INTRODUZIONE

## 1.1 Premessa

La vegetazione è fondamentale negli ecosistemi, perché fornisce le basi per le catene alimentari e i flussi di energia, per la produzione dei sistemi (legname, pascolo ecc.), per la qualità delle acque (bacini, nutrienti ecc.), per le condizioni del suolo (erosione, frane ecc.) e per la conservazione degli ecosistemi stessi (diversità delle piante, diversità degli habitat, frammentazione ecc.). Inoltre, assieme all'atmosfera e agli oceani, la vegetazione è uno dei maggiori fattori che influenzano i cambiamenti climatici. La vegetazione è un complesso sistema dinamico il cui stato è determinato dalle interazioni con gli organismi viventi e i fattori chimico-fisici dell'ambiente (Feoli e Orloci, 1991). Per avere la possibilità di descrivere e predire cambiamenti climatici a lungo e a breve termine è necessario effettuare un monitoraggio continuo dello stato della vegetazione. Essa, infatti, può essere considerata sia come un indicatore dello stato e della dinamica di un sito, sia come indicatore dei cambiamenti avvenuti nel tempo. Il monitoraggio implica la conoscenza di alcuni parametri chiave, come ad esempio la quantità di biomassa e la conoscenza degli attributi strutturali e funzionali della vegetazione.

Per biomassa si intende, con una definizione generica, ogni sostanza a matrice organica. La maggior parte della biomassa, però, deriva dall'accumulo di carbonio da parte della vegetazione mediante la fotosintesi, in cui la radiazione solare fornisce l'apporto energetico necessario. La stima della biomassa ha ricevuto negli ultimi anni notevole interesse, soprattutto in seguito al Protocollo di Kyoto, l'accordo internazionale, stabilito alla Conferenza delle Parti della Convenzione della Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici, del 1997, che prevede l'impegno per i paesi industrializzati di ridurre le emissioni di gas ad effetto serra. La biomassa immagazzinata dalla vegetazione determina la quantità di carbonio che la vegetazione è in grado di assorbire e le emissioni potenziali di carbonio che si avrebbero nell'atmosfera se si deforestasse. Quindi un'accurata stima della biomassa è necessaria per capire meglio gli impatti della deforestazione sul riscaldamento globale e sul degrado ambientale (Lu *et al.*, 2002). La degradazione della foresta tropicale (che costituisce una buona parte delle riserve di carbonio mondiale) avviene soprattutto per la deforestazione, il fuoco, l'attività agricola e per l'estrazione del legno. Queste attività spesso sono condotte senza pianificazione, causando significativi

danni ambientali come frammentazione, perdita di biodiversità, fertilità del suolo ecc. (Santos *et al.*, 2003).

Per quanto riguarda gli attributi strutturali e funzionali della vegetazione, essi sono influenzati dalle condizioni microclimatiche, dalla dinamica dei nutrienti, dall'attività degli erbivori e da molti altri fattori. La quantità di foglie contenute nella vegetazione è una delle caratteristiche principali che indicano gli effetti integrati di questi fattori. A sua volta, l'area delle foglie serve per la produzione primaria (fotosintesi), quindi per l'assimilazione del carbonio, per la traspirazione, per gli scambi energetici e per altri processi. Di conseguenza l'indice di area fogliare (LAI) è un descrittore importante e basilare delle condizioni della vegetazione, utilizzato per una grande varietà di studi fisiologici, climatici, e biogeochimici (Asner *et al.*, 2003) ed è anche un indicatore dello stress delle foreste (Waring, 1985). Quindi può essere utilizzato per il monitoraggio a lungo termine delle foreste, ma per fare ciò è necessario che le misure di LAI siano "robuste" e che ci sia un confronto del LAI tra popolamenti e comunità, come suggerito da Martens *et al.* (1993). Il LAI può essere misurato, analizzato e modellato in un ampio intervallo di scale spaziali: dal singolo albero, fino a intere regioni o continenti. Un incentivo alla ricerca sul valore di LAI in diverse tipi di vegetazione e su scala globale è stato dato dal bisogno di validare i dati del satellite MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), sensore del satellite Terra, lanciato dalla NASA nel dicembre 2000 (Scurlock *et al.*, 2001).

Per il monitoraggio è necessario, inoltre, acquisire un certo grado di conoscenza sui tipi di vegetazione, sulla selezione di una scala adeguata (temporale e spaziale) e sulle tecniche appropriate.

Data l'attuazione del protocollo di Kyoto, sopraccitato, e il bisogno imminente di determinare le fonti e la riserva (*sink*) di carbonio che deriva sia dai processi naturali che dai cambiamenti di uso del suolo, è necessario trovare dei metodi che possano determinare la biomassa accuratamente, ripetutamente e senza costi eccessivi (Houghton *et al.*, 2001). Considerando che i rilievi in campo spesso richiedono un considerevole onere in termini sia economici che di tempo, le tecniche del telerilevamento offrono una valida alternativa per l'analisi della vegetazione e per la stima della biomassa su vaste aree a costi e tempi d'esecuzione sensibilmente più contenuti.

Il telerilevamento è una metodologia che fornisce informazioni sulla struttura del popolamento della vegetazione, sulla densità della vegetazione e sulla composizione delle

specie della vegetazione (Lu *et al.*, 2002), ma anche sui cambiamenti di uso e copertura del suolo. Gli indici spettrali della vegetazione sono ampiamente usati per la loro abilità nello stimare la biomassa verde e l'attività fotosintetica della vegetazione. Tali indici possono essere messi in confronto con le misurazioni in campo che sono necessarie per la validazione dei modelli prodotti con il telerilevamento.

Per questo motivo il ruolo del telerilevamento nel monitoraggio è fondamentale per l'analisi, l'interpretazione, la valutazione spaziale e temporale dei cambiamenti della vegetazione. Tra i molti vantaggi del telerilevamento c'è la possibilità di integrare i dati satellitari con i dati provenienti da diverse fonti (mappe tematiche di temperatura, piovosità, geologia ecc.) nei Sistemi Informativi Geografici (GIS).

## 1.2 Scopo del lavoro

In questa tesi di dottorato la vegetazione viene usata come un indicatore per il monitoraggio del territorio. Uno degli scopi di questa tesi è il confronto tra diverse metodologie per la stima della biomassa (legnosa e verde) per valutarne i pro, i contro, i possibili errori di misurazione e la loro applicabilità per studi di biomonitoraggio dell'alterazione ambientale. Le metodologie utilizzate sono le seguenti:

1. per la biomassa legnosa: taglio totale di alcune aree campione; applicazione delle equazioni allometriche (basate su diametro, altezza, area basale, area della chioma ecc.) per determinare il volume e il peso.
2. per la biomassa verde: taglio e peso delle foglie; LAI misurato con il LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer*, con la fotografia emisferica e con il telerilevamento attraverso equazioni empiriche tra il LAI misurato in campo e gli indici spettrali di vegetazione.
3. creazione di mappe di LAI utilizzando diversi indici di vegetazione e diversi satelliti.

## 2. LA BIOMASSA

In generale il termine biomassa indica ogni sostanza a matrice organica.

La biomassa di un ecosistema è la materia secca degli organismi viventi presente in un dato momento, espressa in  $\text{kg m}^{-2}$  o  $\text{t ha}^{-1}$ . Generalmente ci si riferisce solo alla fitomassa vivente, perché la zoomassa è difficile da determinare e rappresenta una piccola porzione della fitomassa (Röhrig, 1991).

La biomassa è quindi l'accumulo di parte dell'energia proveniente dalla radiazione solare sotto forma di massa vegetale mediante la fotosintesi, in cui la radiazione solare fornisce l'apporto energetico necessario per costruire molecole organiche a partire da acqua e anidride carbonica. A causa della degradazione del suolo e della deforestazione, la perdita di biomassa e il rilascio di carbonio sono diventati una questione prioritaria che sta causando gravi problemi ambientali. Capire meglio lo stato della biomassa e i suoi cambiamenti dovuti alle attività antropiche è importante e urgente per un appropriato uso del suolo e una conservazione delle risorse naturali. Per questo motivo si stanno svolgendo delle ricerche sia per stimare la biomassa a diverse scale (da quella locale a quella globale), sia per la stima della produttività primaria netta (NPP), utilizzando equazioni di regressione e modelli di carbonio (Hu *et al.*, 1996).

Gli studi sulla biomassa sono così riassunti (Kueh e Lim, 1999):

- descrivere quantitativamente gli ecosistemi e indicare le risorse di biomassa disponibili;
- quantificare la quantità di nutrienti dell'ecosistema e i loro cicli;
- determinare la fissazione di carbonio nell'ecosistema forestale;
- fornire stime del contenuto di carbonio nelle foreste;
- quantificare la crescita e la produzione primaria (espressa in  $\text{g m}^{-2} \text{anno}^{-1}$  o  $\text{t ha}^{-1} \text{anno}^{-1}$  di materia secca) e l'incremento delle foreste (Whittaker, 1975);
- stimare i cambiamenti della struttura della foresta
- valutare la possibilità di utilizzarla come fonte di energia rinnovabile.

La biomassa come bioenergia consiste in tutti quei materiali organici che possono essere usati come combustibili solidi, liquidi o gassosi, direttamente (es. la legna da ardere) o attraverso un processo di trasformazione strutturale del materiale organico (es. biodiesel da piante oleaginose). Il vantaggio della biomassa come biocombustibile è che è una risorsa disponibile ovunque, pulita e rinnovabile che non aumenta l'effetto serra, perché la

quantità di CO<sub>2</sub> rilasciata durante la decomposizione equivale a quella assorbita durante la crescita della biomassa stessa. Le fonti principali di biomassa sono i residui delle coltivazioni destinate all'alimentazione, le piante legnose o erbacee espressamente coltivate a scopi energetici (coltivazioni “*no food*”), gli scarti di attività industriali come i trucioli di legno, gli scarti delle aziende zootecniche o i rifiuti urbani.

## 2.1 La biomassa forestale.

Il ciclo del carbonio è un sistema altamente dinamico che include diversi depositi come la vegetazione, il suolo, i detriti, il carbone residuo dei fuochi, i prodotti del taglio ecc. Le foreste giocano il ruolo principale nel bilancio del ciclo del carbonio: contengono circa il 60% del carbonio immagazzinato nella vegetazione e circa il 50% di quello immagazzinato nel suolo (TBFRA-2000, 2000).

La biomassa forestale può essere ripartita in:

- legnosa superficiale o epigea
- fogliare
- radicale o ipogea

L'accrescimento di una popolazione arborea in numero e in biomassa, dalla sua prima comparsa nel biotopo fino al culmine della maturità strutturale, segue una curva ad andamento sigmoideo (curva logistica). Il tratto iniziale è tendenzialmente esponenziale: gli individui che compongono la popolazione si riproducono e accrescono numericamente e ponderalmente, come se nell'ambiente non agisse alcun fattore limitante. Al termine di questo tratto si ha un flesso che segna l'intervento di un fattore ecologico, biotico o abiotico, che impedisce alla popolazione e agli organismi di svilupparsi sotto il controllo dei soli fattori genetici. Si fanno dunque attivi dei fattori ambientali limitanti. Nel tratto finale si ha che gli accrescimenti via via diminuiscono e alla fine si annullano. I fattori limitanti esplicano la propria funzione e mantengono la popolazione a valori di effettivo equilibrio con le condizioni ambientali (Susmel, 1988). L'espressione analitica della curva di accrescimento logistico è data da:

$$V(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K - M_0}{M_0}\right)e^{-rt}} \quad (2.1)$$

in cui  $V(t)$  è il volume ad ettaro in  $m^3$  di biomassa presente in bosco all'anno  $t$ , mentre  $K$ ,  $M_0$  ed  $r$  sono i parametri di crescita tipici per ciascuna curva.  $K$  è la capacità portante dell'ecosistema, misurata in  $m^3$  ad ettaro: rappresenta il valore limite per il quale l'accrescimento  $dV/dt$  è uguale a zero, ossia quando la popolazione raggiunge il punto di equilibrio con i fattori ambientali.  $M_0$  è l'intercetta sull'asse  $V$ , ossia i  $m^3$  ad ettaro esistenti all'anno zero;  $r$  è il tasso intrinseco di accrescimento.

Sulla base di questi parametri sono state definite 14 curve logistiche a carattere nazionale per le specie vegetali censite nell'Inventario Forestale Nazionale 1985 (ISAF 1988), distinte tra fustaie e cedui (fig. , esempio di curva logistica).

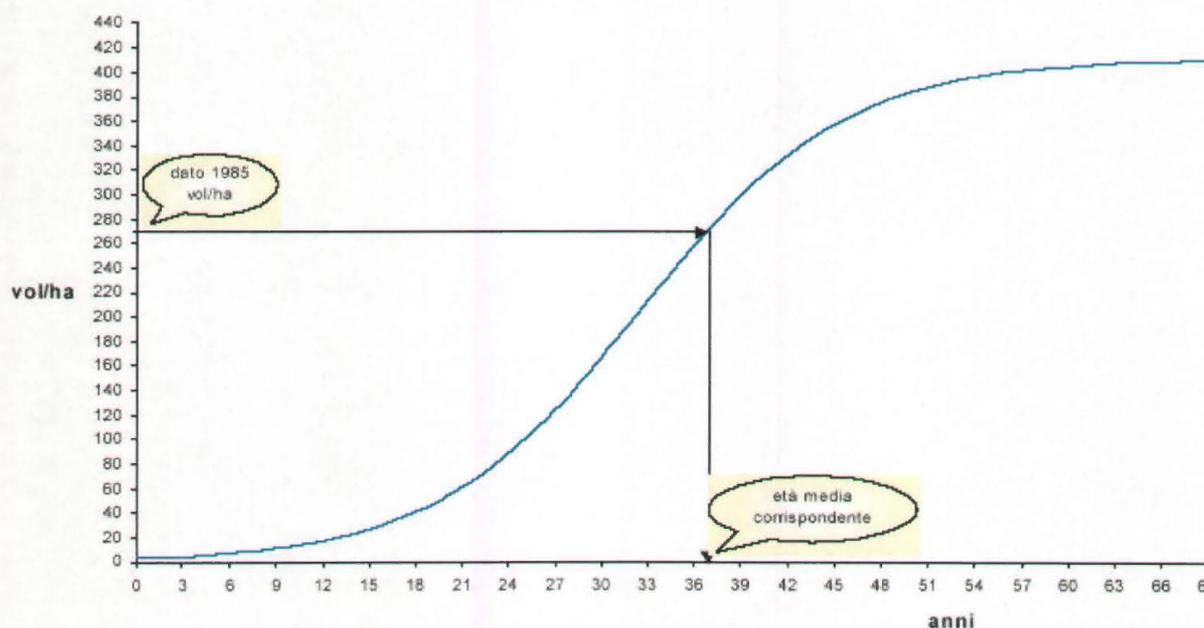


Fig. 2.1 Esempio di curva logistica dell'abete rosso: come viene determinata l'età media ( $t_0$ ) di ciascuna tipologia a partire dalla massa unitaria (vol/ha) (APAT, 2002).

L'evoluzione delle foreste si può modellizzare secondo i parametri di accrescimento potenziale delle logistiche; il prodotto del volume ad ettaro all'anno per la superficie forestale di ciascuna tipologia all'anno costituisce la massa lorda presente nel bosco. La massa netta deriva dalla massa lorda meno la quantità di massa persa a causa di calamità naturali (come l'attacco di parassiti), incendi e tagli, di cui generalmente non si hanno dati ufficiali da poter introdurre in un modello. La massa netta comprende la massa del fusto intero con corteccia; la massa epigea di foglie e rami e ipogea delle radici (questa massa viene calcolata a partire dalla massa legnosa moltiplicata per un opportuno coefficiente); la biomassa contenuta nel suolo e nelle sostanze umiche. Il valore del *sink*, ossia le quantità di tonnellate di carbonio che vengono fissate da un anno all'altro nelle foreste seminaturali, risulta dalla differenza degli *stock* calcolati anno dopo anno; lo *stock* rappresenta la

biomassa totale presente in un bosco all'anno, comprensiva di biomassa epigea, ipogea e della biomassa contenuta nel suolo al netto di tagli e incendi.

Per simulare la capacità di fissazione di carbonio nel settore forestale, l'ANPA (Agenzia Nazionale Protezione Ambiente) ha commissionato al Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali dell'Università degli studi di Padova, la revisione del modello CSEM (*Carbon Sequestration Evaluation Model*). Il modello CSEM calcola separatamente i vari contributi alla fissazione del carbonio, per poi sommarli tra loro nell'output finale degli *stock* per ciascuna tipologia e infine determinare i relativi *sink* (APAT, 2002). I contributi alla fissazione del carbonio, la cui somma costituisce lo *stock*, provengono da:

- biomassa legnosa netta: è la massa del fusto intero comprensivo della corteccia per le conifere e come massa dendrometrica comprensiva di corteccia, meno i rami con diametro inferiore a 3 cm, per le latifoglie e i pini a chioma espansa.
- biomassa epigea (rami e foglie) e biomassa ipogea (radici): corrisponde alla sostanza organica contenuta in un intero albero, comprensiva di foglie, rami, radici e fusto. Viene calcolata moltiplicando la biomassa legnosa per un opportuno coefficiente (1.50 per le conifere e 1.26 per le latifoglie). Trasformando poi i m<sup>3</sup> di biomassa legnosa in tonnellate di carbonio, moltiplicando per 0.17 per le conifere e 0.25 per le latifoglie, si ottengono le tonnellate di carbonio corrispondenti alla biomassa totale.
- carbonio fissato nel suolo: si può ipotizzare che in una foresta naturale indisturbata l'evoluzione del carbonio del suolo sia rappresentabile con un modello di crescita lineare. Esso, infatti, dovrebbe aumentare proporzionalmente allo sviluppo della biomassa arborea, mentre tagli e incendi dovrebbero incidere sulle sostanze organiche del suolo in maniera negativa, riducendo di conseguenza la percentuale del carbonio presente nel suolo.

Dalla differenza tra il carbonio totale, ottenuto come somma delle componenti sopraccitate, di un anno e quello dell'anno precedente, si ricava il *sink* finale.

## 2.2 La struttura della vegetazione

Innanzitutto per struttura della vegetazione si intende la distribuzione tridimensionale della fitomassa superficiale integrata lungo un certo periodo di tempo (Davis e Roberts, 2000). Si riferisce quindi alla distribuzione delle posizioni, orientamenti, aree e ombre dei vari organi della pianta: foglie, fiori, fusti ecc (Welles e Norman, 1991). Anche la

distribuzione delle proprietà ottiche può essere considerata come parte della struttura della vegetazione.

Lo studio dell'architettura di una copertura vegetale è l'oggetto di numerose ricerche, poiché rappresenta la chiave per la comprensione dei processi riguardanti gli scambi di massa ed energia fra la pianta e l'ambiente, ma anche per la sua strategia di adattamento ai fattori fisici, chimici e biotici. La struttura della vegetazione è inoltre importante per la descrizione dei microclimi della vegetazione che includono il vento, la temperatura, l'umidità, l'evaporazione e le precipitazioni (Norman e Campbell, 1989) che non solo influenzano la pianta, ma anche gli altri organismi viventi, tra cui i patogeni e gli insetti. Generalmente, nonostante la sua complessità, la struttura della vegetazione viene descritta solo da poche variabili come il LAI, la densità della chioma, l'inclinazione delle foglie. D'altra parte il LAI è una delle principali variabili usate nei modelli per molti processi, come la fotosintesi e l'evapotraspirazione.

L'architettura della vegetazione cambia a seconda della scala temporale: da pochi minuti e secondi (vento, stress idrico), stagionalmente (evoluzione fenologica, limiti ambientali) e annualmente (dinamiche degli ecosistemi)

Si possono considerare diversi livelli. Al livello di foglie, rami e chioma, la struttura della vegetazione influenza l'intercettazione delle precipitazioni, l'assorbimento della radiazione fotosinteticamente attiva, gli scambi di energia. Alla scala di popolamento o regionale, la densità, l'altezza e le dimensioni della chioma modificano la disponibilità di luce e di umidità che comportano una diversa crescita, successione e vigore delle piante. A scala globale, ma anche ridotta, la struttura della vegetazione influenza il tasso al quale il carbonio è assimilato, immagazzinato, trasportato attraverso gli ecosistemi, rilasciato e così via, e ciò implica un certo impatto sui cicli del carbonio dell'acqua e di altri nutrienti.

### 2.2.1 Descrizione della struttura della vegetazione

Gli elementi dello *stand structure* (*stand* è un'area con condizioni ambientali, struttura della vegetazione e composizione della comunità di piante relativamente uniformi, Barbour *et al.*, 1987) includono fusti, rami, ramoscelli, foglie, altri organi specializzati, oppure la pianta intera, gruppi di piante ecc. che possono essere descritti sulla base della posizione e della condizione (es. morto o vivo, fotosintetico e non fotosintetico ecc.).

La descrizione della struttura in tre dimensioni non è molto praticata, in genere si utilizzano descrittori verticali (altezza e profondità della copertura vegetale, stratificazione e profilo fogliari); orizzontali (copertura, chiusura della vegetazione, densità della chioma o dei rami, indice fogliare, area basale del fusto, fitomassa per unità di area). Esistono comunque alcuni descrittori tridimensionali che incorporano informazioni aggiuntive sulla distribuzione della dimensione degli elementi all'interno del volume del popolamento (*stand*), la posizione e l'orientamento degli elementi.

Esistono diversi modelli per lo studio dell'architettura della vegetazione.

I modelli di trasferimento della radiazione sono quelli che si basano sulla quantità di foglie e sulla distribuzione angolare delle foglie (LAD). Sono comunemente utilizzati per stimare parametri come la copertura della vegetazione e l'indice di area fogliare (LAI), integrando misure di luce con un radiometro o con fotografie emisferiche. Un esempio di un modello di trasferimento della radiazione per derivare il LAI è quello che si basa sulla misurazione della cosiddetta *gap fraction* (letteralmente frazione dell'apertura), che è la frazione di cielo che si vede attraverso la chioma. Un approccio per ricavare il LAI dalla *gap fraction* consiste nell'utilizzare la legge di Lambert-Beer. Un altro approccio consiste in un modello di estinzione esponenziale della luce in funzione dell'angolo zenitale, della densità fogliare e del LAD (Norman e Campbell, 1989).

I modelli ottici geometrici generalmente hanno come presupposto che la vegetazione può essere descritta come una semplice forma geometrica (coni, sferoidi, ellissoidi) e si basano su un modello di riflessione della luce che tiene conto dell'illuminazione e dell'ombreggiatura sia del suolo che della chioma.

I modelli teorici di retrodiffusione (*back scatter*) della chioma sono quelli che studiano le interazioni tra le microonde e la superficie vegetata. Un primo gruppo di modelli tratta la vegetazione come un mezzo continuo casuale sopra una superficie riflettente del suolo. Un secondo gruppo rappresenta la vegetazione come un aggregato di diffusori individuali, come le foglie e i rami, al di sopra di una superficie continua del suolo e utilizzano stime probabilistiche del passaggio delle microonde attraverso le aperture della chioma o dell'intersecarsi delle chiome e dei rami per calcolare la diffusione e l'attenuazione. Molti modelli recenti di diffusione della vegetazione si basano sulla geometria realistica della foresta, specificandone la dimensione, la forma, l'orientamento, la densità ecc. Questi modelli calcolano la diffusione delle microonde da diverse fonti (tronchi, terreno, chioma

ecc.) e valutano la diffusione netta della foresta usando un modello di trasferimento radiativo. Questi modelli fisici sono stati formulati per vegetazioni continue e discontinue: i modelli continui trattano la vegetazione come uno strato di diffusori organizzato casualmente; i modelli discontinui trattano la vegetazione come divisa in chiome, nelle quali i diffusori sono aggregati in volumi a forma di chioma.

### 2.2.2 La frazione delle aperture (*gap fraction*)

La *gap fraction* in una particolare direzione della vegetazione è la frazione di cielo aperto, quindi non ostruito da elementi della vegetazione. Può essere definita anche come la probabilità che un raggio di luce che passa attraverso la vegetazione non sia intercettato dalla chioma stessa, in una determinata direzione (Walter e Torquiebau, 2000). La *gap fraction* varia da 0 (cielo completamente ostruito) a 1 (cielo completamente aperto).

Esistono diversi approcci per l'analisi delle *gap fraction*, ma due sono i più comuni: uno si basa sulla legge di Lambert-Beer, l'altro su un modello di inversione a una dimensione. Entrambi partono dal presupposto che gli elementi che compongono la vegetazione, sono distribuiti in modo casuale.

Il metodo che si basa sulla legge di Lambert-Beer è più semplice perché presuppone che l'estinzione esponenziale della luce che passa attraverso la chioma è adeguatamente descritta dal coefficiente di estinzione  $k$ . La relazione è la seguente:

$$Q_i = Q_0 e^{-kLAI} \quad (2.2)$$

dove:  $Q_i$  è la quantità di luce che arriva sotto la chioma ( $Wm^{-2}$  o  $MJ m^{-2}s^{-1}$ )

$Q_0$  è la luce incidente

$k$  è il coefficiente di estinzione

Da cui si ha:

$$LAI = -\ln(Q_i / Q_0) / k \quad (2.3)$$

Quindi, per applicare questo metodo deve essere noto o stimato solo  $k$ . Per una chioma con una distribuzione sferica dell'angolo di inclinazione delle foglie,  $k$  è approssimativamente di 0.5.

Il modello di inversione a una dimensione (Norman e Campbell, 1989) si basa sulle stesse ipotesi della legge di Lambert-Beer, ma richiede la stima delle *gap fraction* a 2 o più angoli zenitali, dai quali si può ottenere anche l'angolo medio di inclinazione delle foglie. Può essere determinato come segue:

$$T(\vartheta, \alpha) = \frac{P_s}{P_s + P_{ns}} \quad (2.4)$$

dove:  $T(\vartheta, \alpha)$  è la *gap fraction* per un intervallo di angoli zenitali  $\vartheta$  e di angoli azimutali  $\alpha$

$P_s$  è la frazione di cielo in una regione  $(\vartheta, \alpha)$

$P_{ns}$  è la frazione di vegetazione in una regione  $(\vartheta, \alpha)$ .

La stima delle *gap fraction* come funzione degli angoli zenitali è relativamente semplice con strumenti come la foto emisferica o il LAI-2000, dal momento che questi strumenti acquisiscono simultaneamente i dati a diversi angoli. Con strumenti come il Ceptometer e il Line Quantum Sensor i dati a più angoli zenitali si possono ottenere solo aspettando che l'angolo zenitale solare cambi e ripetendo poi le misure nello stesso punto di campionamento. La fotografia emisferica, secondo Martens *et al.* (1993) è molto influenzata dal metodo analitico: in diverse tipi di vegetazione l'autore ha riscontrato che il LAI derivato dalla legge di Lambert-Beer è più del doppio del LAI ricavato con il metodo di inversione.

Quando sono fatte simultaneamente delle misurazioni fuori e sotto la chioma, può essere utilizzata la relazione basata sul teorema di Miller (1967), che è sempre un modello di misurazione del LAI basato sull'intercettazione della luce:

$$L_e = 2 \int_0^{\pi/2} -\ln[T(\vartheta)] \cos(\vartheta) \sin(\vartheta) d\vartheta \quad (2.5)$$

dove:  $L_e$  è il LAI effettivo (prodotto del LAI e dell'indice di raggruppamento del fogliame)

$T(\theta)$  è la radiazione trasmessa non intercettata

$\theta$  è l'angolo zenitale del campo di vista

Il LAI effettivo è solo indirettamente in relazione con il LAI reale a causa dei vari livelli di raggruppamento del fogliame in un popolamento (Eklundh *et al.*, 2003).

### 2.2.3 L'indice di area fogliare (LAI)

L'indice di area fogliare (LAI) è ampiamente utilizzato per descrivere la superficie fotosintetizzante e traspirante della vegetazione e il suo grado di copertura della vegetazione. Poiché l'area fogliare influenza l'intercettazione della radiazione all'interno e sotto la vegetazione, condiziona gli scambi di energia fra la pianta e l'atmosfera e può essere messo in relazione con la crescita e con la produzione primaria netta. Il LAI è un parametro dinamico, infatti varia a seconda della specie di pianta, della temperatura media

annua, della lunghezza del periodo vegetativo, della quantità di acqua, dell'età della pianta. Il LAI aumenta inizialmente con l'età della foresta, fino a raggiungere un massimo nello stadio maturo, per poi diminuire lievemente; generalmente presenta una variazione stagionale dipendente dai cambiamenti di illuminazione e di temperatura, quindi di entità diversa a seconda della latitudine (fig. 2.2).

Un altro parametro importante che influenza il modello di distribuzione geografica del LAI è la disponibilità di acqua: in aree con limitazioni idriche, il LAI raggiunge il suo massimo quando tutta l'acqua del suolo viene utilizzata (Woodward, 1987).

Nonostante ci siano molti studi sulle misurazioni di LAI, c'è poca chiarezza sulle metodologie applicate (stime dirette o indirette), sul tipo di strumento, sul modello di derivazione del LAI e sulla definizione stessa di LAI utilizzata dai diversi autori (Scurlock et al, 2001; Asner et al., 2003). Ciò causa una certa difficoltà nel confrontare i propri dati con quelli degli altri autori (Eklundh, 2003).

Il modo più semplice per definire il LAI è dato dalla seguente formula (Beadle, 1993):

$$\text{LAI} = s/G \quad (2.6)$$

dove:  $s$  è l'area fogliare funzionale (verde) della vegetazione ( $m^2$ )

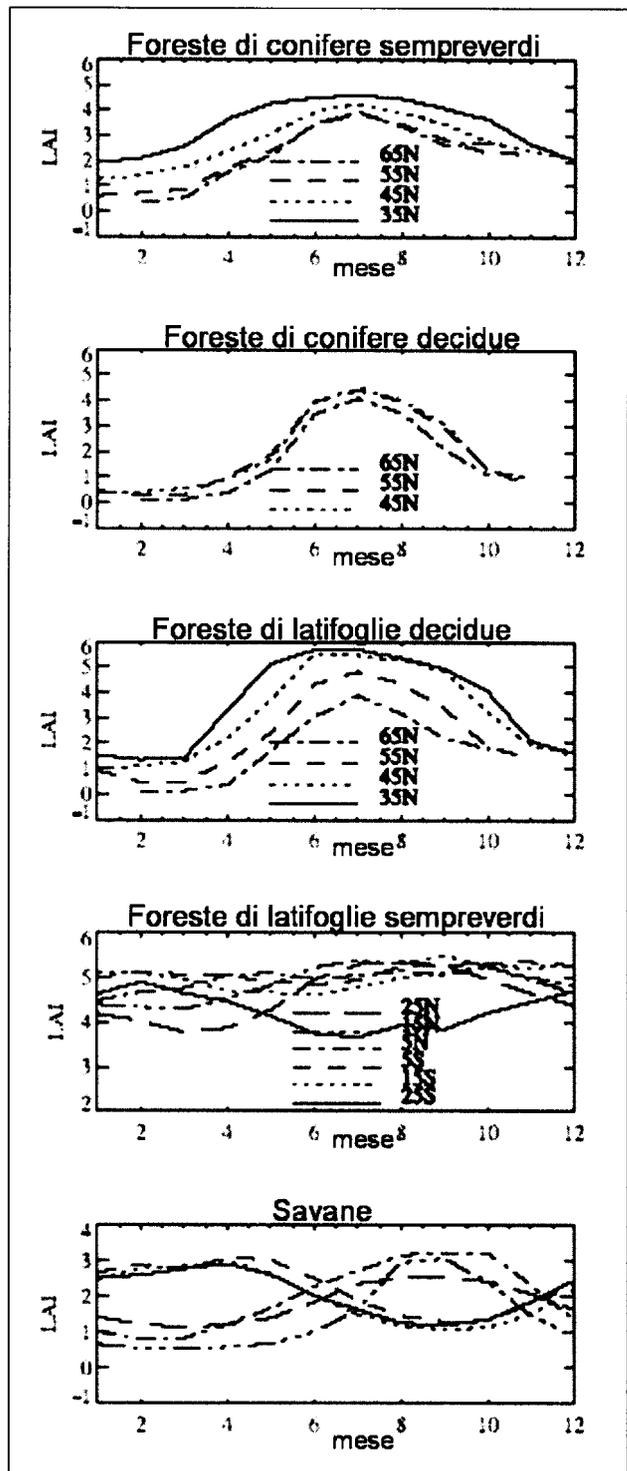


Fig. 2.2 Variazioni stagionali del LAI a diverse latitudini (mod. da Tian et al., 2004).

G è l'area del terreno ( $m^2$ )

quindi è una quantità adimensionale, anche se spesso viene indicato in unità di  $m^2/m^2$ .

Esistono almeno cinque definizioni principali del LAI che in parte riflettono i diversi propositi per i quali il LAI è determinato (es. determinazione della crescita della vegetazione, stima dell'attività fisiologica potenziale, studi di attenuazione della luce al di sotto della copertura vegetale ecc.). Esse sono (Scurlock *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2002; Asner *et al.*, 2003; Jonckheere *et al.*, 2004):

1. il LAI totale è basato sull'area totale esterna delle foglie, tenendo in conto anche la forma delle foglie, per unità di area del terreno orizzontale sotto alla copertura vegetale;
2. il LAI unilaterale (*one-sided*) è definito come la metà del LAI totale, anche se i due lati delle foglie non sono simmetrici;
3. il LAI proiettato orizzontalmente è l'area dell'ombra che dovrebbe essere proiettata da ogni foglia della copertura vegetale con una sorgente di luce a distanza infinita e perpendicolare ad essa, sommata per tutte le foglie della vegetazione;
4. il LAI proiettato inclinato o "*silhouette LAI*" rappresenta l'area proiettata delle foglie tenendo conto delle inclinazioni individuali;
5. è una variazione dell'approccio della quarta definizione, ma si contano le foglie che si sovrappongono una volta sola.

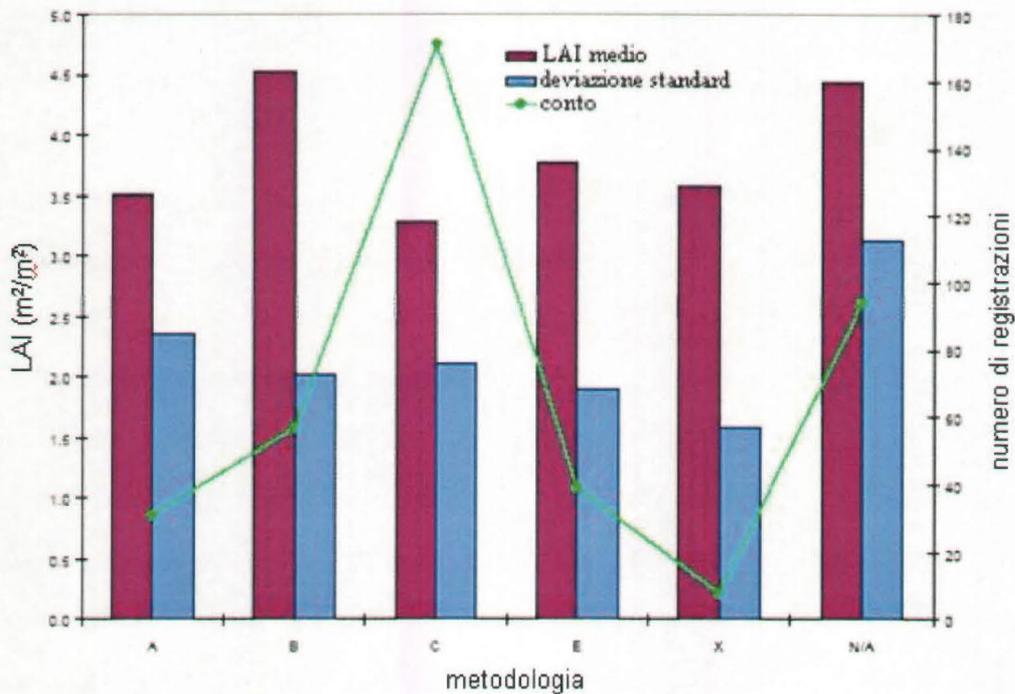
La definizione 1 è usata raramente. La definizione 2 ha il difetto di essere poco chiara, soprattutto per gli aghi delle conifere che possono essere cilindrici o emi-cilindrici, mentre è accettabile per le latifoglie in cui i due lati della foglia hanno la stessa area superficiale. La definizione 3 dovrebbe essere abbandonata secondo Chen e Black (1992), e il LAI delle foglie non piatte dovrebbe essere definito come la metà dell'area totale di intercettazione per unità di area del terreno e per tutti i tipi di foglie come la metà dell'area fogliare verde totale (di tutti i lati) per unità di superficie del terreno. Il motivo per il quale il concetto di proiezione dovrebbe essere abbandonato, secondo gli autori, sta nel fatto che esso non ha nessun significato fisico o biologico, mentre l'area totale di intercettazione ha un significato fisico (per es. l'intercettazione della radiazione) e l'area totale ha una connotazione biologica (per es. scambi di gas).

Le metodologie basate sulle equazioni allometriche sono usate con tutte le definizioni. La definizione 2 è comunemente usata in congiunzione con le metodologie dirette distruttive (taglio) e non distruttive di determinazione di un indice di area fogliare di un

lato dell'area fogliare (foglio di carta millimetrata, sistema ottico di misurazione automatica dell'area fogliare, raccolta e peso della lettiera). La definizione 3 è associata generalmente con i metodi indiretti di contatto. La definizione 4 è usata in congiunzione con i metodi indiretti di non contatto, come ad esempio il LAI-2000 e la foto emisferica. Bisogna puntualizzare però che questi strumenti misurano la radiazione attenuata non solo dalle foglie ma anche dai tessuti non fotosintetici. Sono state coniate, quindi, delle definizioni più appropriate per queste metodologie, tra le quali si possono citare l'indice di area della chioma (FAI, *Foliage Area Index*, che comprende tutte le foglie, gli aghi, i fiori, i frutti, i rami, i tronchi, Welles e Norman, 1991), l'indice di area della pianta (PAI, *Plant Area Index*), mentre Chen e Black (1992) utilizzano il termine di LAI effettivo ( $L_e$ ) per il LAI che deriva da strumenti ottici, che può differire anche molto dal LAI reale. Per questo motivo Fang *et al.* (2003) suggerisce di effettuare una serie di misurazioni negli stessi siti, sia in inverno ad albero spoglio, sia in primavera-estate. In questo modo il LAI effettivo o LAI verde può essere calcolato come differenza tra le misurazioni in inverno e quelle in primavera/estate. È importante notare, infine, che queste diverse definizioni possono dare per risultato differenze significative nel valore di LAI calcolato (Jonckheere *et al.*, 2004).

Asner *et al.*, 2003 hanno creato un database di 1008 misure LAI, raccolte in 15 biomi con tecniche diverse, estendendo il lavoro di Scurlock del 2001. In fig. 2.3 è rappresentata la distribuzione dei dati di LAI pubblicati tra il 1991 e il 2000, suddivisa per le diverse metodologie di misurazione.

Come si può vedere dal grafico i valori medi più alti si hanno con la raccolta della lettiera ( $4.5 \pm 2.0$ ), mentre quelli più bassi derivano dal metodo allometrico ( $3.3 \pm 2.1$ ), i metodi ottici indiretti, come il LAI-2000 hanno un valore medio di  $3.8 \pm 1.9$  e sono statisticamente vicini ai valori medi di LAI ottenuti tramite la raccolta distruttiva ( $3.5 \pm 2.4$ ). Nonostante i valori medi dell'intero database non differiscano tra di loro in modo statisticamente significativo, le differenze che si possono riscontrare per i diversi biomi possono essere notevoli. Ad esempio la foresta temperata sempreverde ha un LAI medio di  $6.7 \pm 6.0$ , un valore minimo di LAI osservato di 0.1 e un valore massimo di 47.0!



A: raccolta distruttiva  
 B: raccolta della lettiera  
 C: allometria  
 E: non contatto indiretto (es. LAI-2000)  
 X: sconosciuto (dati di letteratura verificati, ma metodo non specificato)  
 N/A: non disponibile (letteratura non disponibile per il controllo)

Fig. 2.3 Distribuzione dei dati di LAI, suddivisi per metodologia utilizzata.

### 2.3 Metodologie per lo studio della struttura della vegetazione

Le metodologie di misurazione della vegetazione si dividono in dirette e indirette (Norman e Campbell, 1989). I metodi diretti di misurazione sono quelli che comportano un contatto con le piante o con alcune parti di esse. Generalmente sono i più accurati, ma richiedono un lavoro in campo dispendioso in termini di tempo e di costo e presentano notevoli limiti per aree molto vaste o nel caso di una vegetazione molto eterogenea. In alcuni casi questi metodi possono essere distruttivi o per lo meno causare un certo disturbo alle piante, come nel caso del taglio totale o parziale di alcune piante. Le fonti di errori possono derivare dalla definizione di LAI e dall'accumulo di errori dovuto alla frequenza di ripetizione delle misure. I metodi indiretti si basano su misurazioni a distanza delle proprietà della vegetazione, che possono essere fatte sia a terra (con strumenti portatili in campo), sia attraverso l'utilizzo del satellite o dei sensori avio-trasportati. I metodi indiretti si basano sulla relazione esistente tra la struttura della

copertura vegetale e l'intercettazione della luce. I vantaggi sono sicuramente la rapidità delle misurazioni e la possibilità di estenderle su larga scala, ma in linea generale i metodi indiretti dovrebbero comunque essere tarati, calibrati e validati da misure dirette. Qui di seguito si elencheranno alcune metodologie (tratte da Davis e Roberts, 2000; Walter e Torquebiau, 2000; Janckheere *et al.*, 2004) per le misurazioni dirette e indirette di alcuni parametri della vegetazione; gli strumenti del telerilevamento vengono trattati a parte.

### 2.3.1 Altezza della vegetazione

#### Misurazioni dirette

Per misurare l'altezza di un albero si può tagliare l'albero o salire sulla cima con una scala o con una gru e misurare l'altezza con una corda metrica. Un altro metodo consiste nel ricavare l'altezza con equazioni allometriche da misurazioni dell'area dell'alburno. Per vegetazioni erbacee e cespugli è sufficiente una corda metrica.

#### Misurazioni indirette

Per misurare altezze e distanze degli alberi si utilizza uno strumento che si chiama ipsometro che misura l'angolo tra la cima dell'albero e il piano dell'orizzonte ad una distanza nota dall'albero e poi deriva l'altezza della chioma applicando i principi della trigonometria. Gli ipsometri di nuova generazione, come il Vertex, sono in grado di calcolare distanze, altezze e pendenze, grazie agli ultrasuoni o alla tecnologia che integra laser e ultrasuoni. Un altro strumento è lo scatterometro radar che è in grado di misurare le capacità che hanno gli oggetti di ridiffondere all'indietro (*backscattering*) l'energia elettromagnetica che incide su di essi.

### 2.3.2 Area fogliare

#### Misurazioni dirette

I metodi per le misurazioni dirette si dividono in due procedure: raccolta delle foglie e determinazione dell'area fogliare. I metodi di raccolta sono ad esempio il campionamento distruttivo che consiste nel raccogliere le foglie di un certo numero di alberi rappresentativi all'interno del popolamento oppure al di fuori del popolamento. In questo caso l'area della foglia e la distribuzione verticale dell'area fogliare è calcolata foglia per foglia. È sicuramente un metodo laborioso, ma è uno dei più accurati. Un metodo non

distruttivo è dato dalla raccolta della lettiera delle foglie cadute durante il periodo autunnale, usando le cosiddette trappole per la lettiera (*litter trap*), cioè dei contenitori aperti sistemati nel bosco oggetto di studio. Naturalmente è un metodo studiato appositamente per i boschi di piante decidue. In questo caso il LAI è calcolato sulla base del peso delle foglie e l'accuratezza della misura può raggiungere il 95%. Ciò che viene misurato però non è il LAI di un singolo momento della stagione di crescita, ma quello di un certo periodo di tempo, quindi ci possono essere delle sovrastime di LAI nel caso in cui la specie studiata possa rimpiazzare le foglie durante la stagione riproduttiva. Inoltre non fornisce informazioni sui profili verticali e temporali del LAI.

Dopo la raccolta l'area fogliare può essere determinata con tecniche planimetriche o gravimetriche. Le tecniche planimetriche si basano sul principio della correlazione tra l'area fogliare individuale e il numero di unità di area che la foglia copre su un piano orizzontale. Esse consistono, per esempio, nel ricalcare le foglie su carta millimetrica e poi confrontarle con dimensioni e forme standard di foglie, oppure nell'usare video planimetri o fogliarimetri (es. il Li-3000, Licor, Nebraska; il DIAS Delta-T devices, Cambridge, UK; ecc.). I metodi gravimetrici correlano il peso secco e l'area fogliare usando delle equazioni predeterminate che mettono in rapporto l'area fogliare verde con il peso secco (massa fogliare per area o LMA). Bisogna tener conto che il valore di LMA varia significativamente con l'età del ramo, l'esposizione della luce e l'altezza della vegetazione. Ad ogni modo, è un metodo comodo quando bisogna stimare il LAI da campioni molto grandi.

### Misurazioni indirette

Le misurazioni indirette si dividono in indirette con contatto e indirette senza contatto.

Le misurazioni indirette con contatto sono ad esempio il metodo del quadrato del punto inclinato (*inclined point quadrat*) e le tecniche allometriche. Il metodo del quadrato del punto inclinato (Wilson, 1963) si basa sulla stima della frequenza di contatto. La frequenza di contatto è la probabilità che un raggio (o una sonda) penetrando all'interno della chioma, entri in contatto con gli elementi vegetativi. Il metodo del quadrato del punto inclinato consiste nel perforare la vegetazione con un lungo ago sottile con elevazione nota (cioè l'angolo tra l'ago e il piano dell'orizzonte quando proiettato verticalmente) e con angoli azimutali noti e contare il numero di contatti dell'ago con gli elementi verdi della chioma. I vantaggi sono che non presuppone una distribuzione

casuale delle foglie e che non è un metodo distruttivo, ma richiede molte inserzioni (almeno 1000) per ottenere una stima accettabile del LAI ed è complicato applicarlo in vegetazioni con altezza superiore a 1.5 metri. Le equazioni allometriche mettono in relazione l'area fogliare della pianta e alcuni parametri dell'albero come ad esempio l'area dell'alburno, l'area basale del picciolo, il diametro all'altezza del petto ecc. Il coefficiente di correlazione maggiore si è riscontrato con l'area dell'alburno. Fisiologicamente il numero massimo di foglie che possono essere sopportate dall'alburno decresce come l'albero raggiunge la sua massima altezza, inoltre l'area dell'alburno e la permeabilità dell'alburno decrescono in profondità attraverso la chioma dell'albero. Quindi considerare questi due parametri costanti con l'altezza dell'albero può comportare una sovrastima del LAI per alberi molto grossi. Un altro problema è dato dalla difficoltà, in alcuni casi, di distinguere il confine tra l'alburno e il legno duro. Le equazioni allometriche sono molto utili, ma restrittive data la loro specificità: sono dipendenti, infatti, dalla stagione, dalla fertilità del suolo, dal clima locale, dalla struttura della vegetazione (età, densità, dimensione degli alberi ecc.) e così via. Ad esempio a parità di diametro, specie con foglie più longeve, sostengono una maggior area fogliare; piante con foglie che tollerano l'ombra possono avere un'area fogliare più grande di piante che non tollerano l'ombra (Gower *et al.*, 1999)

Il calcolo di parametri biofisici della copertura forestale attraverso metodi ottici indiretti di non contatto è una procedura comune. Gli strumenti che misurano la *gap fraction* (frazione delle aperture) o la trasmissione della luce attraverso la copertura possono essere suddivisi nei sensori a *fish-eye* che utilizzano la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) diffusa attraverso fotodiodi sistemati azimutalmente e nei sensori *line quantum* che integrano la PAR diffusa mediante una fila lineare di fotodiodi. Dalla misurazione della *gap fraction* si possono derivare il LAI e la copertura.

I sensori a *fish-eye* sono, ad esempio, il LAI-2000 *Plant Canopy Analyser* (Li-Cor, Inc., Lincoln, Nebraska), la lente con angolo a 180° della fotografia emisferica (Rich, 1990), che richiedono condizioni di cielo coperto, e il LAI-L (Cournac, 2002), che opera sia in condizioni di cielo nuvoloso che sereno, non ha bisogno di misure di riferimento fuori dalla foresta ed è stato creato appositamente per i tropici. Il LAI massimo misurabile da questi strumenti generalmente è più basso di quello ottenuto con le misurazioni dirette e il LAI raggiunge un asintotico livello di saturazione intorno al valore di 5.

Il Sunfleck Ceptometer (Decagon Device, Pullman, Washington), il Line Quantum Sensor (Li-Cor 1991, Lincoln, Nebraska) e il SunScan Canopy Analysis System (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK) consistono in una fila lineare di sensori della luce che misurano l'intercettazione della PAR da parte delle piante. Gli strumenti Demon (Center of Environmental Mechanics, Canberra Australia) e TRAC (*Tracing Radiation and Architecture of Canopies*) misurano la trasmissione diretta dei raggi solari in condizioni di cielo sereno. L'MVI (*Multiband Vegetation Imager*), che usa due lunghezze d'onda (visibile e infrarosso vicino) e opera in qualsiasi condizione atmosferica, caratterizza coperture con distribuzione non casuale, come il TRAC, ma determina anche l'area delle foglie soleggiate e separa le foglie dalla corteccia (Kucharik, 1999). I sensori ottici calcolano tutti la *gap fraction* e la distribuzione angolare dei *gap* (aperture), eccetto il TRAC e il MVI che in aggiunta danno anche la distribuzione per ampiezza delle aperture.

### 2.3.3 Biomassa

#### Misurazioni dirette

Per l'erba e piccoli cespugli, la biomassa può essere stimata attraverso il taglio totale e la pesatura di una piccola area. Per gli alberi si può effettuare un taglio stratificato (taglio di un volume rappresentativo) di rami e foglie di un albero o un taglio totale di alcuni alberi (fig. 2.4).

Misure non distruttive per erba, cespugli e alberi derivano dall'applicazione di equazioni allometriche tra la biomassa e alcune misure dirette prese in campo come il diametro (che solitamente si misura all'altezza del petto), l'area basale, l'altezza.

#### Misurazioni indirette.

Nelle vegetazioni erbacee, la biomassa può essere altamente correlata con il LAI, quindi i metodi della *gap fraction* possono essere utilizzati per ricavare la biomassa basandosi su equazioni allometriche. Nelle vegetazioni arbustive l'altezza della chioma, il

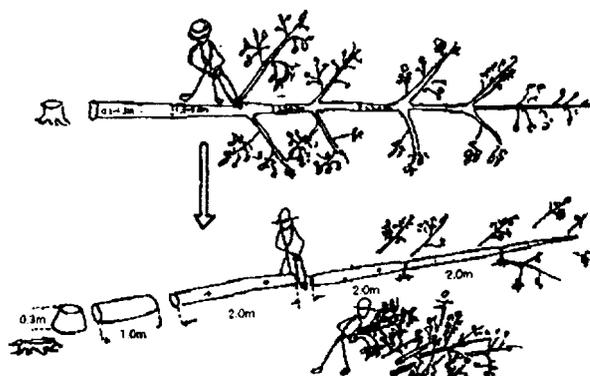


Fig. 2.4 Taglio totale di un albero di cui poi si pesano le foglie, i rami secondo diverse classi di diametro e grandezza, il tronco ecc.

diametro o il volume possono essere stimate con metodi oculari e poi usati per predire la biomassa applicando equazioni dimensionali (equazioni allometriche).

### 2.3.4 Strumenti del telerilevamento

Anche in questo caso ci sono diversi strumenti, che possiamo suddividere in 3 branche principali: i sensori satellitari o aerotrasportati multispettrali e iperspettrali, i sistemi laser e i sistemi radar.

I sensori multispettrali e iperspettrali passivi distinguono le proprietà spettrali delle foglie e dei componenti strutturali non fotosintetici, come i rami e il fusto, per derivare informazioni relative all'assorbimento della luce e alla struttura della vegetazione. Dalle diverse risposte spettrali degli oggetti al suolo nelle diverse bande del satellite e dalla combinazione delle bande in indici spettrali si possono dedurre alcuni parametri importanti come la PAR assorbita, la percentuale di copertura della vegetazione, la quantità di biomassa verde, la copertura del suolo, il tipo di vegetazione ecc. Serie temporali di dati satellitari sono utilizzate per monitorare i cambiamenti stagionali e interannuali della vegetazione verde e della produzione primaria degli ecosistemi. Le differenze principali tra i diversi sensori derivano dalla scala e dalle bande utilizzate.

I laser scanner LIDAR (*LIght Detection And Ranging*) sono dei sistemi aviotrasportati che trasmettono un impulso laser e determinano la distanza dalla superficie in base al tempo impiegato dall'impulso per tornare indietro al sensore. Dai dati laser si possono estrarre il modello digitale del terreno (DTM), il modello digitale dell'altezza degli alberi, il profilo vegetazionale e dove possibile anche calcolare il numero di alberi (soprattutto se si sorvolano delle conifere) e stimare il volume del popolamento.

I sistemi radar sono dei sistemi attivi che forniscono molte informazioni riguardo la superficie terrestre, in particolare la topografia, la rugosità, l'umidità del suolo e la struttura e la composizione della vegetazione (Henderson e Lewis, 1998). Il vantaggio di questi sensori è quello di essere indipendenti dall'illuminazione solare e dalla torbidità atmosferica.

La stima del LAI sulla base del telerilevamento può essere fatta attraverso diverse metodologie:

1. attraverso equazioni empiriche tra il LAI e gli indici spettrali di vegetazione;

2. tramite l'inversione di modelli fisici che si basano sulla riflettanza della vegetazione, usando metodi tradizionali di ottimizzazione;
3. usando le *look-up table* (LUT);
4. con le reti neurali (NN).

Le correlazioni tra il LAI e gli indici di vegetazione possono avere diverse forme matematiche (lineari, esponenziali, potenziali, sigmoidali ecc.). Sono problematiche nel caso si voglia applicarle su scale molto grandi se non si hanno anche informazioni sull'uso del suolo.

## 2.4 Modelli per la stima della produzione primaria netta (NPP)

La produzione delle piante è fortemente correlata con la quantità di radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) assorbita o intercettata dalla vegetazione (Monteith, 1972). L'equazione base per il calcolo della produzione primaria netta (NPP) si basa sulla radiazione incidente sulla vegetazione e sulla quantità di radiazione intercettata (Wilson, 1981):

$$NPP = \varepsilon * i * PAR \quad (2.7)$$

dove: NPP è la produzione primaria netta (g/m<sup>2</sup>/anno)

$\varepsilon$  è l'efficienza fotosintetica nella conversione della radiazione intercettata in biomassa (g/MJ)

$i$  è la proporzione di luce intercettata dagli organi delle piante

PAR è la quantità di luce incidente, cioè l'ammontare della radiazione fotosinteticamente attiva (400-700 nm) che arriva per unità di area di un piano orizzontale sopra le piante per unità di tempo

La produzione primaria netta è altamente correlata con gli indici di vegetazione come l'NDVI, che a sua volta è in relazione lineare con la frazione della radiazione assorbita dalla radiazione (fPAR) (Ruimy, 1994). Quindi la NPP può essere stimata mediante l'uso dell'NDVI secondo la formula, comparabile con l'equazione 2.6:

$$NPP = \varepsilon * NDVI * PAR \quad (2.8)$$

dove: NPP è la produzione primaria netta (g/m<sup>2</sup>/anno)

$\varepsilon$  è l'efficienza fotosintetica nella conversione della radiazione intercettata in biomassa (g/MJ)

NDVI è l'indice spettrale di vegetazione normalizzato

PAR è la radiazione fotosinteticamente attiva ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )

In letteratura si trovano valori molto diversi, che cambiano a seconda se ci troviamo di fronte ad una vegetazione erbacea, legnosa ( $0.2-1.5 \text{ gC}/\text{MJ}$ ) o di coltivazioni, se le specie hanno un metabolismo C3 ( $1.0-1.8 \text{ gC}/\text{MJ}$ ) o C4 ecc.  $\epsilon$  è un parametro che introduce una grande incertezza nelle stime, ma può essere utilizzato come costante ( $1.5 \text{ gC}/\text{MJ}$ ), basandosi su Monteith (1977). Inoltre tale parametro dipende da fattori ambientali come la temperatura dell'aria, il deficit di pressione del vapore, l'umidità del suolo. Utilizzare un  $\epsilon$  specifico per il bioma di cui ci si occupa può aumentare l'accuratezza della stima di NPP e di conseguenza anche quella della biomassa.

L'uso di una relazione lineare empirica tra fPAR e NDVI può anche causare degli errori specialmente nelle aree con basso NDVI (Ruimy, 1994).

Di seguito viene presentata una breve rassegna di alcuni modelli per il calcolo della produzione primaria netta.

#### 2.4.1 Il modello PHYTOMASS di Box

Il modello di Box (PHYTOMASS) è un modello dinamico di carbonio che simula l'accumulo di biomassa (Hu *et al.*, 1996). Il modello si basa sul principio secondo il quale i processi di produzione, a larga scala, sono controllati essenzialmente dalle condizioni climatiche ambientali e l'accumulo della biomassa è determinato in particolare dal bilancio produzione-respirazione che dipende dal clima. Esso è espresso dalla seguente formula:

$$B = B_{\text{seed}} + \Sigma(\text{NPP} - \text{LF} - \text{H}) \quad (2.9)$$

dove: B è la biomassa ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

$B_{\text{seed}}$  è la biomassa iniziale ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

NPP è la produzione primaria netta ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{anno}$ ), equivalente a GPP-R (cioè alla produzione primaria lorda meno la respirazione)

LF è la caduta della lettiera ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{anno}$ )

H è il raccolto o gli erbivori ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

$\text{NPP} - \text{LF} - \text{H}$  è equivalente all'aumento della biomassa vivente

I parametri in *input* del modello sono l'NDVI e la PAR per il calcolo della NPP; la temperatura, le precipitazioni medie mensili, i dati di elevazione e la mappa globale dell'intensità della coltivazione per la simulazione della biomassa.

### 2.4.2 Il modello di Miami

Il modello di Miami è stato sviluppato da Lieth (1973) e calcola la produzione primaria netta annuale secondo la seguente equazione:

$$NPP = \min(N_T, NP) \quad (2.10)$$

dove: NPP è la produzione primaria netta

$$N_T = 3000 / (1 + e^{1.315 - 0.119 * T})$$

$$NP = 3000 * (1 - e^{-0.000664 * P})$$

T è la temperatura media annuale in °C

P è la precipitazione media annuale in mm

### 2.4.3 Il modello Memorial di Thornwaite

Questo modello (Lieth e Box, 1972), calcola la NPP dalla seguente equazione:

$$NPP = 3000 * (1 - e^{-0.0009695 * (V - 20)}) \quad (2.11)$$

dove: V è l'evapotraspirazione reale in mm

### 2.4.4 Il modello di Chikugo

Il modello di Chikugo (Uchijima e Seino, 1985) utilizza la seguente equazione:

$$NPP = 0.29(e^{-0.216 * rdi}) * rn \quad (2.12)$$

dove:  $rdi = rn / (I * P)$  è l'indice di aridità da radiazione

rn è la radiazione netta

I è il calore latente di evaporazione

P è la precipitazione media mensile

$$rn = (1 - r)St - d * T^4 * [286.18 + 202.6 * B - (45.24 + 10.92 * B) * \sqrt{Ea}]$$

r = albedo

$$B = St / SO$$

St è la radiazione solare globale al suolo

SO è la radiazione solare globale alla fine dell'atmosfera

d =  $8.132 * 10^{-11}$  (costante di Stefan-Boltzmann)

T è la temperatura media mensile in °C

Ea è la pressione di vapore media mensile in mb

I modelli di Miami e Chikugo concordano per le vegetazioni dei climi freddo-temperati, temperati e mite-temperati, in cui i valori di NPP sono di circa 5t/ha/anno per la foresta boreale e 10 t/ha/anno per la foresta mite-temperata (Lieth, 1973). Per i tipi subtropicali e tropicali sono in accordo invece i modelli di Miami e di Memorial Thornwaite.

#### 2.4.5 Il modello 3-PG.

Il modello 3-PG (*Physiological Principles Predicting Growth*) è un modello di crescita degli alberi che si basa su principi fisiologici che predicono la crescita (Landsberg e Waring, 1997). È un modello dinamico, mensile o annuale, che permette il calcolo della NPP e di altri parametri come la quantità di biomassa, la disponibilità idrica del suolo ecc. Come variabili in *input* richiede:

- dati climatici: temperatura media mensile, radiazione, piovosità, il deficit di pressione di vapore (VPD), l'NDVI;
- descrittori del sito e del suolo: latitudine, tessitura del suolo, capacità idrica, tasso di fertilità;
- dati iniziali sul popolamento: biomassa legnosa, fogliare e delle radici, acqua disponibile nel suolo.

Il punto di forza di questo modello è che è un modello interfacciabile con il GIS, che permette quindi l'utilizzo sia di mappe tematiche georiferite di temperatura, precipitazione ecc., ma anche di mappe derivate dal telerilevamento, come quella dell'indice di vegetazione NDVI o della radiazione solare. Inoltre anche in *output* si ottengono delle mappe (come ad esempio la mappa di LAI, di NPP o di evapotraspirazione) che possono servire anche per altre elaborazioni.

Il funzionamento del 3-PG può essere riassunto come segue (fig. 2.5):

1. la stima della radiazione totale incidente deriva da dati di temperatura, l'fPAR (frazione della radiazione fotosinteticamente attiva) dall'NDVI di ogni mese. Da queste due variabili viene calcolata l'APAR (radiazione fotosinteticamente attiva assorbita);
2. se ci sono stati dei giorni di gelo, l'APAR si riduce in proporzione ai giorni per mese in cui c'è stato il gelo;
3. il bilancio idrico del suolo viene calcolato in base alla differenza tra le precipitazioni, la capacità del suolo e l'acqua traspirata dalla vegetazione, da mese a mese. Il modificatore

dell'acqua del suolo è basato sul rapporto tra la disponibilità attuale e la disponibilità totale di acqua;

4. viene calcolato il modificatore del VPD per ogni mese, da valori medi di VPD (viene applicato o il modificatore dell'acqua del suolo o quello del VPD);
5. viene calcolata la produzione primaria lorda (GPP) moltiplicando l'APARu (radiazione fotosinteticamente attiva assorbita utilizzabile) per la costante  $1.8 \text{ g C MJ}^{-1}$  (*canopy quantum efficiency*);
6. viene calcolata la NPP ( $NPP = 0.45 \times GPP$ );
7. il rapporto APARu:APAR, determina la frazione di NPP distribuita nelle radici, con il resto disponibile per la crescita superficiale ( $NPP_A$ ).

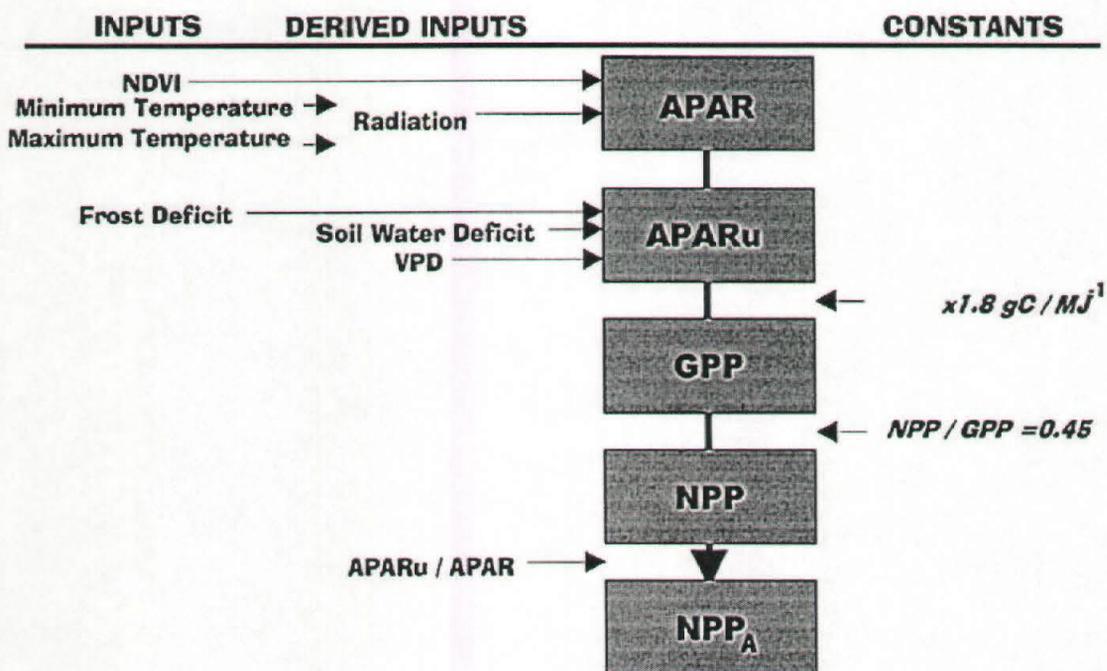


Fig. 2.5 Rappresentazione degli input, delle costanti e della sequenza dei calcoli usati nel modello 3-PG (da Coops, 1998).

### 3. AREA DI STUDIO

#### 3.1 Friuli Venezia Giulia

Il Friuli Venezia Giulia copre una superficie di 7584 Km<sup>2</sup> e si estende in latitudine dai 45° 35' in prossimità del valico di Rabuiese fino ai 48° 31' del Monte Fleons; in longitudine è compreso tra i 12° 20' della chiusa del Vajont e i 13° 55' del Monte Goli.

La regione è delimitata a nord dalla Valle della Gail (Austria), ad est dalle Valli dell'Isonzo e del Vipacco, a sud dal Mar Adriatico e ad ovest dalla pianura padano-veneta e dalla Valle del Piave.

Il territorio è occupato per il 42.5% da rilievi montuosi, per il 38.1% da pianura e per il rimanente 19.4% da una fascia collinare che funge da raccordo graduale tra le altre due unità.

##### 3.1.1 Caratteristiche climatiche

Le differenze climatiche e geomorfologiche che influenzano la vegetazione sono ben spiegate dalla suddivisione della regione in sette distretti fitogeografici (fig. 3.1).

Essi sono, da nord a sud, così descritti (Poldini, 1989; Del Favero *et al.*, 1998):

###### Distretto endalpico

Il clima in questa stretta fascia, che si trova al confine con l'Austria, è continentale, con una ridotta influenza delle correnti caldo umide adriatiche. Le escursioni termiche sono marcate, le precipitazioni annue sono elevate (1400-1600 mm) con regime pluviometrico di tipo equinoziale (cioè con massimi in autunno e primavera).

La vegetazione forestale è caratterizzata dalla dominanza delle conifere, mentre l'ontano verde è l'unica latifolia con una certa diffusione. Troviamo quindi peccete quasi prive di faggio e con ridotta presenza anche di abete bianco, ontanete ad ontano verde, mughete e lariceti.

###### Distretto mesalpico

Quest'area è poco estesa nella parte centrale della regione, mentre va ampliandosi verso ovest e verso est, per effetto della penetrazione di correnti mitiganti adriatiche lungo le valli del Tagliamento e dei torrenti Degano e But. La restante parte della Carnia e della Val Canale sono meno influenzate da queste correnti, a causa dell'orientamento est-ovest

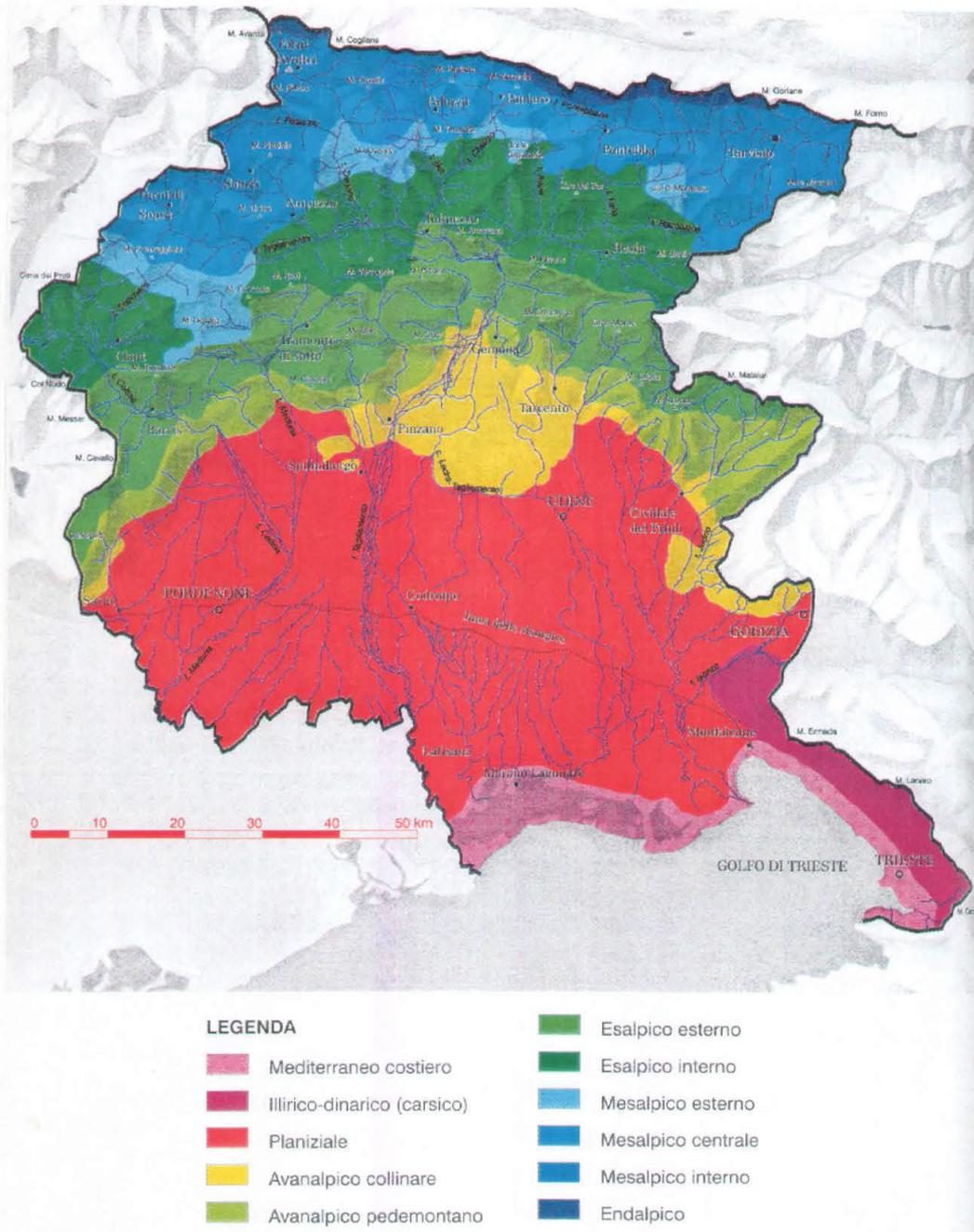


Fig.3.1 I distretti fitogeografici del Friuli Venezia Giulia (da Del Favero et al.,1998).

delle valli. Le temperature medie annue sono di 8° C e le precipitazioni medie annue raggiungono i 1800-1900 mm.

Il distretto mesalpico si differenzia in tre settori: interno, centrale ed esterno. Il settore interno rappresenta un'area di transizione tra il settore endalpico e quello mesalpico, mentre quello esterno è una fascia di transizione verso il distretto mesalpico. Procedendo da quello esterno verso quello interno assistiamo ad una diminuzione del continentalismo e ad un graduale aumento della temperatura (da 5° C fino a 10-11° C medi annui) e delle precipitazioni (da 1400 mm fino ai 1900-2000 mm annui).

La vegetazione forestale è data da peccete, piceo-abieteti, che qui trovano il loro *optimum* climatico; il faggio, pur essendo quasi sempre presente, raramente forma delle faggete pure, ma spesso si accompagna con l'abete bianco e/o l'abete rosso a formare abieti-piceo-faggeti e piceo-faggeti. Nei versanti esposti a sud, dove la disponibilità idrica è spesso precaria, si incontrano, anche le pinete di pino silvestre.

#### Distretto esalpico

Il distretto esalpico interessa tutta la fascia prealpina ed è caratterizzato da precipitazioni abbondanti (2200-3000 mm ad est, 1800-2000 mm ad ovest) e temperature medie annue di 10-11° C. Nei pressi del Monte Canin le precipitazioni superano i 3200 mm all'anno.

Le faggete sono particolarmente favorite da questo regime climatico, quindi dominano nettamente nella fascia montana e altimontana. Gli abeti sono ancora relativamente diffusi, ma la loro capacità concorrenziale è attenuata, e presentano, in particolare l'abete rosso, precoci manifestazioni di deperimento. Si formano inoltre pinete di pino nero e, nella parte centrale soggetta all'effetto delle correnti caldo umide, si sviluppano gli orno-ostrieti; verso l'esterno del distretto, in particolare verso est e su substrati silicatici, compaiono gli aceri-frassineti.

#### Distretto avanalpico

Questo distretto si può suddividere in due settori: pedemontano e collinare. Il settore pedemontano è limitato ad occidente ma tende ad espandersi nella zona orientale della regione, includendo una porzione delle Valli del Torre e la quasi totalità delle Valli del Natisone, con l'esclusione, rispettivamente della zona di Taipana e del Matajur. Le precipitazioni scendono decisamente al di sotto dei 2000 mm annui, le temperature medie annue passano da 9 a 12° C, riducendo la presenza degli aceri-frassineti e delle faggete. Questa è l'area di massima diffusione dei castagneti, predominanti sui substrati silicatici, e degli ostrio-querzeti e degli orno-ostrieti, che invece preferiscono substrati carbonatici.

Il settore collinare è costituito da rilievi di modesta altitudine, morfologia dolce e ondulata e versanti poco pendenti. Le precipitazioni si riducono e vanno dai 1800 mm annui delle aree settentrionali ai 1400 mm annui nella zona del Collio; la temperatura media annua è di circa 13° C, mentre sono assenti mesi con temperature medie inferiori a 0° C. In questa zona la vegetazione è variegata, ma disturbata e ridotta rispetto a quella

potenziale dall'attività antropica. Le formazioni forestali tipiche sono i rovereti collinari, i carpineti e i quercu-carpineti.

#### Distretto planiziale

Il distretto planiziale riguarda tutta la pianura regionale, caratterizzata da temperature medie annue superiori ai 13° C, assenza di temperature medie mensili inferiori a 0° C e precipitazioni comprese tra i 1000 e i 1400 mm.

La vegetazione forestale occupa una superficie molto limitata: si tratta per lo più di formazioni fiancheggianti i corsi d'acqua e di pochi lembi di quercu-carpineti planiziali, risparmiati dal disboscamento effettuato nei secoli passati per aumentare la superficie agricola e le aree urbane.

#### Distretto illirico-dinarico (carsico)

Si caratterizza per un marcato gradiente termico tra il Carso monfalconese (temperature medie annue di 14° C e precipitazioni intorno ai 1200-1300 mm annui) e la parte interna del Carso triestino (attorno agli 11° C, precipitazioni annue di 900-1000 mm). Tale fascia costituisce l'ultima propaggine nord occidentale della vegetazione illirico-dinarica. Le formazioni prevalenti sono date dagli ostrio-querceti a scotano e dalle pinete di pino nero di origine artificiale, ma si segnala anche la presenza esclusiva, su substrati calcarei, della pseudomacchia a carpinella.

#### Distretto mediterraneo (costiero)

Tale distretto ricopre una porzione molto ridotta della regione: la costiera triestina (fra Grignano e Duino) e lo stretto litorale dell'Altro Adriatico. Sulla costiera triestina le temperature medie annue si aggirano sui 14° C e le precipitazioni sui 1000 mm; lungo l'Altro Adriatico le temperature medie annue sono di 13.5° C, mentre le precipitazioni raggiungono i 1000-1100 mm annui. La costiera triestina è caratterizzata dall'ostrio-lecceta, mentre nel resto del litorale il leccio coesiste con le pinete a pino nero e i quercu-carpineti planiziali.

### **3.1.2 Caratteristiche litologiche**

Il Friuli Venezia Giulia presenta un'eterogeneità di substrati litologici, di paesaggi, di morfologie abbastanza rilevante. Spostandosi da N a S si osserva una successione quasi continua di rocce che vanno dal Paleozoico al Neozoico, coprendo un intervallo di quasi 500 milioni di anni. Le rocce più antiche (Ordoviciano) si trovano all'estremo nord della

regione in corrispondenza dei Monti Coglians, Volaja e Fleons (formazione di Fleons); quelle più recenti, i conglomerati neozoici, costituiscono i principali colli che emergono dalla pianura alluvionale (Colli di Osoppo e Ragogna). Questi aspetti si riflettono chiaramente anche sulla morfologia del territorio, dove, in spazi relativamente limitati, si passa dagli aspri bastioni dolomitici alpini alla monotonia della pianura, transitando per i rilievi flyscioidi e morenici, modellati dall'azione meteorica.

I substrati litologici (fig. 3.2) sono descritti in base alle proprietà delle rocce che maggiormente possono influenzare la pedogenesi forestale. Tali proprietà sono:

- la permeabilità: proprietà delle rocce di lasciarsi attraversare dall'acqua;
- l'alterabilità: trasformazione chimico-fisica delle rocce ad opera di diversi agenti;
- la stabilità: maggior o minore propensione di una roccia a dar luogo ad eventi destabilizzanti come ad esempio gli smottamenti;
- il valore pedogenetico: un valore che indica, la minor (valore 1) o la maggior propensione (valore 5) di un substrato a formare suoli forestali.

I substrati litologici per semplicità possono essere suddivisi in due categorie principali: i substrati carbonatici e quelli silicatici (Del Favero *et al.*, 1998).

I substrati carbonatici sono formazioni ricche di carbonati di calcio e/o di magnesio e che originano suoli di scarsa o media fertilità, mentre la disponibilità idrica è generalmente bassa. A questa categoria appartengono i seguenti gruppi:

1. substrati calcarei (valore pedogenetico 3): comprendono i calcari del Mesozoico e quelli più antichi del Paleozoico, i conglomerati e le breccie molto cementati. Si tratta di substrati con discreta propensione a formare suoli forestali. In generale le rocce sono permeabili solo per fratturazione o per carsismo; la stabilità in genere è buona e diventa ottima dove i calcari sono più compatti, bassa dove si manifestano intercalazioni marnose. L'alterabilità è scarsa.
2. substrati dolomitici (valore pedogenetico 2): comprendono le dolomie, le dolomie calcaree e i calcari dolomitici. La permeabilità è minore rispetto ai substrati calcarei, come minore è l'alterabilità e conseguentemente la propensione a formare suoli forestali. La stabilità, funzionalmente al grado di fratturazione, è ottima o buona.
3. substrati gessosi (valore pedogenetico 1): sono costituiti da formazioni carbonatiche gessose o da dolomie alterate, altamente permeabili e con stabilità scadente. Si tratta di substrati facilmente alterabili, ma i cui minerali rilasciati vengono irrimediabilmente

asportati per dilavamento, dando luogo a suoli primitivi sui versanti e a suoli potenti e fertili alla loro base.

4. substrati sciolti (valore pedogenetico 4): sono caratterizzati da un substrato non cementato e comprendono, per esempio, i detriti di falda, la terra rossa, i depositi glaciali, le morene, le frane post-würmiane etc. La permeabilità e l'alterabilità sono alte, mentre la stabilità risulta debole, soprattutto se associata a pendenze elevate e a scarsa cementazione.

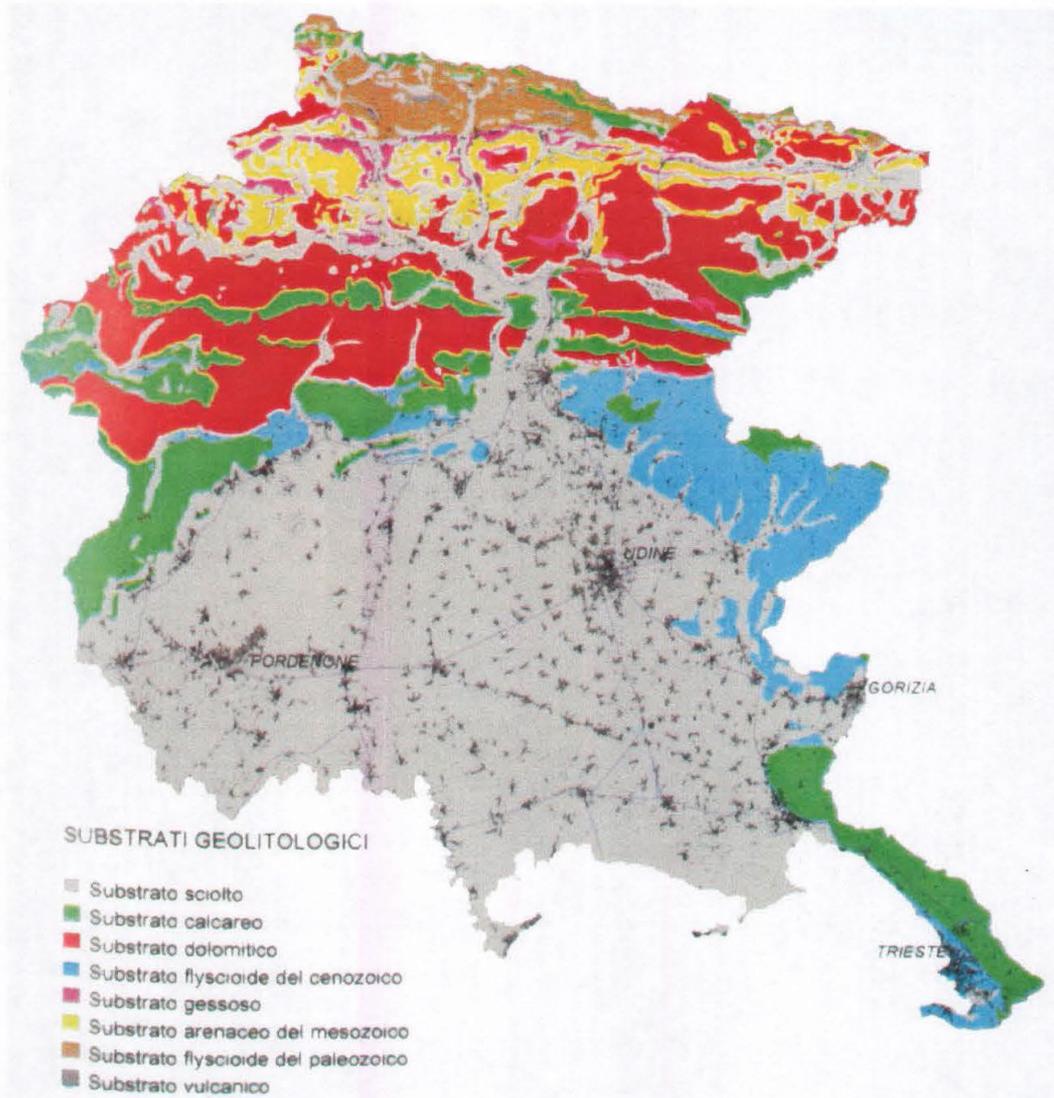


Fig.3.2 I substrati geolitologici (Bortoli *et al.*, 2001).

La categoria dei substrati silicatici (anche se sarebbe più opportuno chiamarli non carbonatici) include i litotipi non carbonatici della regione, che sono caratterizzati più dalla riduzione notevole del contenuto carbonatico, che dalla comparsa della silice, come avviene invece nel settore centrale orientale e centrale della catena alpina. A questa categoria appartengono i seguenti gruppi:

1. substrati vulcanici (valore pedogenetico 4): comprendono tutte le formazioni costituite da rocce vulcaniche. Le rocce vulcaniche della regione hanno generalmente una permeabilità scarsa, un'alterazione media per le rocce più antiche, è modesta per le vulcaniti, più recenti e a maggior contenuto in silice, poco suscettibile all'alterazione. La stabilità è generalmente buona.
2. substrati flyscioidi del Cenozoico (valore pedogenetico 5): sono costituiti da una mescolanza tra arenarie e marne, con intercalazioni di banchi calcarenitici. Sono semipermeabili, da cui deriva un'elevata attitudine a formare suoli forestali, marcatamente acidi e moderatamente xerici (aridi), dove prevale la componente arenacea. La stabilità è bassa o scadente, l'alterabilità è generalmente media.
3. substrati arenacei del Mesozoico (valore pedogenetico 5): producono suoli fertili e con buone caratteristiche chimico-fisiche. Possono essere definiti substrati semipermeabili, a cui appartengono per esempio le arenarie, le argilliti varicolori, le marne e le siltiti alterate. La stabilità è buona dove prevalgono arenarie e scadente dove affiorano le argilliti, l'alterabilità è media.
4. substrati flyscioidi del Paleozoico (valore pedogenetico 4): sono tipici della parte più settentrionale della regione. Il litotipo arenaceo-argilloso con intercalazioni calcaree presenta una bassa permeabilità, soprattutto dove prevale la componente argillosa, mentre l'alterabilità è abbastanza elevata. Danno origine a suoli mediamente profondi, frequentemente acidi, e in questo caso, con una debole componente xerica. La stabilità complessiva è bassa.

I tipi di suoli si differenziano anche in base alla loro acidità e alla disponibilità idrica. Sulla base di quest'ultima, possiamo distinguere i suoli in xerici, mesoxerici, mesici, mesoidrici, idrici, partendo da quelli con scarsa disponibilità idrica per arrivare a quelli in cui c'è ristagno idrico.

### 3.1.3 Vegetazione

Nel 1998 la direzione regionale delle foreste e della caccia (Del Favero *et al.*, 1998) ha individuato una realtà forestale molto articolata con 20 categorie forestali, 105 tipi forestali e oltre 70 varianti.

Le tipologie forestali sono il risultato di un sistema di classificazione che è stato ricavato partendo dalle caratteristiche delle singole specie, dalla definizione dei rapporti concorrenziali fra soggetti e dalla dinamica di sviluppo delle singole formazioni.

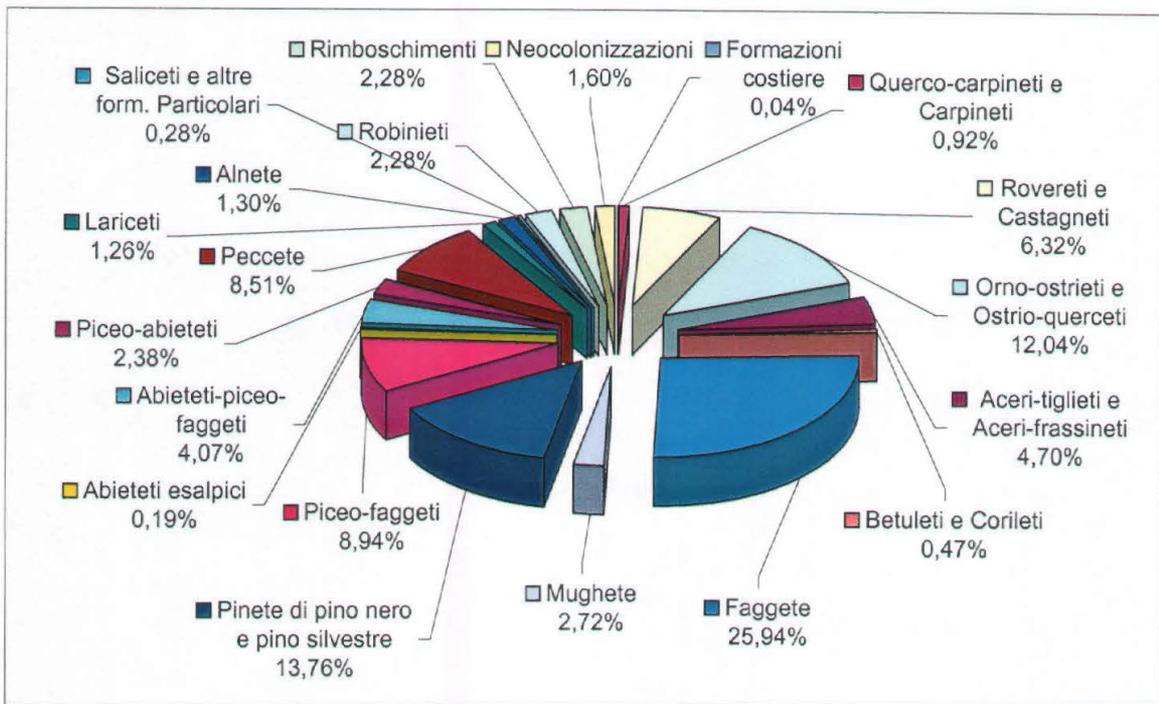


Fig. 3.3 La distribuzione delle categorie forestali in Friuli Venezia Giulia (mod. da Bortoli *et al.*, 2001).

La distribuzione delle 20 categorie forestali è raffigurata nella fig. 3.3. Come si può vedere dal grafico, poco più del 25% dei boschi regionali è composto da faggete e un altro 25% è dato da boschi in cui l'abete rosso gioca un ruolo predominante. Da non sottovalutare l'1.60% rappresentato dai boschi di neoformazione che invadono le aree abbandonate.

I boschi del Friuli-Venezia Giulia possono essere così descritti (Del Favero, *et al.* 1998 e Bortoli *et al.*, 2001):

1. Boschi costieri (Ostrio-lecceta, lecceta con pino nero, bosco costiero dei suoli idrici: 116 ha).

Rivestono un'elevata importanza naturalistica e turistica pur essendo di ridotta estensione. Il leccio è residuale a Grado e a Lignano insinuandosi nei rimboschimenti costieri di pino nero (*Pinus nigra Arn. var. austriaca (Hoess)*) assieme alla robinia (*Robinia pseudoacacia L.*). Il bosco costiero dei suoli idrici si trova fra le dune più interne non interessate da ristagni di acqua salmastra. È una formazione di cui ormai rimangono solo

alcune tracce, a causa principalmente delle opere di bonifica, che hanno modificato le condizioni ambientali adatte alla sua presenza.

L'ostrio-lecceta è costituita soprattutto da specie a portamento arbustivo: leccio (*Quercus ilex* L.), carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop.) e specie mediterranee e orientali come carpinella (*Carpinus orientalis* Mill.), terebinto (*Pistacia terebinthus* L.), fillirea (*Phyllirea latifolia* L.), acero minore (*Acer monspessulanum* L.), che danno origine ad una formazione esclusiva della costiera Triestina. Vi è anche uno strato arbustivo inferiore (*Smilax aspera* L., *Rubia peregrina* L. e *Asparagus acutifolius* L.), mentre manca un vero e proprio strato erbaceo. L'ostrio-lecceta si insedia in un ambiente con un microclima con umidità relativa dell'aria più bassa e più caldo dovuto alla vicinanza del mare e all'effetto riflettente delle chiare rocce affioranti. La località caratteristica è il bosco Cernizza (Duino-Aurisina), in cui questa formazione, data l'elevata copertura della carpinella, prende il nome di pseudomacchia a carpinella (fig. 3.4). In questa località è stata effettuata una serie di transetti.



Fig. 3.4 La lecceta del bosco Cernizza vista dal mare (da: [ambiente.triesteincontra.it](http://ambiente.triesteincontra.it)).

## 2. Boschi di salice e di pioppo (Saliceti e formazioni particolari: 736 ha)

Le numerose specie del genere *Salix* sono colonizzatrici di diversi ambienti. Per questa caratteristica, sono molto usate negli interventi di ingegneria naturalistica (rinaturalizzazioni di sponde fluviali, copertura di corpi di frana, mascheramento di processi erosivi ecc.). Si possono ricordare cinque tipi di saliceti: a *Salix caprea* L., a *S. cinerea* L., a *S. appendiculata* Vill. a *S. glabra* Scop., a *S. waldsteiniana* Willd. Le formazioni particolari sono quello che si collocano in ambienti intermedi, dal punto di vista idrico, tra quelli occupati da quercu-carpineti planiziali e dall'alneta planiziale. Queste formazioni, che hanno un elevato valore naturalistico, sono quelle a ginepro nano e sabina (*Juniperus communis* L. ssp *nana* e *J. sabina* L.), a olivello spinoso (*Hippophaë rhamnoides* L.), a pioppo tremulo (*Populus tremula* L.) e a frassino ossifillo (*Fraxinus oxycarpa* Willd.).



Fig. 3.5 Il lago di Doberdò (da: [www.hyperfvg.org/img\\_fvg/photo](http://www.hyperfvg.org/img_fvg/photo))

Sulle sponde del lago di Doberdò (fig. 3.5) sono state effettuate delle misure di un saliceto a *S. cinerea* e di una formazione a pioppo tremulo.

### 3. Boschi di carpino bianco e querce (Carpineti e quercu-carpineti: 2440 ha)

Sono formazioni dove il carpino bianco (*Carpinus betulus* L.) esercita un ruolo fondamentale nella composizione arborea insieme alla farnia (*Quercus robur* L.), pur non costituendo necessariamente la specie prevalente. La loro diffusione era ampia, oggi limitata ai relitti dei boschi planiziali sia per cause antropiche (si tratta di aree destinate prevalentemente alla produzione agricola), sia perché esigono delle caratteristiche del suolo e climatiche che pur presentandosi frequentemente, sono molto frammentarie.

Queste formazioni sono state suddivise in sei tipologie forestali: quercu-carpineto planiziale, quercu-carpineto collinare, carpineto tipico (varianti: con faggio, con castagno, esalpica interna), carpineto con frassino, carpineto con ostra (variante: con olmo) e carpineto con cerro (variante: carsica).

Il quercu-carpineto planiziale rappresenta la vegetazione potenziale di parte dell'Alta e della Bassa Pianura Friulana, ad eccezione delle aree dei Magredi e delle zone ripariali. Le specie caratteristiche, oltre alla farnia e al carpino bianco che a volte costituisce l'elemento prevalente, sono: l'olmo campestre (*Ulmus minor* Mill.), il frassino ossifillo, l'acero campestre (*Acer campestre* L.), il ciavardello (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz) e a volte il pioppo tremulo, mentre a nord della linea delle risorgive possono penetrare il castagno (*Castanea sativa* Mill.) e la robinia. Per quanto riguarda lo strato arbustivo è da citare la presenza, in alcune stazioni, del bossolo (*Staphylea pinnata* L.) e del ciliegio a grappoli (*Prunus padus* L.); lo strato erbaceo è ricco di specie degli ambienti con disponibilità idrica e di geofite. Le località caratteristiche sono il Bosco Baredi (Muzzana del Turgnano) e il Bosco Sacile (Carlino). Il quercu-carpineto collinare si differenzia da quello planiziale, perché andando

verso l'alto dei versanti collinari, la rovere (*Quercus petraea* Liebl.) tende ad avere il sopravvento sulla farnia, mentre rimane costante la presenza del carpino bianco. Possiamo trovare anche il ciliegio, il frassino maggiore (*Fraxinus excelsior* L.) e l'acero campestre, sporadicamente il carpino nero. Nello strato arbustivo sono frequenti il nocciolo (*Corylus avellana* L.), il biancospino (*Crataegus monogyna* Jacq.) e la sanguinella (*Cornus sanguinea* L.), mentre nello strato erbaceo fioriscono le geofite (*Anemone nemorosa* L., *Crocus napolitanus* Mord. et Loisel, ecc.).

Il carpineto tipico, rispetto il quercu-carpineto planiziale, si instaura in ambienti più interni su substrati diversi (conglomerati piuttosto che flysh), quindi è più frequente nelle Prealpi e molto meno nella zona del Collio. Le specie tipiche sono il carpino bianco, che domina, affiancato dalla farnia, e in misura minore, dal faggio (*Fagus sylvatica* L.), dall'acero di monte (*Acer pseudoplatanus* L.), l'olmo campestre e il ciliegio. Nello strato arbustivo sono presenti il nocciolo, il biancospino, il pungitopo (*Ruscus aculeatus* L.) e il caprifoglio (*Lonicera caprifolium* L.); lo strato erbaceo è ancora una volta caratterizzato da geofite e da altre specie, come ad esempio la vinca (*Vinca minor* L.) e la *Carex pilosa* Scop. Ne esistono tre varianti: con faggio (in ambienti freschi, come ad esempio nella valle dello Judrio), con castagno (favorito dall'uomo), esalpica interna (dove entra in contatto con le peccete di sostituzione).

Il carpineto con frassino si è sviluppato per lo più da recenti processi di ricolonizzazione, di aree coltivate abbandonate, dove il carpino bianco e il frassino maggiore, presenti ai margini, hanno potuto diffondersi assieme.

Negli ambienti con suoli a tessitura franco argillo limosa, con carenze idriche estive, si può avere la presenza contemporanea del carpino bianco e del carpino nero, affiancati dall'acero di monte, dall'orniello (*Fraxinus ornus* L.) e, a volte, dalla roverella (*Quercus pubescens* Willd.), dando origine al carpineto con ostria, di cui esiste anche la variante con olmo campestre. Gli arbusti sono numerosi con prevalenza di *Prunetalia*; nello strato erbaceo sono egualmente diffuse specie termofile e mesofile.

Il carpineto con cerro si è formato in seguito ad un rapido processo di ricolonizzazione dei prati, per opera dell'orniello, del carpino bianco, del frassino maggiore, del cerro (*Quercus cerris* L.) e del castagno tutti già presenti ai bordi. Le località caratteristiche sono lungo la Valle dello Judrio e nel Collio Goriziano. Di questo tipo forestale esiste una variante carsica, tipica delle doline: il carpino bianco domina nei versanti all'ombra, in

quanto sopporta bene un elevato contenuto d'acqua; sui suoli esposti a meridione, quindi soggetti a maggior evaporazione, viene accompagnato dal cerro e dalla rovere.

Il LAI di un carpineto con cerro è stato misurato a Ponte Clinaz, nel comune di Stregna, a fianco di un sentiero che accosta il fiume Judrio.

#### 4. Boschi di robinia (Robinieti: 6091 ha)

La robinia è stata introdotta all'inizio del XX° secolo per consolidare le scarpate ferroviarie. Dopo le due guerre mondiali è stata impiegata per rimboschire i boschi distrutti e in viticoltura, in quanto produce ottimi pali di sostegno per la vite. Successivamente si è diffusa spontaneamente grazie alla sua forte capacità pollonifera e alla sua resistenza ad agenti patogeni. Il suo unico limite è la necessità di una buona disponibilità idrica e di calore. Esistono sia robinieti puri, sia robinieti misti in cui oltre alla rovinia ci sono il castagno, l'acero di monte, a volte il frassino maggiore, il carpino bianco, l'olmo campestre e la rovere.

Essendo i robinieti delle formazioni antropiche, non sono state fatte misure in questi boschi.

#### 5. Boschi di rovere e castagno (Rovereti e castagneti: 16859 ha)

Sono le formazioni dove la rovere e/o il castagno sono le specie principali. I boschi di rovere hanno subito una notevole riduzione di superficie avendo lasciato spazio alle



colture agricole (vigneti e, in passato, castagneti da frutto) ed essendo stati sfruttati notevolmente per il legno. Ne esistono due tipi: rovereto tipico, a sua volta suddiviso nei sottotipi carsico e collinare, e rovereto dei suoli acidi, in tre varianti: con faggio, con tiglio e esalpica interna.

Fig. 3.6 Rovereto tipico carsico: Caresana, San Dorligo della Valle (foto E. Bressan),

Il rovereto tipico carsico (fig. 3.6) non è molto diffuso, è caratterizzato dalla prevalenza della rovere, accompagnata spesso dall'orniello e dal cerro, ma in ambienti caldo-umidi anche dalla carpinnella, in ambienti freschi di forra dall'ontano nero (*Alnus glutinosa* L.

*Gaertn.*), nei versanti esposti a nord dal faggio. Nello strato arbustivo c'è il nocciolo, il corniolo (*Cornus mas* L.), la sanguinella, il biancospino e il ligustro (*Ligustrum vulgare* L.); lo strato erbaceo è dominato da *Sesleria autumnalis* Kern. Il rovereto tipico collinare si riscontra nei medi e bassi versanti del Collio, delle Valli del Natisone e nella Valle dello Judrio. Oltre alla rovere, sono presenti il castagno, l'orniello col carpino nero e in minor misura anche quello bianco. Il rovereto dei suoli acidi è una formazione poco frequente ed è localizzato sulla cima di alcune colline delle Prealpi Giulie Meridionali. La variante con faggio predilige i versanti esposti a nord e a ovest; la variante con tiglio (*Tilia cordata* Mill.) si trova spostandosi verso la parte interna del distretto esalpico, su ex-pascoli ed ex-coltivi di patate; la variante esalpica interna è presente verso i confini del distretto mesalpico, caratterizzata dalla partecipazione del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) e dell'abete rosso (*Picea abies* (L.) Karst.).

I castagneti invece appaiono in tutta l'Alta Pianura e nelle Prealpi, diffusi soprattutto per merito dell'uomo che li ha coltivati per il legno e per il frutto. Infatti, solo pochi dei castagneti su suoli acidi possono ritenersi naturali, mentre per le altre formazioni si dovrebbe parlare di castagneto su altro tipo forestale. Tuttavia, dal momento che sono un elemento determinante della vegetazione del Friuli Venezia Giulia, sono trattati al pari delle altre formazioni naturali.

I castagneti sono separati in quattro tipi: dei suoli xerici, dei suoli mesici, con frassino (variante: con tiglio), dei suoli acidi (variante: esalpica interna).

Il castagneto dei suoli xerici è caratterizzato dalla prevalenza del castagno, a cui si affiancano l'orniello, il carpino nero e la roverella. Lo strato arbustivo è composto da specie termofile, mentre quello erbaceo da specie sub-mediterranee. Nel castagneto dei suoli mesici troviamo invece il carpino bianco, l'acero di monte e in minor misura il faggio, il ciliegio, il tiglio, l'orniello e il frassino maggiore, mentre il nocciolo, il biancospino e la frangola (*Frangula alnus* Mill. var. *alnus*) sono presenti come arbusti. Le aree caratteristiche sono quelle delle Valli dello Judrio, del Natisone e del Torre, rivolte verso la pianura. Il castagneto con frassino si localizza nel fondo delle vallate e nei medi versanti, in ambienti disturbati e con elevato contenuto di azoto. È caratterizzato dalla presenza, anche abbondante, del sambuco (*Sambucus nigra* L.); lo strato erbaceo è composto da specie mesofile. La variante con tiglio compare in genere negli ex-castagneti da frutto trasformati in cedui. Nel castagneto dei suoli acidi appaiono solo la betulla

(*Betula pendula* Roth.), il pioppo tremulo e qualche raro esemplare di rovere; gli strati arboreo ed erbaceo sono poveri. La variante esalpica interna è presente nel distretto omonimo, a contatto con le peccete di sostituzione.

Sono stati fatti alcuni transetti in castagneti delle Valli del Natisone: a Castelmonte, Prepotto; e in due rovereti tipici carsici: Bosco Farneto (Trieste) e Caresana nel comune di San Dorligo della Valle.

#### 6. Boschi di orniello, carpino nero e roverella (Orno-ostrieti e ostrio-quercreti: 32094 ha)

Entrambi i tipi di bosco coronano l'Alta Pianura Friulana, nei versanti esposti a sud dell'area esalpica, su substrati calcarei e dolomitici. Presentano spiccate funzioni protettive e sono da lasciare in parte alla libera evoluzione e in parte da gestire secondo i modelli del bosco ceduo per la produzione della legna da ardere. L'area carsica, invece, si caratterizza solo per gli ostrio-quercreti.

Questi boschi sono così suddivisi: orno-ostrieto primitivo, a sua volta differenziato nei sottotipi di forra, di rupe (varianti: carsica, con leccio) e di falda detritica; orno-ostrieto tipico (varianti: con carpino bianco, con acero riccio, con faggio); ostrio-querceto, separato nei sottotipi tipico (variante: con rovere) e a scotano (varianti: a terebinto, con acero campestre, con cerro).

Gli orno-ostrieti primitivi sono formazioni di alto valore naturalistico che si trovano in ambienti particolari, in cui domina il carpino nero.

L'orno-ostrieto tipico predilige i versanti esposti a sud, su calcari compatti o dolomie, dell'area Pedemontana friulana. Si tratta di una formazione composta dall'orniello e dal carpino nero, sporadicamente dalla roverella, dal maggiociondolo (*Laburnum anagyroides* Med.), dal farinaccio (*Sorbus aria* Crantz.), mentre nello strato arbustivo compaiono frequentemente il biancospino, il nocciolo e il ginepro comune (*Juniperus communis* L.). Lo strato erbaceo è caratterizzato dall'abbondanza della *Sesleria albicans* Kit. e da specie xerofile.

L'ostrio-querceto tipico si colloca sulla parte basale dei versanti, è rappresentato dall'orniello e dal carpino nero, ma in questo caso la roverella è abbondante e spesso dominante; lo strato arbustivo ed erbaceo sono caratterizzati dalla ridotta presenza di specie, tra cui si possono ricordare rispettivamente il biancospino e il prugnolo (*Prunus spinosa* L.), la *Vinca minor* L. e l'*Asparagus tenuifolius* Lam..



Fig. 3.7 L'ostrio-querceto a scotano del Monte Lanaro, a Trieste (foto R. Napolitano).

Il paesaggio del Carso è contraddistinto dalla formazione dell'ostrio-querceto a scotano (fig. 3.7), composta in prevalenza da roverella carpino nero e orniello, ai quali spesso si associano altre latifoglie quali lo scotano (*Cotinus coggygia Mill.*), il corniolo, l'acero campestre e l'acero minore. La variante a terebinto si colloca su suoli più pendenti e più caldi; quella ad acero campestre nelle aree a substrato flyscioide del Cenozoico; quella a cerro sui versanti esposti a sud, su suoli calcarei. Sono boschi di neoformazione

originatisi a seguito dell'abbandono dell'attività agricola o che vanno a sostituire progressivamente le pinete artificiali di pino nero. Gli ostrio-querceti a scotano, caratteristici del Carso, sono stati misurati a Muggia, a Doberdò del Lago e sul Monte Lanaro (Trieste).

#### 7. Boschi di acero montano e frassino (Aceri-frassineti e aceri-tiglieti: 12544 ha)

L'abbondanza delle precipitazioni e l'estesa presenza di substrati flyscioidi del Cenozoico rendono l'area prealpina collinare particolarmente favorevole alla diffusione dell'acero montano (*Acer pseudoplatanus L.*) e del frassino maggiore. Si tratta per lo più di neoformazioni forestali derivanti da processi di ricolonizzazione di coltivi o prati abbandonati gradualmente nell'ultimo cinquantennio.

Questi boschi sono divisi in cinque tipi: aceri-tiglieto, aceri-frassineto con ostraia, aceri-frassineto tipico (varianti: con tiglio, esalpica interna), aceri-frassineto con faggio, aceri-frassineto con ontano nero (variante: con olmo e agrifoglio).

Gli aceri-tiglieti veri e propri mancano nel Friuli Venezia Giulia, anche se il tiglio è diffuso, partecipa a varie formazioni ed è presente in molte fasi iniziali dei processi di ricolonizzazione.

castagno. Sono formazioni che si distribuiscono nell'area Prealpina Meridionale, su substrati flysciodi del Cenozoico, sui medi versanti.

L'acero di monte e il frassino maggiore costituiscono l'acero-frassineto tipico, formazione che è ampiamente diffusa sui substrati flysciodi del Cenozoico, in ambienti con buona disponibilità idrica del suolo, in cui le precipitazioni sono superiori ai 1500 mm annui. Il frassino è particolarmente sensibile alle gelate tardive, l'acero di monte invece sopporta meglio sia gli stress idrici che le gelate, per questo motivo la composizione degli aceri-frassineti è molto variabile. Nel caso in cui ci siano le condizioni ottimali per una delle due specie, essa può prendere il sopravvento sull'altra. Nello strato arbustivo ci sono poche specie tra le quali si possono segnalare il sambuco e il nocciolo nello strato erbaceo si trovano specie nitrofile e subigrofile, e nelle aree ricolonizzate da molto tempo anche geofite, come *Anemone nemerosa* L., *Ranunculus ficaria* L. e *Arum maculatum* L.. La variante con tiglio è frequente lungo versanti scoscesi o nelle aree marginali delle colture agrarie; la variante esalpica interna è caratterizzata dall'elevata presenza dell'abete rosso e del nocciolo.

L'acero-frassineto con faggio è una formazione di transizione tra gli aceri-frassineti tipici e le faggete submontane della serie silicatica. Si trova nell'area più interna delle Prealpi Giulie meridionali, ed è caratterizzato dalla presenza del faggio, del carpino bianco e dell'olmo montano (*Ulmus glabra* Huds.).



L'acero-frassineto con ontano nero è presente nelle Prealpi Giulie meridionali, nelle Valli del Natisone e del Torre, in aree che in passato erano coltivate a prato per la produzione di foraggio, dove nelle zone meno agibili e vicine a rii era già presente l'ontano nero. Negli ambienti in cui mancano le gelate tardive, come specie ricolonizzatrici compaiono anche l'olmo e l'agrifoglio (*Ilex aquifolium* L.).

Negli aceri-frassineti si sono misurati sia il LAI che la biomassa legnosa; le località scelte sono state: Attimis e Taipana (fig. 3.8), nelle Valli del Torre.

Fig. 3.8 Misurazioni con il LAI-2000 nell'acero-frassineto di Platischis, Taipana (foto R. Napolitano)

#### 8. Boschi di betulla e nocciolo (Betuleti e corileti: 1254 ha)

I betuleti e i corileti sono formazioni in cui dominano rispettivamente la betulla e il nocciolo, anche se spesso solo per un breve periodo. Sono, infatti, formazioni che compaiono durante alcuni processi di ricolonizzazione di aree abbandonate dalle colture agrarie.

La betulla non forma vere e propri betuleti, ma spesso partecipa a varie formazioni preferibilmente su substrati flysciodi del Cenozoico, ricchi di argilla, in passato destinati allo sfalcio, oggi ricolonizzati non solo dalla betulla, ma anche dal pioppo tremulo. Su substrati dolomitici, la betulla partecipa assieme al pino nero e a vari salici a ricolonizzazioni di erti pascoli esposti a settentrione.

Il nocciolo è una specie ricolonizzatrice che si espande in ambienti termofili, grazie all'opera dell'uomo e alle specie di uccelli e micromammiferi che si cibano del suo frutto. Il seme ha una buona capacità germinativa e in pochi anni dà origine a formazioni che coprono completamente il suolo. Il nocciolo quindi entra nei processi di ricolonizzazione soprattutto nelle fasi iniziali e vi permane per periodi più o meno lunghi a seconda della fertilità del suolo e della capacità concorrenziale di altre specie.

È stato misurato il LAI sia di un corileto, a Ponte Clinaz (Stregna) che di un betuleto, nel comune di San Leonardo.

#### 9. Boschi di faggio (Faggete: 69149 ha)

Il faggio è la specie arborea che maggiormente caratterizza la vegetazione forestale regionale. La sua diffusione è dovuta al fatto che tale specie predilige ambienti con caratteristiche molto frequenti in regione. Il faggio riprende l'attività vegetativa in primavera e termina la fogliazione già all'inizio dell'estate, per fare ciò ha bisogno di una buona disponibilità idrica, ma dato che le sue radici non sono molto profonde, esso deve captare l'acqua meteorica che cade al suolo o che percola lungo il fusto. Quindi per il suo sviluppo predilige aree in cui le precipitazioni primaverili sono abbondanti e il suolo ha caratteristiche fisiche tali da rendere disponibile l'acqua. Per quanto riguarda il tipo di substrato, esso non è molto determinante, anche se nelle zone climaticamente favorevoli al faggio prevale il substrato carbonatico. Anche l'umidità dell'aria gioca un ruolo importante, aumentando l'acqua disponibile sotto forma di precipitazione occulta e riducendo l'evapo-traspirazione. Per questo motivo il faggio ama gli ambienti nebbiosi

primaverili, ma privi di gelate tardive che ne possono danneggiare i germogli. Il faggio, quindi, può spingersi, qualora le condizioni siano ottimali, sia a quote elevate (ma dove le temperature invernali diventano proibitive lascia il posto alle conifere), sia a quote molto basse (200 m) mescolandosi con la vegetazione termofila. L'*optimum* del faggio è costituito dalla fascia montana del distretto esalpico su substrati carbonatici, dove può dar origine a faggete pure (Prealpi Carniche e Giulie). Nella fascia submontana si formano boschi misti con le specie più rustiche (orniello, carpino nero, ecc.) su substrati carbonatici che hanno una minor disponibilità idrica e con le specie più esigenti (carpino bianco, frassino maggiore ecc.) su substrati silicatici. Nel piano subalpino e in parte in quello altimontano la faggeta si arricchisce di una o più conifere: abete rosso, abete bianco (*Abies alba Mill.*) e larice (*Larix decidua Mill.*). Nel passaggio dal settore esalpico a quello mesalpico il clima assume un connotato maggiormente continentale e alle faggete si sostituiscono progressivamente i boschi misti a partecipazione di faggio. Nel settore mesalpico il faggio si mescola con l'abete bianco e l'abete rosso a formare i piceo-faggeti e gli abieti-piceo-faggeti.

Esistono ben 16 tipi di faggete, raggruppabili in quattro sottocategorie, in relazione all'altimetria, e in due serie sulla base del substrato. Essi sono così descritti:

Sottocategoria: faggete submontane

Serie carbonatica: submontana con ostria

submontana tipica (var.: con tasso)

submontana dei suoli mesici carbonatici (var.: con carpino bianco)

Serie silicatica: submontana dei suoli mesoidrici

submontana dei suoli mesici silicatici (var.: con abete bianco)

submontana dei suoli acidi (var.: mesalpica)

Sottocategoria: faggete montane

Serie carbonatica: montana dei suoli xerici

montana tipica

sottotipo esalpico (var.: con abete bianco, con abete rosso)

sottotipo esalpico

Serie silicatica: montana dei suoli acidi (var.: bassomontana)

montana dei suoli mesici

Sottocategoria: faggete altimontane e subalpine

Serie carbonatica: altimontana tipica (var.: con abete rosso, con larice, dei suoli acidi carbonatici)  
subalpina

Serie silicatica: altimontana dei substrati silicatici (var.: a megafornie, a calagrostide)

Sottocategoria: faggete azonali

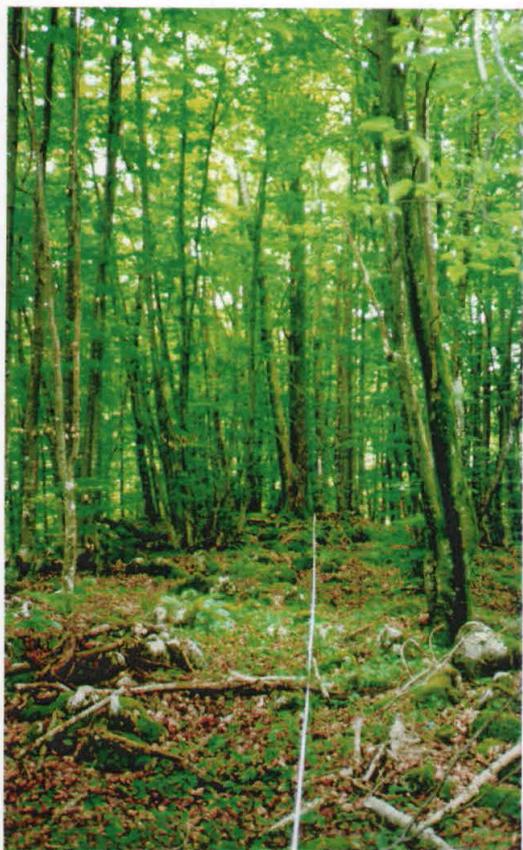
Serie carbonatica: primitiva  
sottotipo di rupe  
sottotipo di falda detritica

Data la complessità delle faggete, qui di seguito verranno descritti in maniera più dettagliata solo i tipi in cui sono state fatte delle misurazioni per questa tesi di dottorato.

La faggeta submontana con osteria è un tipo piuttosto frequente negli ambienti che si possono considerare di transizione fra l'area prealpina e le valli interne più continentali, con ripidi versanti e substrati calcarei. Il faggio generalmente domina, ed è affiancato dal carpino nero e in minor misura anche da orniello, roverella, acero di monte e talvolta dal tasso (*Taxus baccata* L.). Nello strato arbustivo si trovano il nocciolo, il corniolo, i viburni (*Viburnum lantana* L., *V. opulus* L.) e il biancospino. In questa formazione c'è un'elevata competitività fra le diverse specie arboree che si trovano tutte ai limiti della loro area naturale di diffusione. Questo tipo di bosco è stato misurato nella foresta Cecconi (comune di Tramonti di Sotto), sia per quanto riguarda il LAI, che la biomassa legnosa, valutata con le formule allometriche e con la misurazione del legno in seguito a taglio.

La faggeta submontana dei suoli mesici silicatici si trova nelle Prealpi Giulie e Carniche. Una delle località caratteristiche è il Monte San Nicolò (San Leonardo), dove sono state fatte alcune misurazioni di LAI. Il faggio domina lo strato arboreo, ma ad esso si associano il carpino bianco, il ciliegio, la rovere, il castagno e in minor misura il carpino nero. Nello strato arbustivo sono frequenti il nocciolo e il biancospino; lo strato erbaceo è caratterizzato da specie tipiche dei carpineti.

La faggeta montana tipica esalpica è caratteristica delle Dolomiti Friulane, del territorio alpino più esterno e di quello prealpino, ad eccezione della parte meridionale. Alcuni transetti sono stati fatti nella Foresta Cecconi e sul Monte San Simeone (Bordano)). Il faggio è solo raramente affiancato dal frassino maggiore e dall'acero di monte, mentre il nocciolo, il farinaccio, il sorbo degli uccellatori (*Sorbus aucuparia* L.) ecc. possono essere stati favoriti localmente dalla ceduzione. Vi è spesso presente anche l'abete rosso, ma



trovandosi al suo limite meridionale di diffusione, spesso porta segni di deperimento e di precoce invecchiamento. Esiste una variante ad abete bianco (Foresta del Cansiglio), soprattutto nelle zone più interne del distretto esalpico, nei versanti esposti a nord a quote variabili tra 1200 e 1400 m.

Sono stati fatti anche altri due rilievi in faggete: uno a Platischis (Taipana), in fig. 3.9, e uno tra Attimis e Taipana. In entrambi i casi la tipologia forestale corrispondente al punto GPS del rilievo non era una faggeta, ma rispettivamente un aceri-frassineto con faggio e un aceri-tiglieto.

Fig. 3.9 La faggeta di Platischis (Taipana) con la delineazione del transetto (foto R. Napoletano)

#### 10. Pinete di pino nero e pino silvestre (36683 ha)

Le pinete di pino nero costituiscono una formazione caratteristica del paesaggio forestale regionale, esse, infatti, sono presenti in modo naturale nel nord Italia solo nella parte medio-alta del Friuli Venezia Giulia. Il pino nero si è poi spontaneamente diffuso anche in altri ambienti o è stato introdotto dall'uomo, grazie alla sua notevole capacità di adattamento a svariate condizioni climatiche. Tale conifera si trova prevalentemente nel settore esalpico, dove è maggiore l'umidità atmosferica, mentre il pino silvestre è presente soprattutto nel settore mesalpico, poiché tollera una maggiore siccità atmosferica, ma è meno frequente a causa della sua predilezione per gli ambienti continentali. Le formazioni in cui prevalgono questi pini costituiscono spesso gli stadi iniziali di colonizzazione o ricolonizzazione, che poi evolvono in consorzi misti con altre specie. Le pinete pure tendono a mantenersi tali solo in condizioni di continuo disturbo (incendi, pascoli ecc.) o su suoli primitivi; diversamente evolvono verso formazioni miste con latifoglie. Vista la loro prevalente funzione protettiva, questi boschi vengono generalmente lasciati alla libera evoluzione. I boschi migliori vengono utilizzati per la fornitura di materiali da costruzione, imballaggi, nonché di legname da impiegare nella realizzazione di opere secondo le tecniche dell'ingegneria naturalistica.

Le pinete sono state suddivise in otto tipi: pineta di pino nero primitiva (sottotipi: di rupe, di falda detritica), pineta di pino nero tipica (var. mesalpica), pineta di pino nero submontana con ostraia, pineta di pino nero con faggio, pineta di pino nero montana con pino silvestre, pineta di pino silvestre primitiva (sottotipi: di rupe, di falda detritica), pineta di pino silvestre esalpica (sottotipi: con faggio, tipico di cui esiste la variante submontana), pineta di pino silvestre mesalpica (sottotipi: con faggio e abete rosso, tipico di cui esiste la variante su substrati gessosi).

#### 11. Boschi di abete rosso e faggio (Piceo-faggeti: 23843 ha)

Nel settore mesalpico, in ambienti di transizione tra quelli propri delle faggete e quelli delle peccete, generalmente su suoli di origine carbonatica caratterizzati da una minor disponibilità idrica, si formano boschi misti di faggio e abete rosso con abete bianco presente solo marginalmente. Le località caratteristiche sono il Tarvisiano, la Carnia e l'alto Pordenonese. I piceo-faggeti sono largamente presenti anche sui substrati silicatici più antichi (Carbonifero), come ad esempio in ambiente montano nei versanti esposti a sud compresi tra Ligosullo e Forni Avoltri. Tali formazioni sono state raggruppate in cinque tipi, suddivise in due serie. Della serie su substrati carbonatici fanno parte: piceo-faggeto primitivo, piceo-faggeto dei suoli serici (var.: con abete bianco, su substrati gessosi, con larice), piceo-faggeto dei suoli mesici carbonatici con i sottotipi montano (varianti: con abete bianco, su substrati gessosi, con larice) e altimontano (varianti: con abete bianco, con larice). Nella serie su substrati silicatici ci sono il piceo-faggeto dei suoli acidi (variante bassomontana) e il piceo-faggeto dei suoli mesici con i sottotipi altimontano e montano (variante: bassomontana).

Il LAI del piceo-faggeto dei suoli serici, variante con abete bianco, è stato misurato a Forni di Sopra. Esso è caratterizzato dalla presenza, oltre che dell'abete rosso e del faggio, del pino silvestre e dell'abete bianco, maggiormente presente nelle zone in cui sono elevati l'umidità atmosferica e le precipitazioni. Lo strato arboreo è generalmente dominato dall'abete rosso che raramente supera i 16-18 metri di altezza. Nello strato erbaceo sono abbondanti *Carex alba Scop.*, *Calamagrostis varia Host.*, *Mercurialis perennis L.* e *Cyclamen purpurascens Miller.*

12. Boschi di abete bianco e faggio dell'area prealpina (Abieteti esalpici: 501 ha)

Sono formazioni in cui l'abete bianco gioca un ruolo preminente nella composizione dello strato arboreo, mescolandosi con il faggio. Queste due specie sono ecologicamente simili, anche se esistono delle differenze: l'abete bianco tollera meglio, infatti, le gelate tardive, e meno l'umidità atmosferica elevata, in quanto negli ambienti umidi proliferano più facilmente i funghi che lo infettano. Poiché necessita di una buona disponibilità idrica in primavera, ma al contrario del faggio, l'abete bianco capta l'acqua in profondità, è maggiormente competitivo su suoli silicatici, che più facilmente hanno le caratteristiche idriche e di profondità da esso richieste. Tale specie trova quindi il suo *optimum* ecologico negli ambienti montano e altimontano del distretto mesalpico, su suoli mesici derivati da substrati silicatici e in versanti esposti a nord lungo il fondo delle vallate più interne. Su suoli carbonatici, è più frequente nel distretto mesalpico, nelle vallate con clima continentale, dove però mostra segni precoci di deperimento.

L'abieteti esalpico è suddiviso nei sottotipi submontano (località caratteristiche: Pian delle Case-Barcis, Foresta regionale del Bosco Castellet in Val Caltea ecc.) e montano (località caratteristiche: Foresta regionale del Cansiglio, Col della Rizza-Caneva).

13. Boschi di abete rosso, abete bianco e faggio (Abieti-piceo-faggeti: 10846 ha)

Addentrando nel settore mesalpico dove il clima inizia ad essere favorevole anche all'abete rosso, diventano frequenti gli abieti-piceo-faggeti, presenti dalle basse quote a quelle elevate (piano altimontano). Le località caratteristiche sono l'Alta Val Pesarina, Bosco Bernone – Ampezzo ecc. Gli abieti-piceo-faggeti sono distinti in tre tipi e in due serie. Della serie su substrati carbonatici fa parte l'abieti-piceo-faggeto dei substrati carbonatici, di cui esistono i sottotipi montano (variante: bassomontana) e altimontano. La serie dei substrati silicatici comprende l'abieti-piceo-faggeto dei suoli mesici con i sottotipi montano (variante: bassomontana) e altimontano, e l'abieti-piceo-faggeto altimontano dei suoli acidi (variante: montana).

14. Boschi di abete rosso e abete bianco (Piceo-abieteti: 6351 ha)

Sono formazioni miste in cui il faggio, condizionato dalla bassa temperatura dei fondovalle interni o dalla presenza di terreni profondi che favoriscono gli abeti, più esigenti, partecipa solo in modo sporadico. Le località caratteristiche sono Pradibosco –

Prato Carnico, Boschi di Paularo, la Foresta Regionale di Pramosiso (Paluzza). In quest'ultima è stata effettuata una serie di transetti, in cui sono stati misurati il LAI e la biomassa legnosa.

Anche in questo caso distinguiamo tre tipi, suddivisi in due serie. Della serie su substrati carbonatici fa parte il piceo-abieteteto dei substrati carbonatici, di cui esistono i sottotipi dei suoli mesici carbonatici (varianti: microterma, xerica) e dei substrati gessosi. La serie dei substrati silicatici comprende il piceo-abieteteto dei suoli mesici con i sottotipi submontano, bassomontano, montano (varianti: microterma, dei suoli mesoidrici), altimontano (variante: a megaforbie), e il piceo-abieteteto dei suoli acidi con i sottotipi montano (variante: bassomontana) e altimontano (variante: a megaforbie).

#### 15. Boschi di abete rosso (Peccete: 22679 ha)

L'abete rosso costituisce la seconda specie in ordine di importanza nel paesaggio forestale del Friuli-Venezia Giulia. I boschi di questa specie sono prevalenti nel settore endalpico e molto frequenti in quello mesalpico, avendo l'abete rosso il suo *optimum* nella fascia montana e subalpina. Il fattore limitante principale per questa specie non è la temperatura troppo rigida, ma la durata della stagione vegetativa, che deve essere di almeno due mesi e mezzo in cui la temperatura deve superare i 10° C, anche se l'ideale sono tre mesi e mezzo di temperature superiori ai 14° C. Altro fattore limitante, soprattutto se le foglie non hanno completato la maturazione, è il bilancio idrico invernale, in cui la perdita di acqua per traspirazione cuticolare, può non essere compensata dall'assorbimento dal suolo gelato. Nel piano montano superiore, sui substrati flyscioidi del Paleozoico e su versanti esposti a sud, caratterizzati pertanto da un maggiore continentalismo, si trova il tipico bosco di abete rosso (pecceta montana dei suoli acidi). Salendo al piano altimontano la pecceta è riscontrabile anche sui substrati carbonatici, mentre nel piano subalpino il substrato è indifferente e la pecceta generalmente domina. In ambiente montano su substrati acidi e versanti esposti a sud, la pecceta si presenta in alternanza o mescolanza alla faggeta formando i piceo-faggeti già citati. A quote variabili tra 400 e 900 m, su versanti esposti a sud, vi sono peccete submontane e bassimontane particolari condizionate dai trattamenti selvicolturali (peccete di sostituzione): sono formazioni che manifestano un marcato cambiamento della composizione delle specie arboree. Nei suoli acidi all'abete rosso si mescolano castagno,

carpino bianco, rovere e faggio; nei suoli mesici derivanti da substrati arenacei, si evolvono nei casi più favorevoli verso carpineti o aceri-frassineti e, in quelli meno favorevoli, manifestano un rallentamento o un blocco della successione verso boschi misti di latifoglie, con fasi prolungate a nocciolo e rovo. Abbastanza frequenti sono le peccete artificiali, derivanti dalle opere di rimboschimento, e quelle secondarie originatesi a seguito della ricolonizzazione naturale di aree destinate in passato dall'agricoltura.

Quindi, riassumendo, esistono sei tipi di pecceta: pecceta dei substrati carbonatici, divisa nei sottotipi altimontana (varianti: con larice, montana, dei suoli xerici, dei suoli mesoidrici) e subalpina; pecceta montana dei suoli acidi, con i sottotipi: tipica (variante: microterma) e in successione con faggeta; pecceta altimontana e subalpina dei substrati silicatici (varianti: a calamagrostide, a megaforbie, a sfagni); pecceta di sostituzione con i sottotipi dei substrati gessosi, dei suoli mesici (variante: a evoluzione non prevedibile) e dei suoli acidi; pecceta secondaria con i sottotipi montana e altimontana; pecceta azonale e

extrazonale con i sottotipi su alluvioni e ad asplenio.

Alcuni transetti sono stati effettuati nella pecceta di sostituzione dei suoli acidi a Paluzza (fig. 3.10). Tale sottotipo si forma generalmente su substrati flyscioidi del Paleozoico, in ambienti montani e submontani, in cui a fianco dell'abete rosso sono presenti soprattutto la rovere, il castagno e il carpino bianco.

Alcuni rilievi effettuati a Forni di Sopra ricadono sulla carta delle tipologie

forestali su pecceta azonale su alluvioni in cui sia faggio che peccio compaiono abbondantemente. Ma secondo le osservazioni effettuate in campo si trattava invece di un piceo-faggeto, poiché c'era una netta dominanza del faggio.



Fig. 3.10 La pecceta di Paluzza

## 16. Boschi di larice (Lariceti: 3356 ha)

Le formazioni a netta prevalenza di larice sono poco diffuse in regione per il clima solo localmente continentale, caratteristica segnalata anche dall'assenza totale del pino cembro nel territorio del Friuli Venezia Giulia. Il lariceto primitivo ricopre le zone rupicole nella parte più interna del distretto mesalpico e di quello endalpico. Frequenti sono i lariceti che ricolonizzano ex prati ed ex pascoli in evoluzione verso peccete, piceo-faggeti e faggete. Il lariceto tipico dei substrati carbonatici è una formazione dominata dal larice in cui a volte si uniscono l'abete rosso e più raramente il faggio. Nel sottobosco sono presenti arbusti di rododendro (*Rhododendron sp.*) e salici, nonché *Lonicera caerulea L.* e *Sorbus chamaemespilus (L.) Crantz*. Nel sottotipo dei substrati silicatici, il larice subisce la concorrenza dell'ontano verde, su cui riesce a vincere solo nel caso di una minor disponibilità idrica. La variante a megaforbie viene segnalata in alcune zone della Carnia, a contatto con pascoli o con l'alneta di ontano verde.

#### 17. Boschi di ontano verde (Alnete: 3472 ha)

Alle quote più elevate, su terreni con buona presenza di argilla e carenza di calcio, sulla parte alta dei versanti lungamente innevati e anche su ex pascoli, si incontrano i boschi di ontano verde (*Alnus alnobetula (Ehrh.) K. Koch*), a cui si affiancano salici e rododendro ferrugineo (*Rhododendron ferrugineum L.*). Lo strato erbaceo è caratterizzato dalla presenza di megaforbie, fra le quali si possono ricordare: *Adenostyles alliariae (Gouan) A. Kern*, *Cicerbita alpina (L.) Wallr.*, *Achillea macrophylla L.*, *Alchemilla sp.* ecc.

#### 18. Boschi di pino mugo (Mughete: 7.249 ha)

I boschi di pino mugo (*Pinus mugo*) si sviluppano su substrati calcarei o dolomitici, dalle quote più elevate fino a circa 500 metri sul livello del mare, dove i terreni faticano ad approfondirsi per l'instabilità o per basse temperature, a seconda della quota o del distretto geografico. Sono stati individuati quattro tipi di mughete: macroterma, mesoterma (sottotipi: esomesalpica e mesoendalpica), microterma (sottotipi: dei suoli basici e dei suoli acidi, di cui esiste la rara variante a empetro), a sfagni. Queste formazioni di pino mugo sono importanti per la protezione dei suoli poco evoluti e per il loro valore naturalistico.

### 19. Rimboschimenti (6085 ha)

Nel Friuli Venezia Giulia il 2.28% delle tipologie forestali è composto da rimboschimenti naturali o artificiali di abete rosso, larice, pino nero o plurispecifico sia di conifere che di latifoglie su diverse tipologie forestali.

Da ricordare sono i rimboschimenti di pino nero su ostrio-querceto a scotano presenti nella provincia di Trieste. Le piantagioni di pino nero nel Carso iniziarono a metà dell'800, quando l'altipiano era poco più che una landa desertica. I rimboschimenti proseguirono fino al periodo tra le due guerre. Esistono due diverse situazioni: nei versanti esposti a sud il pino nero soffre, presenta scarsa rinnovazione e frequenti attacchi parassitari; nei versanti esposti a nord o nelle aree pianeggianti il pino nero è vitale. Le pinete artificiali di pino nero del Carso si presentano in evoluzione naturale verso gli ostrio-querceti; qui vengono attuati interventi di diradamento nelle pinete a densità eccessiva e tagli di sgombero dei pini dove il bosco di latifoglie è ormai affermato. Sono state prese alcune misure di LAI nei rimboschimenti di pino nero del Monte Grisa (Trieste) e a Caresana (San Dorligo della Valle)

### 20. Formazioni secondarie recenti (Neocolonizzazioni: 4270 ha)

Da non sottovalutare la presenza in regione delle formazioni secondarie o neocolonizzazioni, che ricoprono l'1.60% della superficie forestale. Sono i nuovi boschi che invadono le aree agricole abbandonate e rappresentano delle fasi di transizione.

#### 3.1.4 Scelta delle stazioni

Le stazioni sono state scelte sulla base di tre fattori principali: l'ampiezza, la pendenza, la rappresentatività della tipologia; ma anche secondo l'esigenza di alcuni progetti.

In figura 3.11 è raffigurata la mappa dei tipi forestali del Friuli Venezia Giulia, con sovrapposti, in rosso, i punti in cui sono state eseguite le misurazioni.

Per fare ciò innanzitutto sono state eliminati i boschi con ampiezza inferiore ai 6.25 ha che corrisponde alla dimensione del pixel di un'immagine MODIS (250x250m).

Questo ha comportato l'eliminazione di alcune categorie come gli abieteti esalpici e gli abieteti-piceo-faggeti. Si sono eliminati poi anche i robinieti, in quanto tipologia introdotta dall'uomo, le mughete, le alnete e i lariceti. In seguito la mappa dei tipi forestali è stata incrociata con il DEM per eliminare le aree con pendenza maggiore al 20 per ridurre

l'errore delle misurazioni effettuate in campo, e per l'effetto sull'immagine registrata dal satellite. In alcuni casi questi criteri non sono stati rispettati perché le aree sono state scelte per la realizzazione di alcuni progetti. Così è stato nella foresta Cecconi, dove per poter tagliare il bosco è stato necessario scegliere delle piccole aree molto pendenti, o quando si è collaborato con l'Università degli Studi di Udine, che ha scelto le aree sia in base alla possibilità di tagliare una particella di bosco, sia in base alle strisciate disponibili del Laser Scan.

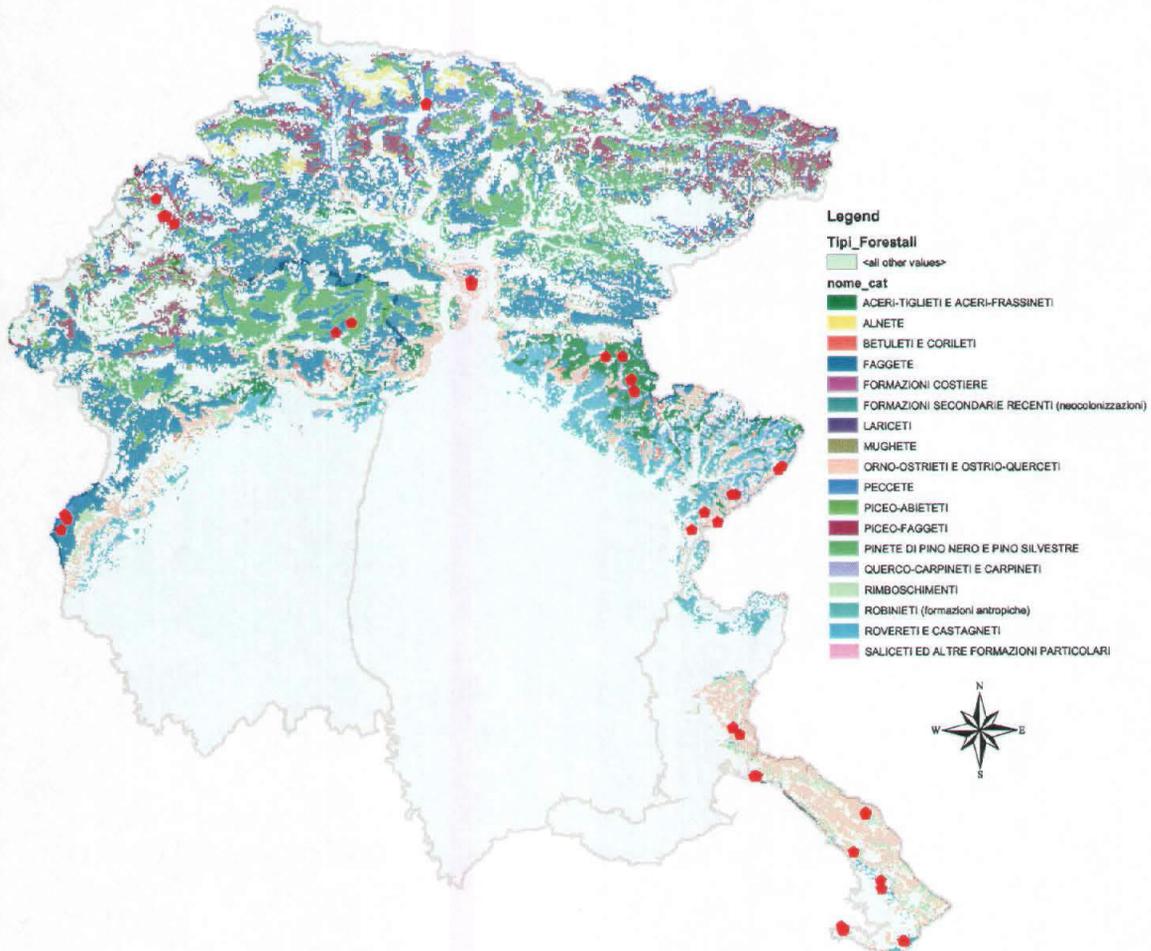


Fig. 3.11 La mappa delle categorie forestali con in rosso le stazioni in cui sono stati fatti i rilievi. L'elenco delle stazioni, con il numero di rilievi per sito, la tipologia forestale e la classe di appartenenza (in cui rispetto alle categorie forestali sono separati i rovereti dai castagneti e i corileti dai betuleti) sono riassunti in tabella 3.1:

Tab. 3.1 Elenco delle stazioni in cui sono state fatte le misurazioni di LAI.

Sito	Data	# di rilievi	Tipologia Forestale	Classe
Muggia	01/06/2003	4	ostrio-querceto a scotano var. acero campestre	ostrio-querceto
Foresta Cecconi	13/06/2003	2	faggeta montana tipica esalpica	faggeta
Foresta Cecconi	13/06/2003	1	faggeta submontana con ostria	faggeta
Foresta Cecconi 4	13/06/2003	1	faggeta montana submontana con ostria	faggeta
Attimis	18/03/2004	1	acero-frassineto	acero-frassineto
Attimis	18/03/2004	1	faggeta	faggeta
Platschis	14/04/2004	1	acero-frassineto con faggio	acero-frassineto
Platschis	14/04/2004	1	faggeta	faggeta
Monte Grisa	31/05/2004	2	rimboschimento di pino nero su ostrio-querceto	rimboschimento di pino nero
Monte Grisa	01/06/2004	2	rimboschimento di pino nero su ostrio-querceto	rimboschimento di pino nero
Platschis	03/06/2004	1	acero-frassineto con faggio	acero-frassineto
Platschis	03/06/2004	1	faggeta	faggeta
Campo Bonis	03/06/2004	1	neocolonizzazione esalpica tendente all'acero-frassineto con ontano nero	neocolonizzazione
Monte Lanaro	28/06/2004	3	ostrio-querceto a scotano	ostrio-querceto
Bosco Farneto	01/07/2004	1	rovereto tipico carsico	rovereto
Cansiglio	08/07/2004	2	faggeta montana tipica esalpica, var. con abete bianco	faggeta
Cansiglio	08/07/2004	2	pecceta secondaria montana	pecceta
Caresana	15/07/2004	1	rimboschimento di pino nero su ostrio-querceto a scotano	rimboschimento di pino nero
Caresana	15/07/2004	1	rovereto tipico carsico	rovereto
Forni di Sopra	22/07/2004	1	pecceta	pecceta
Forni di Sopra	23/07/2004	4	piceo-faggeta	piceo-faggeta
Forni di sopra	24/07/04	1	piceo-faggeto dei suoli serici, var. con abete bianco	piceo-faggeta
Taipana	12/08/2004	1	acero-frassineto con ostria	acero-frassineto
Attimis	12/08/2004	1	faggeta	faggeta
Prepotto (Bocavizza)	12/08/2004	1	castagneto (tendente all'ostrio-querceto)	castagneto
Prepotto	12/08/2004	1	castagneto dei suoli mesici	castagneto
S. Leonardo (San Nicolò)	12/08/2004	1	faggeta submontane dei suoli mesici silicatici	faggeta
S. Leonardo	12/08/2004	1	betuleto	betuleto
Prepotto	13/08/2004	1	ostrio-querceto tipico	ostrio-querceto
Ponte Clinaz	13/08/2004	1	carpineto con cerro	carpineto
Ponte Clinaz	13/08/2004	1	corileto	corileto
Paluzza	19/08/2004	4	pecceta di sostituzione dei suoli acidi	pecceta
Doberdò	23/08/2004	1	ostrio-querceto a scotano, var. a terebinto	ostrio-querceto
Doberdò	23/08/2004	1	saliceto a salix cinerea	saliceto
Doberdò	23/08/2004	1	pioppeto	pioppeto
Cernizza	23/08/2004	4	ostrio-lecceta	ostrio-lecceta
Bordano 1	24/08/2004	5	faggeta montana tipica esalpica	faggeta
Pramosio	17/11/2004	4	piceo-abieteto	piceo-abieteto

## 3.2 Bacino del *Rio Cachoeira*, Bahia, Brasile

La parte di tesi riguardante il lavoro svolto in Brasile rientra nel progetto finanziato dalla Comunità europea “*Decision Support System for Sustainable ECOsystem MANagement in Atlantic Rain Forest Rural Areas*” (ECOMAN, <http://www.uatla.pt/ecoman/>) nell’ambito del programma di ricerca e di sviluppo tecnologico INCO2 (*Confirming the international role of Community Research*). Il progetto ECOMAN prevede la collaborazione del Dipartimento di Biologia dell’Università di Trieste con altre Università ed Istituti di Ricerca dell’Europa, del Costa Rica e del Brasile.

L’obiettivo generale di questo progetto è di produrre un sistema di supporto decisionale (*Decision Support System*, DSS), atto a promuovere uno sviluppo sostenibile delle aree rurali situate nella foresta pluviale tropicale, affette da un’intensa e sempre più pressante attività antropica, e rivolto al recupero delle aree degradate, nonché al miglioramento della situazione economica delle popolazioni locali.

La Foresta Pluviale Atlantica rappresenta uno dei più chiari esempi di “area sensibile” in cui gli effetti della pressione antropica risultano avere un forte impatto negativo sulla funzionalità e sulla struttura dell’ecosistema. La progressiva erosione del suolo, la scarsità d’acqua, la riduzione della biodiversità causati dall’alterazione dei processi naturali, dalla degradazione delle risorse idriche, del suolo e dell’atmosfera, rappresentano gli effetti più visibili di questa pressione.

Nell’ambito del progetto sono state individuate due aree sensibili: una in Costa Rica e una in Brasile. Per questo dottorato si è presa in considerazione solo l’area di studio brasiliana.

### 3.2.1 Localizzazione

L’area di studio è situata nella regione sud-est dello stato di Bahia (Brasile) ed è rappresentata dal bacino idrografico del *Rio Cachoeira* che si estende tra i 14°42’ e i 15°20’ di latitudine sud e tra i 39°01’ e i 40°09’ di longitudine ovest (Fig. 3.12)

Il bacino ha una superficie di drenaggio di 4600 Km<sup>2</sup> e interessa le aree di dodici comuni con una popolazione complessiva di circa 600.000 abitanti.

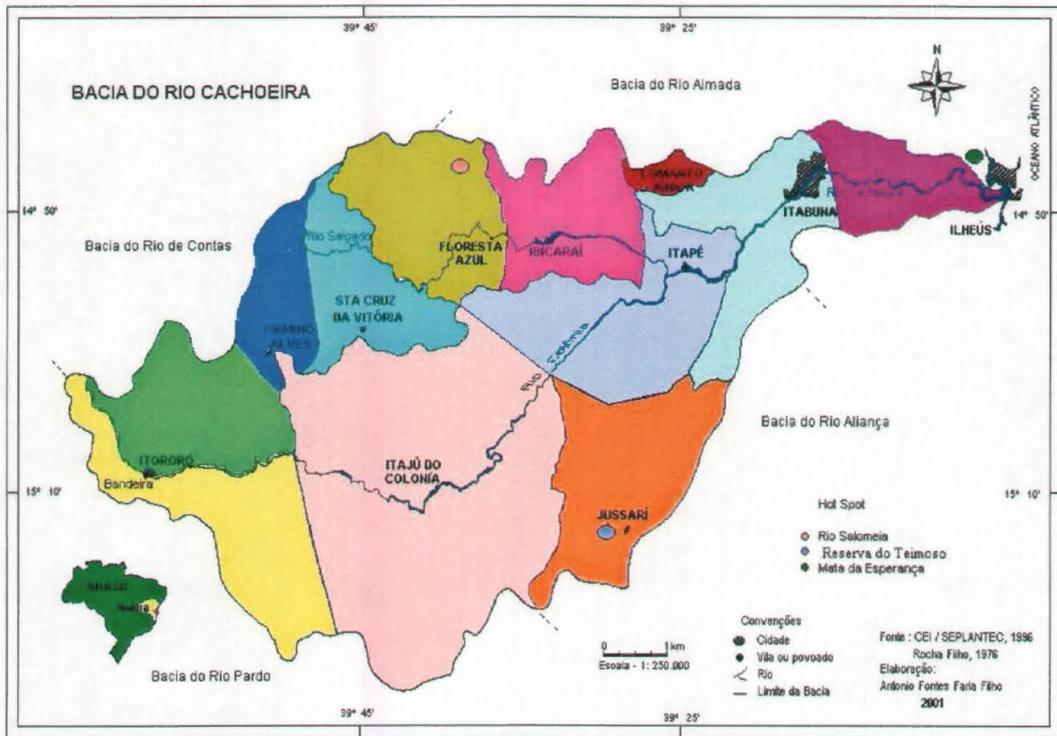


Fig. 3.12 Localizzazione dell'area di studio.

Un rilievo di basse montagne e dolci colline circonda la pianura del bacino da sempre di particolare importanza per lo sviluppo delle piantagioni di cacao, forza trainante, non solo dell'economia locale, ma anche dell'intero Brasile (fig. 3.13).



Fig. 3.13 Veduta del bacino del *Rio Cachoeira* (foto M. Duriavig).

rimanenti aree della foresta tropicale atlantica.

La parte superiore del bacino presenta problemi di forte erosione del suolo e degrado ambientale, dovuti probabilmente alla intensa attività di estrazione del legname. Questo fa sì che vaste aree siano dedicate alla pastorizia. Nella parte inferiore del bacino si trovano le grandi piantagioni di cacao, accompagnate da pochi pascoli e dalle

Le zone più vicine alla costa e quelle a sud delle colline centrali sono meno produttive per la coltivazione del cacao, a causa del tipo di suolo, e sono caratterizzate dalla concentrazione di piccole fattorie con altre attività agricole.

### 3.2.2 Caratteristiche idrografiche

La rete idrografica del bacino del *Rio Cachoeira* può essere distinta in tre corsi d'acqua principali (Ceplac, vol.4, 1976):

- *Rio Colonia*: nasce nel comune di Itororò, ad un'altezza di circa 400 m, e presenta un'estensione di circa 100 km. Il suo corso bagna diversi comuni, scorrendo inizialmente in direzione NW-SE fino alla città di Itororò, dove prosegue in direzione W-E. In prossimità della città di Itajù do Colonia devia nuovamente in direzione N-E, scorrendo verso la confluenza con il *Rio Salgado*, nei pressi del comune di Itapè.
- *Rio Salgado*: nasce nel comune di Firmino Alves. Lungo il suo corso di 64 km bagna vari comuni scorrendo principalmente in una direzione W-E fino al suo incontro con il *Rio Colonia*.
- *Rio Cachoeira*: riceve questa denominazione a partire dalla confluenza dei fiumi *Colonia* e *Salgado*, circa 500 m a monte della città di Itapè. Nel suo percorso attraversa tre comuni, nell'ultimo dei quali si fonde con il *Rio Santana* e il *Rio Fundao* in un luogo conosciuto con il nome di *Coroa Grande*. Le sue acque procedono così fino a sfociare nell'oceano Atlantico, nei pressi della città di Ilheus.

### 3.2.3 Caratteristiche geologiche

Il bacino del *Rio Cachoeira* è formato in maniera predominante da rocce granitiche del complesso cristallino brasiliano, che presentano la loro struttura in direzione N-E. Nella parte ovest del bacino, dopo la città di Firmino Alves, si trova invece una grande fascia di migmatiti disposte in direzione N-S. La permeabilità e porosità delle rocce sono secondarie, come risultato della fratturazione e dello scorrimento che interessò la maggior parte delle rocce costituenti il bacino.

All'interno dell'area vi sono, inoltre, tre zone di scorrimento e una grande zona di faglia che influenzano parte del percorso di alcuni fiumi del bacino (Ceplac, vol.4, 1976).

### 3.2.4 Caratteristiche climatiche

Il bacino del *Rio Cachoeira* è diviso in due zone climatiche, descritte secondo lo schema climatico di Koppen. La zona litoranea ha un clima di tipo *Af*, cioè caldo e umido delle

zone tropicali, senza una stagione secca, con precipitazioni tra 1300 e 1700 mm/anno. Tale zona è disposta lungo la costa, con una larghezza media di 40 Km.

La porzione occidentale del bacino ha un clima di tipo *Aw*, cioè un clima umido tropicale, con una stagione piovosa estiva e un inverno secco. Le precipitazioni sono comprese tra 870 e 1200 mm/anno.

In entrambe le regioni climatiche la temperatura media annuale è intorno ai 23° C (Torres et al, 2001a); mentre l'umidità media è del 78%, ma può superare l'80% nelle aree prossime al litorale (Ceplac, vol. 3, 1976).

### 3.2.5 La vegetazione dell'area di studio

Prima di descrivere in modo più dettagliato la vegetazione dell'area di studio, è necessario fare una breve introduzione sulla formazione vegetale primaria dominante nella regione sud-est di Bahia: la foresta tropicale umida costiera, conosciuta con il nome portoghese di *Mata Atlantica* (foresta pluviale atlantica).

La foresta atlantica deve la sua esistenza principalmente alle abbondanti precipitazioni che si riscontrano lungo tutta la fascia e alla temperatura costante (la temperatura media annuale raramente scende sotto i 20°C (Dov Por, 1992)), possibile perché la costa è protetta dai venti dell'altopiano continentale, ed è influenzata dalla vicinanza dell'oceano. Per quanto riguarda l'altitudine, la foresta si distribuisce dalle zone pianeggianti più vicine alla costa, fino ad altezze di poco inferiori ai 2000 m, grazie al permanere di condizioni di temperatura e piovosità favorevoli.

Il termine foresta atlantica è generalmente attribuito ad un complesso di latifoglie, per lo più sempreverdi, che una volta dominavano il bordo est del Brasile, formando una vasta cintura di 100-200 km che si estendeva in modo continuo per 4000 km dallo stato odierno di Rio Grande do Norte a quello di Rio Grande do Sul (6°N – 30°S), con una superficie stimata di 1.0-1.5 milioni di km<sup>2</sup>, all'epoca della sua scoperta, nel 1500 (Fonseca, 1985). Ben nota, purtroppo, è l'estensione dell'attuale foresta rimanente, che non eccede i 20.000 km<sup>2</sup>, ovvero il 5% dell'area originale. Attualmente la percentuale di foresta atlantica rimanente all'interno dello stato di Bahia, mantiene uno dei valori più elevati del Brasile, circa il 16%, con i minori tassi di deforestazione.

Comunque, anche se rimangono soltanto pochi frammenti della foresta originaria, essi hanno uno dei più alti livelli del mondo di biodiversità e di endemismo delle piante

(Thomas *et al.*, 1998). La foresta atlantica possiede 156 generi e circa 500 specie in comune con la foresta Amazzonica, mentre le specie endemiche rappresentano circa il 53% del totale.

La conservazione della foresta atlantica, in questa regione, si deve al modello di coltivazione creato per il cacao (*Theobroma cacao* L.), conosciuto con il nome di *cabruca*, che consiste nel piantare le piante di cacao al di sotto della copertura forestale naturale, permettendone la preservazione.

Secondo lo studio effettuato dalla “*Commissao Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira*” (CEPLAC), all’interno del progetto “*Diagnostico socioeconomico da regioao cacueira*” 1975-1976 (Ceplac, vol.7, 1976), la vegetazione dell’area di studio è così caratterizzata:

1. formazioni forestali: frammenti rimanenti della foresta atlantica originaria;
2. *capoeira* (comunità di sostituzione): vegetazione in uno stadio dinamico di rigenerazione;
3. comunità soggette allo sfruttamento delle risorse naturali: legname e coltivazioni di sussistenza;
4. pascolo;
5. coltivazioni di cacao: associate a una copertura arborea appositamente impiantata o derivante dalla foresta originale;
6. coltivi a ciclo lungo.

### 1. Formazioni forestali

Le formazioni forestali costituiscono la vegetazione rimanente della foresta originaria. Esse sono altamente frammentate nella loro disposizione, ma risultano legate tra di loro dalle piantagioni di cacao che funzionano come una serie di corridoi ecologici.

Si possono distinguere in:

- foresta igrofila del sud di Bahia: è una formazione vegetale sempreverde che si sviluppa lungo la fascia costiera, comparabile, per quanto riguarda la struttura, a quella amazzonica (Torres, 2001b). Presenta un’elevata diversità di specie, con un strato arboreo dominante, costituito da alberi di 20-30 m, tra i quali spesso emergono alberi che raggiungono 50-60 m di altezza, ed un substrato arbustivo denso, rappresentato da varie famiglie. È presente su vari tipi di suoli, in regioni climatiche con precipitazioni tra i 1300 e 1700 mm/anno, regolarmente distribuite nel corso dell’anno;

- foresta mesofila: comprende una vegetazione arborea stratificata, non così rigogliosa come quella della foresta igrofila, infatti gli alberi sono più bassi e, nella stagione secca, possono perdere parte delle foglie. Si riscontra nella fascia più interna rispetto alla costa, nella zona collinare e montuosa, dove le precipitazioni sono inferiori ai 1200 mm/anno, concentrate nella stagione umida. Questo tipo di foresta attualmente è molto frammentata e principalmente secondaria;
- foresta mesoxerofila: è molto simile alla foresta mesofila, ma è considerata separatamente da essa in quanto la componente decidua è prevalente. I pochi frammenti rimasti, esclusivamente di foresta secondaria, sono incastrati in una matrice dominata da pascoli.

La foresta può trovarsi in due diversi stadi successionali: la foresta secondaria e la foresta primaria.

La foresta secondaria rappresenta uno stadio avanzato di rigenerazione naturale, nel quale gli elementi arborei sono diventati predominanti, lo strato superiore è relativamente serrato e uniforme, il diametro medio all'altezza del petto è superiore a 18 cm, le specie emergenti sono in numero abbastanza consistente, le epifite sono numerose. La vegetazione presenta anche uno strato erbaceo ed uno arbustivo ed una elevata biodiversità. Questo stadio avanzato, grazie alle sue caratteristiche, presenta quindi una struttura molto simile alla foresta primaria.

La foresta secondaria può derivare anche dall'estrazione del legname o ad opera dei coltivatori di cacao. Nel caso dello sfruttamento "predatorio" del legname, si ha un effetto negativo sul popolamento in quanto vengono tagliati gli alberi con maggior pregio commerciale e rimangono invece quelli fenotipicamente inferiori. Inoltre spesso avviene in modo non pianificato e causando danni anche agli alberi circostanti. Questo tipo di attività ha causato dei frammenti forestali completamente decharacterizzati dal punto di vista della struttura diametrica, orizzontale e verticale, e della diversità e composizione floristica. Per questo motivo c'è un decreto legge del 10/2/93 che prevede che l'estrazione del legname si basi su un piano di prelievo sostenibile e che ci sia un ripopolamento attraverso la semina o l'impianto di giovani individui, pianificato e quantificato secondo i danni dello sfruttamento. Questa legge mira alla formazione di foreste economicamente produttive, senza che esse perdano la loro capacità di rigenerazione, attraverso il mantenimento della loro struttura diametrica, orizzontale e

verticale. Nel caso dello sfruttamento selettivo, operato dai coltivatori di cacao, gli alberi con diametro minore vengono utilizzati per offrire sostegno alle piante di banane e cacao cariche di frutti, mentre quelli con diametro maggiore vengono tagliati per costruzioni rurali e barche. Lo sfruttamento, che dipende dall'intensità e dalla frequenza, causa un disequilibrio nella distribuzione diametrica e nella composizione floristica. Tuttavia la foresta mantiene una struttura orizzontale e verticale accettabile e una buona capacità di conservazione naturale. Questa forma di sfruttamento ha dato origine alla grande maggioranza dei frammenti di foreste che si incontrano oggi, spostandosi tra le varie piantagioni di cacao.

La foresta primaria propriamente detta è una foresta che ha sofferto molto poco o per niente l'interferenza dell'uomo, e quindi non ha subito modificazioni considerevoli nella struttura e nella composizione floristica. La foresta primaria è il tipo di foresta a maggiore biodiversità, ma raramente si presenta, nella regione sud-est di Bahia, in aree molto estese, anzi quasi sempre è ridotta a piccole aree all'interno delle foreste secondarie, principalmente nelle zone con suoli non adatti alla coltivazione.

## 2. Capoeira

La *capoeira* è la vegetazione che si sviluppa in situazioni di rigenerazione naturale della foresta igrofila o della foresta mesofila, quando un'area è abbandonata o lasciata a riposo dopo lo sfruttamento agricolo. È formata da individui di diverso portamento ma con piccolo diametro, appartenenti sia allo strato arbustivo che a quello arboreo.

Esistono tre stadi successionali di rigenerazione naturale, descritti e caratterizzati dal decreto legge del 1993, citato in precedenza, e dalla successiva risoluzione del 04/05/94. Essi sono:

- stadio iniziale di rigenerazione. È caratterizzato dalla presenza di piante erbacee e arbustive la cui altezza non supera i 5 m e da specie legnose con diametro ad altezza del petto di 8 cm. Le epifite, quando presenti, hanno una bassa biodiversità e normalmente sono rappresentate da licheni, pteridofita e briofita, mentre i rampicanti sono normalmente piante erbacee. Il sottobosco è assente e la diversità vegetale non è molto grande, con poche specie arboree ma abbondanti specie pioniere.
- stadio medio di rigenerazione. Questo stadio si caratterizza per la predominanza dello strato arbustivo ed arboreo sopra quello erbaceo, dando così origine ai primi strati

differenziati. L'altezza media della vegetazione rientra in un intervallo tra i 5 e i 12 m. La copertura arborea può presentarsi aperta o chiusa, con la presenza eventuale anche di individui emergenti, e predominano gli individui con diametro medio compreso tra gli 8 e i 18 cm. Le epifite aumentano di numero, ed è presente un sottobosco.

- stadio avanzato di rigenerazione. È caratterizzato dalla predominanza degli elementi arborei. Questo stadio successionale, dove è presente lo strato erbaceo, arbustivo e quello arboreo, dove la biodiversità è molto grande, può essere facilmente scambiato con una foresta primaria. La sua struttura è già stata descritta in precedenza come quella di una foresta secondaria in stadio successionale naturale avanzato.

### 3. Comunità soggette allo sfruttamento delle risorse naturali

All'interno di questo agroecosistema, basato sul prelievo delle risorse naturali, si possono collocare diverse attività, dall'utilizzo del legname ai sottoprodotti della foresta, ai prodotti delle coltivazioni di sussistenza (per es. manioca, fagioli, granoturco).

Nello specifico, lo sfruttamento d'estrazione del legname, nella regione sud-est di Bahia, si è sempre verificato, fino dalla sua colonizzazione, tanto negli ecosistemi forestali rimanenti, quanto in quelli di *capoeira*. Ma è negli ultimi anni, in conseguenza della crisi del cacao, che essa si è fatta più intensiva e non selettiva. Oggi, infatti, si cerca di ottenere il massimo rendimento finanziario che la foresta permetta, in modo che soddisfi le necessità immediate, senza nessuna preoccupazione per le questioni ambientali.

### 4. Pascoli

Mentre l'allevamento praticato un tempo, era essenzialmente di pascolo e a gestione estensiva, oggi si percepisce, invece, una tendenza verso un allevamento basato più sullo sfruttamento del latte e con tecniche di gestione maggiormente raffinate. Molto diffusi sono anche i cosiddetti pascoli sporchi, aree di pascolo ormai abbandonate caratterizzate dalla presenza di specie pioniere proprie dello stadio iniziale di rigenerazione.

### 5. Coltivi di cacao

Il cacao (*Theobroma cacao* L.) è una specie nativa della foresta umida tropicale amazzonica (fig. 3.14). A Bahia il cacao fu introdotto nel 1746 dal colono francese Luiz Frederico Warneux, che prese le sementi da Parà e le donò ad Antonio Dias Ribeiro,

proprietario di una tenuta nei pressi del *Rio Pardo*. Fino alla prima metà dell'ultima decade, più del 70% delle piantagioni di cacao si basavano sul sistema di coltivazione tradizionale, denominato *cabruca*, lo stesso dei primi colonizzatori del sud est di Bahia.



Fig. 3.14 Il *Theobroma cacao* L. e il frutto del cacao (foto R. Napolitano).

Da un punto di vista ambientale può essere definito come un sistema ecologico di coltivazione agroforestale che si basa sull'eliminazione dello stato di sottobosco della foresta primaria per piantare le piante di cacao, mentre si lascia intatto lo strato dominante e codominante della foresta. In alcuni casi si arriva ad attuare un diradamento dello strato superiore della foresta, per ottenere una copertura più adeguata alle piante di cacao.

Se consideriamo quindi da una parte gli aspetti socioeconomici e dall'altra quelli ambientali, il sistema *cabruca* costituisce la miglior forma di "uso del suolo" in ambiente tropicale. Infatti, sebbene una buona parte degli individui arborei, appartenenti alla foresta originaria, che vengono lasciati per ombreggiare le piante di cacao, non si adattano alle condizioni di isolamento e muoiono. Tuttavia è possibile ancora oggi incontrare frammenti di foresta primaria all'interno di questo sistema.

Fino al 1980, la regione sud-est di Bahia, nota come regione del cacao, possedeva più di 500.000 ha coltivati a cacao, con una produzione pari al 95% di quella dell'intero Brasile e al 20% di quella mondiale (Alger & Calda, 1996). Dal 1986 la regione ha subito una forte crisi economica, a causa dell'introduzione accidentale del fungo *Crinipellis pernicioso*, originario dell'Amazzonia che causa una malattia conosciuta come *vassoura-de-bruxa* (scopa della strega) che infesta tutt'oggi le piantagioni. La diffusione del fungo è controllata solamente con la potatura e bruciatura delle parti infette degli alberi. Non esiste controllo chimico, né è si è sviluppato un ibrido della pianta del cacao resistente alla malattia.

Negli ultimi anni al sistema tradizionale di coltivazione del cacao si sono affiancati altri tipi di coltivazione agroforestale: le piante di cacao possono essere associate all'eritrina (*Erythrina fusca*) o all'albero della gomma (*Hevea brasiliensis*) costituendo rispettivamente il

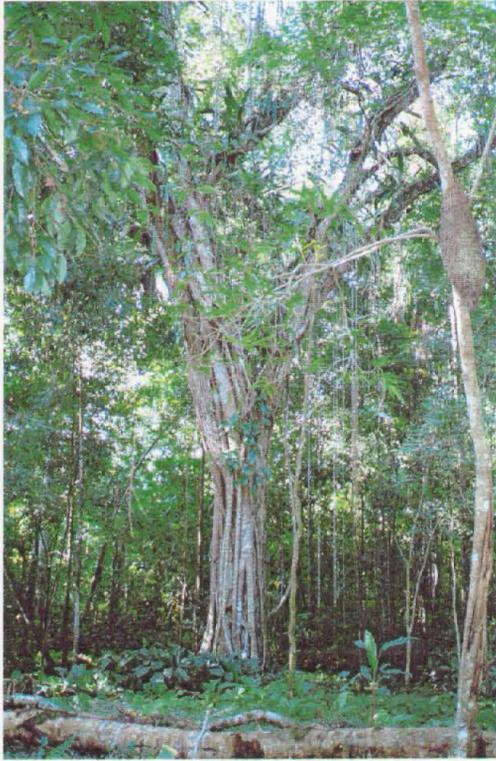


Fig. 3.15 L'albero dell'eritrina (foto R. Napolitano)

sistema cacao-eritina e quello cacao-*seringueira* (il nome portoghese con cui viene indicato l'albero della gomma, fig. 3.15).

Nel primo caso, dopo una completa deforestazione, le giovani piante di cacao impiantate ricevono l'ombra provvisoriamente dalle piante di manioca (*Manihot esculenta*) e di banane (*Musa sapientum*), dalle quali i coltivatori traggono un'ulteriore reddito fintanto che il cacao non produce i suoi frutti.

Mentre le piante di protezione temporanea vengono eliminate progressivamente, in seguito alla maggior quantità di luce richiesta dalle piante di cacao, gli alberi di eritina, impiantati con il cacao, crescono fino a rimanere gli unici

elementi con funzione protettiva. Questo tipo di coltivo, nel sud-est di Bahia, presenta un'estensione di circa 150.000 ha (Sena Gomes, 1992).

Il sistema cacao-*seringueira*, conseguente anch'esso ad una deforestazione completa e legato ad una copertura forestale imposta con l'impianto di alberi della gomma, è poco diffuso a causa di una più bassa produzione (Alves, 1990).

## 6. Coltivi a ciclo lungo

Le specie agricole a ciclo lungo sono la palma da olio (*Elaeis guineensis*), il cocco (*Cocos nucifera*), l'albero della gomma (*Hevea brasiliensis*, fig.3.16), e il caffè (*Coffea arabica*, fig.3.16).



Fig. 3.16 Una piantagione di caffè e l'albero della gomma (foto R. Napolitano)

Sebbene ciascuna di esse sia stata impiantata come monocoltura, è stata riscontrata una grande potenzialità anche nella composizione di vari sistemi agroforestali. È possibile infatti trovare nella regione alcuni sistemi agroselviculturali (*seringueira* e cacao, cocco e cacao) e selvipastorali (palma da olio e foraggio).

### 3.2.6 Gli “hot spots”

Al fine di garantire uno studio maggiormente dettagliato, in un’area vasta come il bacino del *Rio Cachoeira*, sono stati individuati tre “hot spots”, ovvero delle aree di particolare interesse per lo scopo del progetto ECOMAN.

#### Hot spot 1: Parco municipale di Boa Esperança (fig. 3.17)

Situato nel comune di Ilheus, rappresenta una delle poche aree nella regione che conservano ancora una vegetazione di foresta primaria originaria. In questa zona, infatti, è stato istituito un parco di riserva naturale municipale con un’area di circa 432 ha. L’intero parco è circondato però dalla periferia della città di Ilheus, la quale attua una costante e crescente pressione antropica sull’intera area. La superficie totale di questo hot spot è di circa 1025 ha.

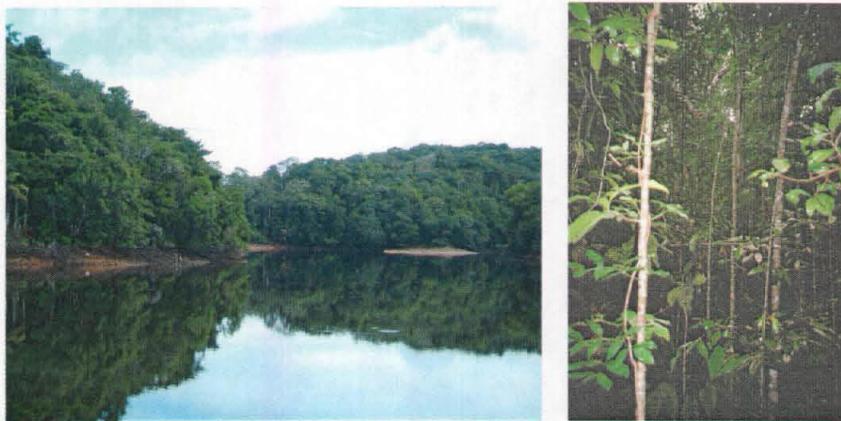


Fig. 3.17 Parco Boa Esperança (foto R. Napolitano)

#### Hot spot 2: bacino del fiume Saloméia (fig. 3.18)

Situato nel comune di Floresta Azul, è un’area che presenta diversi tipi di uso del suolo, dalle piantagioni di cacao, ai pascoli, alle coltivazioni di granoturco. Sul territorio sono presenti 22 fattorie che praticano attività legate sia all’agricoltura che all’estrazione del legname ma con scarse conoscenze per quanto riguarda le pratiche di conservazione del suolo. All’interno dell’area è presente anche una diga, costruita e mantenuta dal governo

di Bahia, con l'intento di fornire acqua a quattro distretti municipali per un totale di 80.000 abitanti. La superficie totale di questo hot spot è di 5350 ha.



Fig. 3.18 Piantagione di cacao nel bacino del Rio Salomeia

Hot spot 3: regione Teimoso (fig.3.19)

La regione della Serra do Teimoso è situata nel comune di Jussari, in una zona climatica di transizione, tra la zona umida e quella semiumida. In questa regione si trova la riserva ecologica di Teimoso (RPPN- *Reserva Natural da Serra do Teimoso*), presente all'interno di una proprietà privata appartenente ad una famiglia di coltivatori di cacao. Tale riserva presenta la rigogliosa vegetazione originaria della foresta atlantica, ma è circondata da numerosi campi coltivati, soggetti, durante gli ultimi venti anni, a differenti usi del suolo, dalle piantagioni di cacao, a quelle di caffè, ai pascoli. L'area della riserva è di circa 200 ha su un totale di 1850 ha dell'intero hot spot.



Fig 3.19 Riserva di Teimoso (foto R. Napolitano)

### 3.2.7 Misure in campo

Dal 17 al 30 giugno 2003 è stata effettuata una campagna di misurazioni in campo nell'area di studio, riguardanti una serie di misure di LAI con lo strumento LAI-2000 *Plant Canopy Analyser* e nei sei transetti distribuiti all'interno dei tre hot spot anche una serie di misure di biomassa forestale.

I dati sono stati raccolti in diversi tipi di vegetazione distribuiti nell'area di studio: pascolo, *cabruca*, cacao-*seringuera*, *capoeira*, nella foresta e in alcune piantagioni di *cupuaçu* (*Theobroma Grandiflorum*), di banana (*Musa sapientum*) e di cocco (*Cocos lucifera*).

## 4 MATERIALI E METODI: I RILIEVI DI CAMPO

### 4.1 Il LAICOR-2000 Plant Canopy Analyzer

Il LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer* (LI-COR, 1992) è uno strumento per la misurazione non distruttiva del LAI. La teoria su cui si basa questo strumento è che la quantità di foglie di una copertura vegetale può essere dedotta dalla quantità di radiazione solare attenuata dalla chioma. Misurando questa attenuazione a diversi angoli rispetto allo zenit, si possono ottenere informazioni anche sull'orientamento delle foglie.

Il LAI2000 consiste in un sensore ottico e in una unità di controllo (fig. 4.1). Il LAI-2000 usa un sensore della luce a *fish-eye* che misura simultaneamente la radiazione diffusa a 5 distinti angolari zenitali con ampiezza di  $13^\circ$ . Il sensore proietta un'immagine quasi emisferica (ca  $150^\circ$ ) in 5 fotodiodi, la cui superficie attiva è sistemata in anelli concentrici, che misurano la radiazione in 5 bande. Il primo fotodiodo misura la luminosità sulla verticale, quello più esterno la luminosità di un anello centrato a  $68^\circ$  ( $61-74^\circ$ ), come si può vedere nella fig. 4.2. L'unità di controllo registra i dati provenienti dal sensore e li utilizza per il calcolo immediato del LAI, dell'angolo di inclinazione delle foglie, dell'errore medio, della frazione di cielo visibile dal sensore.

#### 4.1.1 Presupposti

Ci sono alcune ipotesi che devono essere soddisfatte affinché il calcolo del LAI e

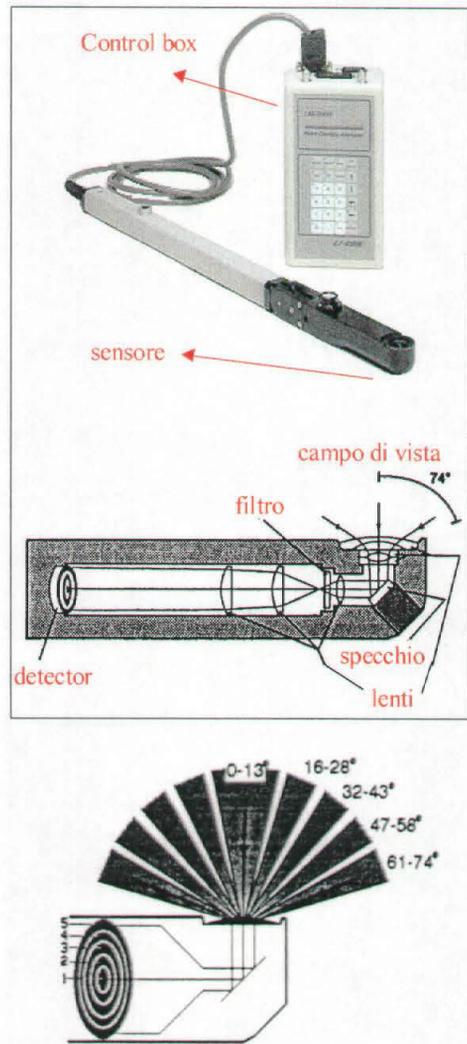


Fig. 4.1 LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer* (mod. da [www.licor.com](http://www.licor.com))



Fig. 4.2 Campo di vista del sensore

L'orientamento sia corretto, naturalmente, dal grado di violazione di questi presupposti dipende l'accuratezza dei calcoli. I quattro principali presupposti sono:

1. le foglie sono considerate come corpi neri: le letture effettuate al di sotto della vegetazione non comprendono nessuna radiazione che è stata riflessa o trasmessa dalle foglie;
2. le foglie sono distribuite casualmente;
3. le foglie sono orientate azimutalmente in modo casuale;
4. gli elementi della chioma sono piccoli in confronto al campo di vista di ciascun anello

Nessuna vegetazione reale corrisponde esattamente a questi presupposti:

1. le foglie non sono certamente come dei corpi neri, tuttavia esse hanno una trasmittanza e riflettanza relativamente basse al di sotto dei 490 nm. Il problema della trasmissione è quindi ovviato dalla presenza di filtro blu che respinge le radiazioni con lunghezza d'onda superiore ai 490 nm; quello della riflessione da misurazioni effettuate con cielo coperto;
2. le foglie non sono mai distribuite casualmente ma sono raggruppate lungo i rami e i gambi;
3. alcune specie presentano un certo grado di eliotropismo, violando quindi il presupposto della casualità azimutale. L'importanza di questo presupposto si riduce quando le misurazioni sono fatte in diverse direzioni, come avviene con il LAI-2000, tranne quando si utilizza un tappo molto chiuso;
4. : la grandezza degli elementi può essere ovviata seguendo la regola secondo la quale la distanza del sensore dalla foglia più vicina deve essere almeno quattro volte la larghezza della foglia.

Questi fattori normalmente possono essere ignorati, tranne che nel caso delle conifere, per le quali è necessario utilizzare dei parametri di calibrazione.

#### **4.1.2 Teoria**

Il LAI-2000 misura la probabilità di vedere il cielo guardando in su attraverso la chioma in diverse direzioni. Le misurazioni contengono due informazioni strutturali riguardo la copertura vegetale: quantità fogliare e orientamento.

##### Quantità di foglie.

Come un raggio di radiazione passa attraverso la vegetazione, c'è una certa probabilità che esso sia intercettato dalle foglie. La probabilità di intercettazione è proporzionale alla

lunghezza del percorso (*path length*), alla densità fogliare (quantità di foglie per volume di chioma) e dall'orientamento delle foglie. Se si può considerare che le foglie siano piccole in confronto a tutta la chioma e distribuite casualmente nella zona in cui passa il raggio, allora la probabilità che il raggio di radiazione dalla direzione  $(\theta, \Phi)$  non sia intercettato è dato dalla formula 4.1:

$$T(\theta, \Phi) = \exp (-G(\theta, \Phi) \mu S(\theta, \Phi)) \quad (4.1)$$

dove:  $\Phi$  è l'angolo azimutale

$\theta$  è l'angolo zenitale

$G(\theta, \Phi)$  è la frazione di foglie proiettata verso la direzioni  $(\theta, \Phi)$

$\mu$  è la densità ( $m^2$  di foglie per  $m^3$  di chioma)

$S(\theta, \Phi)$  è la lunghezza del percorso (m) attraverso la chioma

Dal momento che il sensore del LAI-2000 fa una media degli azimut, si trascurano dalle formule l'indicazione azimutale  $\Phi$ , considerando però che le varie quantità sono medie azimutali.

L'equazione precedente può essere riscritta in tale modo:

$$G(\theta) \mu = - \frac{\ln(T(\theta))}{S(\theta)} \equiv K(\theta) \quad (4.2)$$

dove  $k(\theta)$  è la frequenza di contatto (Miller, 1967) che è l'equivalente al numero medio di contatti per unità di lunghezza del viaggio che una sonda dovrebbe fare passando attraverso la chioma all'angolo zenitale  $\theta$ . Miller diede una soluzione esatta per  $\mu$ :

$$\mu = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{-\ln(T(\theta))}{S(\theta)} \sin \theta d\theta \quad (4.3)$$

In una vegetazione omogenea completamente coperta, la densità fogliare è collegata con l'indice di area fogliare  $L$  moltiplicato per l'altezza  $z$  della chioma e il percorso  $S$  è in relazione con l'altezza della chioma moltiplicata per l'angolo zenitale  $\theta$ :

$$L = \mu z \quad (4.4)$$

$$S(\theta) = z / \cos \theta \quad (4.5)$$

Sostituendo queste relazioni nell'equazione 4.3 si ottiene un'espressione per il LAI:

$$L = 2 \int_0^{\pi/2} -\ln(T(\theta)) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (4.6)$$

L'equazione per la densità fogliare e quest'ultima equazione sono equivalenti nel caso in cui la distanza  $S(\theta)$  sia  $1/\cos\theta$ ; quindi la formula (4.3) darà come risultato il LAI se la distanza è  $1/\cos\theta$ ; altrimenti verrà elaborata la densità fogliare.

Il LAI-2000 usa sempre 5 valori  $\theta_i$  di angolo zenitale, che vengono visualizzati nel file di output sotto l'etichetta ANGLES. La non intercettazione della chioma  $T(\theta)$  è calcolata per ogni paio di letture A e B e il logaritmo di ognuno di questi valori è diviso per i valori  $S_i$  della distanza (DISTS nel file di output), per ottenere le frequenze di contatto  $k(\theta_i)$ . Per ogni angolo di vista  $\theta_i$ , le frequenze di contatto  $k(\theta_i)$  derivano dalla media di una coppia A B e la media  $k_i$  è riportata nel file come CNTCT#; la deviazione standard di ogni media è indicato come STDDEV. GAPS sono la trasmittanza media  $T_i$  ( $T_i = \exp(-k_i S_i)$ ) calcolata dai valori  $k_i$  usando l'equazione (4.2). L'integrazione dell'equazione (4.3) è fatta numericamente attraverso la somma dei prodotti di  $k_i$  e  $(\sin\theta_i d\theta_i)$  o  $W_i$ :

$$"LAI" = 2 \sum_{i=1}^5 k_i W_i \quad (4.7)$$

“LAI” può essere inteso sia come LAI che come densità fogliare, a seconda del *path length* usato. I valori di  $W_i$  sono calcolati dividendo l'intervallo da  $0^\circ$  a  $90^\circ$  in 5 intervalli irregolari basati sugli angoli centrali assegnati ad ogni anello sensore. Una volta normalizzati, in modo che la somma sia 1.0, i valori di  $W_i$  sono:

Angle $\theta_i$	$W_i = \sin\theta_i d\theta_i$
7	.034
23	.104
38	.106
53	.218
68	.494

Poiché i valori di  $W_i$  sono fissi, l'equazione 4.7 è un metodo molto veloce per il calcolo del LAI. Comunque nelle coperture con le foglie orientate verticalmente (ad esempio nei prati), la luce diffusa causa una diminuzione del valore di contatto dell'anello più esterno, causando una sottostima del LAI, che può arrivare fino al 10%. Tale effetto può essere evitato calcolando il LAI con il metodo di Lang (1987):

$$LAI = 2(Slp + Int) \quad (4.8)$$

dove  $Slp$  e  $Int$  sono la pendenza e l'intercetta del numero medio di contatto e  $\theta$  (in radianti). Questo riduce l'importanza dell'anello più esterno. Il LAI-2000 effettua questo calcolo che può essere visualizzato sulla console sotto il nome  $2*(S+I)$ .

### Orientamento delle foglie

Una volta che la densità delle foglie (o il LAI) è determinata dai numeri di contatto, l'equazione 4.2 può essere risolta per ottenere la funzione di orientamento  $G(\theta)$ .

Come  $G(\theta)$  è in relazione con l'orientamento delle foglie? La figura 4.3 indica la relazione teorica tra  $G$  e l'angolo zenitale  $\theta$  per coperture vegetali ideali in cui le foglie siano posizionate a caso e orientate azimutalmente in modo casuale, ma inclinate ad un angolo fisso. Sono rappresentate 10 differenti angoli di inclinazione delle foglie.

Il LAI-2000 calcola l'angolo medio di inclinazione delle foglie con il metodo di Lang

(1986) che determina le pendenze medie di curve ideali di  $G$  e fitta un'equazione polinomiale a questi dati, ciò genera una equazione empirica che mette in relazione la pendenza della funzione  $G$  con l'angolo medio di inclinazione delle foglie. L'equazione polinomiale di 5° grado che dà MTA in funzione della pendenza ( $x$ ) è la seguente:

$$MTA = 56.8196 + 46.84833x + x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \quad (4.9)$$

Nel LAI-2000, una volta che il LAI (o la densità fogliare) è stato calcolato, vengono determinati 5 valori di  $G(\theta)$  dividendo i valori di contatto per il LAI (o la densità fogliare). Una linea retta fitta  $G(\theta)$  e  $\theta$  e la pendenza di questa linea è usata nell'equazione 4.9 per predire MTA. L'errore standard di questa pendenza è aggiunto al valore di pendenza e il valore risultante è usato nuovamente nell'equazione 4.9 per calcolare un secondo angolo di inclinazione delle foglie, che è poi sottratto da MTA per ottenere SEM, l'errore standard di MTA.

### Diffuse Non-interceptance

Un'utile parametro per la caratterizzazione delle radiazioni di un ambiente è  $\tau$ , *diffuse non-interceptance* (Norman and Welles, 1983). Questa è una quantità tra 0 e 1 che indica la probabilità che la radiazione diffusa dall'alto penetri nella vegetazione in un particolare luogo, ed è dato da:

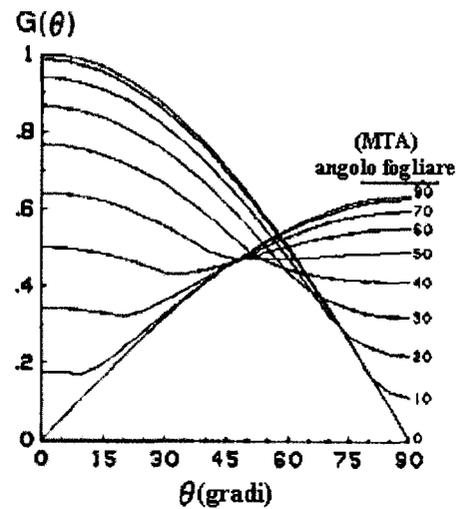


Fig. 4.3 Relazione ideale tra l'area fogliare proiettata e la direzione, per alcuni angoli di inclinazione delle foglie (Warren Wilson e Reeve, 1959)

$$\tau = \frac{\int_0^{\pi/2} \tau(\theta) T(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \tau(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta} \quad (4.10)$$

dove  $\tau(\theta)$  è l'intensità della distribuzione della radiazione del cielo sopra la vegetazione. Il LAI-2000 usa l'equazione 4.11 per calcolare DIFN sommando i prodotti dei 5 *gap fraction* medi  $T_i$  con  $W_i'$ ;  $W_i'$  sono i valori normalizzati di  $\sin\theta_i \cos\theta_i d\theta_i$  che sono rispettivamente 0.066, 0.189, 0.247, 0.249 e 0.249.

$$DIFN = \sum_{i=1}^5 T_i W'_i \quad (4.11)$$

Il programma C2000, oltre a duplicare il calcolo di DIFN della *control box*, lo ricalcola usando la distribuzione della luminosità del cielo misurata (cioè il valore  $\tau(\theta)$  è misurato e usato, al posto di assumere una luminosità del cielo uniforme).

### Dove e come misurare

Una misura con il LAI-2000 richiede almeno 2 misurazioni: una prima misurazione di tipo A (*above*), cioè al di sopra della vegetazione (nel caso di vegetazione erbacea o arbustiva e poi una lettura di tipo B (*below*), cioè al di sotto della copertura vegetale. Nei boschi o nelle foreste la misurazione di tipo A viene fatta al di fuori del bosco, al centro di una radura con raggio pari almeno a sette volte l'altezza della chioma. Se non si ha a disposizione una radura spaziosa, si usano dei tappi che riducono il campo di visuale del sensore, così è sufficiente che il raggio della radura sia tre volte e mezzo l'altezza della chioma, con tappi di 90° o 45°.

Un rilevamento con il LAI-2000 consiste, quindi, in almeno 10 numeri: cinque corrispondono ai segnali provenienti dai cinque fotodiodi quando il sensore ottico è al di fuori della vegetazione, gli altri cinque sono i risultati delle letture al di sotto della copertura vegetale. Dividendo le cinque coppie corrispondenti sono ricavati i valori di trasmittanza. Per esempio, se il primo sensore legge 50 (l'unità di misura non è importante) sopra la chioma e 5 sotto, allora la trasmittanza a questo angolo (centrato a 7°) è 5/50=0.10. Dalla trasmittanza di tutti cinque gli anelli, il LAI-2000 calcola il LAI e l'orientamento delle foglie.

In pratica si effettua una misura A e poi un certo numero di misure B, possibilmente lungo un transetto e al centro del bosco, lontano dai tronchi. Se le condizioni del tempo non sono stabili, dopo ogni lettura B, si deve ritornare nella radura per un'altra lettura A,

oppure, una volta finito il transetto si concludono le misurazioni con un'altra misura A e lo strumento farà un'interpolazione fra i valori di A misurati. Le misure A e B devono essere fatte con lo stesso tappo, l'inclinazione, direzione e altezza del sensore devono essere le medesime, poiché ogni oggetto che è comune alle letture A e B (ad esempio l'operatore) non influenza il calcolo del LAI. Quindi è consigliabile l'ausilio di una bussola.

Per sapere quanto una misura B è rappresentativa di una copertura vegetale si utilizza la seguente formula:

$$A=f\Delta H^2 \quad (4.12)$$

dove: A è l'area rappresentata dal campione

F è la "frazione di vista" del sensore (0.75, 0.5, 0.25, 0.125 rispettivamente per i tappi di 270°, 180°, 90°, o 45°)

H è l'altezza della chioma

Ad esempio per una lettura B senza tappo ( $f=1$ ) di una chioma con 5 m di raggio e con 1 m di altezza, A è di 3 m<sup>2</sup> ( $A=1*3.14*1^2=3.14$ ), quindi la misura B copre il 12% della chioma ( $3.14/5*5=0,12$ ).

Il LAI è proporzionale al logaritmo del *gap fraction*, così la via migliore per avere la media dei *gap fraction* è fare la media dei loro logaritmi (Lang and Xiang, 1986). Questo è infatti il motivo per cui il LAI-2000 fa la media di più letture B; ogni lettura B è la media lineare della radiazione che il sensore può vedere. Possono sorgere problemi se il sensore vede una variabilità molto elevata della densità della vegetazione, perché il *gap* nella chioma sarà sopra pesato e il LAI sottostimato. Un modo per sopperire a questo problema è utilizzare i tappi, in modo da includere aree dense e aree spoglie in letture B separate.

Un'altra considerazione da fare è che una vegetazione omogenea richiede un minor numero di letture B di una eterogenea. Per sapere, quindi, quante misure B sono necessarie in una vegetazione più o meno omogenea si fa una lettura di prova, composta da una misura A e 6 misure B in zone a diversa densità di vegetazione. Si consulta poi una tabella (tab. 4.1) che si trova all'interno del manuale, in cui, a seconda del risultato dato dal rapporto tra SEL e LAI, viene indicato il numero di misure B utili.

Tab. 4.1 Numero di letture B da fare, sulla base del rapporto SEL/LAI.

SEL/LAI	# DI LETTURE B DA FARE
0.01	2
0.02	3
0.03	5
0.04	6
0.05	8
0.06	11
0.07	13
0.08	16
0.09	19
0.1	23

Ad esempio, se dopo 6 letture B, ottengo  $SEL/LAI=0.1/2.0=0.05$ , dovrei fare 8 misure B per raggiungere il 95% di confidenza che il LAI misurato è entro il 10% del vero valore.

#### Quando misurare

Le condizioni ideali in cui misurare il LAI sono date da un cielo uniformemente coperto. Nel caso di giornate soleggiate, bisogna tener conto che maggiore è la porzione di foglie illuminate dal sole, maggiore è la sottostima del LAI, a causa della radiazione diffusa. Quindi si deve ovviare al problema mettendo uno dei tappi per coprire la porzione di cielo che contiene il sole e sistemandosi con le spalle al sole in modo da fare ombra sul sensore, o preferire l'alba o il tramonto.

#### Perché usare i tappi

Si può riassumere che l'uso dei tappi va attuato nei seguenti casi:

- per rimuovere il sole dalla vista del sensore, altrimenti si ha una sottostima del LAI;
- per rimuovere l'operatore dalla vista del sensore, oppure bisogna avere l'accuratezza di occupare la medesima porzione di vista del sensore nelle diverse misure;
- quando la luminosità del cielo non è uniforme;
- quando la copertura vegetale non è uniforme, per evitare la sottostima del LAI, è meglio includere nel campo di vista del sensore zone dense e zone rade in misure diverse;
- per evitare di includere nel campo di vista del sensore anche la chioma, nel caso la radura sia troppo piccola.

#### Come vedere i risultati

Dopo le misurazioni i risultati sono automaticamente salvati in un file il cui contenuto è diviso in 5 parti (liste):

- lista 1: informazioni, osservazioni, risultati;

- list 2: ANGLES e DIST#;
- list 3: valori di CNTCT# e STDDEV;
- list 4: ANGLES e GAPS;
- list 5: osservazioni.

I dati contenuti nella lista 1 vengono visualizzati immediatamente sullo schermo dello strumento e contengono le informazioni inserite dall'utente sul luogo, la data e il tipo di misura e i risultati del calcolo del LAI. Essi sono, ad esempio:

FILE= 5            numero del file  
 20 jun 18:35:01   data e ora in cui è stato creato il file  
 WHAT= faggeta    informazione inserita dall'utente sul tipo di vegetazione  
 WHERE= attimis   informazione inserita dall'utente sul luogo della misurazione  
 LAI= 4.10        Indice di Area Fogliare  
 SEL= .13         errore standard del LAI  
 DIFN= .151       frazione di cielo visibile  
 MTA= 60         angolo medio di inclinazione delle foglie  
 SEM= 2           errore standard del calcolo di MTA  
 SMP= 8           numero di campionamenti  
 2\*(S+I)= 2.62    calcolo alternativo del LAI

Di seguito vengono descritti con maggior dettaglio questi importanti dati.

- LAI (*Leaf Area Index*): è la risposta alla domanda “Quante foglie?”. Anche se LAI letteralmente significa indice di area fogliare, si deve sottolineare che il LAI-2000 misura tutti gli oggetti che bloccano la luce, quindi sarebbe più indicato utilizzare il termine *foliage* che indica le foglie, i piccioli, i ramoscelli e i rami su cui le foglie sono attaccate. Di conseguenza tradurlo, in modo più corretto, come indice di area della chioma. Il LAI è adimensionale ( $m^2$  di area della chioma proiettata su  $m^2$  di terreno), tuttavia se il valore DIST# non equivale ad  $1/\cos(\text{angolo})$ , allora il LAI rappresenta la densità della chioma ( $m^{-1}$ ).
- SEL (*Standard Error of LAI*): errore standard della determinazione del LAI
- DIFN (*Diffuse non-interceptance*): frazione del cielo visibile dal sensore. È calcolato integrando il *gap fraction* (GAPS) per ottenere un valore che indica la frazione di cielo che non è bloccata dalla chioma. Ha un *range* tra 0 (il cielo non è visibile dal sensore) e 1 (il sensore non vede la chioma, ma solo cielo), ed è in pratica la combinazione del LAI e del MTA in un unico valore, anche se non si base sugli stessi presupposti, ma dipende solo dall'ipotesi che non ci sia diffusione da parte delle foglie. Si può

considerare come un indicatore dell'assorbimento della radiazione diffusa a lunghezza d'onda corta (<490nm) della vegetazione

- MTA (*Mean Tilt Angle*): indica come le foglie sono orientate, in gradi. Il MTA risponde alla domanda "com'è orientata la chioma?". Se tutte le foglie sono orientate orizzontalmente, allora il corretto MTA dovrebbe essere 0°; se sono tutte verticali il valore di MTA dovrebbe essere 90°. L'informazione di per sé non ha gran significato, ma dà un'indicazione sulla plausibilità del risultato: normalmente il valore varia tra 30°, se predominano le foglie orizzontali, a 60°, se predominano le foglie verticali. Un valore inaspettato indica che c'è stato qualche errore nella misurazione o nel valore DIST.
- SEM (*Standard Error of MTA*): errore standard del MTA

- SMP (*Sample pair*): numero di osservazioni che sono state incluse nel calcolo del LAI
- La seconda lista contiene le informazioni su:

- ANGLES: sono gli angoli medi di ognuno dei 5 anelli concentrici del sensore
- DIST: sono le lunghezze del percorso, per chiome completamente coperte il valore è di  $1/\cos(\text{angolo})$

La terza parte descrive i:

- CNTCT#: sono le frequenze medie di contatto (il logaritmo del *gap fraction* diviso per la lunghezza del percorso)
- STTDEV: è l'errore standard delle frequenze di contatto

La quarta lista si occupa dei dati sui GAPS che sono i valori di *gap fraction*.

L'ultima parte riporta le informazioni inerenti le diverse letture: un'etichetta A o B che indica se la misura è stata fatta sopra o sotto la copertura vegetale, un numero sequenziale, l'orario di lettura, i valori di ciascun dei 5 anelli del sensore.

Un esempio di file completo è il seguente:

FILE	DATE	TIME	TIPO	DOVE	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
42	24 AUG	11:06:21	LECCIO	CERNIZZA	3.46	0.09	0.062	44	16	10
ANGLES		7.000	23.00	38.00	53.00	68.00				
CNTCT#		2.080	2.043	3.602	1.645	1.063				
STDDEV		0.484	0.319	0.388	0.145	0.115				
DISTS		1.008	1.087	1.270	1.662	2.670				
GAPS		0.123	0.109	0.011	0.066	0.059				
A	1	11:07:57	218.8	239.9	322.8	234.7	182.6			
B	2	11:12:43	25.23	26.88	22.05	12.11	6.544			
B	3	11:15:06	14.69	15.08	61.52	12.69	8.136			
B	4	11:19:07	15.42	21.06	16.82	17.44	12.06			
B	5	11:22:22	60.92	49.48	34.66	25.56	18.38			
B	6	11:42:23	43.86	38.13	32.91	13.13	7.874			
B	7	11:42:58	25.50	26.46	70.57	14.56	11.31			
B	8	11:43:17	12.55	18.41	18.58	14.42	9.580			
B	9	11:44:08	37.41	36.99	39.38	12.52	11.16			
B	10	11:44:36	31.37	23.50	22.34	13.48	10.37			
B	11	11:44:56	34.73	21.48	57.91	21.64	16.80			

### Errori di misurazione

Ci si può rendere conto di un errore di misurazione se il valore di B di uno o più anelli è maggiore del corrispondente valori della misura A, cosicché la trasmittanza per quell'anello è maggiore di 1.0. Ciò può dipendere da una variazione delle condizioni del tempo tra una misura e l'altra o per un errore di metodologia dell'operatore. Quando lo strumento trova una trasmittanza maggiore di 1, esso emette un suono (0.5 s di durata), immediatamente dopo il suono che avvisa che la lettura è stata completata. Tale lettura B è ignorata nel calcolo del LAI, ma viene comunque memorizzata nel file finale.

### Elaborazione dei file

Dopo aver raccolto i dati, è possibile scaricarli sul computer per interpolarli, modificarli e ricalcolare il LAI con il programma C2000. Per esempio, nel caso in cui non si abbia a disposizione una radura sufficientemente grande che consenta che nessun elemento della vegetazione entri nel campo di vista del sensore, si può, una volta scaricati i dati, mascherare uno o più degli anelli esterni. I dati provenienti da questi anelli non verranno considerati e il software darà in output un nuovo valore di LAI, di DIFN e di MTA.

## 4.2 La fotografia emisferica

La fotografia emisferica è una tecnica utilizzata per studiare le caratteristiche della copertura vegetale mediante fotografie con ampio raggio visivo acquisite mediante un

obiettivo a *fish-eye* di 180° (lente SIGMA 8 mm F4). Da tale immagine è possibile ricavare la geometria della distribuzione delle aperture, stimare la penetrazione potenziale della radiazione solare attraverso le aperture stesse e determinare alcune caratteristiche dell'architettura della vegetazione (copertura, LAI, distribuzione angolare delle foglie). La fotografia emisferica può essere applicata per lo studio di qualsiasi tipo di copertura vegetale, quindi foreste, cespugli, ma anche coltivazioni (Rich, 1990), e può trovare impiego in numerose ricerche applicate all'ecologia, all'agricoltura, alle scienze forestali, alla micro meteorologia ed ad altri campi.

#### **4.2.1 Acquisizione delle fotografie**

L'attendibilità dei dati dipende notevolmente dalla qualità della foto. La pellicola può essere tanto a colori quanto in bianco e nero, ma è preferibile che abbia almeno 400 ASA. Per necessità dell'elaborazione la parte superiore della fotografia deve essere rivolta verso il nord magnetico e lo zenit deve trovarsi al centro della foto. La macchina fotografica deve essere posizionata con molta attenzione: innanzitutto va montata su un treppiede, orientata verso il nord magnetico e livellata orizzontalmente, ricorrendo ad una bolla e ad una bussola. Prima di scattare le fotografie devono essere selezionati il tempo di esposizione e l'apertura più adatti alle condizioni di luce: lo scopo è quello di ottenere delle fotografie con il maggior contrasto possibile tra il cielo e le foglie. Le condizioni di luce ideali sono quelle di giornate con cielo uniformemente coperto o quelle che si riscontrano poco prima dell'alba o subito dopo il tramonto. Per incrementare il contrasto si può usufruire ad un filtro blu, adatto in una giornata soleggiata, o ad un filtro rosso, adatto ad una giornata nuvolosa (Wang e Miller, 1987).

#### **4.2.2 Geometria della foto emisferica**

L'immagine circolare risultante dalla foto deriva dalla proiezione su di un piano della visuale emisferica fotografata (fig. 4.4). Nella foto ogni punto rappresenta una direzione nel cielo e viene associato ad una coppia di angoli in un sistema di coordinate emisferiche: angolo zenitale  $\theta$  (rispetto alla verticale) e azimutale  $\alpha$  (rispetto al nord).

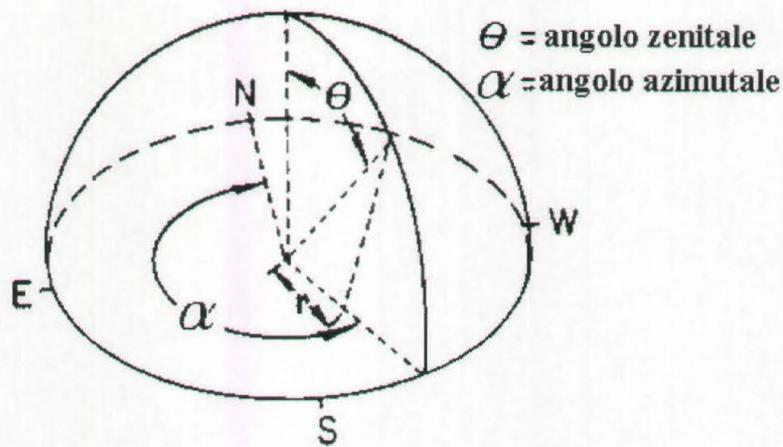


Fig. 4.4 La figura illustra come una lente emisferica proietta un'emisferica di direzioni su un piano (mod. da Rich, 1990).

Il centro della foto rappresenta lo zenit e la circonferenza l'orizzonte; dal momento che la foto viene scattata verso l'alto, l'est e l'ovest appaiono invertiti e, di conseguenza, l'angolo azimutale viene misurato, rispetto al nord, in senso antiorario (fig. 4.5).

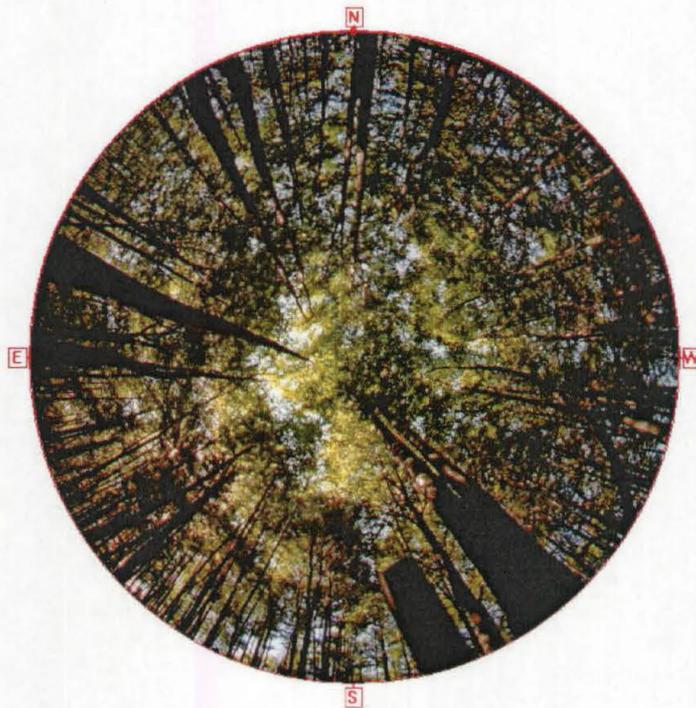


Fig.4.5 Nell'immagine circolare risultante dalla proiezione l'est e l'ovest sono invertiti.

L'esatta natura della proiezione dipende dalla lente utilizzata. La lente applicata in questo lavoro (SIGMA 8 mm F4) usa la proiezione equidistante (o polare), secondo la quale ogni angolo zenitale è linearmente trasformato in distanza lungo un asse radiale dal centro della foto verso la circonferenza (fig. 4.6).

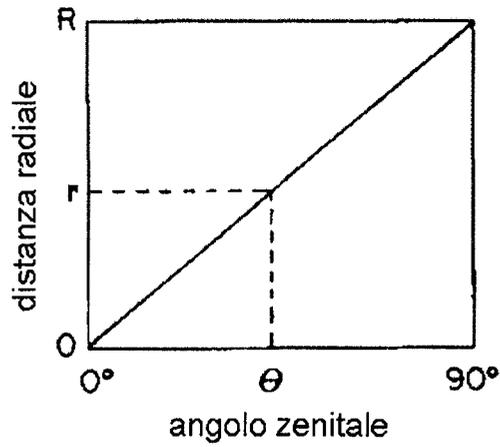


Fig. 4.6 In una proiezione angolare la distanza lungo il raggio è proporzionale all'angolo zenitale (mod. da Rich, 1990).

### 4.2.3 Distorsione dell'immagine

La lente proietta una regione emisferica su una regione piana. Durante la proiezione l'immagine subisce una distorsione e gli oggetti nella foto appaiono distorti, perché, partendo dal piano nel quale si trova la macchina fotografica, essi si trovano sempre più lontani da essa e sottendono angoli più piccoli; per questo motivo aree uguali sull'emisfera non sono rappresentate da aree uguali nella fotografia (Mitchell e Whitmore, 1993).

In una proiezione equidistante una immagine circolare sulla emisfera apparirà circolare all'orizzonte ed ellittica verso l'orizzonte (Herbert, 1987), come si può vedere in fig. 4.7.

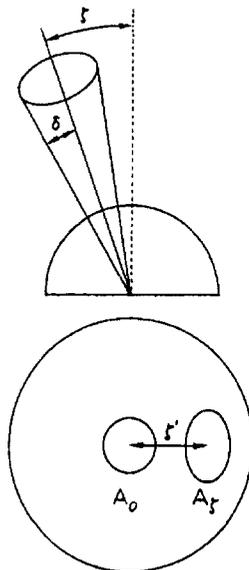


Fig. 4.7 Una regione conica di raggio  $\delta$  con un angolo zenitale  $\xi$  è proiettata su un piano come un'area ellittica ( $A_\xi$ ), alla distanza di  $\xi'$  dall'area circolare ( $A_0$ ) derivante dalla proiezione di una regione conica con angolo zenitale 0 (mod. da Herbert, 1987).

Il problema generale è lo stesso delle proiezioni cartografiche del globo: la proiezione può basarsi su distanze lineari uguali o su aree uguali, ma non su entrambe.

Per calcolare l'area della regione proiettata si fa riferimento ad un cilindro che racchiude esattamente la sfera come fosse un tubo. L'area della sfera è uguale all'area della superficie curva del cilindro con il diametro uguale a  $4\pi r^2$  dove  $r$  è il raggio della sfera. Si consideri una fascia orizzontale di spessore  $b$  che attraversa il cilindro e la sfera: l'area della superficie curva della fascia sulla sfera è uguale all'area della superficie curva della fascia sul cilindro cioè  $2\pi rh$ . La maggiore lunghezza della fascia sulla sfera, vista lateralmente, rispetto alla sua altezza, è compensata esattamente dalla minore circonferenza della fascia sul cilindro (fig. 4.8).

L'area di una zona sulla emisfera è quindi calcolabile facendo riferimento alla sua altezza sul cilindro: per  $n$  zone dell'emisfera di uguale superficie e di spessore  $b$  l'area è data da  $(r/n) 2\pi r$ .

Per la proiezione sul piano si fa riferimento al  $\sin a$  dove  $a$  è l'angolo calcolato rispetto al piano orizzontale; contando le zone dal piano cosicché la circonferenza più alta della  $i$ -esima zona si trovi  $ir/n$  dal piano si ha che:

$$\sin \alpha = (ir/n) / r \quad (4.13)$$

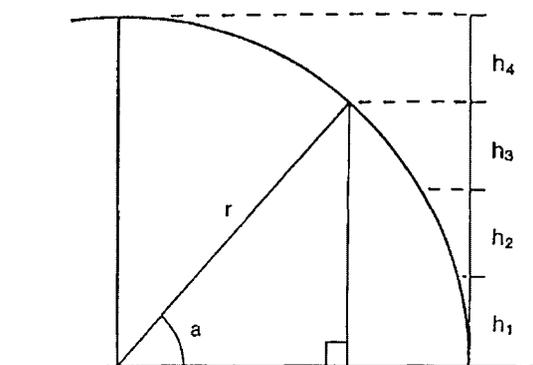


Fig.4.8 Relazione fra le aree del cilindro e quelle sull'emisfera (mod. da Mitchell e Whitmore, 1993).

#### 4.2.4 Il software per l'elaborazione delle foto emisferiche: HEMIVIEW 2.1

Il software che è stato utilizzato per l'analisi delle foto emisferiche è HemiView 2.1, sviluppato nel luglio del 1999.

Il programma effettua una correzione polinomiale della distorsione dell'immagine, per calcolare la proporzione della distanza radiale dal centro dell'immagine come funzione dell'angolo zenitale:

$$p = a_1 \cdot \theta + a_2 \theta^2 + \dots \quad (4.14)$$

dove:  $\theta$  è l'angolo zenitale in radianti

$p$  è la distanza proporzionale lungo il raggio

$a_1$  e  $a_2$  sono coefficienti dell'equazione polinomiale

Secondo questa funzione alla distanza radiale pari a 0 e 1 corrisponde un valore di angolo zenitale rispettivamente di 0 e di 90 gradi (fig. 4.9).

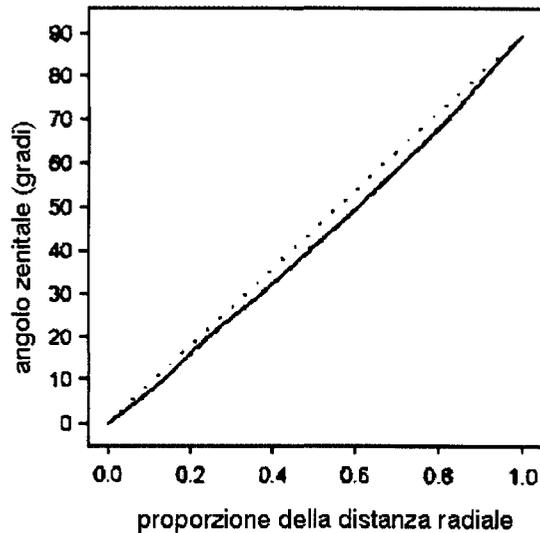


Fig. 4.9 Calibrazione della lente emisferica Sigma 8 mm F4. Il grafico confronta la relazione tra angoli e distanze nella proiezione della lente (linea tratteggiata) e quella in una perfetta proiezione equidistante (linea continua) (mod. da Rich *et al.*, 1999).

Il programma HemiView 2.1 deriva numerosi indici dall'analisi della fotografia emisferica classificata con il metodo del livello di soglia e dai dati inerenti al sito inseriti dall'operatore, applicando dei modelli di distribuzione della radiazione. La soglia viene calcolata con il programma Otsu (fig. 4.10) che applica l'analisi della varianza sull'istogramma dell'immagine in toni di grigio, secondo la formula:

$$\eta = \delta_b^2 / \delta_t^2 \quad (4.15)$$

dove:  $\eta$  = soglia

$\delta_b^2$  = varianza tra le classi

$\delta_t^2$  = varianza totale

Il metodo ottimizza il valore di  $\eta$  per massimizzare il rapporto tra la varianza tra le classi e la varianza totale e dunque la separabilità tra le classi (Otsu, 1979).

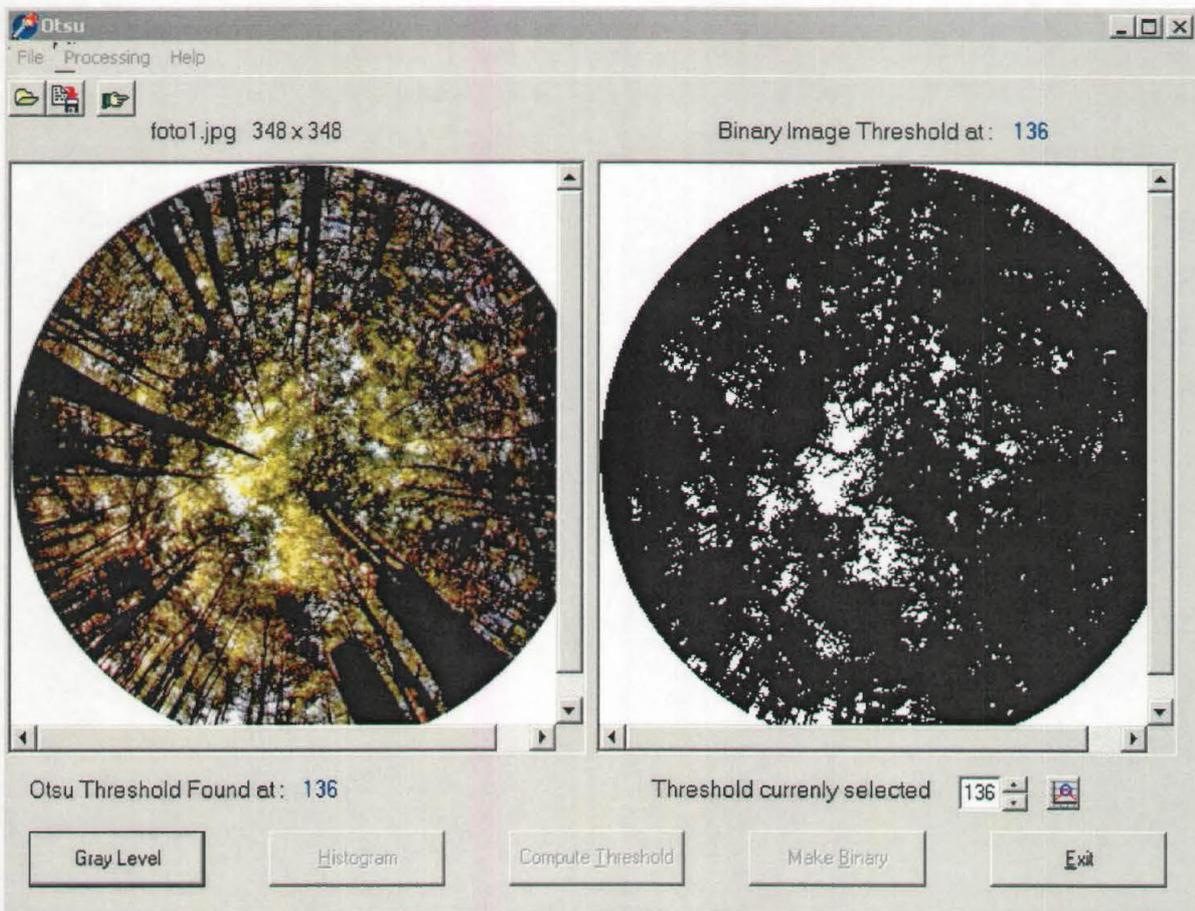


Fig. 4.10 Il calcolo della soglia con il programma Otsu.

Una volta individuato il livello ottimale di soglia si procede alla binarizzazione dell'immagine in cui i *pixel* con valore inferiore o uguale alla soglia sono classificati come cielo ostruito (valore 0, colore nero), i *pixel* con valore superiore alla soglia vengono classificati come cielo (valore 1, bianco). Se la foto presenta una luminosità non omogenea, il valore soglia rappresenta un compromesso fra un valore più alto adatto alla parte sottoesposta della fotografia e uno più basso per la parte sopraesposta.

Gli indici che si possono ricavare dall'analisi dell'immagine fotografica sono raggruppati come segue:

- indici geometrici;
- indici della copertura;
- indici della radiazione solare.

#### INDICI GEOMETRICI

Questi indici danno un'indicazione dell'ostruzione e della visibilità del cielo

**GAP FRACTION:** è la proporzione di cielo visibile all'interno di un dato settore, calcolata come rapporto fra il numero di *pixel* di cielo visibile e il numero totale dei *pixel* di

quel settore. Il suo valore è compreso fra 0 (cielo totalmente ostruito dalla vegetazione) e 1 (cielo totalmente visibile).

Tutti i calcoli degli indici della copertura e della radiazione solare si basano sul valore della gap fraction di ogni settore.

### INDICI DELLA COPERTURA

LAI: il software HemiView stima il valore di LAI sulla base di un modello di distribuzione angolare ellissoidale delle foglie, espresso dal parametro ELADP (*Ellipsoidal Leaf Angle Distribution Parameter*). In questo modello gli elementi della copertura sono distribuiti nella stessa proporzione e orientazione della superficie di un ellissoide di rotazione. L'ELADP è uguale al rapporto fra il semiasse orizzontale dell'ellissoide e il semiasse verticale, rispetto al quale si assume che gli elementi della copertura siano distribuiti in modo simmetrico e casuale (fig. 4.11).

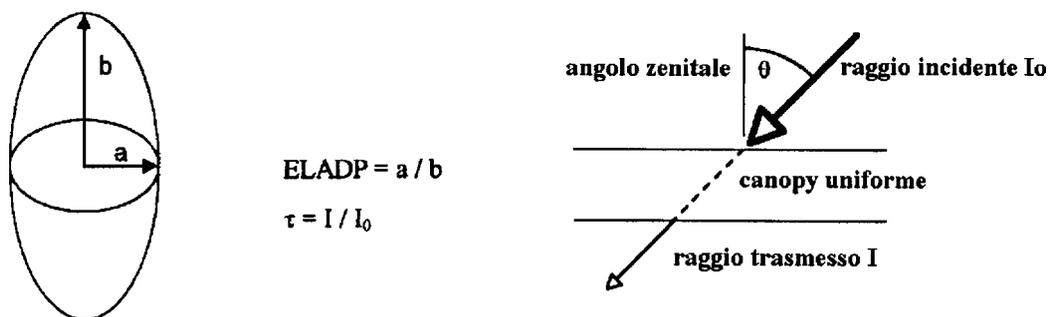


Fig. 4.11 Modello di distribuzione ellissoidale degli elementi della copertura (Rich *et al.*, 1999).

In una copertura con ELADP superiore a 1 gli elementi sono orientati per lo più orizzontalmente, mentre un valore inferiore a 1 indica una disposizione prevalentemente verticale. Il valore di ELADP e l'angolo zenitale del raggio di luce incidente ( $\theta$ ) sono utilizzati dal software per calcolare il coefficiente di estinzione  $k$ , secondo la formula di Campbell (1986):

$$k(x, \theta) = \frac{\sqrt{x^2 + \tan(\theta a^2)}}{x + 1.702 * (x + 1.12)^{-0.708}} \quad (4.16)$$

dove:  $x$  è il valore di ELADP

$\theta$  è l'angolo zenitale del raggio di luce incidente

Il LAI è calcolato per ogni settore del cielo sulla base del valore di ELADP dell'intera copertura e dei valori della GAP FRACTION di ogni settore secondo la seguente formula:

$$LAI(\alpha, \theta) = - \ln[\text{SkyGap}(\alpha, \theta)] / k(x, \theta) \quad (4.17)$$

dove:  $LAI(\alpha, \theta)$  è il valore stimato per ogni settore del cielo

SkyGap( $\alpha, \theta$ ) è il valore della GAP FRACTION in ogni settore

$x$  è il valore di ELADP calcolato per l'intera copertura

$\alpha$  e  $\theta$  sono rispettivamente l'angolo azimutale e l'angolo zenitale del settore

La stima del LAI presuppone una distribuzione uniforme degli elementi nella copertura quindi è meno accurata per coperture che non rispettano questa condizione. Per questo motivo alcuni ricercatori hanno considerato il LAI calcolato dalla foto come la metà dell'area fogliare su un'area unitaria di terreno (Rich *et al.*, 1999) ed hanno applicato un fattore di correzione che tenga conto della non uniformità della copertura (Gower e Norman, 1991; Gardingen *et al.*, 1991).

LAD: la distribuzione angolare delle foglie rappresenta il modo in cui il LAI dell'intera copertura si distribuisce fra gli elementi alle diverse orientazioni; è calcolato come funzione dell'angolo zenitale per un numero di classi angolari pari al numero degli intervalli zenitali scelti per la mappa del cielo. L'angolo di inclinazione corrisponde all'angolo zenitale della normale al piano dell'elemento.

GndCover: il valore della copertura è stimato come proporzione di terreno coperto dagli elementi della copertura, supponendo per essi una distribuzione ellissoidale.

$$\text{GndCover} = 1 - \text{EXP}(-k(x,0)*L) \quad (4.18)$$

dove:  $k(x,0)$  è il coefficiente di estinzione per l'angolo zenitale 0

$x$  è l'EDALP

$L$  è il valore di LAI per l'intera copertura

La copertura è definita come la proiezione verticale dell'area della chioma (di un singolo albero o di un bosco) sulla superficie del terreno, espressa come frazione o percentuale dell'area stessa. La copertura vegetale è un parametro importante, in quanto rappresenta un sensibile indicatore del degrado e della desertificazione del paesaggio (Purevdorj *et al.*, 1998).

### INDICI DELLA RADIAZIONE SOLARE

Questi indici sono basati sulla geometria e sulle proprietà fisiche della radiazione solare.

Una foto ottenuta con un obiettivo emisferico può essere considerata come una mappa dell'ostruzione della luce da parte della vegetazione e delle direzioni dalle quali la radiazione può invece penetrare nel bosco. Il software, conoscendo le coordinate geografiche del punto dal quale è stata scattata la foto, ricostruisce il cammino del sole nel

cielo e calcola la variazione temporale della radiazione diretta e diffusa per ogni giorno dell'anno; non è in grado però di fornire alcuna informazione né sulla radiazione riflessa né su quella trasmessa dagli elementi della chioma, a volte però queste due componenti possono non essere trascurabili. Come Mitchell e Withmore (1993) sottolineano, la componente riflessa può infatti influenzare la composizione spettrale della radiazione sotto la chioma.

DSF (*Direct Site Factor*) o indice della radiazione diretta: è la proporzione della radiazione diretta che penetra nel bosco rispetto alla radiazione diretta totale incidente, calcolata per ogni settore del cielo. Quest'ultima è calcolata secondo la legge di Gates del 1980 (Mitchell e Withmore, 1993) che tiene conto dell'attenuazione della luce attraverso l'atmosfera:

$$S\theta = S * T^{m(\theta)} \quad (4.19)$$

dove:  $S\theta$  è la radiazione incidente con un determinato angolo zenitale

$S$  è la costante solare ( $1370 \text{ W m}^{-2}$  o  $2900 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

$T$  è la trasmittività dell'atmosfera per lunghezza unitaria di cammino ottico, vale a dire per la verticale passante per lo zenit a livello del mare

$m(\theta)$  è la lunghezza relativa del cammino ottico rispetto allo zenit al livello del mare per una data posizione angolare del sole (sia  $\theta$  l'angolo zenitale e  $\alpha$  l'angolo azimutale):

$$m = \sec\theta * p/p_0 = p/p_0 + 1/\cos\theta = p/p_0 * 1/\sin\alpha \quad (4.20)$$

dove:  $p$  è la pressione atmosferica del sito

$p_0$  è la pressione atmosferica standard a livello del mare

ISF (*Indirect Site Factor*) o indice della radiazione diffusa, è la proporzione di radiazione diffusa che penetra nel bosco da ogni settore del cielo, rispetto a quella diffusa totale incidente. La penetrazione della radiazione diffusa attraverso la chioma dipende da tre fattori:

- distribuzione spaziale dell'intensità della radiazione diffusa;
- distribuzione spaziale delle strutture che intercettano la luce;
- assorbimento, riflessione e trasmissione della luce da parte degli elementi vegetali (Chazdon e Field, 1987).

In relazione al primo punto HemiView propone due modelli di distribuzione della luce diffusa: il modello UOC (*Uniform Overcast Sky*) che assume una distribuzione omogenea

della radiazione diffusa nel cielo, e il modello SOC (*Standard Overcast Sky*) secondo il quale tale radiazione varia in relazione dell'angolo zenitale come espresso dalla legge di Moon e Spencer del 1942 (Rich *et al.*, 1999):

$$L_{\theta} = (L_z/3) * (1+2\cos\theta) \quad (4.21)$$

dove :  $\theta$  è l'angolo zenitale

$L_{\theta}$  è la luminosità (flusso della radiazione) da una data direzione del cielo

$L_z$  è la luminosità allo zenit

Nel primo caso la radiazione diffusa è proporzionale all'area angolare del settore del cielo, nel secondo caso è calcolata come funzione dell'angolo zenitale. Secondo il modello SOC la distribuzione della luce diffusa è standard in quanto del tutto indipendente dalle condizioni meteorologiche.

Il valore di tutti gli indici della radiazione varia da 0 a 1 rispettivamente nel caso di cielo totalmente ostruito e di cielo totalmente visibile. Ogni modello per il calcolo della radiazione dà per assunto che il fogliame blocchi totalmente i raggi incidenti e che questi passino invece indisturbati attraverso le aperture della chioma. Per il calcolo della radiazione diretta viene supposto un cielo completamente sereno, mentre per la radiazione diffusa il modello assume una copertura nuvolosa uniforme (Rich *et al.*, 1999). Ad ogni valore viene applicata la correzione del coseno per l'angolo di incidenza (angolo fra la normale della superficie e la radiazione incidente): la quantità di radiazione che raggiunge una superficie è infatti proporzionale al coseno dell'angolo di incidenza ( $I=I_0\cos\alpha$ ), è quindi totale ad un angolo di  $0^\circ$  ( $\cos\theta=1$ ), nulla a  $90^\circ$  ( $\cos\theta=0$ ).

Gli algoritmi utilizzati dal software fanno riferimento a due griglie che vengono sovrapposte alla fotografia; esse rappresentano:

- la MAPPA del CIELO: divide la foto in diversi intervalli di angoli zenitali e azimutali, rappresentati rispettivamente da una serie di anelli concentrici e di settori il cui numero è definito dall'operatore. Questa mappa divide l'emifoto in un certo numero di aree che rappresentano diverse direzioni del cielo e, di conseguenza, variazioni nello spazio (fig. 4.12);

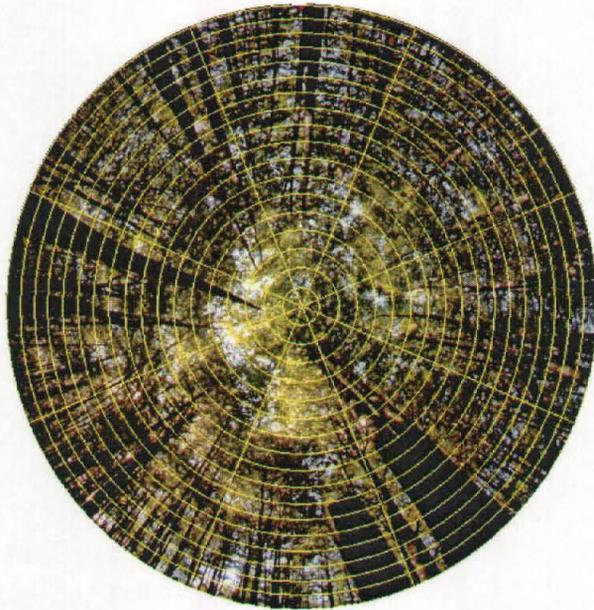


Fig. 4.12 La mappa del cielo sovrapposta alla fotografia emisferica.

- la MAPPA SOLARE: deriva dall'insieme dei tracciati solari che individuano il movimento del sole nelle ore del giorno per ogni giorno dell'anno; i tracciati più esterni si riferiscono ai solstizi, quello centrale evidenzia il movimento del sole negli equinozi. Questa mappa divide l'emifoto in aree che rappresentano variazioni del tempo (fig. 4.13).

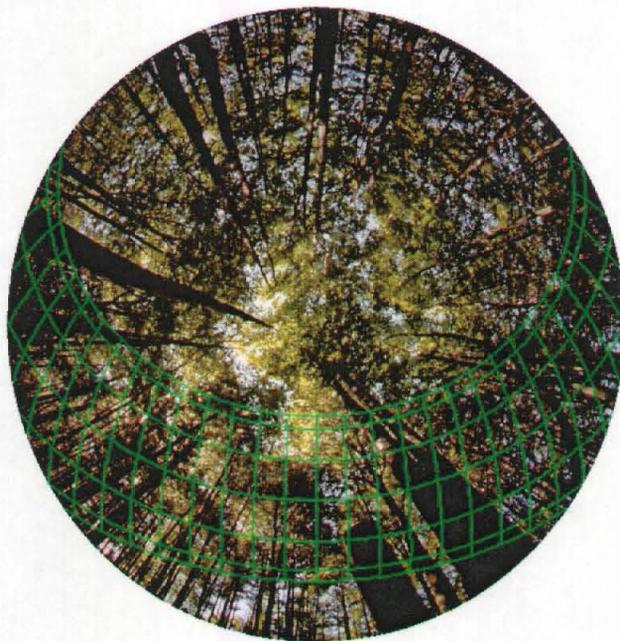


Fig.4.12 La mappa solare sovrapposta alla emifoto; le linee verticali uniscono i punti dei tracciati solari con la stessa ora.

#### 4.2.5 Elaborazione delle fotografie

Tutte le fotografie sono state scansionate con uno scanner (CanoScan FS 2710) alla risoluzione di 2720 dpi (*dot per inch*). Se nelle foto sono visibili delle aree che non devono essere incluse nella classificazione, come ad esempio il terreno o il sole, è possibile sovrapporre una maschera a queste aree, con un qualsiasi programma di elaborazione delle immagini (es. Paint Shop Pro). HemiView ignora nella classificazione le aree colorate di rosso (RGB 255 0 0). Le fotografie così migliorate possono essere importate in HemiView per essere elaborate. Innanzitutto esse vanno allineate: questa operazione (*alignment*) consiste nel sistemare una circonferenza ai bordi dell'immagine in modo da definirne il contorno; il centro della circonferenza deve coincidere con il centro della foto in modo tale che il software riconosca in essa il punto corrispondente allo zenit. Un esatto allineamento dell'immagine è importante affinché le mappe del cielo e del sole siano create correttamente.

Ad ogni sito va associata una scheda nella quale sono inserite delle informazioni indispensabili per la classificazione delle foto. Queste informazioni riguardano i valori angolari dell'esposizione e dell'inclinazione, utilizzati per il calcolo dell'angolo di incidenza e le coordinate geografiche UTM, espresse in gradi, del punto nel quale è stata scattata la foto e il valore di declinazione magnetica (angolo compreso fra il nord geografico e il nord magnetico), indispensabile per orientare correttamente la foto. Si ricordi infatti che le foto sono state orientate verso il nord indicato dalla bussola, di conseguenza verso il nord magnetico.

Due scelte importanti per l'elaborazione delle foto riguardano il modello più appropriato di distribuzione della radiazione diffusa e il numero di settori della mappa del cielo. In questo lavoro è stato applicato il modello SOC, perché adatto a rappresentare condizioni di cielo sia uniformemente sia parzialmente coperto o sereno. Il modello UOC, invece, è applicabile solo nel caso particolare di un cielo densamente e uniformemente coperto. (Mitchell e Whitmore, 1993). Una volta scelto il modello bisogna decidere il numero di settori che devono essere creati: HemiView fa infatti la correzione del coseno, riferendosi al centroide di ogni settore, con un errore –per il modello SOC- di quasi l'1%. Per rendere i risultati più accurati il cielo deve essere diviso in più di 9 intervalli zenitali: è stato deciso di scegliere 8 divisioni azimutali e 18 zenitali per creare la mappa solare.

### 4.3 Misure allometriche

La conoscenza della massa legnosa combinata con le valutazioni qualitative circa le caratteristiche vegetative ed ecologiche della foresta, facilitano la realizzazione dei piani di gestione o di assestamento forestale, dei progetti di miglioramento o di utilizzazione boschiva. Inoltre la massa legnosa è quella che difende il suolo, mitiga gli eccessi meteorologici e immagazzina i gas a effetto serra sottraendoli all'atmosfera (AA.VV., 2000).

Nelle vegetazioni arbustive la massa legnosa può essere misurata sulla base dell'altezza della chioma, dell'altezza dell'albero ( $H$ ), del diametro: il diametro all'altezza del petto (DBH, circa 1.30 metri), dell'area basale ecc., applicando equazioni dimensionali, dette equazioni allometriche. Le equazioni allometriche sono appunto quello che mettono in relazione il diametro dell'albero con l'altezza (o altri parametri) dando una misura indicativa di biomassa. Esistono in letteratura diverse tavole stereometriche (o tavole di cubatura) e tavole alsometriche (o tavole di produzione) che sono il riferimento fondamentale per la misurazione delle masse legnose forestali (dato quantitativo per eccellenza), in quanto consentono di ricavare dati univoci e raffrontabili nello spazio e nel tempo. Le tavole di cubatura si distinguono in (Castellani, 1982):

- tavole dendrometriche che danno il volume (e in qualche caso il peso) di tutta la parte epigea della pianta al di sopra del livello di taglio con eventuali esclusioni di materiale più minuto (fascina);
- tavole cormometriche che forniscono il volume del legname da lavoro con esclusione quindi di norma del cimale e dei rami;
- tavole della biomassa che forniscono in volume o in peso l'intera massa epigea (foglie comprese) e generalmente anche la massa delle radici;
- tariffe, cioè tavole stereometriche ad una entrata ma distinte per strutture e differenziate per classi di fertilità.

Le tavole suddette danno generalmente il volume con corteccia della massa legnosa degli alberi in funzione solo del diametro a m 1,30 da terra (tavole ad una sola entrata) oppure anche dell'altezza, che può essere quella totale o quella cormometrica (tavole a doppia entrata).

Il peso generalmente è espresso in  $\text{kg}/\text{m}^2$  o in  $\text{t}/\text{ha}$ , mentre il volume in  $\text{m}^3/\text{ha}$ .

### 4.3.1 Applicazione nel Friuli Venezia Giulia

I dati dendrometrici sono stati forniti dal Dipartimento di Scienze Agrarie e ambientali dell'Università degli Studi di Udine con la quale si è collaborato per le campagne a terra di raccolta di dati in alcune aree del Friuli Venezia Giulia. Negli stessi transetti in cui sono state fatte le misurazioni di LAI, l'Università di Udine ha effettuato i rilevamenti del diametro e dell'altezza degli alberi, dell'ampiezza e dell'altezza della chioma. Le stazioni in cui si è stati sono: la faggeta a Taipana (1 transetto di 50x20m), l'acero-frassineto a Taipana (2 transetti di 50x20m), la pecceta a Paluzza e Pramodio (8 transetti di 20x20m).

Per quanto riguarda la tipologia acero-frassineto sono state applicate le equazioni allometriche ottenute da un taglio sperimentale eseguito in loco (Alberti *et al.*, in stampa). I dati sperimentali confermano la possibilità di utilizzo delle tavole di cubatura della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia e in particolare quelle riguardanti "altre specie di latifoglie". Per gli altri rilievi i dati di biomassa sono stati ottenuti utilizzando le tavole di cubatura della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

I dati dendrometrici della foresta Cecconi ci sono stati forniti dal CETA (Centro di ecologia Teorica e Applicata), con il quale sono state fatte delle misurazioni di biomassa verde e legnosa nel giugno 2003. Le tavole di cubatura utilizzate dal CETA sono le tavole stereometriche e alsometriche dell'ISAFSA (1988).

### 4.3.2 Applicazione nel bacino del *Rio Cachoeira*

Nel caso del Brasile le misurazioni sono state fatte negli hot spot, in tre rappresentativi tipi di foresta del bacino del *Rio Cachoeira*: la foresta igrofila matura, la foresta igrofila secondaria e la *cabruca*. I campionamenti sono stati fatti in sei transetti di 250 m<sup>2</sup> (50x5 m), due per ogni hot spot, su terreni la cui pendenza è stata misurata con un clinometro. L'analisi della vegetazione ha incluso la fisionomia, la struttura, la composizione floristica, la misurazione dell'altezza, del diametro, del limite inferiore della chioma e della sua ampiezza di tutti gli alberi con diametro all'altezza del petto maggiore di 7.8 cm. Per ogni transetto è stato anche disegnato un profilo, in cui sono state anche schematizzate le epifite.

Per la foresta tropicale sono stati provati diversi modelli, come ad esempio quello di Brown *et al.* (1989) per la foresta primaria e quello di Uhl *et al.* (1988) per la foresta secondaria, ma alla fine sono stati scelti due modelli diversi, sulla base del diametro, come suggerito da Lu *et al.* (2002). Nel caso della foresta tropicale, si è preferito scegliere questo

parametro come discriminante, per due motivi principali. Il primo è che data l'eterogeneità della composizione arborea, l'abbondanza del numero di specie e in alcuni casi anche la difficoltà nella determinazione della specie, sarebbe stato difficile trovare in letteratura delle equazioni specie-specifiche per ogni pianta determinata nel transetto e si sarebbe comunque dovuto usare delle equazioni generiche per le specie di dubbia determinazione. Il secondo motivo è che spesso ci sono alberi, con differenze diametriche significative, e utilizzare una singola equazione comporterebbe errori nella stima della biomassa legnosa. Ad esempio l'equazione di Uhl (1988) sopra citata, è adeguata per stimare alberi con un diametro compreso tra i 7 e i 20 cm, mentre sovrastima tutto ciò che sta al di fuori di questo intervallo.

Quindi per calcolare la biomassa degli alberi con DBH inferiore a 25 cm, è stata scelta l'equazione 4.22 di Nelson *et al.* (1999); per gli alberi con DBH maggiore o uguale a 25 cm, si è utilizzata invece l'equazione 4.23 di Overman *et al.* (1994). L'equazione 4.24 è stata usata poi per calcolare la biomassa superficiale totale (Lu *et al.*, 2002).

$$\ln(DW1) = -2.5202 + 2.41 \ln(DBH) + 0.4644 \ln(H) \quad (4.22)$$

$$\ln(DW2) = -3.843 + 1.035 \ln(DBH^2H) \quad (4.23)$$

$$AGB = \left( \sum_{i=1}^m DW1 + \sum_{j=1}^n DW2 \right) / AP \quad (4.24)$$

dove: ln:l'algoritmo naturale

DBH: il diametro all'altezza del petto (cm)

H: altezza totale (m)

DW1: biomassa di un singolo albero (kg), quando DBH < 25 cm

DW2: biomassa di un singolo albero (kg), quando DBH ≥ 25 cm

m: numero totale di alberi nel transetto, quando DBH < 25 cm

n: numero totale di alberi nel transetto, quando DBH ≥ 25 cm

AP: area totale del transetto (m<sup>2</sup>)

AGB: biomassa superficiale (*above-ground biomass*, kg/m<sup>2</sup>)

L'equazione di Overman sottostima la biomassa per alberi con diametro inferiore a 5 cm (Nelson, 1999), ma nei transetti effettuati negli *hot spot* sono stati considerati solo gli alberi con diametro maggiore a 7.8 cm.

Per stimare la biomassa totale, la biomassa secca e il carbonio fissato dal diametro (DBH) per le piante di cacao (*Theobroma cacao* L.), sono state utilizzate le seguenti formule (Hernandez, 2002):

$$\text{biomass totale (kg)} = 0.2666 * \text{DBH}^2 \quad (4.25)$$

$$\text{biomassa secca (kg)} = 0.115 * \text{DBH}^2 \quad (4.26)$$

$$\text{carbonio fissato (kg)} = 0.0577 * \text{DBH}^2 \quad (4.27)$$

Queste formule naturalmente sono state applicate nei transetti effettuati nella *cabruca* solo sulle piante di cacao, per il calcolo della biomassa degli altri alberi presenti sono state utilizzate le equazioni 4.22 e 4.23.

Una volta ottenuta la quantità di biomassa presente applicando questi modelli, si può trasformare il valore in quantità di carbonio presente moltiplicando il risultato per 0.5, un fattore standard per convertire la biomassa legnosa in carbonio (Houghton *et al.*, 2001; Dong *et al.*, 2003).

## 5. IL TELERILEVAMENTO (O REMOTE SENSING)

Il termine telerilevamento deriva dall'unione della parola greca *tele*, che significa da lontano, e del termine rilevamento che indica un processo di acquisizione di informazioni: quindi in senso esteso può essere utilizzato per qualunque metodo di osservazione effettuata a distanza dall'oggetto di indagine. In senso stretto, e nel suo utilizzo usuale, indica tutti i metodi di osservazione della Terra nei quali la radiazione elettromagnetica costituisce il veicolo di trasporto dell'informazione dall'oggetto di indagine del sensore (Dermanis e Biagi, 2002).

Quindi, il telerilevamento (o *remote sensing*) si basa sulla rilevazione e registrazione dell'energia elettromagnetica riflessa dalla superficie terrestre e dagli oggetti posti su di essa. Lo spettro delle onde elettromagnetiche può essere suddiviso in regioni, a seconda della lunghezza d'onda (Fig. 5.1).

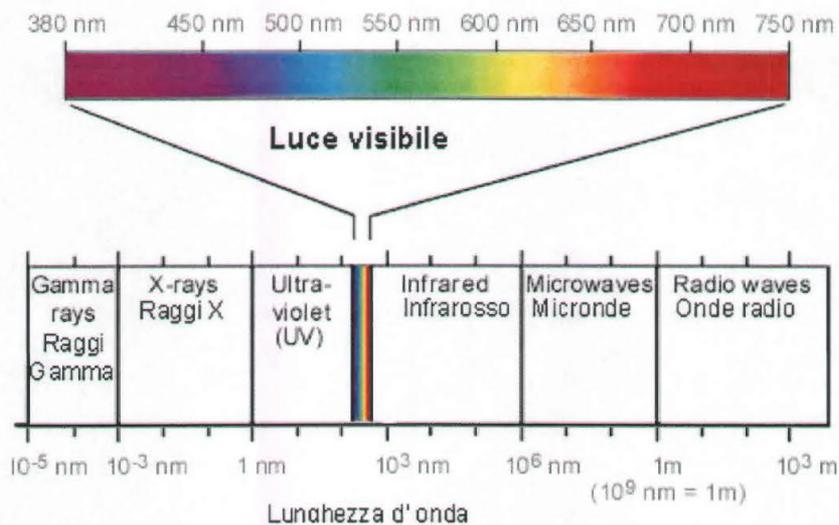


Fig. 5.1: Regioni spettrali dello spettro elettromagnetico.

Il sensore posto sul satellite misura la radianza, ovvero la quantità di energia riflessa e/o emessa nel suo campo visivo dal sistema Terra-atmosfera illuminato dal Sole. Questo segnale dipende dalla lunghezza d'onda delle radiazioni solari, dalle condizioni atmosferiche e dalla riflettanza (il rapporto tra la radiazione riflessa e quella incidente). Esso viene alterato dai processi atmosferici di assorbimento, rifrazione e diffusione. L'assorbimento è un processo che si verifica quando una frazione di energia che attraversa l'atmosfera viene intercettata dalle sue componenti, principalmente del vapore acqueo, dall'anidride carbonica e dall'ozono, e riemessa con una lunghezza d'onda diversa. Tale effetto si minimizza sintonizzando i canali dei sensori su lunghezze d'onda comprese nelle

cosiddette finestre atmosferiche, ovvero negli intervalli spettrali in cui le interazioni tra i gas atmosferici e la radiazione incidente sono meno pronunciate.

Il processo di diffusione avviene quando la direzione del raggio incidente viene deviata dalle molecole e dall'aerosol presenti nell'atmosfera, mentre la rifrazione è dovuta alle diverse densità che hanno gli strati dell'atmosfera che la radiazione deve attraversare.

L'energia incidente è quella parte della radiazione elettromagnetica che raggiunge la superficie terrestre, che, a sua volta, può venire assorbita dai vari oggetti presenti sul territorio, riflessa (nel visibile o nell'infrarosso medio), trasmessa o emessa (nell'infrarosso termico).

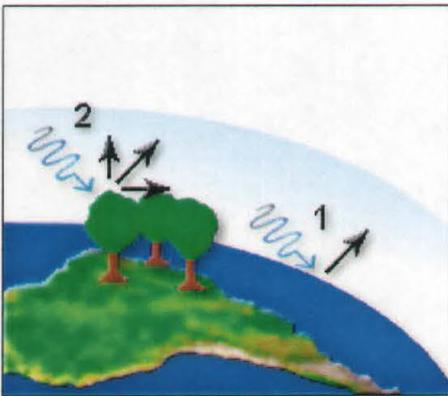


Fig. 5.2 Riflessione speculare (1) e diffusa (2) della radiazione.

Le proporzioni con cui avviene questa scomposizione variano sia in rapporto alle lunghezze d'onda considerate, che alle diverse caratteristiche degli oggetti presenti sulla superficie terrestre.

Nel telerilevamento, la riflessione assume un ruolo di grande importanza. La quantità di energia riflessa dipende dall'angolo di incidenza della radiazione, dalla riflettanza o albedo della superficie incisa e dalla sua geometria. Inoltre la riflessione può essere speculare o

diffusa. La riflessione speculare (fig. 5.2, freccia 1) avviene su superfici lisce e fa sì che la luce sia riflessa in una singola direzione con un angolo uguale a quello di incidenza. La riflessione diffusa (fig. 5.2, freccia 2) avviene su superfici ruvide e fa sì che la luce sia riflessa in molte direzioni.

L'energia riflessa o emessa dagli oggetti presenti sulla superficie terrestre attraversa poi nuovamente l'atmosfera, venendo da questa in parte assorbita, in parte diffusa.

La deviazione e l'intensità dell'assorbimento variano da un punto all'altro dello spettro elettromagnetico, cioè a seconda della lunghezza d'onda che ha la radiazione elettromagnetica che entra in contatto con l'atmosfera.

Si vengono a creare quindi delle zone dello spettro in cui il disturbo dovuto alla presenza dell'atmosfera è più marcato, cioè laddove essa risulta opaca alla radiazione sia incidente che riflessa, ed altre in cui invece risulta limitato o trascurabile (finestre atmosferiche). I vari tipi di sensori, posti su aerei o satelliti, vengono quindi progettati in modo da rilevare le informazioni solo all'interno di queste finestre atmosferiche.

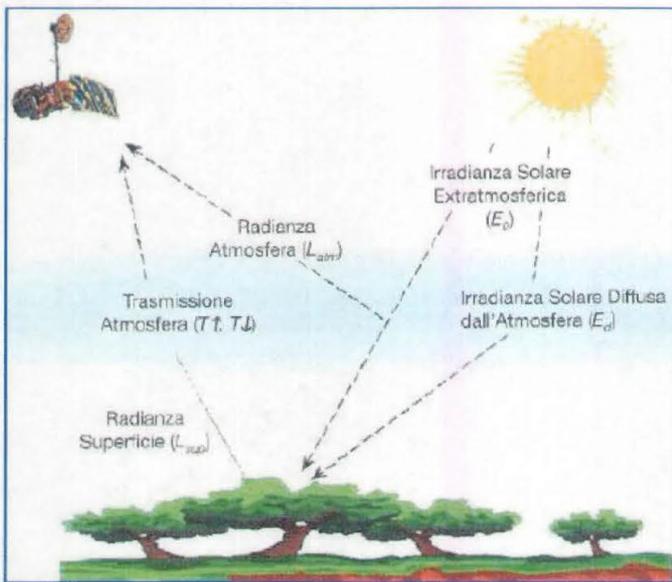


Fig. 5.3 Energia elettromagnetica recepita dai sensori di un satellite

L'energia elettromagnetica (fig. 5.3) rilevata dal sensore viene trasformata in un segnale elettrico e trasferita in file di dati digitali o raccolti in formato analogico su film fotografico (a seconda che si impieghino tecnologie non fotografiche o fotografiche). A questo punto i dati registrati su nastro o riprodotti su pellicola (foto aeree) sono pronti per essere analizzati ed interpretati. La restituzione delle informazioni può

avvenire sotto forma di tabelle o di mappe tematiche che possono poi essere utilizzate secondo le finalità prescelte dagli utenti.

### 5.1 Tipi di sensori utilizzati nel telerilevamento

Storicamente il primo sensore capace di utilizzare la radiazione elettromagnetica (nel visibile) per raccogliere informazioni sulle caratteristiche del terreno è stata la camera fotografica; la sua prima applicazione nel contesto del telerilevamento avvenne a bordo di aerei per la produzione di carte topografiche (Gomasasca, 2001). In seguito si iniziarono ad effettuare riprese fotografiche aeree con film sensibili all'infrarosso oppure applicando filtri sulle camere di ripresa in modo da osservare singole bande dello spettro visibile. Lo



Fig. 5.4 Sensori attivi e passivi.

studio delle applicazioni delle foto aeree allo spionaggio militare diede un forte impulso al filone della ricerca che pose le basi per il telerilevamento.

Ad ogni modo si può affermare che la nascita del telerilevamento moderno avvenne con il lancio del satellite Landsat 1, il 23 luglio 1972.

Nell'ambito degli strumenti (fig. 5.4) si

effettua un'ulteriore distinzione tra sensori passivi e attivi. I sensori passivi si limitano a registrare l'energia elettromagnetica emessa dal sole e riflessa, assorbita o trasmessa dalla superficie investigata. Tra questi ricordiamo le fotocamere, gli strumenti a scansione, le termocamere e le telecamere. I sensori attivi sono quelli che emettono radiazioni captandone il segnale di ritorno, come i radar o le camere fotografiche con flash.

### 5.1.2 Risoluzione degli strumenti

Ogni strumento è caratterizzato da diverse risoluzioni, legate alle diverse modalità di osservazione degli oggetti.

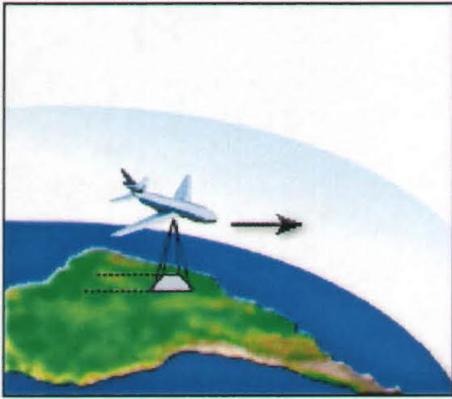


Fig. 5.5 Risoluzione spaziale di un sensore.

La **risoluzione spaziale** (o **geometrica**) è data dalla distanza tra il centro di due *pixel* (*picture elements* o elementi di immagine) adiacenti e viene definita dalla dimensione del *pixel* nella direzione nadirale. La dimensione del *pixel* dipende dall'angolo fra la direzione di osservazione e il piano tangente alla superficie terrestre. Il livello di definizione di un sensore aereo trasportato, che non vola a quota costante, dipende dall'apertura angolare

corrispondente a un *pixel* al nadir, chiamata campo di vista istantaneo (*Istantaneous Field of View*, IFOW), come si vede in fig. 5.5. Più in alto è posizionato il sensore rispetto alla superficie terrestre, maggiore sarà l'IFOW. La dimensione al suolo del *pixel* dipende dall'altezza di ripresa e dalle caratteristiche del sensore e può variare da meno di un metro fino a più chilometri. Ogni *pixel* è caratterizzato da due coordinate, che individuano la sua posizione nell'immagine.

La **risoluzione spettrale** corrisponde al numero di bande, cioè all'intervallo di lunghezze d'onda a cui è sensibile lo strumento, e alla loro localizzazione nello spettro. Ogni banda registra una specifica porzione dello spettro elettromagnetico e bande più strette hanno una maggiore risoluzione spettrale.

La **risoluzione radiometrica** è la minima energia elettromagnetica che il sensore è in grado di rilevare. È espressa mediante il numero  $k$  di bit utilizzati per memorizzare un singolo valore: è definita  $1/256$  nel caso di 8 bit,  $1/128$  per 7 bit,  $1/64$  per 6 bit, ecc. Esiste cioè un intervallo minimo di radianza che sta in un Numero Digitale (*digital number*

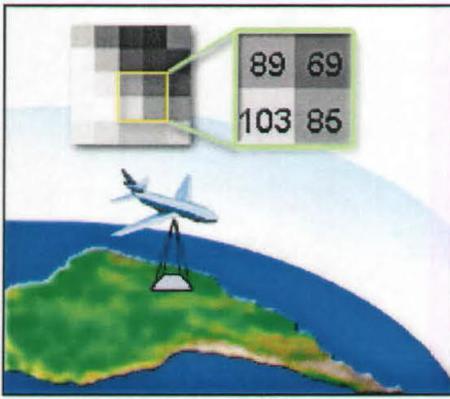


Fig. 5.6 Risoluzione radiometrica, es. di DN.

o DN). Questo DN rappresenta la quantità di radiazione elettromagnetica riflessa o emessa (nel caso della banda del termico) dalla particella del terreno ricevuta dal sensore ed è associato ad ogni *pixel* dell'immagine. Il DN è una grandezza di tipo discreto; per esempio se per misurare questa informazione si usasse un solo bit, si potrebbero rappresentare solo due livelli di radianza: 0 e 1, mentre con 8 bit si possono rappresentare 256

differenti livelli di intensità, da 0 a 255. Il valore del *digital number* è visualizzato con un tono di grigio, dove, nel caso di 8 bit, il valore minimo (0) è rappresentato dal colore nero e corrisponde a nessuna radiazione emessa o riflessa; il valore massimo (255) è indicato dal colore bianco e indica un'alta riflettanza (fig. 5.6).

Per **risoluzione temporale** si intende invece il periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive di una stessa area.

Per quanto concerne gli intervalli dello spettro elettromagnetico campionati da un sensore, esso può essere definito nel seguente modo:

- ottico: l'intervallo spettrale è compreso tra 0.38 e 1000  $\mu\text{m}$  (1 mm), associato al telerilevamento passivo;
- pancromatico: una sola banda che comprende di solito tutto il visibile ed eventualmente parte dell'infrarosso vicino;
- multispettrale: 2-9 bande spettrali;
- super-spettrale: 10-16 bande spettrali;
- iper-spettrale: > 16 bande spettrali;
- radar: intervallo delle microonde tra 1 mm e 1 m, tipico strumento di rilevamento attivo.

Ciò significa che per ogni ripresa di un sensore multi-, super- o iper- spettrale sono disponibili più immagini contemporanee e relative alla stessa scena; però ciascuna immagine contiene osservazioni su una diversa banda dello spettro (fig. 5.7).

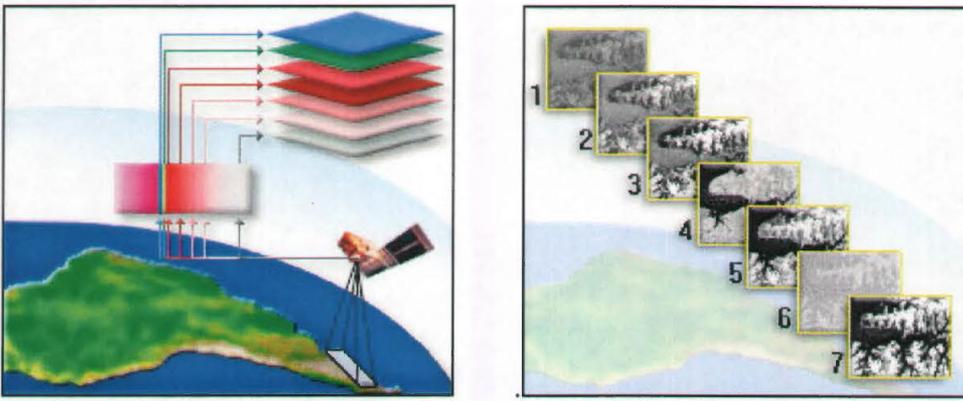


Fig. 5.6: Esempio di sensore multispettrale: bande di cui si compone un'immagine del satellite Landsat 5.

I campi di applicazione delle tecniche del telerilevamento sono molteplici (geologia, geodesia, archeologia, ingegneria ecc).

Le caratteristiche fondamentali che stanno alla base dell'utilità del telerilevamento come fonte di informazioni georiferibili sono:

- sinotticità: visione vasta di porzioni di territorio altrimenti non ottenibili con tecniche tradizionali;
- ripetibilità: osservazioni cicliche, o periodiche, di una data situazione territoriale che consentono confronti temporali;
- aggiornabilità dei dati raccolti;
- la multispettralità;
- l'economicità rispetto a tecniche tradizionali (es. uso del suolo e censimenti agricoli)

## 5.2 La firma spettrale

I sensori per lo studio delle risorse terrestri misurano l'energia riflessa e/o emessa dai vari corpi presenti al suolo; lo scopo del telerilevamento è quello di riuscire a stabilire una corrispondenza tra la quantità e la qualità dell'energia riflessa e/o emessa e la natura e lo stato dei corpi o delle superfici dai quali essa proviene, a seconda delle varie lunghezze d'onda. Le superfici non riflettono né emettono tutte le lunghezze d'onda allo stesso modo. Esse tendono ad assorbire certe lunghezze d'onda e a rifletterne altre.

La capacità che ogni oggetto ha di riflettere o emettere energia nelle diverse regioni o bande dello spettro costituisce la sua **firma spettrale**.

### 5.2.1 Caratteristiche spettrali della vegetazione

La vegetazione manifesta comportamenti spettrali specifici a diverse lunghezze d'onda producendo una firma caratteristica (fig. 5.7).

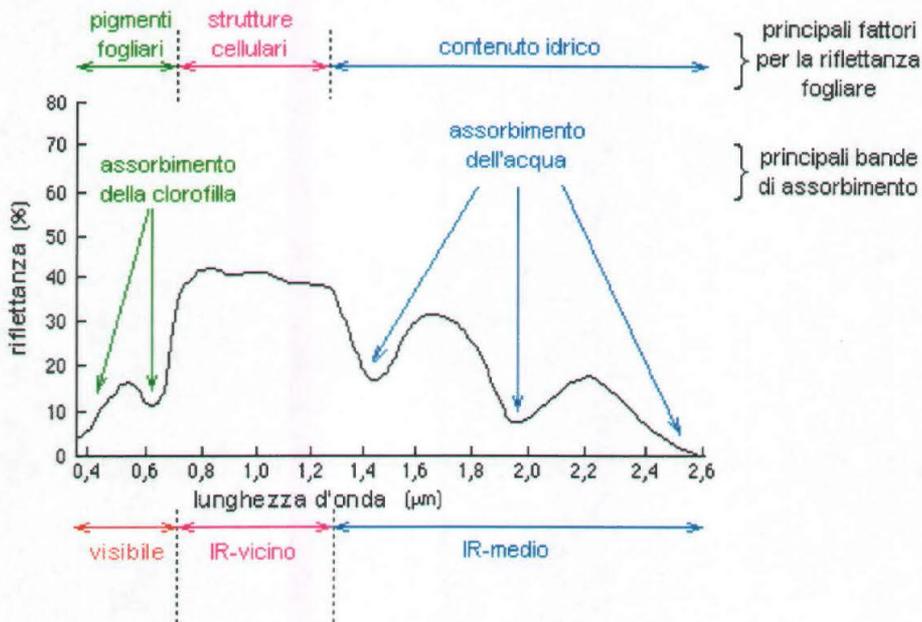


Fig. 5.7 Firma spettrale della vegetazione (mod. da Hoffer, 1978).

La curva di riflettanza può variare il suo andamento in funzione di molti fattori quali il tipo di vegetazione e la sua densità, lo stadio fenologico, lo stato fito-sanitario, il contenuto di umidità ecc.

Nelle bande del visibile (0,40-0,70 μm), l'assorbimento della luce ad opera dei pigmenti fogliari predomina sulla riflettanza. Ci sono due picchi d'assorbimento, nel blu (0,45 μm) e nel rosso (0,67 μm), in accordo con l'assorbimento dei due pigmenti principali, la clorofilla a e b, che rappresentano il 65% dei pigmenti totali delle piante superiori. La riflettanza ha invece un picco nella bande del giallo-verde (0,55 μm). Anche gli altri pigmenti hanno una certa importanza nella risposta spettrale delle foglie nel visibile. Il carotene è un pigmento di color giallo arancio che assorbe molto fra i 0,35-0,50 μm ed è responsabile del colore di alcuni fiori, frutti e delle foglie senza clorofilla. La xantofilla ha invece un colore rosso-blu, assorbe molto intorno ai 0,35-0,50 μm ed è responsabile del colore delle foglie quando cadono.

Nella regione dell'infrarosso vicino si osserva che la foglia assorbe poca radiazione elettromagnetica (10% max). In questa regione troviamo un tipico "plateau" di riflettanza, imputabile essenzialmente alle caratteristiche morfologico-strutturali del mesofillo fogliare

che determinano differenze negli indici di rifrazione tra citoplasma, parete, lamella mediana e spazi d'aria tra le cellule. Questa riflettanza dipende perciò dallo spessore relativo del mesofillo.

Infine, nell'infrarosso lontano, si ha assorbimento della luce da parte dell'acqua contenuta nella foglia, che dipende dalla struttura interna ed esterna, l'età, il contenuto idrico, lo stress e il vigore. Poiché l'acqua assorbe molto le radiazioni a 1.45, 1.95 e 2.50  $\mu\text{m}$ , queste lunghezze d'onda non possono essere utilizzate per misure di riflettanza. Nelle altre lunghezze d'onda dell'infrarosso lontano, la riflettanza aumenta quando il contenuto idrico fogliare diminuisce.

All'invecchiamento della pianta la riflettanza nell'infrarosso declina sensibilmente seguita poi da quella nelle bande del verde; la senescenza porta infatti al cambiamento del colore della foglia dovuto all'assenza dei cloroplasti.

### 5.3 Tecniche di elaborazione delle immagini

L'elaborazione delle immagini digitali implica la loro manipolazione e interpretazione con l'aiuto del computer. Le molteplici procedure applicabili nel trattamento delle immagini dal satellite possono essere riassunte in cinque categorie principali (Lillesand e Kiefer, 1994):

1. pre-elaborazione delle immagini (*preprocessing*). Le prime operazioni da effettuare sono quelle mirate alla correzione geometrica della distorsione dell'immagine, alla calibrazione radiometrica (o correzione atmosferica) e all'eliminazione del rumore presente nei dati. Lo scopo è di rendere l'immagine il più fedele possibile alla scena originale e di prepararla alle analisi successive.
2. miglioramento dell'immagine (*enhancement*). Le procedure di miglioramento hanno il fine di aumentare la quantità di informazioni che possono essere interpretate in modo visivo. Esistono per esempio procedure che cambiano il contrasto di un'immagine, come lo *stretching*, altre che prevedono la combinazione di più bande (come i *composite*) e anche operazioni che prevedono una trasformazione delle bande spettrali, come l'analisi delle componenti principali.
3. classificazione dell'immagine. In seguito alle tecniche visive di interpretazione delle immagini, si applicano tecniche quantitative che coinvolgono un'analisi multispettrale dei dati e l'applicazione di regole statistiche. Tali regole si possono basare

esclusivamente su informazioni della radianza spettrale, e allora si parla di classificazione spettrale, oppure su informazioni geometriche, come dimensione, pendenza, e quindi si ha una classificazione di tipo spaziale. In ogni caso lo scopo è di creare alcune classi, o temi, di copertura vegetale (*land cover*) e di determinare l'identità di ogni *pixel* dell'immagine. I dati classificati vengono usati per produrre mappe tematiche di copertura vegetale.

4. unione dei dati e integrazione con un G.I.S. Lo scopo dell'unione dei dati (*merging*) è di combinare i dati telerilevati di una data area geografica, con i dati di un G.I.S. che portano informazioni di vario tipo, sulla medesima area.
5. modellamento biofisico. L'obiettivo è di mettere in relazione i dati registrati con le tecniche di *remote sensing* con le caratteristiche biofisiche e con i fenomeni misurati sul terreno. Lo scopo di questa operazione è di simulare il funzionamento dell'ambiente e di predire il suo comportamento in condizioni alterate.

### 5.3.1 La correzione atmosferica o radiometrica.

Le correzioni di tipo radiometrico vengono normalmente eseguite per “ripulire” le immagini dagli effetti di disturbo esercitati dalla presenza dell'atmosfera. L'atmosfera influenza i dati telerilevati in due modi distinti: innanzitutto agisce come una barriera che, per fenomeni di assorbimento, smorza la propagazione delle onde elettromagnetiche, in secondo luogo, a causa del fenomeno di diffusione (*scattering*), agisce come una sorgente fittizia. Infatti, una parte della radiazione che viene diffusa, chiamata radiazione di percorso (*path radiance*), viene deviata dall'atmosfera direttamente al sensore senza fornire informazioni sugli oggetti al suolo. L'interferenza dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione e causa un effetto di foschia sull'immagine (Altobelli *et al.*, 2003). Questi fenomeni comportano un errore inevitabile nel valore della radianza registrato dal satellite. Infatti, se non ci fosse l'atmosfera, tutti i fotoni riflessi raggiungerebbero il sensore e la radianza misurata definirebbe la riflettanza reale della superficie terrestre, poiché dipenderebbe solo dalle proprietà di quest'ultima. La correzione atmosferica quindi è una tecnica di pre-elaborazione che serve a minimizzare l'effetto dell'atmosfera e a ricavare le reali riflettanze dell'oggetto.

### 5.3.2 La correzione geometrica.

La proiezione della superficie terrestre in un'immagine satellitare non può essere di tipo cartografico, a causa della rotazione terrestre, della curvatura della superficie, alle variazioni in altitudine e velocità della piattaforma dei sensori, a fenomeni di rollio e beccheggio, all'obliquità della scansione, alla distorsione panoramica ecc. Tali fattori producono una distorsione che necessita di essere corretta. È necessario allora eseguire un processo di correzione geometrica chiamato georeferenziazione.

La georeferenziazione è la procedura mediante la quale le entità spaziali di una rappresentazione geografica digitale, in formato *raster* (digitale) o vettoriale (linee, punti, oìpoligoni), vengono messe in relazione con le corrispondenti entità reali della superficie terrestre. La georeferenziazione consente perciò di inserire un'immagine in un sistema di riferimento geografico e chilometrico globale, indispensabile per la creazione di un GIS.

Per georiferire è necessario localizzare numerosi punti di controllo (*Grond Control Point* o GCP) con le coordinate reali, presenti sulla cartografia o su immagini della stessa area già georiferite. Punti tipici sono quelli che sono facilmente distinguibili nelle due immagini (quella non georiferita e quella georiferita), come gli incroci stradali, la pista dell'aeroporto o i maggiori corsi d'acqua ecc. La differenza tra la posizione dei GCP e la loro locazione nell'immagine satellitare da georiferire viene usata per determinare la trasformazione geometrica richiesta. I *pixel* originali sono ricampionati per eguagliare le coordinate corrette

### 5.3.3 Il miglioramento delle immagini

Per analizzare le immagini è spesso necessario effettuare una serie di trasformazioni volte a migliorare la percezione e l'individuazione di bersagli o categorie di oggetti. Una di queste tecniche è la creazione *color composite*: una funzione che consente la rappresentazione di immagini multispettrali, costituite da più bande, mediante la combinazione dei tre colori primari. Ad esempio, la composizione in colori reali (*true color*) si ottiene associando le banda del visibile blu,

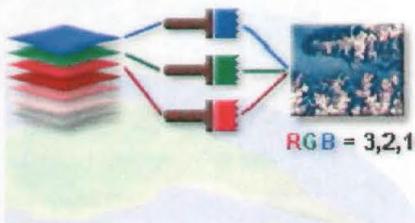


Fig. 5.8 Color composite a colori reali.

verde, rosso ai corrispettivi canali del monitor, quella

del rosso, verde, che rappresentano le tre bande del visibile, dà come risultato

un'immagine a colori reali assimilabile a quella delle foto aeree (fig. 5.8). Un altro esempio è la rappresentazione all'infrarosso in falsi colori convenzionale, che si ottiene assegnando la banda del verde al canale del blu, la banda del rosso al canale verde, e quella dell'infrarosso vicino o al rosso. In questo caso due gruppi di colori dominano le classi al suolo: i rossi, che rappresentano la vegetazione, e i grigio-marroni medi, posti soprattutto in corrispondenza dei versanti luminosi con esposizione al sole. Il mare è visualizzato in toni di blu scuro che, in prossimità della costa diventano più chiari. Le aree urbane sono in toni di blu-azzurro.

#### 5.3.4 L'integrazione nei Sistemi Informativi Geografici (G.I.S)

Spesso i dati telerilevati devono essere integrati con l'informazione cartografica e altri dati per poter essere informativi. Generalmente questi dati vengono registrati in forma di mappa, o *file* denominati *layers* ed integrati nel Sistema Informativo Geografico (*Geographic Information System*, GIS). Il GIS è un insieme di strumenti software e hardware per acquisire, gestire ed analizzare dati di natura geografica correlati tra loro poiché fanno tutti riferimento ad un sistema comune di coordinate (Aronoff, 1989).

Il GIS è quindi un metodo informatico per generare mappe, catalogare e analizzare aspetti, fenomeni e immagini del territorio. Attraverso le tecnologie GIS, in altre parole, è possibile studiare e rappresentare, sotto forma di tematismi sovrapponibili, una moltitudine di informazioni geografiche (vettoriali o *raster*) che, opportunamente collegate a una banca dati, permettono di effettuare analisi statistiche, generare mappe tematiche derivate, analizzare elementi grafici, o consentire valutazioni geo-ambientali altrimenti non ottenibili in tempi brevi. Questa particolare caratteristica fa delle tecnologie GIS il più potente mezzo di pianificazione e analisi di dati territoriali, per la simulazione di scenari ed eventi, per la previsione, controllo e pianificazione di strategie di sviluppo sostenibile. Ed inoltre, essendo i dati GIS georeferenziati, cioè connessi con lo spazio geografico cui si riferiscono, possono essere risolti, con efficienza ed impegno economico limitato, delicati problemi territoriali o prospettate soluzioni senza più ricorrere a complesse sovrapposizioni di mappe o consultazione di archivi cartacei o tavole slegate fra di loro.

## 5.4 Gli indici di vegetazione

Gli Indici di Verde (VI) derivano da una particolare combinazione di bande del satellite (differenza, somma e rapporto) per ridurre al minimo gli effetti, sulla risposta radiometrica della copertura vegetale, delle condizioni d'irradianza, delle variazioni delle proprietà ottiche del suolo, delle variazioni topografiche e degli effetti atmosferici.

Gli indici spettrali di vegetazione hanno una buona correlazione con i parametri associati allo stato di salute e alla produttività delle colture. Per calcolare tali indici vengono usate per lo più le bande del rosso, dell'infrarosso vicino (NIR) e/o l'infrarosso medio (MIR). Gli indici più sensibili alla radiazione fotosinteticamente attiva assorbita e che hanno più correlazione con la biomassa verde sono indici come l'NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*). La maggior o minore correlazione dei diversi tipi di indici di vegetazione dipendono dal tipo di vegetazione e dalla densità.

Gli indici di verde vengono classificati in tre gruppi principali, a seconda che essi siano basati:

- sulla distanza: indici basati su combinazioni aritmetiche tra bande;
- sulla pendenza: indici che prevedono il calcolo della pendenza della linea del suolo, derivante dalla combinazione delle bande del rosso e dell'infrarosso vicino, il cui valore risultante viene poi combinato con due bande spettrali;
- sulle trasformazioni ortogonali: basati sulla de-correlazione tramite ortogonalizzazione di un set di bande spettrali.

Gli indici più comunemente usati sono quelli appartenenti al primo gruppo e prevedono la combinazione tra la banda del rosso (correlata con l'assorbimento della luce da parte della clorofilla) e la banda dell'infrarosso vicino (legata alla densità della vegetazione verde). Tali bande contengono più del 90% delle informazioni sulla copertura vegetale e, inoltre, in esse è massimo il contrasto tra il suolo e la vegetazione.

Il primo indice utilizzato è stato il *Simple Ratio (SR)*, di cui si riporta la formula (Jordan, 1969):

$$SR = \frac{NIR}{red} \quad (5.1)$$

dove: NIR è la riflettanza nella banda dell'infrarosso vicino

red è la riflettanza nella banda del rosso

Questo indice ha il pregio di esaltare certe caratteristiche spettrali della curva della vegetazione consentendo di separare la risposta della stessa (valori elevati di DN) da quella del suolo (valori bassi di DN).

L'indice usato più comunemente è l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), che si ottiene dall'espressione (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (5.2)$$

L'NDVI ha come intervallo di valori [-1, +1]: normalmente, i valori inferiori allo zero identificano corpi d'acqua, i valori intorno allo zero identificano il suolo nudo e quelli tra 0 e +1 identificano la vegetazione. Quanto più il valore di NDVI è elevato, tanto maggiore è la biomassa verde in quel punto.

Un indice molto simile al precedente è l'IIR (*InfraRed Index*) che prende in considerazione la banda dell'infrarosso medio (MIR) al posto della banda del rosso (Hardinsky *et al.*, 1983). Questo consente di avere utili informazioni sullo stress idrico e quindi sulla vigoria della vegetazione, in virtù del fatto che la banda del MIR è legata ad un picco di riflettanza dell'acqua. Esso è dato dalla seguente formula:

$$IIR = \frac{NIR - MIR}{NIR + MIR} \quad (5.3)$$

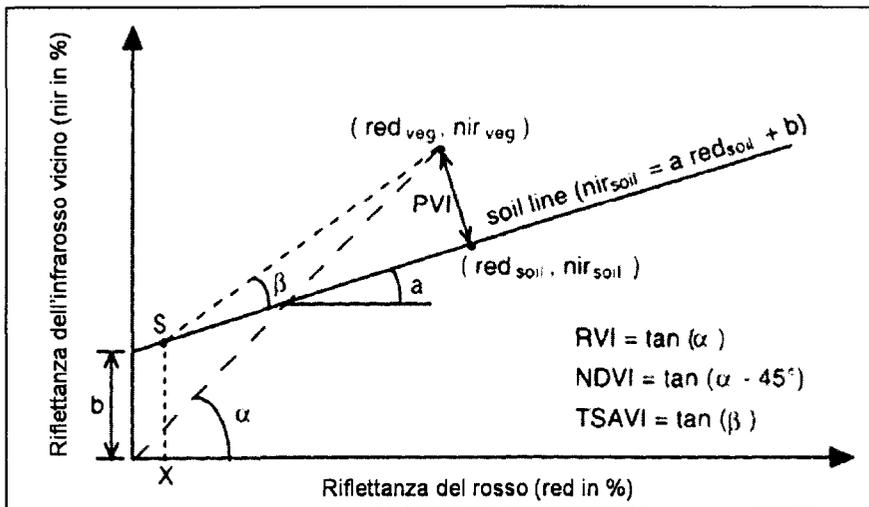


Fig. 5.9. Relazione geometrica tra RVI (altro nome per l'PSR), NDVI, PVI e TSAVI (mod. da Baret *et al.*, 1989).

Poichè gli indici precedenti non minimizzano gli effetti ottici del suolo sulla riflettanza della copertura vegetale, Richardson e Wiegand (1977) hanno proposto il *Perpendicular Vegetation Index* (PVI), definito come distanza ortogonale tra un punto, posto nello spazio

bidimensionale delle bande del rosso e dell'infrarosso vicino, dalla cosiddetta linea del suolo (*soil line*, fig. 5.9).

$$PVI = ((red_{soil} - red_{veg})^2 + (NIR_{soil} - NIR_{veg})^2)^{1/2} \quad (5.4)$$

dove:  $red_{soil}$  e  $NIR_{soil}$  sono la riflettanza del suolo nel rosso e nel NIR

$red_{veg}$  e  $NIR_{veg}$  sono la riflettanza della vegetazione nel rosso e nel NIR

Huete (1988) propose successivamente il *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), descritto dalla seguente formula:

$$SAVI = \frac{NIR - red}{NIR + red + L} * (1 + L) \quad (5.5)$$

dove  $L$  è un fattore determinato empiricamente per minimizzare l'effetto del suolo.

Negli anni fu ulteriormente migliorato nel *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* (TSAVI) (Baret *et al.*, 1989).

Liu ed Huete (1995) svilupparono un nuovo indice per ottimizzare i segnali della vegetazione, minimizzando il disturbo del *background* e dell'aerosol. L'equazione è la seguente:

$$EVI = G * \frac{NIR - red}{L + NIR + C_1 * red - C_2 * blue} \quad (5.6)$$

dove  $L$  è il termine di correzione del *background* (sottobosco, lettiera, suolo ecc.) della copertura vegetale (e della neve che determinano la diversa trasmittanza nel NIR e nel rosso attraverso la vegetazione;  $C_1$  e  $C_2$  sono i coefficienti di correzione dell'aerosol, che usano la banda del blu per correggere gli effetti dell'aerosol nella banda del rosso;  $G$  è il *Gain Factor*. I coefficienti correntemente usati sono:  $L=1$ ,  $C_1=6$ ,  $C_2=7.5$ ,  $G=2.5$ . L'EVI è più sensibile degli altri indici ai parametri strutturali della chioma, il tipo di copertura, la fisionomia e l'architettura delle piante. Inoltre, in accordo con Dong *et al.* (2003), l'NDVI satura nel caso di coperture vegetali molto dense, come ad esempio nelle foreste pluviali tropicali, quindi Boegh *et al.* (2002) suggerisce l'utilizzo dell'EVI che ha una maggior capacità di registrare le variazioni del LAI di vegetazioni con alta densità.

Nel caso in cui una foresta sia molto aperta, il sottobosco diventa un importante aspetto della riflettanza misurata dal satellite, che può influenzare in modo considerevole il confronto con i dati di LAI. Chen *et al.* (2002) indicano la possibilità dell'utilizzo dell'indice *Reduced Simple Ratio* (RSR), espresso dalla seguente formula:

$$RSR = \frac{NIR}{red} \left( 1 - \frac{SWIR - SWIR_{min}}{SWIR_{max} - SWIR_{min}} \right) \quad (5.7)$$

dove NIR, red, SWIR sono la riflettanza rispettivamente del NIR, nel rosso e nella banda del SWIR.  $SWIR_{min}$  e  $SWIR_{max}$  sono il valore minimo e massimo della riflettanza nel SWIR trovati in ogni immagine. I vantaggi dell'utilizzo di questo indice, rispetto l'SR, sono:

1. la differenza tra i diversi tipi di copertura è molto ridotta così che l'accuratezza dei dati di LAI per tipi di copertura misti può essere migliorata
2. l'influenza del *background* è soppressa, in quanto la banda dello SWIR è molto sensibile alla quantità di vegetazione contenente acqua liquida presente nel *background*. Quindi la sensibilità ai cambiamenti di LAI è maggiore dal momento che l'influenza del verde del background è ridotta.

Per questa tesi di dottorato sono stati applicati gli indici NDVI (sulle immagini MIVIS, Landsat e MODIS), RSR (sulle Landsat) e EVI (sulle MODIS).

## 5.5 I diversi tipi di sensori

Nella tab 5.1. sono elencati alcuni dei sensori satellitari attualmente in orbita, con le loro caratteristiche spettrali, spaziali, temporali e radiometrica, nonché l'ampiezza della scansione.

Tab. 5.1 Descrizione di alcuni tipi di sensori satellitari.

	bande spettrali	Nadir IFOV	ampiezz a scansione	ciclo di ripetizione	Bit per pixel
NOAA/ AVHRR	Red- IR-TIR	1 Km	2700 Km	2 volte/giorno	16 MS, 8 NDVI
MODIS Terra	blue- red-IR-	250 m (bands 1-2) 500 m (bands 3-7)	2300 Km	1 - 2 giorni	16
Aqua	TIR	1000 (bands 8-36)			
Landsat TM	VIS- IR-TIR	30m MS, 120m TIR	185 Km	16 giorni	8
Landsat ETM+	VIS- IR-TIR PAN	30m MS, 120m TIR, 15 m PAN	185 Km	16 giorni	8

SPOT	VIS-	20m MS, 10m	60 Km	26 giorni	8
	IR-PAN	PAN			
ERS1/2	C-	30 m	100 Km	35 giorni	16 - 8
	band				
Ikonos	VIS-	4m MS, 1m PAN	11 Km	2.9 giorni	11 Km
	IR-PAN				
QuickBird	VIS-	2,44 m MS, 0,61 m	16.5 Km	2° la lat.	11 Km
	IR-PAN	PAN			

Qui di seguito verranno descritti in modo più dettagliato i sensori satellitari (MODIS Terra, Landsat) e il sensore aerotrasportato (MIVIS) utilizzati per questa tesi.

## 5.6 Il satellite MODIS

Il sensore MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*), in fig.5.10, fu installato



Fig. 5.10 Il satellite MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) (da <http://www.thic.org/>).

a bordo del satellite Terra (EOS AM-1), mandato in orbita dall'*Earth Observing System* il 18 dicembre 1999. Successivamente, il 4 maggio 2000, fu lanciato il secondo sensore MODIS integrato sul satellite Aqua (EOS PM-1). Questi due satelliti hanno un'orbita circolare, sub-polare ed elio-sincrona, discendente per il Terra e ascendente per l'Aqua, che ha un'altezza di 705 km, con un'ampiezza di scansione (*swath*) di 2330 km (*cross track*) per 10 km (lungo la traiettoria al nadir). Questi strumenti offrono due coperture globali ogni uno-due giorni dei fenomeni oceanici, atmosferici e terrestri, dando un contributo decisivo alla disponibilità di dati scientifici di pubblico dominio.

Il sensore MODIS fornisce dati con un'alta sensibilità radiometrica (12 bit) in 36 bande spettrali con lunghezze d'onda da 0.4 fino a 14.4  $\mu\text{m}$ : 11 nel visibile, 9 nel NIR, 4 nel MIR, 6 nel TIR e 6 nel infrarosso lontano. Le prime due bande sono acquisite alla risoluzione

nominale di 250 m, le successive 5 bande alla risoluzione di 500 ed infine le ultime 29 bande hanno una risoluzione di 1000 m.

### 5.6.1 Caratteristiche delle 36 bande del sensore MODIS

Le prime 7 bande (620-2155 nm) sono dedicate allo studio del suolo e cadono principalmente nel dominio del visibile e dell'infrarosso vicino. La prima corrispondente al rosso dà indicazioni sul contenuto di clorofilla; la terza, nel blu, permette di rilevare possibile informazioni riguardanti differenze di vegetazione; la quarta, nel verde, permette di evidenziare caratteristiche di vegetazione sana; le rimanenti, che cadono nel dominio dell'infrarosso vicino, contribuiscono ad evidenziare proprietà e differenze nella struttura del suolo. Misurano in genere radiazione riflessa con una larghezza di banda da 20 a 40nm.

Le bande dalla 8 alla 16 (405-877 nm) sono dedicate allo studio del mare e sue caratteristiche. Tali bande sono molto più strette delle precedenti circa 10-20nm e permettono di rilevare informazioni sulla clorofilla (9-11), sui sedimenti (12-13). La banda 14, molto stretta (10nm), è dedicata a misure di fluorescenza della clorofilla. Misurano radiazione riflessa e cadono nel visibile e infrarosso. La risoluzione spaziale è a 1km;

Le bande dalla 17 alla 36 (890nm-14.385  $\mu\text{m}$ ) sono dedicate principalmente allo studio dell'atmosfera (alcune utilizzate anche per misure al suolo) e permettono di ricavare informazioni sulla concentrazione di aerosol e loro proprietà (17-19), sulla temperatura di superficie del mare (banda 20) e delle nuvole (22-23), su proprietà delle nuvole e loro altezza, bande (33-36), sulla concentrazione di ozono (banda 30). La banda 26 è dedicata allo studio dei cirri. La larghezza di tali bande risulta molto stretta ed opportunamente combinate tra loro permettono di ottimizzare l'estrazione di informazioni su parametri che riguardano il monitoraggio della superficie terrestre e dell'atmosfera a livello globale. Nella tabella 5.2 sono elencate le applicazioni principali delle 36 bande del MODIS con la lunghezza d'onda di ciascuna banda (in  $\mu\text{m}$ ).

Tab. 5.2 Descrizione delle 36 bande del MODIS: lunghezza d'onda (in  $\mu\text{m}$ ) e principali applicazioni (modificato da <http://daac.gsfc.nasa.com>)

BANDA	Lunghezza d'onda	Applicazioni principali
1	0.620-0.670	limiti della terra, delle nuvole, dell'aerosol
2	0.841-0.876	
3	0.459-0.479	proprietà della terra, delle nuvole, dell'aerosol

4	0.545-0.565		
5	0.1230-0.1250		
6	0.1628-0.1652		
7	0.2105-0.2155		
8	0.405-0.420		colore dell'oceano, fitoplancton, biogeochimica
9	0.438-0.448		
10	0.483-0.493		
11	0.526-0.493		
12	0.546-0.556		
14	0.662-0.672		
15	0.743-0.753		
16	0.862-0.877		
17	0.890-0.920	vapor acqueo atmosferico	
18	0.931-0.941		
19	0.915-0.965		
20	3.660-3.840	temperatura della superficie terrestre e delle nuvole	
21	3.929-3.989		
22	3.929-3.989		
23	4.020-4.080		
24	4.433-4.498	temperatura atmosferica	
25	4.482-4.549		
26	1.360-1.390	vapor acqueo delle nuvole (specialmente cirri)	
27	6.535-6.895		
28	7.175-7.475		
29	8.400-8.700	proprietà delle nuvole	
30	9.580-9.880	ozono	
31	10.780-11.280	temperatura della superficie terrestre e delle nuvole	
32	11.770-12.270		
33	13.185-13.485	altezza del limite superiore delle nuvole	
34	13.485-13.785		
35	13.785-14.085		
36	14.085-14.385		

## 5.6.2 I prodotti del MODIS

Il trattamento dei dati avviene per fasi di processamento che dal livello 0 (archiviazione del dato grezzo e delle informazioni associate) passa al livello 1A e 1B. Il livello 1A contiene i dati georiferiti sulla superficie terrestre e non calibrati; i prodotti 1B sono il risultato dell'applicazione di funzioni di calibrazione che permettono la creazione del set di bande spettrali e informazioni da utilizzare per le elaborazioni successive. I prodotti di livello 2 derivano dall'applicazione di algoritmi sviluppati dalla NASA DAAC (*Distributed Active Archive Center*). Esistono 44 prodotti distinti in 5 temi. Essi sono:

### Calibrazione:

- MOD 01 – Livello 1A valori radiometrici
- MOD 02 – Livello 1B valori radiometrici georiferiti
- MOD 03 – set di dati per il georiferimento

### Atmosfera:

- MOD 04 – aerosol
- MOD 05 – colonna di vapor acqueo
- MOD 06 – copertura nuvolosa
- MOD 07 – profili atmosferici
- MOD 08 – valori atmosferici
- MOD 35 – maschera nuvolosa relativa alla copertura

### Terra:

- MOD 09 – riflettanza superficiale
- MOD 11 – temperatura ed emissività terrestre superficiale
- MOD 12 – copertura terrestre/cambiamenti della copertura terrestre
- MOD 13 – indici di vegetazione (NDVI massimo ed MVI integrato)
- MOD 14 – anomalie termiche e incendi
- MOD 15 – LAI e FPAR
- MOD 16 – evapotraspirazione
- MOD 17 – attività fotosintetica e produttività primaria
- MOD 43 – riflettanza superficiale
- MOD 44 – cambiamenti della distribuzione della vegetazione

### **Criosfera:**

- MOD 10 – copertura nevosa
- MOD 29 – copertura glaciale marina

### **Oceano:**

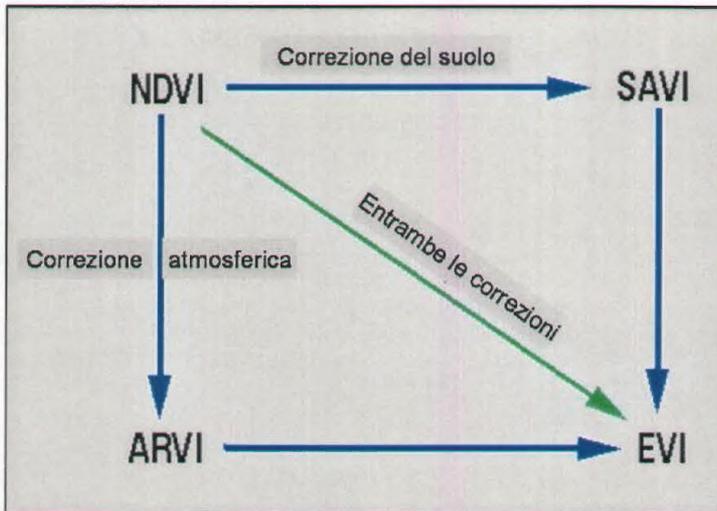
- MOD 18 – valori di radianza normalizzata proveniente dall'acqua
- MOD 19 – concentrazione del pigmento clorofilliano
- MOD 20 – fluorescenza della clorofilla
- MOD 21 – concentrazione della clorofilla a
- MOD 22 – radiazione fotosinteticamente attiva (PAR)
- MOD 23 – concentrazione del particolato sospeso
- MOD 24 – concentrazione della materia organica
- MOD 25 – concentrazione dei coccoliti
- MOD 26 – coefficiente di attenuazione dell'acqua dell'oceano
- MOD 27 – produttività primaria dell'oceano
- MOD 28 – temperatura superficiale marina
- MOD 31 – concentrazione di ficoeritrina
- MOD 36 – coefficiente di assorbimento totale
- MOD 37 – proprietà dell'aerosol dell'oceano
- MOD 39 – radianza normalizzata proveniente dall'acqua trasparente

I prodotti MODIS utilizzati per questa tesi di dottorato sono il MOD13 e il MOD15.

### **Il prodotto MOD13.**

Il prodotto MOD13 è quello che contiene gli indici di vegetazione NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e l'EVI (*Enhanced Vegetation Index*). Hanno una risoluzione spaziale di 250 m, di 500 m o di 1 km ed una risoluzione temporale di 16 giorni o 1 mese.

Entrambi gli indici sono in grado di stimare la densità della vegetazione, basandosi sui dati forniti dal MOD09 e dal MOD12. Sia l'NDVI che l'EVI presentano dei risultati che vanno da -1 a +1: i valori negativi indicano assenza di vegetazione, mentre quelli positivi indicano una quantità di vegetazione elevata. Tra i due, l'EVI è il più preciso, grazie all'algoritmo che corregge le distorsioni nella luce riflessa. Queste distorsioni sono causate dalle particelle dell'aria e dalla risposta del suolo al di sotto della vegetazione (fig. 5.11).



### Il prodotto MOD15

Il prodotto MOD15 contiene informazioni su altri parametri biofisici tra i quali il LAI (*Leaf Area Index*) ed il FPAR (*Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation*). Le immagini hanno una risoluzione spaziale di 1 km ed una

risoluzione temporale o di un giorno o di 8 giorni. Questi dati derivano dal prodotto della riflettanza superficiale MOD09, dal prodotto della *land cover* MOD12 e da informazioni ancillari sulle caratteristiche della superficie come il tipo di copertura del suolo e il background. L'algoritmo del MODIS per il LAI-FPAR è basato sulla teoria del trasferimento tridimensionale della radiazione (Mynemi *et al.*, 2002).

L'indice dell'area fogliare (LAI) è definito come l'area di un lato delle foglie per unità di area del suolo, l'indice della frazione di radiazione fotosinteticamente attiva (FPAR) misura la porzione di radiazione assorbita dalla vegetazione nelle lunghezze d'onda fotosinteticamente attiva dello spettro (0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ). Il FPAR è in relazione non lineare con il LAI. I valori di LAI sono compresi tra 1 e 8, mentre quelli di FPAR sono compresi tra 0.0 e 1.0. Il LAI ed il FPAR sono variabili biofisiche che descrivono la struttura della chioma e sono correlati ai tassi di energia dei processi funzionali della vegetazione ed alle variazioni della biomassa. Il LAI e l'FPAR sono usati per calcolare la fotosintesi, l'evapotraspirazione e la produzione primaria netta (NPP). Sono essenziali per il calcolo dei bilanci energetici terrestri e della biogeochimica dell'acqua e del carbonio, con riferimento alla vegetazione.

### 5.6.3 Procedura di acquisizione dei dati

Fra i principali aspetti che hanno contribuito al successo dei dati MODIS ci sono la disponibilità dei dati, che sono scaricabili gratuitamente al sito

<http://modis.gsfc.nasa.gov/>, e i tipi di prodotto forniti con un vasto servizio di supporto. La procedura di acquisizione dei dati è la seguente:

- registrazione al sito <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>, cliccando su “Become a registered user” (fig.5.12);

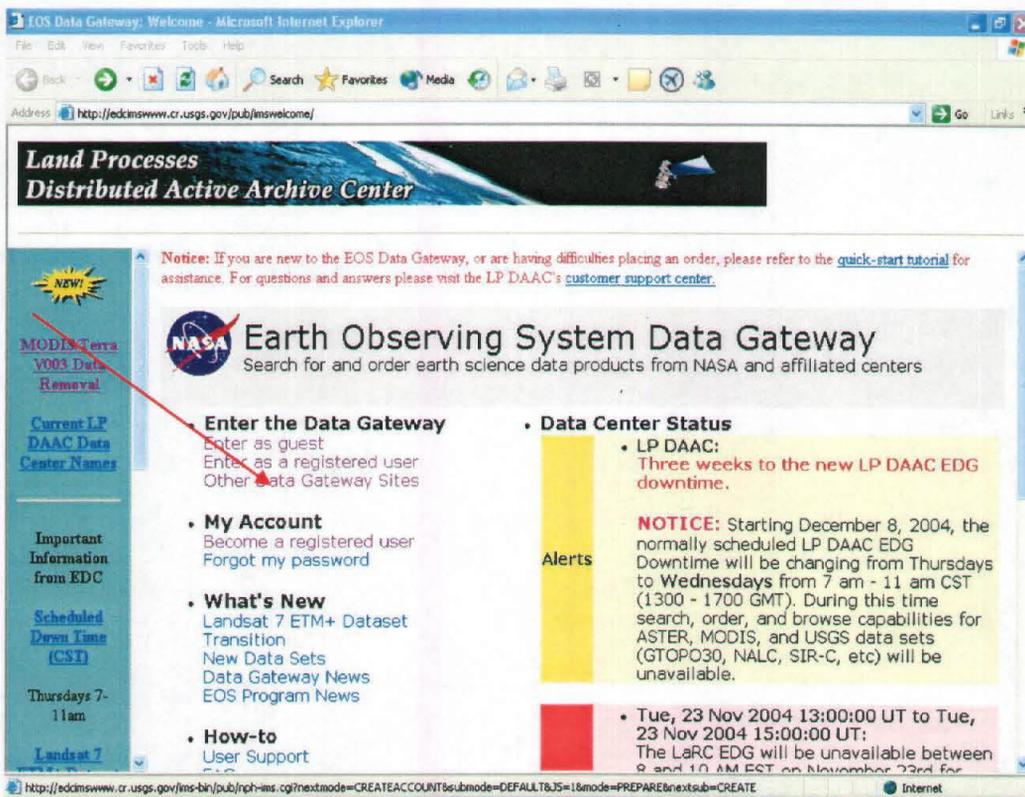


Fig. 5.12 Sito da cui scaricare le MODIS (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>)

- scelta del tipo o dei tipi di prodotto a cui si è interessati a seconda del campo di cui ci si occupa (atmosfera, terra, oceani ecc.) e della risoluzione temporale (1 giorno, 8 giorni, 16 giorni) e spaziale (1 km, 500 m, 250 m) necessaria;
- selezione della data di acquisizione delle immagini (opzionale) e della zona di interesse inserendo le coordinate in latitudine e longitudine;
- visualizzazione della schermata in cui sono indicati tutti i “granuli” (insieme di dati corrispondenti a 5 minuti di ripresa lungo l’orbita) disponibili soddisfacenti le richieste dell’utente;
- controllo della copertura nuvolosa. I dati MODIS contengono una valutazione di questo parametro;

- selezione di un'immagine e controllo della copertura della strisciata del satellite (fig. ), cliccando su *Show map coverage*;

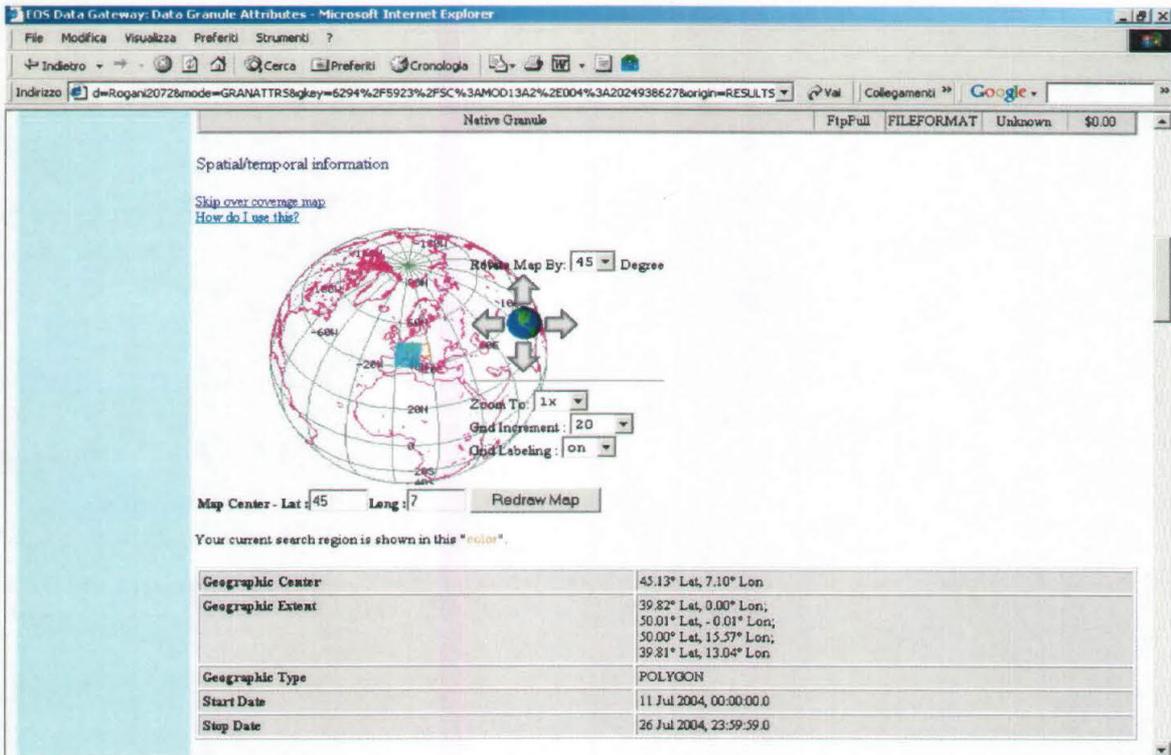


Fig. 5.13 Consultazione in *preview* della strisciata del satellite (da <http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

- selezione delle immagini e ordinazione, mediante inserimento dei propri dati.  
Ogni granulo è indicato con una serie convenzionale di lettere e di numeri, come si può vedere in fig. 5.14.

**MOD13A1.A2003161.h11v05.004.2003183014032.hdf**

Nome abbreviato del prodotto: MOD per il Terra/MODIS, MYD per l'Aqua/MODIS

Risoluzione Spaziale (in generale)

A2=1km  
A1=500m  
Q1=250m

Data di acquisizione: anno, giorno dell'anno

Localizzazione orizzontale e verticale dell'unità spaziale (SIN tile)

Versione del processamento

Data del processamento

Formato del file

Fig. 5.14 Descrizione del nome convenzionale del file dell'immagine MODIS.

Dopo aver effettuato l'ordine, la NASA invia un e-mail con i dati del sito FTP da cui è possibile scaricare le immagini entro 48 ore dal primo accesso.

I dati vengono forniti in formato HDF-EOS (*Hierarchical Data Format – Earth Observing System*), che consiste in un archivio di dati relativi all'immagine ed altri dati alfanumerici. Nei prodotti MODIS, infatti, ad ogni grandezza è associato un indice di qualità (*quality flag*) in 4 livelli, funzione di vari fattori (ad es. qualità della calibrazione, presenza di superficie emersa, efficacia delle correzioni atmosferiche, presenza di nuvole, angolo di ripresa).

### 5.6.4 MODIS *Reprojecting Tool* (MRP)

Una volta scaricate le immagini è necessario innanzitutto riproiettarle dal sistema di proiezione sinusoidale (SIN) con il quale vengono fornite, al proprio sistema (es. UTM; Gauss Boaga ecc.). Per effettuare questa procedura si utilizza il MODIS *Reprojection Tool* (MRT) che è un software gratuito che gira sulle principali piattaforme, da Linux a Windows ecc, scaricabile al sito del *USGS EROS Data Center MODIS Reprojection Tool* (<http://ede.usgs.gov/programs/sddm/modisdist/index.shtml>).

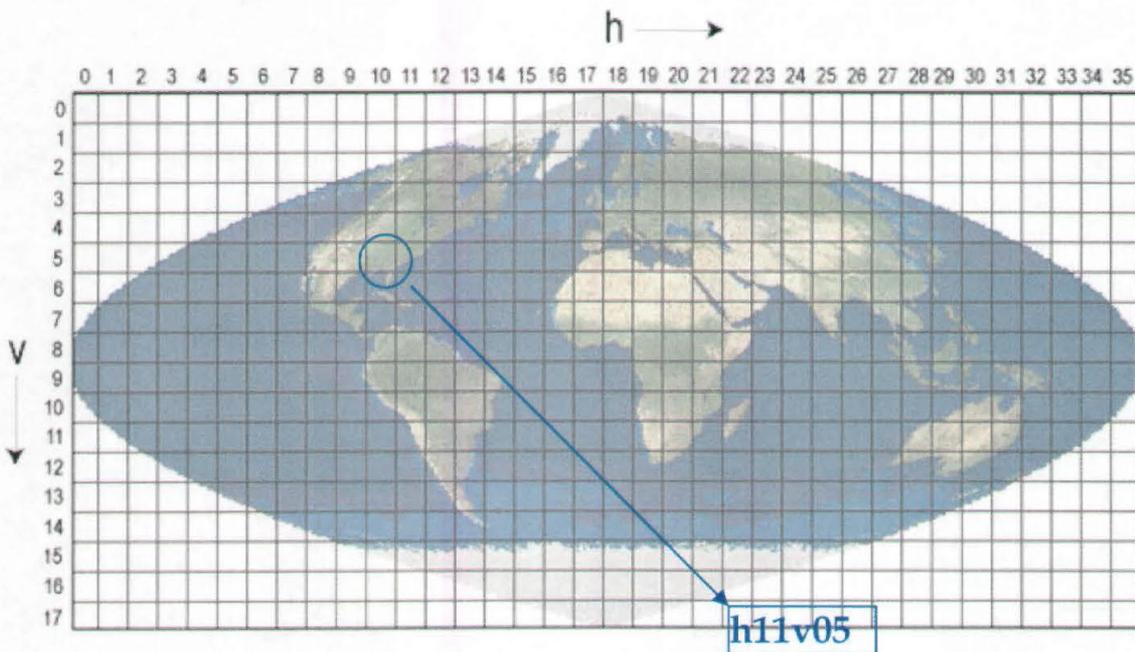


Fig. 5.15 Proiezione sinusoidale con il reticolo di  $10^\circ$  per  $10^\circ$ .

La proiezione sinusoidale di Sanson-Flamsteed, usata dal MODIS, è una proiezione non conforme geografica equivalente, poiché mantiene inalterate le aree del globo terrestre. I paralleli sono rettilinei orizzontali, a distanza costante e reale, mentre i meridiani sono curve sinusoidali, tranne quello centrale che è rettilineo, con angoli sempre più acuti man mano che ci si allontana dal meridiano centrale.

Un sistema reticolare è usato poi per suddividere il globo terrestre in quadrati (*tile*) di 10 gradi per 10 gradi all'equatore. Il sistema di coordinate di questi quadrati inizia a (0,0), nell'angolo in alto a sinistra, dove il primo numero rappresenta il numero orizzontale (h), il secondo quello verticale (v), la numerazione poi procede verso destra per il numero orizzontale e verso giù per il numero verticale (Fig. 5.15).

La trasformazione da una proiezione ad un'altra prevede l'impiego di tre algoritmi di riconversione:

- prossimo più vicino (*the nearest neighbour*): il nuovo numero digitale DN è dato dal numero digitale del *pixel* che ha le coordinate di riga e colonna più vicine alle coordinate X, Y, (reali) ottenute dalla trasformazione geometrica;
- convoluzione bilineare: il nuovo valore è definito dalla media pesata dei valori di un intorno costituito dai 4 *pixel* più vicini, con modifica quindi dei valori di radianza originali
- convoluzione cubica: il nuovo numero digitale è assegnato sulla base di una valutazione dei 16 *pixel* più vicini, con anche in questo caso modifica dei valori di radianza.

Se lo desidera, l'utente può riproiettare solo una porzione dell'immagine (*spatial subsetting*) e solo le bande selezionate (*spectral subsetting*). I formati dei file in uscita sono il GeoTiff, l'HDF-EOS e il formato binario (*raw binary*), che sono supportati dalla maggior parte dei software di elaborazione delle immagini satellitari.

Nella fig. 5.16 è rappresentata l'interfaccia del programma *MODIS Reprojecting Tool 3.1*.

La proiezione utilizzata per effettuare tutte le rielaborazioni in questa ricerca è la Gauss-Boaga (datum: roma 1940, ellissoide: international 1924) per quanto riguarda il Friuli Venezia Giulia, e il Corrego Alegre (UTM, zona 24, emisfero sud) per quanto riguarda il Brasile. Nella figura 5.17 sono rappresentati i parametri di proiezione introdotti per il Gauss Boaga.

Per le immagini del Brasile è stato sufficiente inserire tre parametri:

long/z: -39.00

lat/z: 0.00

zona: 24

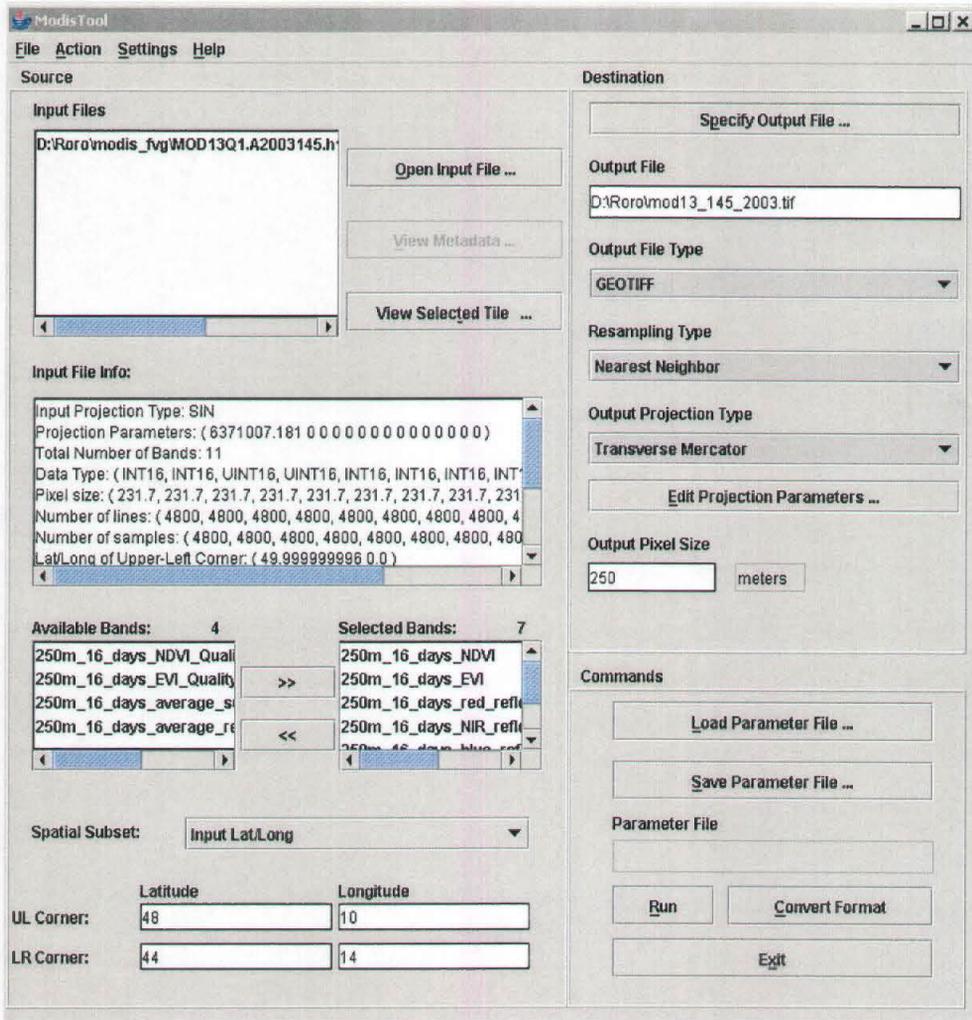


Fig. 5.16 Interfaccia del Modis Reprojecting Tool 3.1.

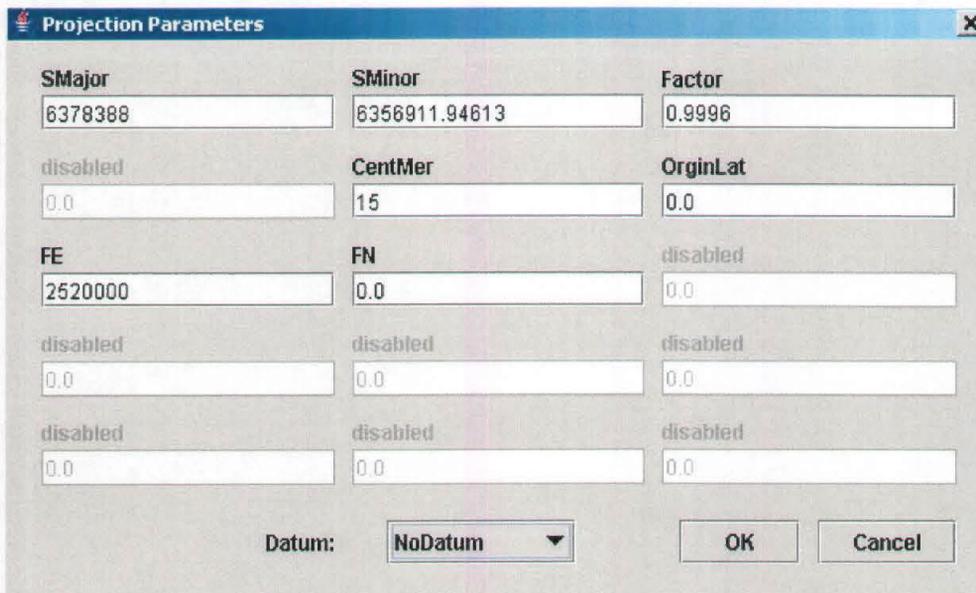


Fig. 5.17 Parametri di proiezione del Gauss Boaga.

## 5.7 I satelliti LANDSAT

Il termine Landsat si riferisce sia al programma della NASA per lo studio delle risorse terrestri mediante l'uso di satelliti artificiali, sia al nome della serie dei satelliti dedicati a questo programma.

I primi tre utilizzavano la stessa piattaforma e lo stesso carico utile costituito dai sensori MSS (*Multispectral Scanner System*) e RBV (*Return Beam Vidicon*). A partire dal Landsat 4 il sensore RBV è stato sostituito dal TM (*Thematic Mapper*); quindi nella missione fallita del Landsat 6 si è passati all'*Enhanced Thematic Mapper* (ETM) e infine, nel Landsat 7, all'*ETM+* diventato operativo e disponibile nell'autunno del 1999 (tab. 5.3).

Tab.5.3 Le missioni Landsat e i loro sensori.

Satellite	In orbita da	a	sensori
Landsat 1	23 luglio 1972	6 gennaio 1978	MSS, RBV
Landsat 2	22 gennaio 1975	25 febbraio 1982	MSS, RBV
Landsat 3	5 marzo 1978	31 marzo 1983	MSS, RBV
Landsat 4	16 luglio 1982	luglio 1995	MSS, TM
Landsat 5	1 marzo 1984	...	MSS, TM
Landsat 6	5 ottobre 1993	perso in lancio	ETM
Landsat 7	15 aprile 1999	...	ETM+

Per questa tesi sono state utilizzate sia le immagini del Landsat 5 che del Landsat 7 ETM+. Il Landsat 5 presenta un'orbita vicino polare ( $9^{\circ}\text{N}$ ), circolare ed eliosincrona, procede cioè di pari passo con la rotazione terrestre e questo gli permette di attraversare

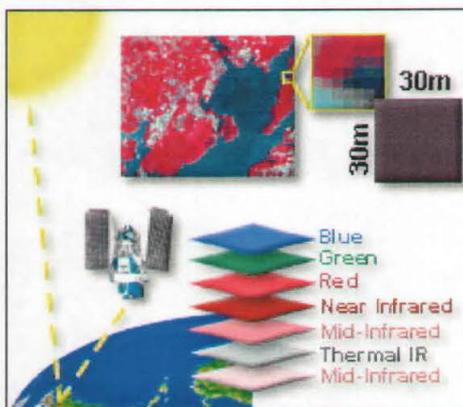


Fig. 5.18 Il sensore TM del satellite Landsat.

l'equatore ogni giorno alla stessa ora solare. La sua orbita, compiuta ad un'altezza di 705 km, è anche ripetitiva: rileva la stessa area della superficie terrestre ( $185 \times 185 \text{ Km}$ ) ogni 16 giorni effettuando ogni giorno 14,5 orbite con un periodo di 98,9 minuti (Lillesand e Kiefer, 1994).

Il sensore montato è il *Thematic Mapper* che consente l'acquisizione in sette diverse bande spettrali. 3 nel visibile, 1 nell'infrarosso vicino (NIR), 2 nell'infrarosso medio (MIR) e una in quello termico (TIR), quindi ha una risoluzione

spettrale che va da 0.45 a 12.5  $\mu\text{m}$  (fig. 5.18). La risoluzione geometrica è pari a: 30 m per le bande dalla 1 alla 5 e per la banda 7, mentre è di 120 m per la banda 6 nell'infrarosso termico. Il sensore TM, inoltre, è caratterizzato da una risoluzione radiometrica di 256 DN, tramite una quantizzazione del segnale su scala di 8 bit. I segnali vengono raccolti da 16 rilevatori per ognuna delle bande (tab. 5.4).

Da questi dati possono essere estratte informazioni non solo di tipo quantitativo (valore radiometrico, misure di superficie), ma anche qualitativo (stress ambientale, umidità del suolo, ecc.), tramite tecniche di trattamento e analisi numeriche. Le caratteristiche delle 7 bande del sensore e le loro principali applicazioni sono riassunte in tabella

Tab 5.4. Caratteristiche delle bande del satellite Landsat 5 TM (da Dermanis & Biagi, 2002).

Banda TM	GSD (m)	lunghezza d'onda ( $\mu\text{m}$ )	Possibilità applicative
1 (blu)	30	0.45-0.52	Massima penetrazione nell'acqua, per studi di batimetria. Discriminazione fra suolo nudo e vegetazione.
2 (verde)	30	0.52-0.60	Misura il picco di riflessione nel verde della vegetazione e il suo vigore.
3 (rosso)	30	0.63 - 0.69	Stima dell'assorbimento della clorofilla. Discriminazione tra le varie tipologie vegetazionali e tra queste e suolo nudo.
4 (NIR)	30	0.76-0.90	Studi della biomassa e sulla quantificazione del contenuto idrico della vegetazione. Delimitazione dell'interfaccia acqua e suolo
5 (MIR)	30	1.55-1.75	Riflettività della vegetazione influenzata dal contenuto d'acqua. Discriminazione tra nuvole e manto nevoso. Identificazione dell'umidità del suolo.
6 (TIR)	120	10.40-12.50	Monitoraggio della vegetazione sotto stress. Stima della temperatura superficiale. Localizzazione di attività geotermiche e determinazione di fonti di calore inquinanti.
7 (MIR)	30	2.08-2.35	Identificazione litotipi per ricerche minerarie e petrolifere, in particolare rocce soggette ad alterazioni idrotermali

Il sensore ETM+ ha più o meno le stesse caratteristiche del TM, però la risoluzione spaziale della banda 6 è di 60 m, anziché di 120 m, ed è presente anche una banda pancromatica (0.52-0.90  $\mu\text{m}$ ) con 15 m di risoluzione.

## 5.8 Il sensore aerotrasportato MIVIS

Il AA 5000 MIVIS DAEDALUS (*Multispectral Infrared Visible Imaging Spectromer*) è uno scanner iperspettrale aerotrasportato di proprietà del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.), montato su un aereo CASA 212/C, operativo dal 1994 (fig. 5.19). Il termine iperspettrale si riferisce alla molteplicità di canali (102) di registrazione a intervalli di lunghezza d'onda relativamente stretti.



Fig. 5.19 Piattaforma aerea CASA 12/C (da: [www.iaa.cnr.it/iaa/images/storia/Foto15e.jpg](http://www.iaa.cnr.it/iaa/images/storia/Foto15e.jpg))

Le caratteristiche tecniche dello strumento sono riassunte in tab. 5.5.

Tab. 5.5 Caratteristiche tecniche dello strumento MIVIS (mod. da: [www.sensytech.com/Imaging/MIVIS.html](http://www.sensytech.com/Imaging/MIVIS.html)).

102 bande spettrali
Copertura spettrale compresa tra 0,43 e 12,7 $\mu\text{m}$
2 corpi neri selezionati a meno di 15°C e più di 45°C rispetto alla temperatura ambiente
Registrazione spaziale delle bande con un <i>Field Stop</i> ottico (IFOV) di 2,0 mrad
<i>Field OfView digitalizzato</i> 71,1°
Velocità rotazionali di scansione: 25, 16,7, 12,5, 8,3 e 6,25 scan/sec.
Scena ripresa per linea di scansione pari a 755 <i>pixel</i>
Controllo computerizzato in tempo reale della qualità dei dati
Digitalizzazione dei dati in 12 bit per <i>pixel</i>
Ampio <i>range</i> dinamico: massima temperatura della scena 1200°C
Sistema PAS ( <i>Position and Attitude Sensor</i> ): GPS, giroscopio, <i>flux gate compass</i>
Interfaccia operatore attraverso un <i>Touch Screen Display</i> con menù operativi

Il MIVIS è costituito da cinque distinte componenti chiamate sottosistemi (fig. 5.20):

- Testa di scansione e spettrometro. La testa di scansione è costituita da elementi ottici, dal motore che controlla la scansione e da due corpi neri di riferimento, calibrabili in funzione della temperatura ambiente. Tali componenti sono contenute all'interno di una struttura di acciaio e alluminio che scherma la radiazione ottica dispersa e fornisce l'interfaccia con lo spettrometro.

- Digitalizzatore. La funzione principale è quella di convertire i 102 segnali analogici in forma digitale a 12 bit, formattare questi dati e registrarli su supporto magnetico. Questo processo è sincronizzato con la rotazione dello specchio di scansione per mezzo di segnali inviati dal contatore ottico installato nel motore di scansione. Il digitalizzatore controlla anche il sistema PAS (*Position and Attitude Sensor*) e il ricevitore GPS.
- Distributore di alimentazione: svolge funzioni di conversione tra l'alimentatore dell'aereo e i restanti sottoinsiemi del MIVIS.
- *Moving Window Display* e *Monitor*. Il *Moving Window Display* contiene un monitor, un oscilloscopio digitale e un trasformatore di corrente; le sue funzioni sono controllate attraverso un menù di selezione disponibile all'operatore su un *Touch Screen display*.
- Registratore VLDS (*Very Large Data Store*). È un registratore digitale su nastro magnetico VHS, capace di memorizzare, a diverse velocità di scansione, una gran quantità di dati. I dati sono elaborati, archiviati e distribuiti dal sistema MIDAS (*Multispectral Interactive Data Analysis System*).

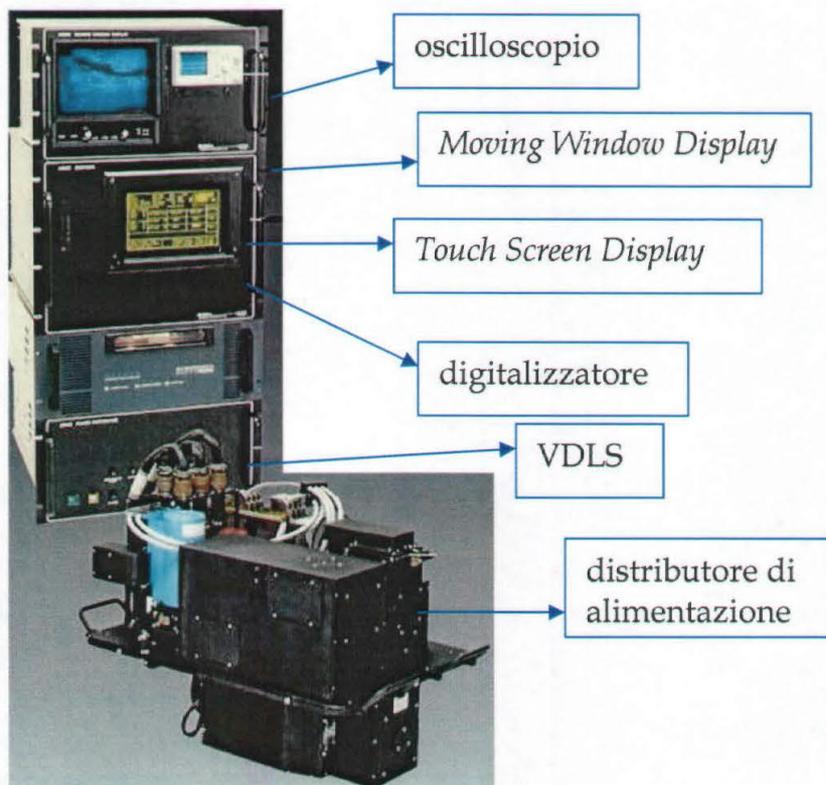


Fig. 5.20 Il sensore MIVIS (mod. da: [www.sensytech.com/Imaging/MIVIS.html](http://www.sensytech.com/Imaging/MIVIS.html))

Le immagini MIVIS sono generalmente fornite in scene di 512x755 pixel, dopo il processamento con il software MIDAS, in quattro possibili livelli:

1. livello 0: dato grezzo più informazioni ancillari sulle calibrazioni radiometriche e le correzioni geometriche;
2. livello 1: dati calibrati radiometricamente (radianza e temperatura), attraverso le informazioni ottenute dalle sorgenti di riferimento interne al sensore;
3. livello 2: dati corretti dagli effetti dell'atmosfera e calibrati radiometricamente; l'utente deve fornire elementi per la correzione del "cammino" di radianza (*path radiance*) e dell'irradianza solare;
4. livello 3: come i livelli 1 e 2, ma con la correzione geometrica delle distorsioni e dagli effetti dovuti alla variazione della piattaforma aerea per il roll e il beccheggio, mediante l'utilizzo del PAS.

Il dato sorgente viene, quindi, decommutato a terra utilizzando una stazione di decommutazione: in questa fase vengono eliminati eventuali rumori sistematici introdotti accidentalmente e il dato sorgente viene calibrato radiometricamente, utilizzando i dati provenienti dalle sorgenti di riferimento del sensore registrati durante il volo e i dati della calibrazione effettuata al banco di taratura prima delle riprese. Alla fine del processo si ottengono valori definitivi di radianza al sensore moltiplicati per il fattore  $10^9$  per registrare i dati in due bytes ed espressi in  $W\ cm^{-2}\ sr^{-1}nm^{-1}$  per le bande comprese tra 1 e 92; per i canali dal 93 al 102, i dati sono espressi in temperature al sensore moltiplicate per un fattore 10 ( $^{\circ}C$ ), calcolati con una interpolazione lineare tra i valori di riferimento dei due corpi neri.

### 5.8.1 Caratteristiche spettrali

Il MIVIS è uno strumento modulare costituito da 4 spettrometri che riprendono simultaneamente la radiazione proveniente dalla superficie terrestre nel visibile, nell'infrarosso vicino e nell'infrarosso termico. Il sensore è dotato di 102 canali, dei quali 20 riprendono nel visibile e nell'infrarosso vicino (spettrometro 1), 8 nell'infrarosso vicino (spettrometro 2), 64 nell'infrarosso medio (spettrometro 3) e 10 nell'infrarosso termico (spettrometro 4) per una copertura compresa tra 0.43 e 12.7  $\mu m$ . Nella tab. 5.6 sono riportati, per ciascuno dei quattro spettrometri, le bande spettrali, gli intervalli di frequenza (espressi in  $\mu m$ ) e le possibili applicazioni per le quali le diverse bande possono dare un contributo informativo. La scelta dei canali e delle bande è stata fatta in modo da poter soddisfare le esigenze di ricerca per applicazioni in discipline scientifiche che

utilizzano il telerilevamento, come la botanica, l'agronomia, la geologia, la pedologia, l'idrologia, l'oceanografia ecc.

Tab. 5.6 Caratteristiche spettrali delle bande del MIVIS e loro utilizzo (AA.VV., 2002)

Canaleo banda		Spettrometro 1
1	0,433-0,453	clorofilla in acqua
2	0,453-0,473	sostanza gialla in acqua
3	0,473-0,493	controllo inquinamento in acqua
4	0,493-0,513	studi geologici
5	0,513-0,533	sedimenti sospesi in acqua e controlli
6	0,533-0,553	sulle coste
7	0,553-0,573	sostanza organica nel terreno; inventario
8	0,573-0,593	forestale; studi sul fitoplancton
9	0,593-0,613	uso del suolo; presenza di clorofilla in
10	0,613-0,633	acqua; studi di mineralogia
11	0,633-0,653	mappe geologie
12	0,653-0,673	mappe geologie
13	0,673-0,693	tettonica; produttività del suolo;
14	0,693-0,713	studi sulle piogge acide
15	0,713-0,733	erosione
16	0,733-0,753	sedimenti sospesi in acqua
17	0,753-0,773	mappe geologie
18	0,773-0,793	inventario forestale
19	0,793-0,813	struttura della vegetazione
20	0,813-0,833	struttura della vegetazione
		<b>Spettrometro 2</b>
21	1,150-1,200	contenuto ferroso del terreno
22	1,200-1,250	contenuto ferroso del terreno
23	1,250-1,300	caratteristiche legate all'assorbimento di
24	1,300-1,350	ossigeno da parte del terreno
25	1,350-1,400	umidità dei suoli
26	1,400-1,450	umidità dei suoli
27	1,450-1,500	umidità dei suoli
28	1,500-1,550	umidità dei suoli
		<b>Spettrometro 3</b>
29 - 92	2,000-2,500	mappe geologie, studi di mineralogia,
(64 canali con ampiezza pari a 0,008 $\mu\text{m}$ )		litologia; studi sull'umidità del terreno, ecc.
		<b>Spettrometro 4</b>
93	8,200-8,600	controllo inquinamento termico
94	8,600-9,000	clorofilla in acqua
95	9,000-9,400	mappe degli incendi
96	9,400-9,800	mappe geologie
97	9,800-10,20	umidità del terreno
98	10,20-10,70	sedimenti sospesi in acqua; vapor d'acqua;
99	10,70-11,20	temperatura dell'acqua
100	11,20-11,70	ricerche sullo spandimento di olio
101	11,70-12,20	litologia
102	12,20-12,70	studi sulle piogge acide

La risoluzione spaziale del sensore è di 2 millirad e varia quindi in funzione dell'altezza della piattaforma: a 12.000 m, la risoluzione del *pixel* al suolo è pari a 24 x 24 m; la risoluzione aumenta progressivamente al diminuire della quota di ripresa, fino a essere pari a 2 x 2 m per un'altezza di 1000 m. (Pitea *et al.* 2002). L'alta risoluzione permette tipi

di indagini precluse ad altri sensori come la stima quantitativa di parametri funzionali della vegetazione quali la produttività primaria netta, il contenuto fogliare dei pigmenti fotosintetici, dell'amido, della lignina, dell'azoto, del carbonio e dell'acqua, ma anche della temperatura superficiale fogliare. Tali parametri possono essere usati come indicatori dello stato di salute degli ecosistemi naturali, quindi permettono di evidenziare eventuali stati di stress o d'alterazione ambientale.

Altre applicazioni di particolare interesse sono la determinazione delle coperture di cemento-amianto, l'analisi di siti adibiti a discarica, lo studio di zone paludose, lagunari e marine, l'attività dei vulcani e lo studio dei siti archeologici (Traviglia, 2005).

### 5.8.2 Caratteristiche della ripresa

Nel 2001 la Direzione Regionale delle Foreste e della Caccia ha commissionato al CISIG (Consorzio per l'Innovazione dei Sistemi Informativi dei Grandi sistemi fluviali) di Parma una serie di riprese sul Friuli Venezia Giulia (fig. 5.21, indicati in blu).

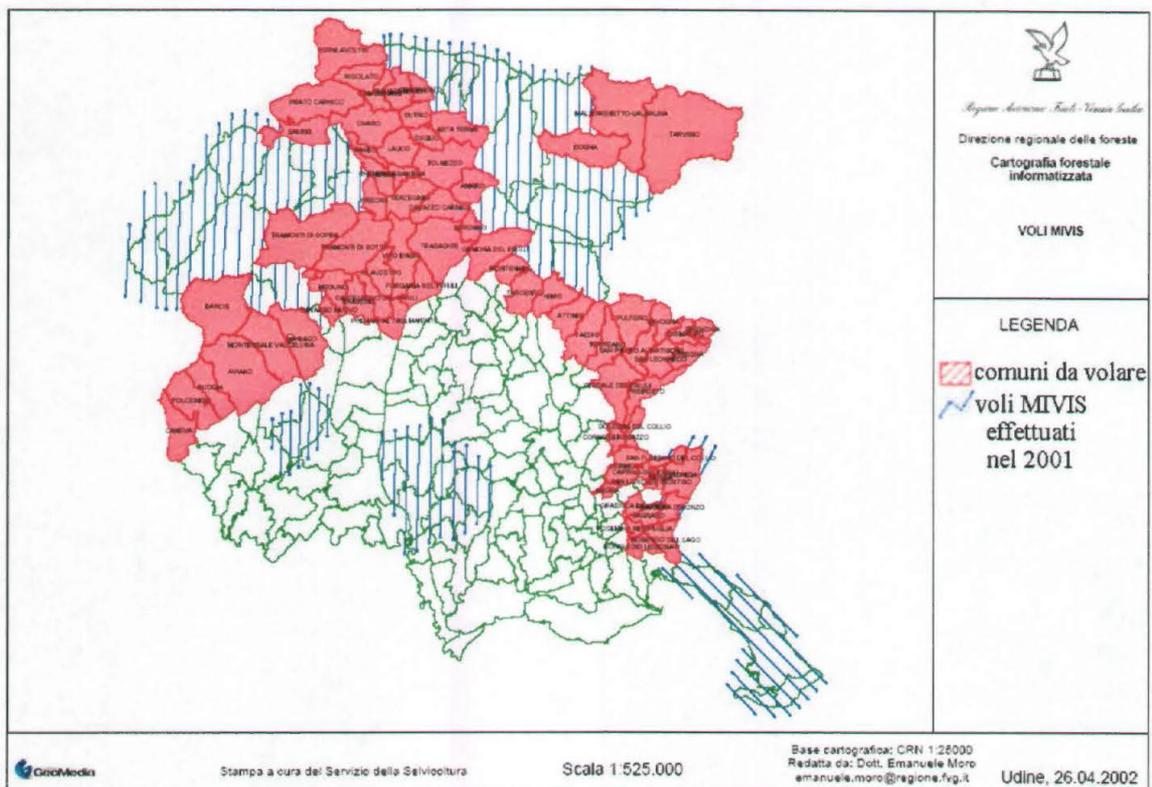


Fig. 5.21 I voli MIVIS effettuati nel 2001 (da: Direzione Regionale delle Foreste).

Il piano di volo è stato definito in modo da garantire una quota di volo relativa di 2000 metri sulle cime più alte; al fine di ottenere un *pixel* variabile tra 4 e 7 metri

rispettivamente sulle cime delle montagne e nei fondovalle mentre nelle aree di pianura il *pixel* è di circa 4 metri costanti lungo le strisciate di volo.

Le strisciate sono state orientate, dove possibile, in direzione nord-sud per ottimizzare l'area da coprire e garantire il minimo influsso dell'irraggiamento solare sui dati ripresi; sempre a tal fine, il periodo di volo è stato realizzato tra la tarda mattinata e il primo pomeriggio, in corrispondenza del massimo del carico solare.

### 5.8.3 Georeferenziazione

La difficoltà maggiore per la georeferenziazione dei dati MIVIS, così come per tutti i sensori a scansione, è data dalla presenza di una notevole distorsione geometrica, imputabile sia alla particolare modalità di ripresa, che alla naturale presenza di dislivelli tra le superfici indagate. Con l'utilizzo dei dati ancillari e attraverso una buona conoscenza dell'area non è però impossibile raggiungere l'obiettivo finale. Certamente le difficoltà ma soprattutto i tempi di realizzazione appaiono però molto rilevanti.

Per ridurre notevolmente i tempi è possibile effettuare la georeferenziazione attraverso l'utilizzo di un'ortofoto digitale o usando come base un modello digitale del terreno (DTM). Ad ogni modo per ottenere un risultato veramente buono è necessario utilizzare solo una piccola porzione dell'immagine, possibilmente centrale dove le distorsioni sono minime. Nel momento in cui si ha la necessità di studiare un'area vasta, come il Friuli Venezia Giulia, facendo un mosaico di immagini, ci si trova davanti a parecchie difficoltà: il dispendio notevole di tempo per georeferire una gran quantità di immagini e la difficoltà ad unirle a causa della poca sovrapposizione tra immagini adiacenti. Inoltre per riuscire a georeferire bene queste immagini è necessaria una buona conoscenza del territorio. In aree montane, infatti, in cui sono scarsi i punti di riferimento, se non si conosce bene l'area la georeferenziazione risulta parecchio complessa.

### 5.8.4 Elaborazione delle immagini

Anche per quanto riguarda l'elaborazione delle immagini sono stati riscontrati alcuni problemi. Programmi economici come GRASS 5.0 (*Geographical Resources Analysis Support System*) e Ilwis 3.2 hanno problemi a gestire le immagini MIVIS: nel primo caso importare tutte le bande e fare il *support* per ognuna di esse, comporta un notevole dispendio di

tempo; l'Ilwis 3.2 invece non permette l'utilizzo di alcune operazioni (come ad esempio la creazione dei composite), perché le immagini sono in 12 bit. Per poter fare tutte le operazioni con questo programma è necessario quindi riscaldare le immagini a 8 bit, perdendo delle informazioni preziose. Inoltre, il calcolo dell'indice NDVI con le bande originali e con le bande riscalate dà dei risultati completamente diversi, con uno spostamento dell'0.2 circa dei valori. Il programma Erdas 7.0 gestisce le MIVIS abbastanza bene, però è un programma piuttosto caro. Il programma migliore sembra essere l'ENVI di cui però non si è potuto usufruire per questa tesi di dottorato ed è anche abbastanza costoso. Un'altra nota da fare è sulla presenza di disturbi in alcune bande, tanto che alla fine per studiare la vegetazione si sono scelte solamente poche bande, più o meno le stesse di quelle che fornisce il satellite Landsat. Sicuramente per studi in cui viene utilizzato il TIR i risultati sono più soddisfacenti.

### 5.8.5 Scelta delle bande da utilizzare

Inizialmente, attraverso un'analisi di tutte le 102 bande, si sono individuate le bande più idonee allo scopo dello studio, attraverso un'analisi delle firme spettrali di alcune tipologie vegetazionali della provincia di Trieste (fig. 5.22). Le bande scelte sono la banda 2 (blu), la 6 (verde), la 13 (rosso), la 18 (NIR), la 23 (NIR), la 28 (NIR), la 64 (MIR) e la 93 (TIR). Le bande 13 e 18 sono quelle che si utilizzano per produrre l'NDVI. Le bande 13, 6, 2 vengono combinate per creare un *composite* a colori reali (assorbimento rosso e blu, piccolo riflettività verde); mentre le bande 18, 28 e 13 sono state utilizzate per un *composite* all'infrarosso a falsi colori (*plateau* massima riflettanza nel NIR, picco di assorbimento dell'acqua, picco relativo della clorofilla) indicato per le coperture vegetali e la discriminazione tra colture agrarie e vegetazione spontanea.

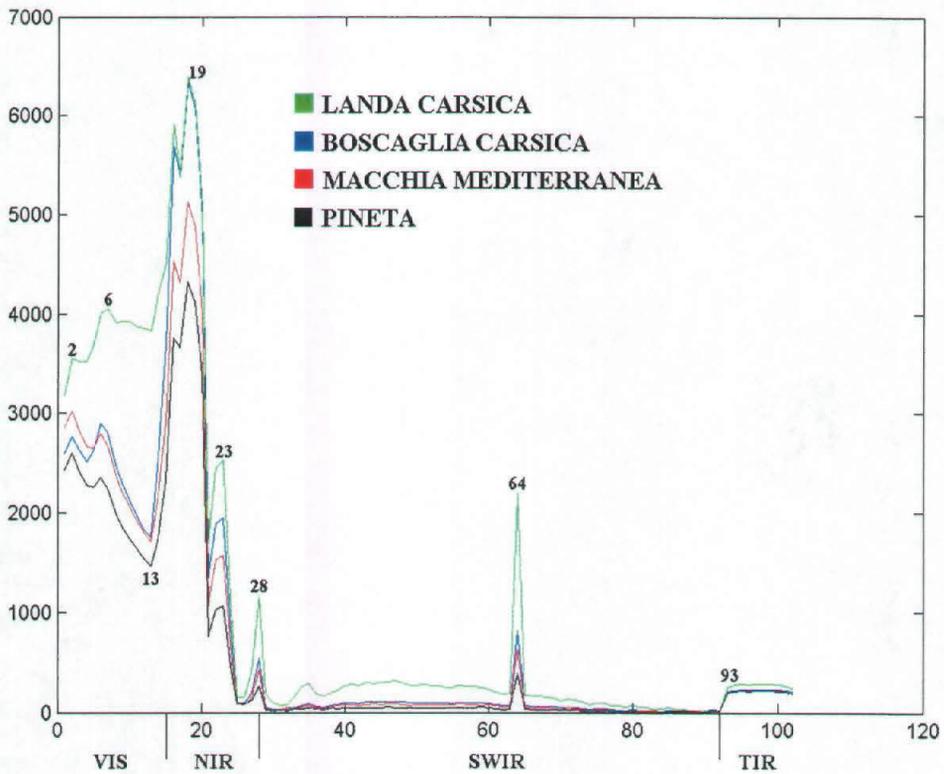


Fig. 5.22 Analisi delle firme spettrali di alcune tipologie vegetazionali con le 102 bande del MIVIS.

## 5.9 Dati satellitari utilizzati

Le immagini del satellite Landsat utilizzate per questo studio sono:

### Friuli Venezia Giulia

- Landsat 5 TM del 26/07/2001 (191/28 path/length) a 30 m
- MODIS, prodotto MOD13 (NDVI, EVI a 250 m):  
 MOD13Q1.A2003145.h18v04.004.2003172075845.hdf (da 25/5 a 9/6/2003)  
 MOD13Q1.A2004065.h18v04.004.2004089154103.hdf (da 5/3 a 20/3/2004)  
 MOD13Q1.A2004097.h18v04.004.2004116183432.hdf (da 6/4 a 21/4/2004)  
 MOD13Q1.A2004145.h18v04.004.2004165021152.hdf (da 24/5 a 8/6/2004)  
 MOD13Q1.A2004177.h18v04.004.2004202001329.hdf (da 25/6 a 10/7/2004)  
 MOD13Q1.A2004193.h18v04.004.2004216094936.hdf (da 11/7 a 26/7/2004)  
 MOD13Q1.A2004225.h18v04.004.2004245192957.hdf (da 12/8 al 27/8/2004)
- MIVIS del 2001 a 4-7 m.

### Brasile

- Landsat 7 ETM+ del 17/05/2002 (216/070 path/length) a 30 m

- MODIS, prodotto MOD 13 (NDVI, EVI a 250 m):  
MOD13Q1.A2003161.h14v10.004.2003184101004.hdf (da 10/6 a 25/6/2003)  
MOD13Q1.A2003177.h14v10.004.2003214051500.hdf (da 25/6 a 3/7/2003)
- MODIS, prodotto MOD 15 (LAI, fPAR a 1 km):  
MOD15A2.A2003169.h14v10.004.2003183130321.hdf (da 10/6 a 25/6/2003)  
MOD15A2.A2003177.h14v10.004.2003195001125.hdf (da 25/6 a 3/7/2003)

## 5.10 Integrazione dei dati di biomassa a terra e del telerilevamento

La stima della biomassa si può ottenere dal telerilevamento sulla base delle relazioni empiriche tra i parametri misurati a terra e gli indici di vegetazione ad essi correlati. I dati di biomassa (legnosa o verde) vengono usati come variabile indipendente, mentre gli indici di vegetazione, le bande del satellite, le misure di tessitura possono essere usati come variabili dipendenti. Per valutare la correlazione tra i due parametri si utilizzano diversi modelli di regressione: lineare, logaritmica, sigmoide ecc. Per ognuno di essi si calcola il coefficiente di Pearson ( $R^2$ ), che esprime la percentuale di varianza espressa dal modello di regressione scelto. Inoltre, si determina anche la significatività del risultato ottenuto ( $p < 0.05$ ). Per rispondere alla domanda “quanto è affidabile la relazione si analizza il valore di  $r$  che misura la proporzione della variazione della variabile dipendente  $y$  che viene spiegata utilizzando la variabile  $x$  e la retta di regressione. Ad es. se  $r = 0.8$  significa che approssimativamente il 66% della variazione dell'indice di vegetazione può essere spiegato da un modello lineare (o altro) utilizzando la biomassa (Middleton, 2004).

Una volta calcolata la retta (o curva) derivata dall'interpolazione lineare (o esponenziale ecc) dei punti, in cui sulle asse delle  $x$  è stato messo il LAI e su quello delle  $y$  l'indice di vegetazione, si ricava l'inverso di questa equazione. In questo modo si ottengono le formule per la creazione di una mappa di LAI dalle immagini satellitari, sulla base della risposta spettrale e delle misurazioni in campo. Ad esempio, nel caso di una relazione lineare si ha che:

$$NDVI = a * LAI + b$$

da cui si ricava:

$$LAI = (NDVI - b) / a$$

Una volta creata la mappa di LAI si può confrontare con quelle del satellite MODIS, la si può usare come input per dei modelli di produzione primaria o di fissazione del

carbonio ecc., permettendo agli studiosi di estendere le loro teorie dal livello della foglia al livello di paesaggio.

## 6. RISULTATI

### 6.1 I risultati ottenuti per il Friuli Venezia Giulia

#### 6.1.1 Le misure di LAI con il LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer*

Le misurazioni del LAI con il LAI-2000 sono state effettuate in 61 siti, in 14 classi di vegetazione diverse per un totale di 501 campionamenti puntuali. Generalmente le misurazioni sono state fatte lungo transetti di 50 m, con 10 misure distanti l'una dall'altra 5 metri. In alcuni casi, dove ciò non era possibile a causa di qualche ostacolo naturale o per conformità con la dimensione dei transetti in cui sono state fatte anche le misurazioni di biomassa legnosa con l'Università degli Studi di Udine (Valli del Torre, Paluzza e Pramasio), i transetti sono stati di 20 m (con 10 misurazioni ogni due metri). Solo nel caso della foresta Cecconi le misurazioni hanno seguito una procedura particolare a causa delle dimensioni ridotte delle particelle in cui sono state fatte le misure, come si può vedere nella figura 6.1, dove a sinistra è rappresentata la sequenza delle misure nella particella 26, suddivisa in 4 aree di 9x9 metri, e a destra quelli della particella 36 (18x18 metri).

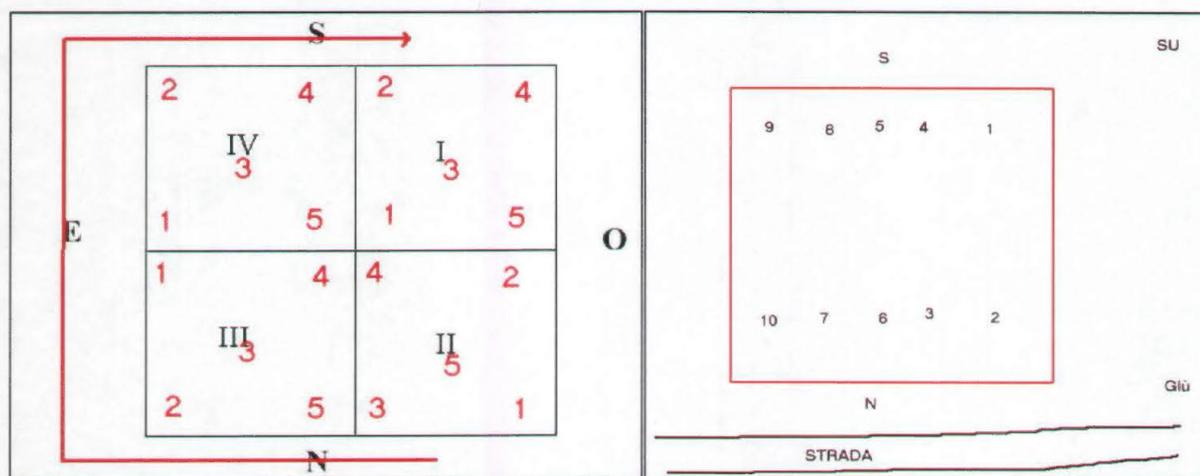


Fig. 6.1 Campagna di misure di LAI nella foresta Cecconi (particella 26 a sx, particella 36 a dx).

Nella tabella 6.1 sono riassunti i risultati delle misure di LAI, per transetto, con il **sel** (errore standard del calcolo del LAI) e il **difn**, cioè la frazione del cielo visibile dal sensore, che varia tra 0 (il cielo non è visibile dal sensore) e 1 (il sensore non vede la chioma, ma solo cielo).

Tab. 6.1. I risultati delle misure di LAI per ogni rilevamento effettuato.

località	classe	lai	difn	sel
Platischis	acero-frassineto	2,970	0,2060	0,08

Taipana	acero-frassineto	4,140	0,0260	0,10
San Leonardo	betuleto	3,140	0,0710	0,23
Ponte Clinaz	carpineto	5,560	0,0070	0,11
Prepotto	castagneto	4,350	0,0230	0,14
Prepotto	castagneto	3,730	0,0400	0,12
Ponte Clinaz	corileto	4,920	0,0160	0,15
Attimis	faggeta	4,900	0,0140	0,08
Monte S. Simeone	faggeta	5,380	0,0900	0,20
Monte S. Simeone	faggeta	4,430	0,0230	0,16
Monte S. Simeone	faggeta	5,170	0,0120	0,18
Monte S. Simeone	faggeta	4,640	0,0210	0,06
Monte S. Simeone	faggeta	4,140	0,0280	0,06
foresta del Cansiglio	faggeta	3,880	0,0400	0,16
foresta del Cansiglio	faggeta	4,530	0,0210	0,18
Foresta Cecconi	faggeta	4,130	0,0280	0,07
Foresta Cecconi	faggeta	4,260	0,0250	0,04
Foresta Cecconi	faggeta	4,196	0,0240	0,10
Foresta Cecconi	faggeta	4,185	0,0250	0,06
Platschis	faggeta	3,130	0,1390	0,19
San Nicolò	faggeta	4,750	0,0170	0,06
Campo di Bonis	neocolonizzazione	2,600	0,1030	0,14
bosco Cernizza	ostrio-lecceta	3,230	0,0660	0,09
bosco Cernizza	ostrio-lecceta	3,170	0,0720	0,14
bosco Cernizza	ostrio-lecceta	2,700	0,0960	0,14
bosco Cernizza	ostrio-lecceta	2,560	0,1250	0,16
monte Lanaro	ostrio-querceto	2,610	0,1190	0,09
monte Lanaro	ostrio-querceto	3,030	0,0780	0,05
monte Lanaro	ostrio-querceto	3,280	0,0610	0,09
Muggia	ostrio-querceto	3,320	0,0510	0,14
Muggia	ostrio-querceto	2,770	0,0800	0,31
Muggia	ostrio-querceto	3,320	0,0480	0,10
Muggia	ostrio-querceto	3,480	0,0800	0,31
Doberdò	ostrio-querceto	2,450	0,1340	0,05
Doberdò	ostrio-querceto	2,450	0,1340	0,05
prepotto	ostrio-querceto	3,480	0,0530	0,12
prepotto	ostrio-querceto	3,480	0,0530	0,12
foresta del Cansiglio	pecceta	2,840	0,1060	0,18
foresta del Cansiglio	pecceta	3,720	0,0500	0,05
Forni di Sopra	pecceta	3,081	0,0680	0,13
Paluzza	pecceta	3,640	0,0460	0,04
Paluzza	pecceta	3,540	0,0520	0,04
Paluzza	pecceta	3,080	0,0680	0,03
Paluzza	pecceta	2,910	0,0820	0,05
Pramosio	piceo-abieteto	3,85	0,0470	0,04
Pramosio	piceo-abieteto	3,55	0,0540	0,05
Pramosio	piceo-abieteto	3,31	0,0720	0,04
Pramosio	piceo-abieteto	3,49	0,0670	0,03
Forni di Sopra	piceo-faggeta	5,060	0,0130	0,09
Forni di Sopra	piceo-faggeta	3,890	0,0400	0,16
Forni di Sopra	piceo-faggeta	5,190	0,0110	0,13
Forni di Sopra	piceo-faggeta	5,230	0,0040	0,19
Forni di Sopra	piceo-faggeta	4,480	0,0220	0,12

Doberdò	pioppeto	2,880	0,1040	0,11
Caresana	rimboschimento	4,060	0,0300	0,12
monte Grisa	rimboschimento	1,350	0,3440	0,07
monte Grisa	rimboschimento	1,310	0,3710	0,08
monte Grisa	rimboschimento	1,830	0,2370	0,02
monte Grisa	rimboschimento	2,010	0,2130	0,13
bosco Farneto	rovereto	2,170	0,1570	0,04
Doberdò	saliceto	2,490	0,1140	0,08

Il software C2000 fornito con lo strumento permette di isolare ogni singola misura del transetto e di calcolarne il LAI, l'MTA (angolo medio di inclinazione delle foglie) e il DIFN (frazione di cielo coperta). Questo valore è stato poi confrontato con la misurazione ottenuta con la foto emisferica nel punto corrispondente (vedi capitolo 6.1.2).

I valori medi di LAI con la relativa deviazione standard per le diverse classi di vegetazione, sono riassunti in tabella 6.2.

Tab. 6.2 Valori medi di LAI misurati in campo con il LAI-2000.

classe	LAI	
	medio	dev std
acero-frassineto	3,56	±0,83
betuleto	3,13	±0,76
carpineto	5,56	±0,36
castagneto	4,04	±0,53
corileto	4,92	±0,51
faggeta	4,41	±0,68
neocolonizzazione	2,60	±0,44
ostrio-lecceta	3,02	±0,47
ostrio-querceto	2,99	±0,47
pecceta	3,26	±0,45
piceo-abieteto	3,55	±0,22
piceo-faggeta	4,94	±0,91
pioppeto	2,79	±0,43
rimboschimento	2,19	±1,31
rovereto	2,16	±0,12
saliceto	2,49	±0,28

La deviazione standard del rimboschimento è la più alta, perché nella stessa classe si fa la media tra due rimboschimenti molto diversi: nel rimboschimento di Monte Grisa (Trieste) sono presenti quasi esclusivamente pini neri, il rimboschimento di Caresana (San Dorligo della Valle) è invece un bosco misto, con una netta presenza di latifoglie.

Come suggerito da Fang *et al.* (2003) sono state fatte anche alcune campagne di misurazione prima della ricrescita delle foglie, in due tipi di bosco: l'acero-frassineto e la

faggeta, per valutare quanto la parte legnosa dell'albero influenza il valore di LAI. Il LAI medio misurato di inverno per l'acero-frassineto è di 0.26, quello della faggeta di 0.46.

### 6.1.2 Le misure di LAI con la fotografia emisferica

Le fotografie emisferiche sono state effettuate, in 9 classi di vegetazione diverse per un totale di 204 fotografie. Dato il maggior dispendio di tempo per realizzare le foto e la successiva elaborazione, normalmente sono state fatte dalle 3 alle 5 foto per transetto, anche se alcune volte, sono state fatte 10 foto. In ogni caso, comunque, esse sono state scattate negli stessi punti in cui si misurava il LAI con il LAI-2000, avendo cura di orientarli nella medesima direzione e di tenere gli strumenti alla stessa altezza (l'ombelico). I valori di LAI, di **grdcover** (grado di copertura) e di **vissky** (frazione di cielo visibile), ottenuti in seguito all'elaborazione con il *software* HemiView 2.1, per ogni fotografia, sono riassunti in tab. 6.3.

Tab. 6.3 Valori di LAI per ogni fotografia emisferica.

località	tipologia	data	lai_fe	grdcover	vissky
Platischis	acero-frassineto	02/06/04	2,008	0,598	0,154
Platischis	acero-frassineto	02/06/04	1,607	0,566	0,194
Platischis	acero-frassineto	12/08/04	5,658	0,852	0,029
Platischis	acero-frassineto	12/08/04	4,687	0,919	0,027
Platischis	acero-frassineto	12/08/04	4,371	0,897	0,029
Platischis	acero-frassineto	12/08/04	3,585	0,910	0,039
Platischis	acero-frassineto	12/08/04	3,243	0,952	0,035
Platischis	acero-frassineto	12/08/04	3,337	0,947	0,033
San Leonardo	betuleto	12/08/04	5,218	0,844	0,029
San Leonardo	betuleto	12/08/04	5,145	0,853	0,028
San Leonardo	betuleto	12/08/04	3,260	0,877	0,047
San Leonardo	betuleto	12/08/04	5,926	0,713	0,044
San Leonardo	betuleto	12/08/04	4,267	0,840	0,037
San Leonardo	betuleto	12/08/04	3,864	0,892	0,035
San Leonardo	betuleto	12/08/04	5,146	0,888	0,025
San Leonardo	betuleto	12/08/04	4,597	0,883	0,033
San Leonardo	betuleto	12/08/04	3,402	0,899	0,045
San Leonardo	betuleto	12/08/04	3,667	0,897	0,038
Ponte Clinaz	carpineto	13/08/04	3,156	0,939	0,038
Ponte Clinaz	carpineto	13/08/04	3,221	0,896	0,045
Ponte Clinaz	carpineto	13/08/04	4,298	0,952	0,019
Ponte Clinaz	carpineto	13/08/04	3,205	0,932	0,038
Ponte Clinaz	carpineto	13/08/04	3,808	0,928	0,029
Ponte Clinaz	carpineto	13/08/04	4,825	0,566	0,075
Prepotto	castagneto	12/08/04	4,742	0,935	0,021
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,957	0,940	0,026

Prepotto	castagneto	12/08/04	4,432	0,911	0,026
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,797	0,923	0,035
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,992	0,929	0,027
Prepotto	castagneto	12/08/04	2,923	0,920	0,050
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,412	0,911	0,040
Prepotto	castagneto	12/08/04	4,345	0,914	0,028
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,801	0,905	0,034
Prepotto	castagneto	12/08/04	5,456	0,840	0,036
Prepotto	castagneto	12/08/04	4,106	0,921	0,027
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,308	0,915	0,041
Prepotto	castagneto	12/08/04	6,457	0,803	0,034
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,449	0,909	0,042
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,795	0,874	0,045
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,676	0,888	0,038
Prepotto	castagneto	12/08/04	3,885	0,810	0,048
Ponte Clinaz	corileto	13/08/04	5,018	0,918	0,019
Ponte Clinaz	corileto	13/08/04	4,312	0,947	0,019
Ponte Clinaz	corileto	13/08/04	3,956	0,912	0,032
Ponte Clinaz	corileto	13/08/04	4,999	0,892	0,024
Ponte Clinaz	corileto	13/08/04	5,356	0,945	0,018
Platischis	faggeta	02/06/04	3,869	0,706	0,071
Platischis	faggeta	02/06/04	2,354	0,797	0,098
Platischis	faggeta	02/06/04	2,454	0,797	0,099
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	2,897	0,935	0,049
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	2,854	0,933	0,052
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	3,142	0,929	0,044
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	4,958	0,924	0,020
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	3,541	0,943	0,031
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	5,317	0,885	0,026
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	6,376	0,792	0,030
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	6,317	0,810	0,026
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	4,085	0,929	0,028
foresta del Cansiglio	faggeta	08/07/04	6,211	0,841	0,026
Attimis	faggeta	12/08/04	4,261	0,885	0,044
Attimis	faggeta	17/08/04	3,679	0,947	0,027
Attimis	faggeta	21/08/04	3,694	0,938	0,029
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,463	0,918	0,037
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,954	0,932	0,028
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	5,619	0,871	0,028
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,298	0,944	0,035
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	4,289	0,947	0,020
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	2,945	0,917	0,049
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,731	0,882	0,042
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,767	0,949	0,026
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,850	0,910	0,034
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,539	0,930	0,032
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	4,020	0,883	0,035
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,418	0,930	0,035
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	4,838	0,856	0,034
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,692	0,918	0,040
Monte San Simeone	faggeta	24/08/04	3,891	0,926	0,030

monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,810	0,801	0,076
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,791	0,551	0,113
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,139	0,710	0,122
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,090	0,734	0,124
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	3,092	0,260	0,126
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,789	0,863	0,064
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	3,074	0,363	0,116
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,135	0,588	0,149
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	1,867	0,736	0,143
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,382	0,846	0,086
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,620	0,888	0,066
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,114	0,765	0,118
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,306	0,820	0,096
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,395	0,472	0,144
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,523	0,729	0,102
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,676	0,822	0,075
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,965	0,791	0,070
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,815	0,726	0,087
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	3,968	0,737	0,058
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,074	0,772	0,118
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,736	0,546	0,118
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,505	0,838	0,081
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	3,278	0,760	0,071
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	3,141	0,002	0,129
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	3,604	0,647	0,079
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	2,602	0,812	0,081
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	1,974	0,539	0,168
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	3,273	0,769	0,067
monte Lanaro	ostrio-querceto	28/06/04	1,816	0,642	0,166
Prepotto	ostrio-querceto	13/08/04	3,673	0,886	0,039
Prepotto	ostrio-querceto	13/08/04	5,849	0,742	0,033
Prepotto	ostrio-querceto	13/08/04	4,692	0,804	0,037
Prepotto	ostrio-querceto	13/08/04	2,919	0,850	0,065
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	3,773	0,814	0,048
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	3,685	0,764	0,058
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	3,401	0,740	0,065
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	5,472	0,003	0,062
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	3,893	0,746	0,056
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	2,591	0,841	0,077
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	2,916	0,630	0,093
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	3,258	0,197	0,115
foresta del Cansiglio	pecceta	08/07/04	2,662	0,457	0,124
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	3,390	0,783	0,063
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	3,733	0,780	0,056
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	1,850	0,741	0,144
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	3,689	0,712	0,066
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	4,863	0,121	0,003
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	1,873	0,719	0,149
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	2,517	0,864	0,082
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	3,342	0,660	0,093
Forni di Sopra	pecceta	22/07/04	1,802	0,682	0,162

Paluzza	pecceta	19/08/04	3,235	0,884	0,049
Paluzza	pecceta	19/08/04	3,376	0,872	0,048
Paluzza	pecceta	19/08/04	3,189	0,889	0,049
Paluzza	pecceta	19/08/04	4,001	0,907	0,034
Paluzza	pecceta	19/08/04	4,817	0,852	0,030
Paluzza	pecceta	19/08/04	5,656	0,829	0,028
Paluzza	pecceta	19/08/04	4,284	0,899	0,029
Paluzza	pecceta	19/08/04	4,815	0,843	0,034
Paluzza	pecceta	19/08/04	2,667	0,870	0,069
Paluzza	pecceta	19/08/04	5,613	0,816	0,030
Paluzza	pecceta	19/08/04	2,859	0,861	0,065
Paluzza	pecceta	19/08/04	3,134	0,857	0,057
Paluzza	pecceta	19/08/04	5,188	0,827	0,030
Paluzza	pecceta	19/08/04	2,899	0,697	0,090
Paluzza	pecceta	19/08/04	3,526	0,840	0,050
Paluzza	pecceta	19/08/04	3,081	0,831	0,062
Paluzza	pecceta	19/08/04	3,658	0,777	0,063
Paluzza	pecceta	19/08/04	3,563	0,806	0,059
Paluzza	pecceta	19/08/04	4,251	0,754	0,057
Paluzza	pecceta	19/08/04	3,610	0,854	0,051
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,304	0,936	0,036
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,286	0,948	0,034
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,460	0,936	0,033
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	2,896	0,916	0,051
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,838	0,880	0,040
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,159	0,892	0,048
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,173	0,891	0,049
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,450	0,950	0,030
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,737	0,837	0,048
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	3,056	0,865	0,055
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	2,796	0,888	0,058
Forni di Sopra	piceo-faggeta	23/07/04	2,634	0,884	0,066
Forni di Sopra	piceo-faggeta	24/07/04	2,788	0,859	0,064
Forni di Sopra	piceo-faggeta	25/07/04	2,826	0,894	0,057
Forni di Sopra	piceo-faggeta	26/07/04	5,125	0,898	0,023
Forni di Sopra	piceo-faggeta	27/07/04	4,119	0,873	0,037
Forni di Sopra	piceo-faggeta	28/07/04	3,335	0,870	0,049
Forni di Sopra	piceo-faggeta	29/07/04	3,043	0,931	0,043
Forni di Sopra	piceo-faggeta	30/07/04	2,476	0,770	0,093
Forni di Sopra	piceo-faggeta	31/07/04	3,836	0,956	0,022
Forni di Sopra	piceo-faggeta	01/08/04	2,846	0,846	0,066
Forni di Sopra	piceo-faggeta	02/08/04	2,439	0,828	0,088
Monte Grisa	rimboschimento	31/05/04	1,085	0,315	0,322
Monte Grisa	rimboschimento	31/05/04	0,652	0,152	0,452
Monte Grisa	rimboschimento	31/05/04	0,719	0,052	0,430
Monte Grisa	rimboschimento	31/05/04	0,713	0,144	0,432
Monte Grisa	rimboschimento	01/06/04	1,197	0,313	0,292
Monte Grisa	rimboschimento	01/06/04	0,926	0,227	0,360
Monte Grisa	rimboschimento	01/06/04	0,889	0,043	0,376
Monte Grisa	rimboschimento	01/06/04	0,887	0,122	0,376
Caresana	rimboschimento	15/07/04	5,091	0,929	0,018

Caresana	rimboschimento	15/07/04	4,741	0,929	0,021
Caresana	rimboschimento	15/07/04	4,045	0,952	0,021
Caresana	rimboschimento	15/07/04	4,937	0,941	0,018
Caresana	rimboschimento	15/07/04	4,154	0,893	0,031
Caresana	rimboschimento	15/07/04	4,327	0,924	0,023
Caresana	rimboschimento	15/07/04	3,674	0,922	0,033
Caresana	rimboschimento	15/07/04	4,073	0,919	0,028
Caresana	rimboschimento	15/07/04	4,395	0,847	0,037
Caresana	rimboschimento	15/07/04	4,584	0,171	0,070
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	2,705	0,820	0,076
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	2,645	0,794	0,085
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	2,465	0,667	0,115
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	2,730	0,725	0,090
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	2,493	0,639	0,118
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	1,859	0,505	0,182
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	1,807	0,540	0,179
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	2,593	0,752	0,095
bosco Farneto	rovereto	01/07/04	1,942	0,606	0,158
Caresana	rovereto	15/07/04	2,054	0,657	0,138
Caresana	rovereto	15/07/04	2,334	0,649	0,120
Caresana	rovereto	15/07/04	2,692	0,754	0,091
Caresana	rovereto	15/07/04	2,703	0,376	0,134
Caresana	rovereto	15/07/04	2,730	0,886	0,062
Caresana	rovereto	15/07/04	3,513	0,934	0,032
Caresana	rovereto	15/07/04	3,908	0,900	0,033

I valori medi per classe di vegetazione sono riassunti in tabella 6.4.

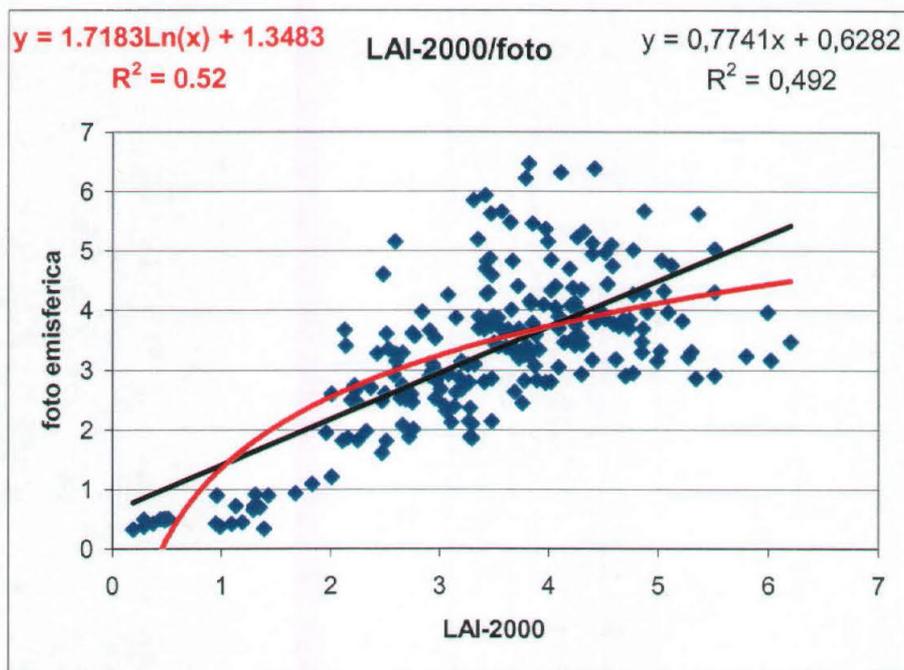
Tab. 6.4 Valori medi di LAI misurati in campo con il LAI-2000.

classe	LAI medio	dev std
acero-frassineto	3,56	$\pm 1,35$
betuleto	4,45	$\pm 0,90$
carpineto	3,75	$\pm 0,69$
castagneto	4,09	$\pm 0,84$
corileto	4,73	$\pm 0,57$
faggeta	4,01	$\pm 1,06$
ostrio-querceto	2,84	$\pm 0,83$
pecceta	3,58	$\pm 0,98$
piceo-faggeta	3,26	$\pm 0,61$
rimboschimento	2,84	$\pm 1,83$
rovereto	2,57	$\pm 0,55$

### 6.1.3 Correlazione tra le misure di LAI in campo con i due strumenti

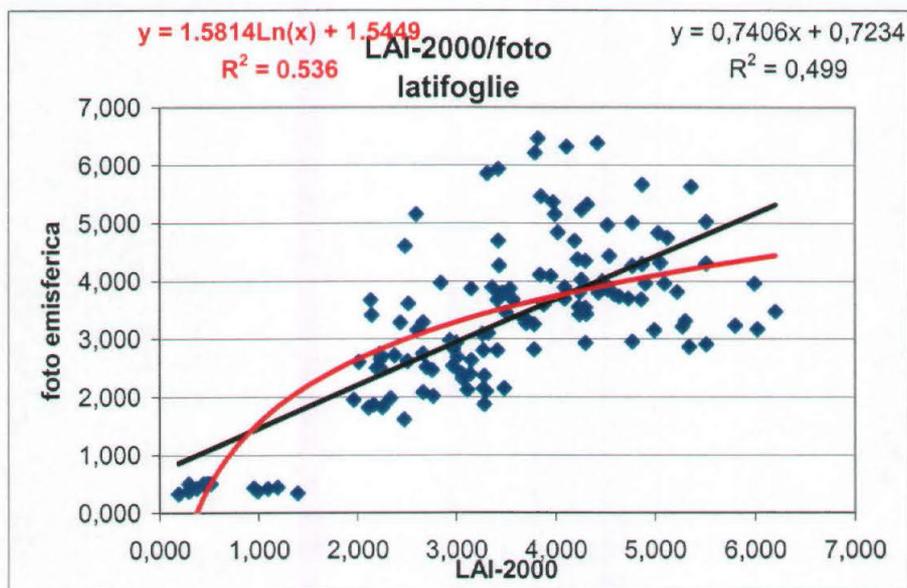
Le correlazioni (lineari e logaritmiche) tra le misure di LAI ottenute con il LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer* e con la foto emisferica prima per tutte le classi di vegetazione, poi

separando le conifere dalle latifoglie, sono rappresentate nelle figure 6.2, 6.3, 6.4. Oltre all'equazione di correlazione è indicato anche il valore di R, il numero di gradi di libertà (gdl= n-2) e la probabilità, espressa in %, che l'ipotesi possa essere accettata. Il valore soglia è del 5%, corrispondente a una probabilità dello 0.05.



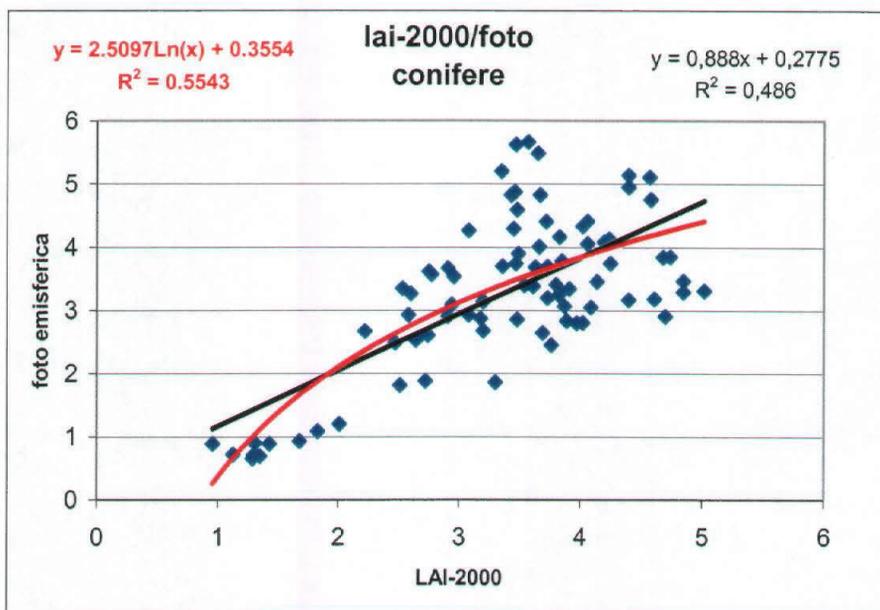
R	0,7	<b>R</b>	<b>0,721</b>
gdl	214	<b>gdl</b>	<b>214</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.2 Correlazione LAI-2000 e foto emisferica per tutte le misurazioni.



R	0,707	<b>R</b>	<b>0,732</b>
gdl	130	<b>gdl</b>	<b>130</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.3 Correlazione LAI-2000 e foto emisferica per le latifoglie.



R	0,6971	<b>R</b>	<b>0,744</b>
gdl	80	<b>gdl</b>	<b>80</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.4 Correlazione LAI-2000 e foto emisferica per le conifere.

Come si può vedere dai grafici, la curva che esprime meglio la correlazione tra i due strumenti è quella logaritmica, anche se anche la relazione lineare è significativa. Non ci sono grandi differenze nel risultato separando le latifoglie dalle conifere.

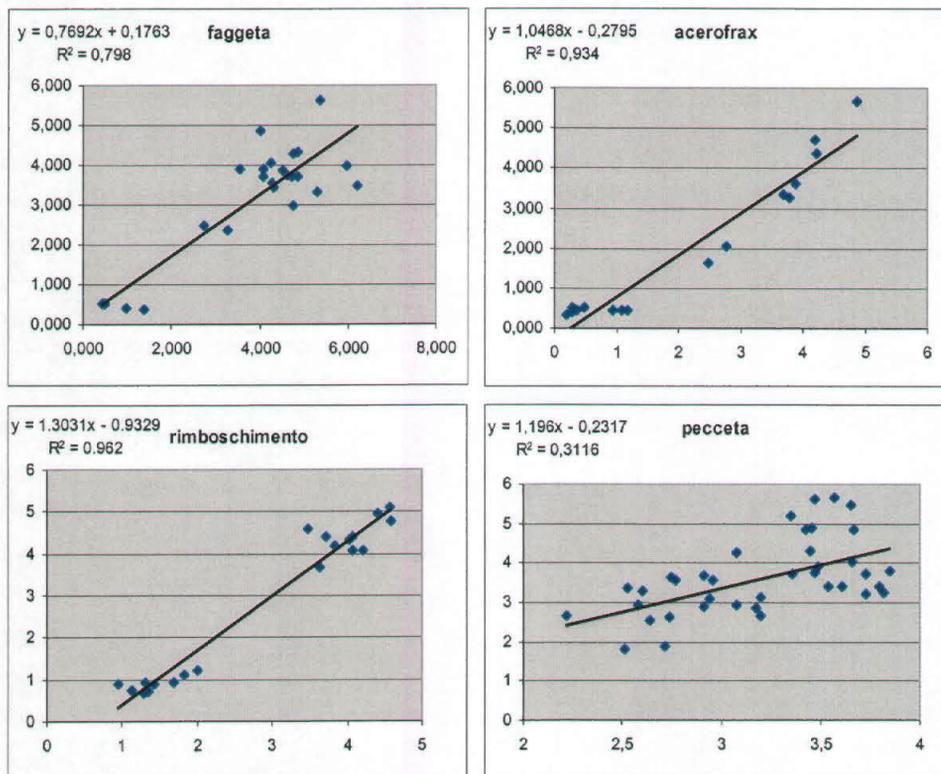
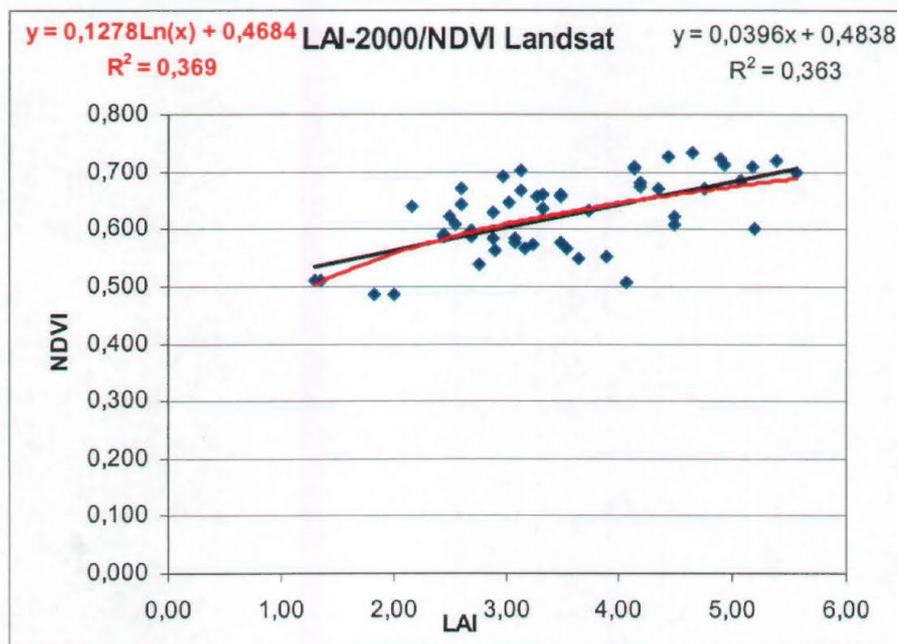


Fig. 6.5 Correlazioni tra le misure fatte con i due strumenti (asse x: LAI-2000; asse y: foto emisferica) per le classi che sono risultate maggiormente correlate.

Nelle fig. 6.5 sono rappresentate le classi che sono risultate maggiormente correlate utilizzando i due strumenti: la faggeta, l'acero-frassineto, il rimboschimento di pino nero e la pecceta.

#### 6.1.4 Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI del satellite Landsat.

La correlazione tra il LAI e la riflettanza del Landsat aumenta quando si separano le conifere dalle latifoglie in confronto all'analisi di entrambi i tipi di insieme, in accordo con Eklundh *et al.* (2003), come si può vedere nelle figure 6.6, 6.7, 6.8.



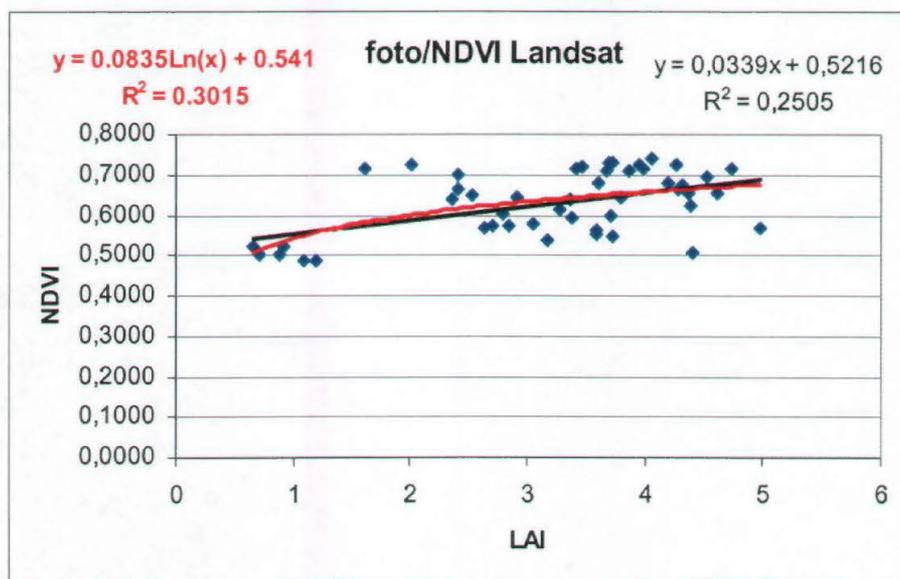
R	0,602	<b>R</b>	<b>0,607</b>
gdl	55	<b>gdl</b>	<b>55</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.6 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e NDVI per tutte le classi di vegetazione.



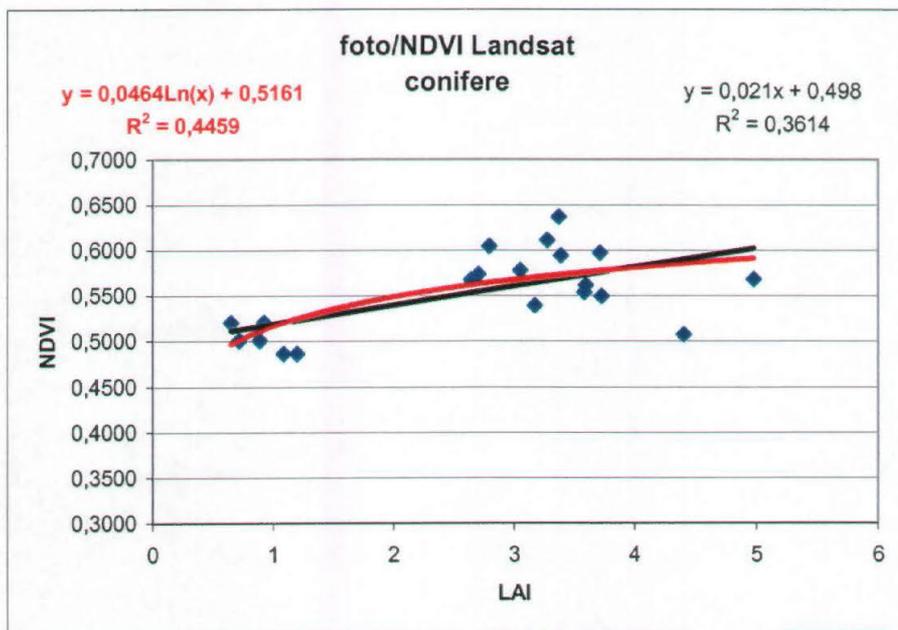
### 6.1.5 Correlazione tra il LAI della foto emisferica e l'NDVI del satellite Landsat.

La correlazione tra il LAI misurato con la foto emisferica e l'NDVI del satellite Landsat ha dato dei risultati meno convincenti rispetto a quelli del sensore LAI-2000, soprattutto per le latifoglie in cui la correlazione non è risultata significativa ( $p > 5\%$ ). La spiegazione può essere trovata sia nel minor numero di misure, sia nella maggior sensibilità della foto emisferica a condizioni del tempo non sempre ideali (ad es. sole o vento).



R	0,5	<b>R</b>	<b>0,549</b>
gdl	49	<b>gdl</b>	<b>49</b>
p (%)	0,019	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.10 Correlazione tra LAI con la foto emisferica e NDVI per tutte le classi di vegetazione.

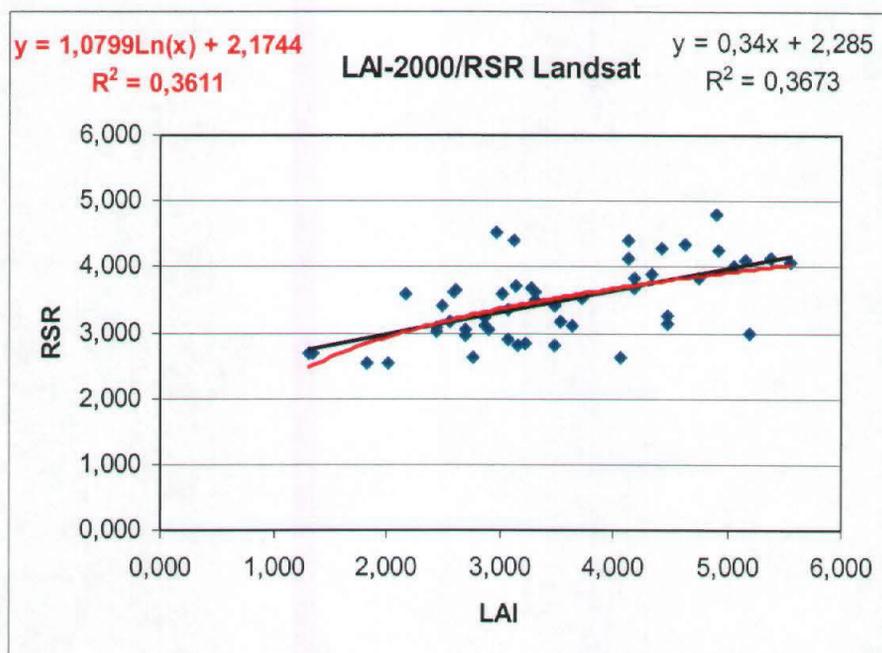


R	0,6	<b>R</b>	<b>0,667</b>
---	-----	----------	--------------

gdl	19	<b>gdl</b>	<b>19</b>
p (%)	0,404	<b>p (%)</b>	<b>0,096</b>

Fig. 6.10 Correlazione tra LAI con la foto emisferica e NDVI per le conifere. In entrambi i casi la relazione migliore è quella logaritmica (fig. 6.9 e fig. 6.10).

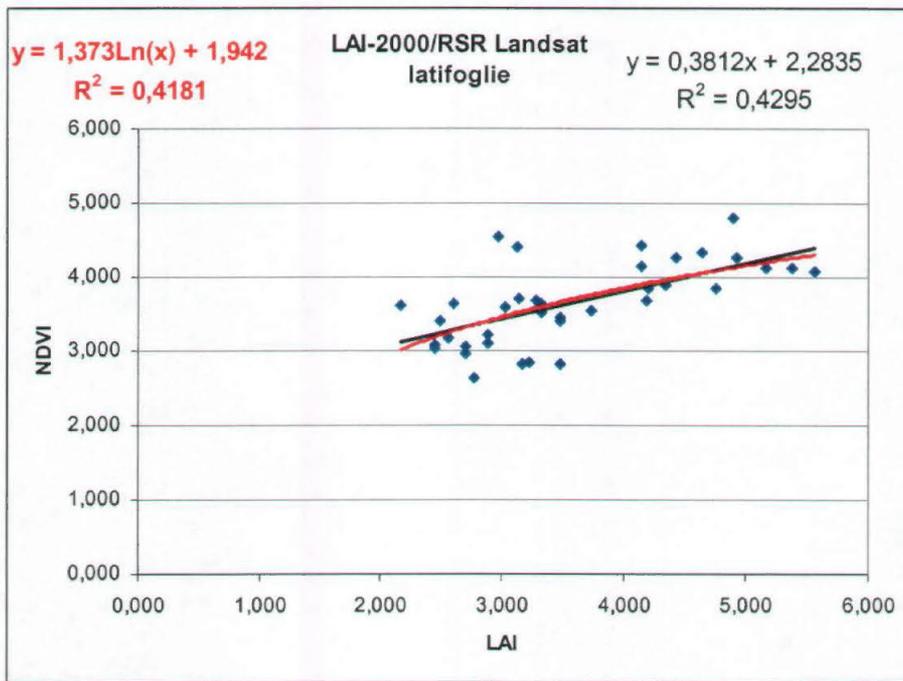
### 6.1.6 Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'RSR del satellite Landsat.



R	0,606	<b>R</b>	<b>0,6</b>
gdl	55	<b>gdl</b>	<b>55</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

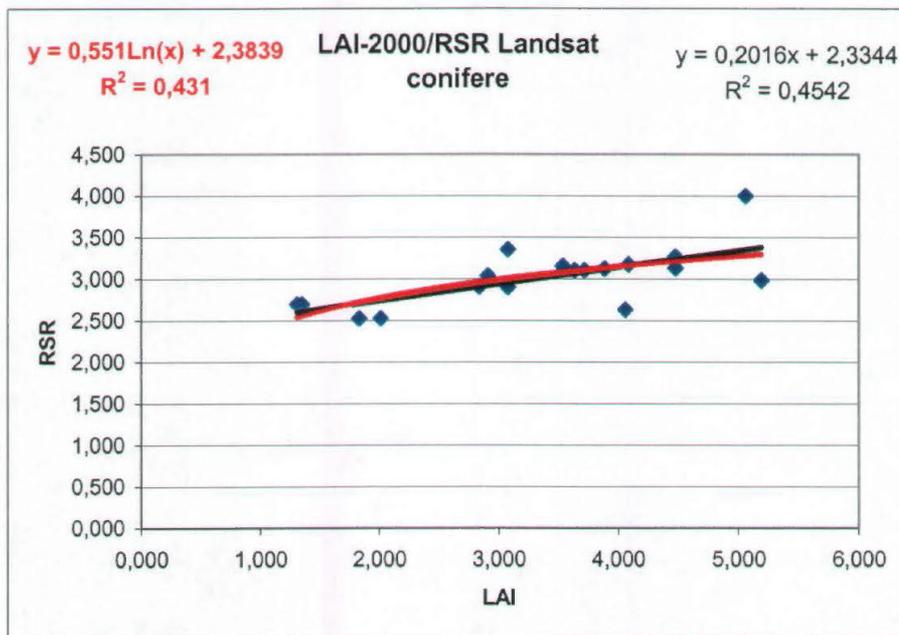
Fig. 6.11 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e l'RSR per tutti i rilievi.

Secondo quanto riscontrato in letteratura l'indice RSR dovrebbe normalizzare le differenze tra le foreste decidue e quelle di conifere e di conseguenza migliorare l'interpretazione del LAI nelle foreste miste. Per quanto riguarda le misurazioni fatte nel Friuli Venezia Giulia, ciò non è stato riscontrato. La differenza tra la correlazione del LAI (con il LAI-2000) e i due indici di vegetazione è veramente minima: nel caso dell'NDVI il valore di  $R^2$  è di 0.363 (fig. 6.6), nel caso dell'RSR è di 0.367 (fig. 6.11). Anche i risultati ottenuti separando le latifoglie (fig. 6.12) dalle conifere (fig. 6.13) sono inferiori a quelli ottenuti con l'NDVI, pur essendo statisticamente significativi.



R	0,655	<b>R</b>	<b>0,647</b>
gdl	42	<b>gdl</b>	<b>42</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.12 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e l'RSR per le latifoglie.



R	0,678	<b>R</b>	<b>0,66</b>
gdl	17	<b>gdl</b>	<b>17</b>
p (%)	0,142	<b>p (%)</b>	<b>0,210</b>

Fig. 6.13 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e l'RSR per le conifere.

### 6.1.7 Correlazione tra il LAI della foto emisferica e l'RSR del satellite Landsat.

Le correlazioni tra l'indice RSR e le misure fatte con la foto emisferica sono risultate significative solo nel caso delle conifere (fig. 6.14). Nè le latifoglie nè tutte le classi hanno dato dei risultati accettabili. La spiegazione è la stessa di quella dell'NDVI: sono stati fatti meno rilievi e probabilmente non sempre nelle condizioni di tempo ideali.

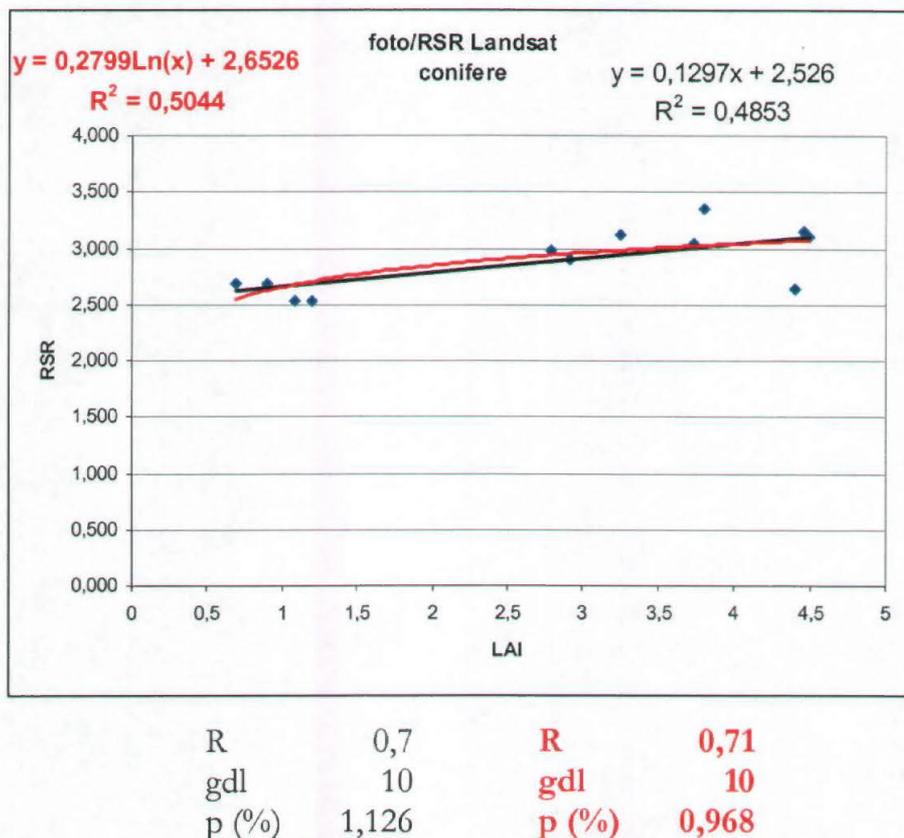


Fig. 6.14 Correlazione tra LAI con la foto emisferica e l'RSR per le conifere.

### 6.1.8 Correlazione tra il LAI e i dati del sensore MODIS.

Poichè è possibile scaricare le immagini MODIS relative agli stessi giorni in cui sono state fatte le campagne a terra, sono state utilizzate 7 immagini diverse (a 250 metri) per la correlazione tra le misure in campo e gli indici di vegetazione del MODIS. Probabilmente è proprio per questo motivo che la correlazione coi dati MODIS è maggiore, soprattutto per le latifoglie, rispetto a quella del Landsat.

Dal momento che sono state fatte anche alcune misure in inverno per poter calcolare il LAI effettivo e avendo la possibilità di avere anche le immagini MODIS relative, nei grafici seguenti sono presenti anche i punti delle misurazioni invernali. Studi sulle variazioni del LAI e dell'NDVI annuali e loro correlazione sono stati fatti da Saito *et al.* (2001), Wunderle *et al.* (2003), Tian *et al.* (2004). Quest'ultimo ha proprio studiato gli

andamenti stagionali del LAI e dell'NDVI con il satellite MODIS e ha scoperto che ad altitudini elevate l'NDVI misurato diminuisce nel caso ci sia la neve e in quel caso il MODIS sottostima il LAI.

### 6.1.9 Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI del MODIS.

La correlazione tra il LAI-2000 e l'NDVI del MODIS dà buoni risultati quando si considerano tutti i rilievi (fig. 6.15) e le latifoglie (6.16). Non è risultata significativa considerando solo le conifere ( $p > 5\%$ ).

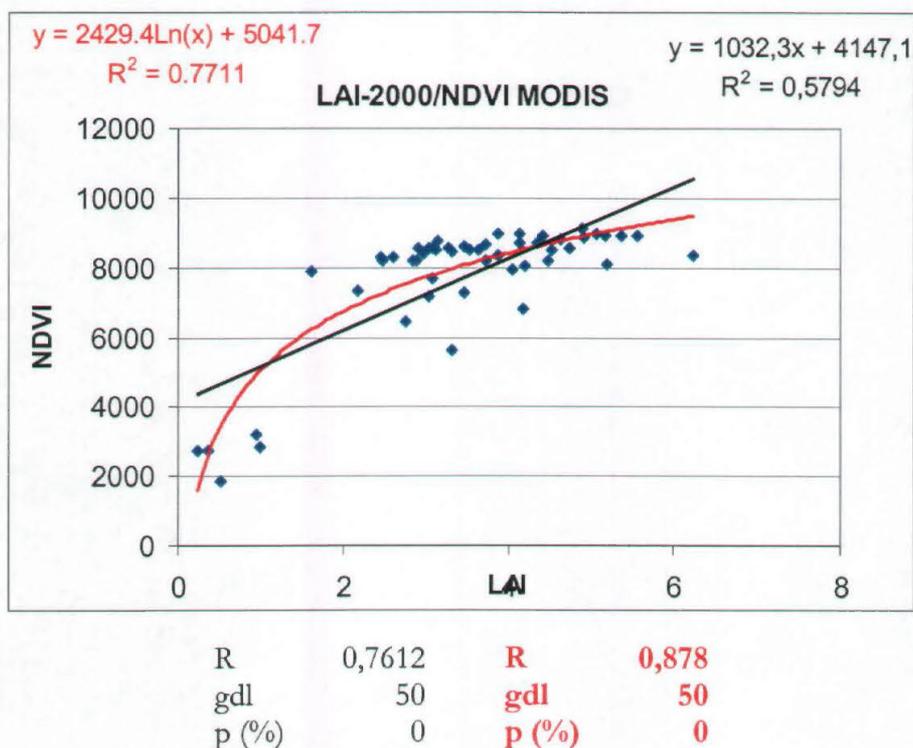
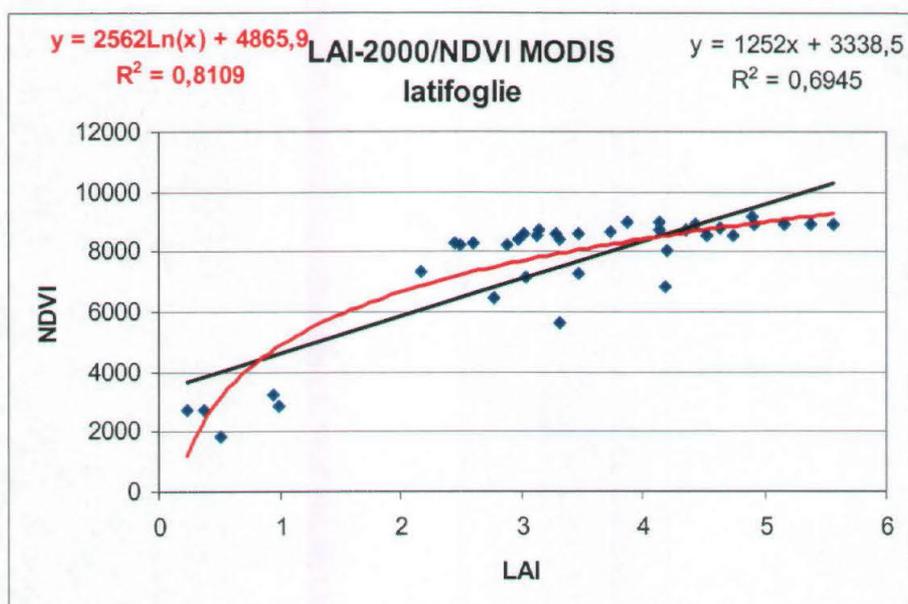


Fig. 6.15 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e l'NDVI per tutte le classi di vegetazione.

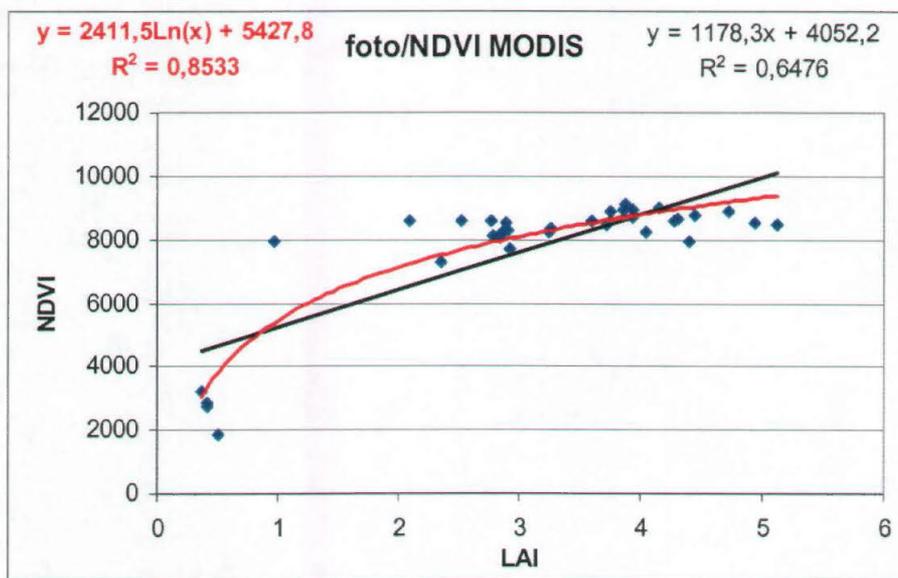


R	0,833	<b>R</b>	<b>0,900</b>
gdl	38	<b>gdl</b>	<b>38</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.16 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e l'NDVI per le latifoglie.

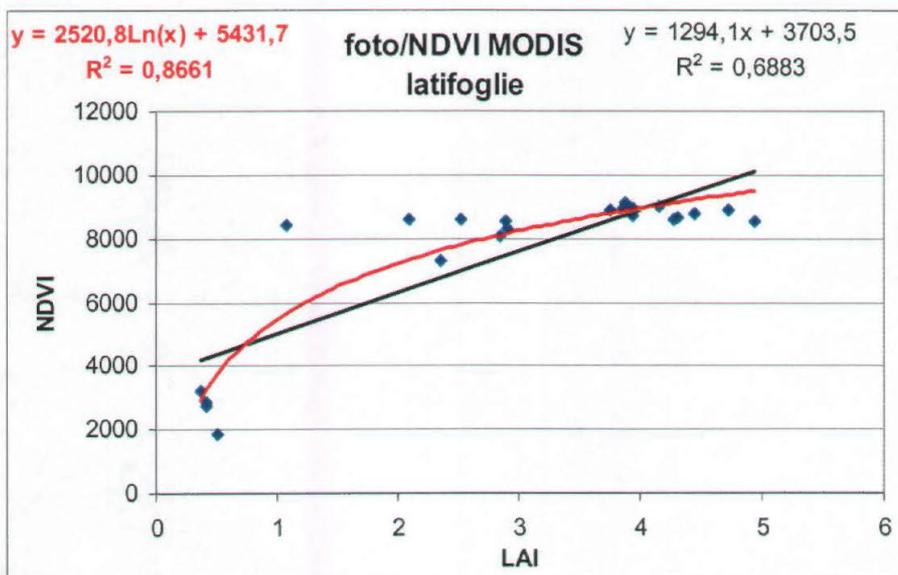
### 6.1.9 Correlazione tra il LAI della foto emisferica e l'NDVI del MODIS.

La correlazione tra la foto emisferica e l'NDVI del MODIS dà buoni risultati quando si considerano tutti i rilievi (fig. 6.17) e le latifoglie (6.18). Non è risultata significativa considerando solo le conifere ( $p > 5\%$ ).



R	0,805	<b>R</b>	<b>0,924</b>
gdl	32	<b>gdl</b>	<b>32</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0,</b>

Fig. 6.17 Correlazione tra LAI con la foto emisferica e l'NDVI per tutte le classi di vegetazione.



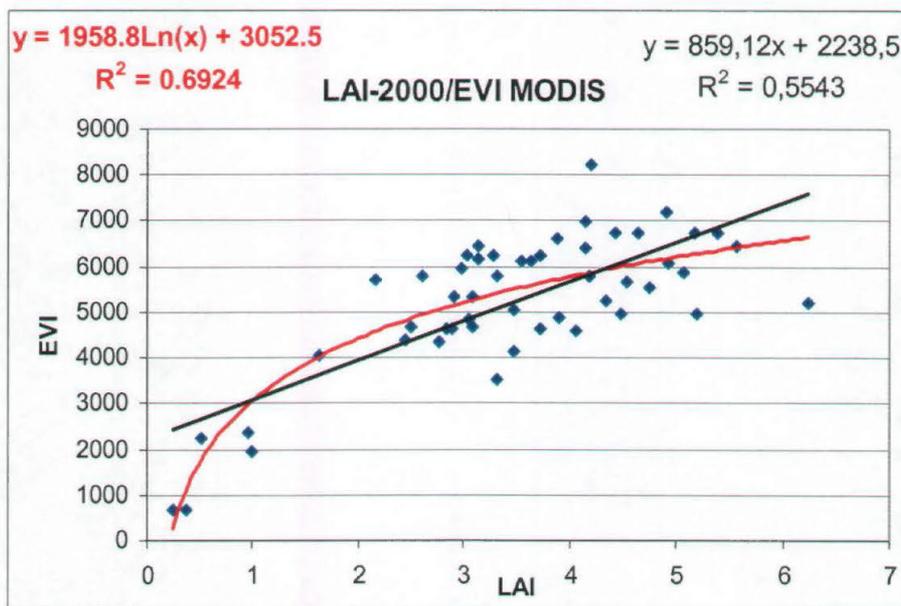
R	0,83	<b>R</b>	<b>0,93</b>
gdl	20	<b>gdl</b>	<b>20</b>

p (%)      0      p (%)      0,

Fig. 6.18 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e l'NDVI per le latifoglie.

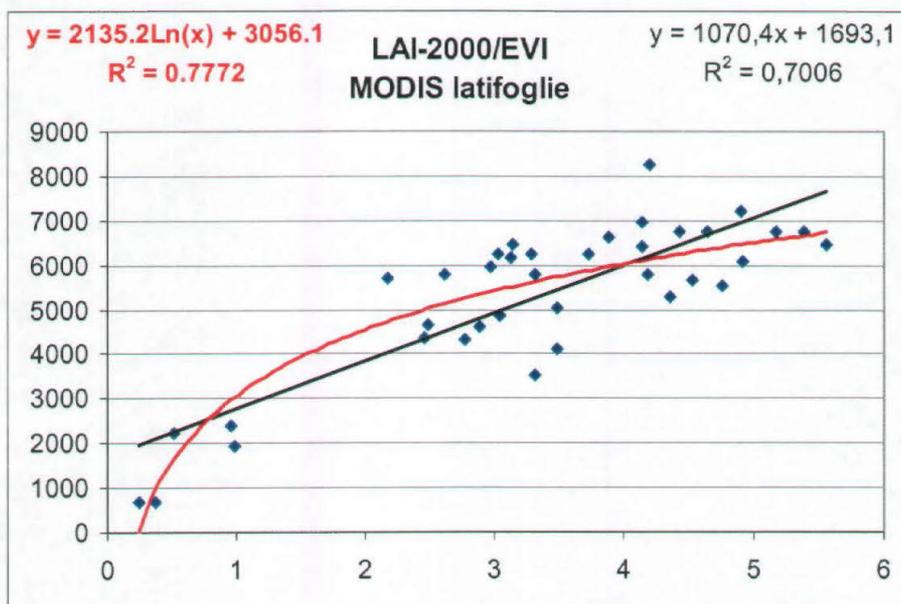
### 6.1.10 Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'EVI del MODIS.

La correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'EVI del MODIS ha dato risultati simili rispetto quelli ottenuti con l'NDVI: la correlazione dà buoni risultati quando si considerano tutti i rilievi (fig. 6.19) e le latifoglie (6.20), mentre non è risultata significativa considerando solo le conifere ( $p > 5\%$ ).



R	0,744	<b>R</b>	<b>0,832</b>
gdl	50	<b>gdl</b>	<b>50</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0,968</b>

Fig. 6.19 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e l'EVI per tutti i rilievi.

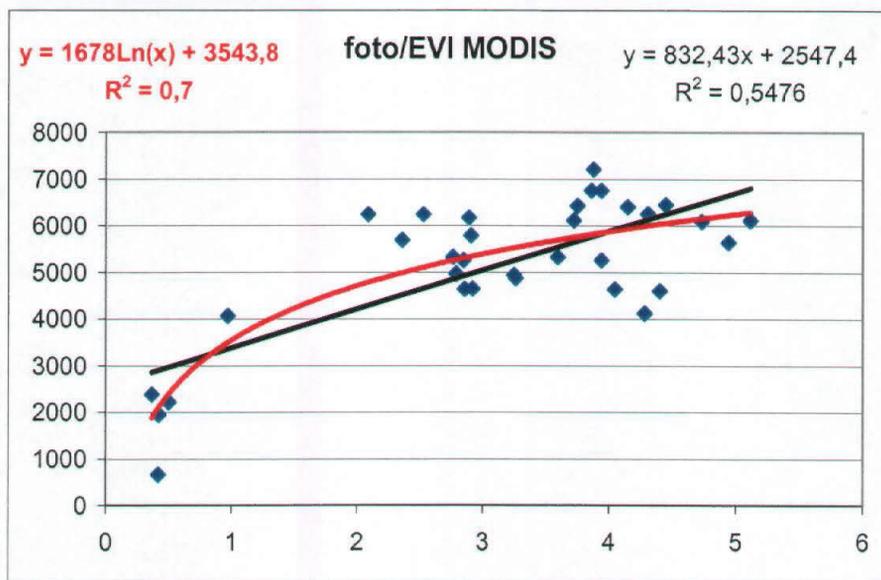


R	0,837	<b>R</b>	<b>0,881</b>
gdl	40	<b>gdl</b>	<b>40</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0,968</b>

Fig. 6.20 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e l'EVI per le latifoglie.

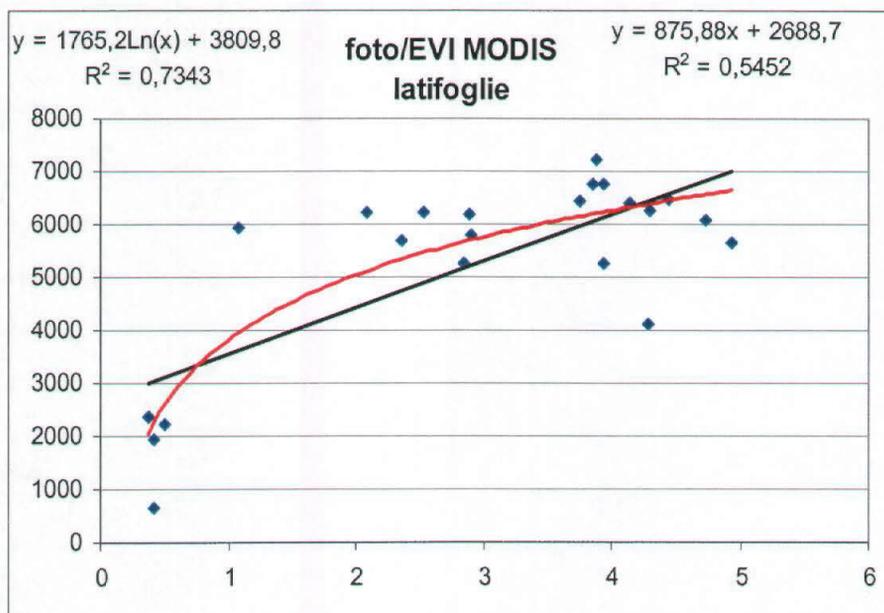
### 6.1.12 Correlazione tra il LAI della foto emisferica e l'EVI del MODIS.

Anche la correlazione tra il LAI della foto emisferica con l'EVI del MODIS risulta significativo quando si considerano tutti i rilievi (fig. 6.21) o solo le latifoglie (6.22), mentre non è risultata significativa considerando solo le conifere ( $p > 5\%$ ).



R	0,74	<b>R</b>	<b>0.837</b>
gdl	32	<b>gdl</b>	<b>32</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.21 Correlazione tra LAI con la foto emisferica e l'EVI per tutti i rilievi.

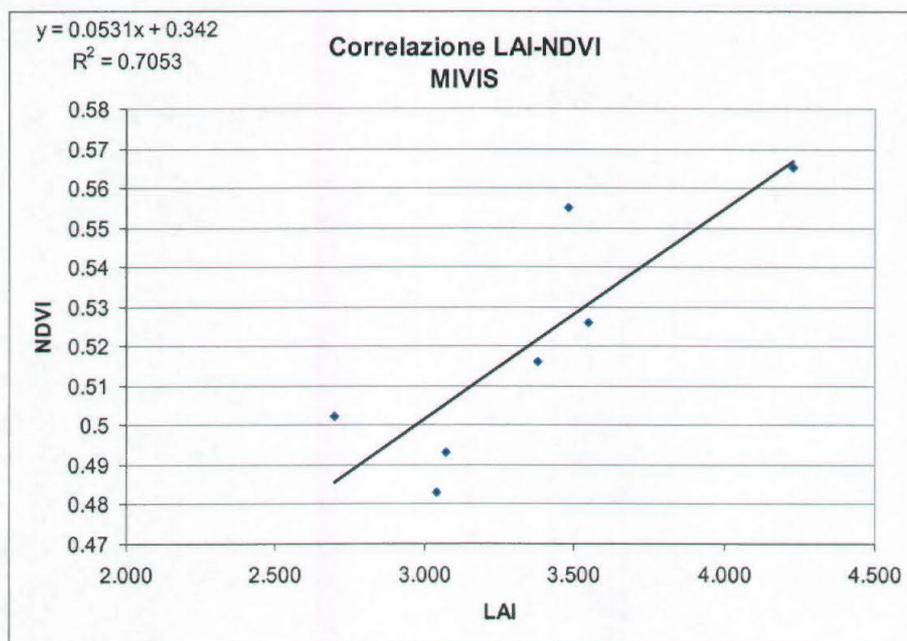


R	0.738	<b>R</b>	<b>0.857</b>
gdl	20	<b>gdl</b>	<b>20</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

Fig. 6.22 Correlazione tra LAI con la foto emisferica e l'EVI per le latifoglie.

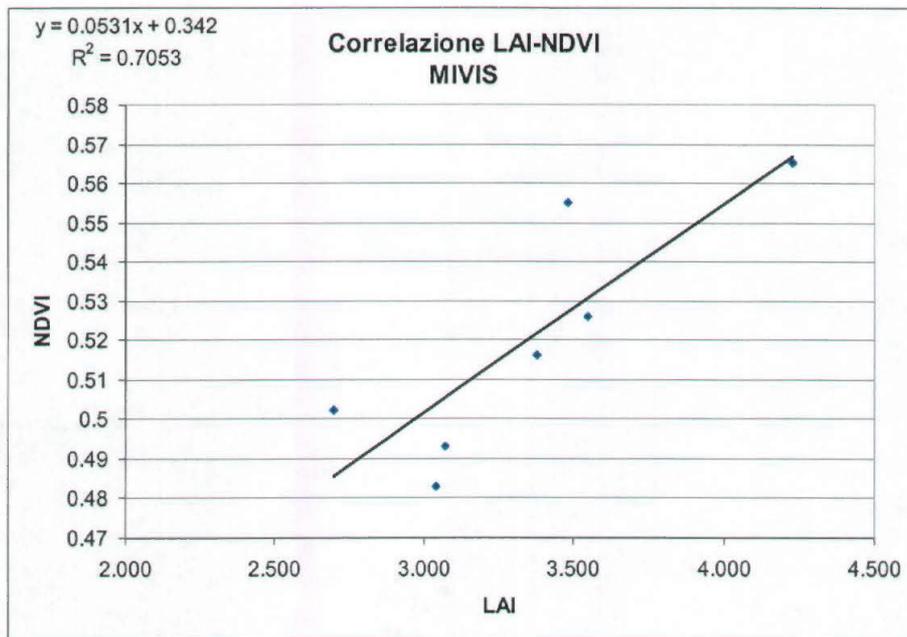
### 6.1.13 Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI delle immagini MIVIS.

Come è stato spiegato nel capitolo 5.8 la georeferenziazione delle immagini MIVIS è risultata piuttosto laboriosa e non sempre soddisfacente. Dal momento che georiferire accuratamente tutte le immagini corrispondenti ai siti in cui sono state fatte le misure avrebbe comportato un notevole dispendio di tempo, qui di seguito si mostreranno solo i dati inerenti all'area di studio di Muggia, in cui sono state fatte alcune misurazioni in un ostriro-querceto a scotano (fig. 6.23). Questi dati sono confrontati con gli stessi dati sull'immagine Landsat (fig. 6.24). Entrambi sono significativi per  $p < 0.05$ .



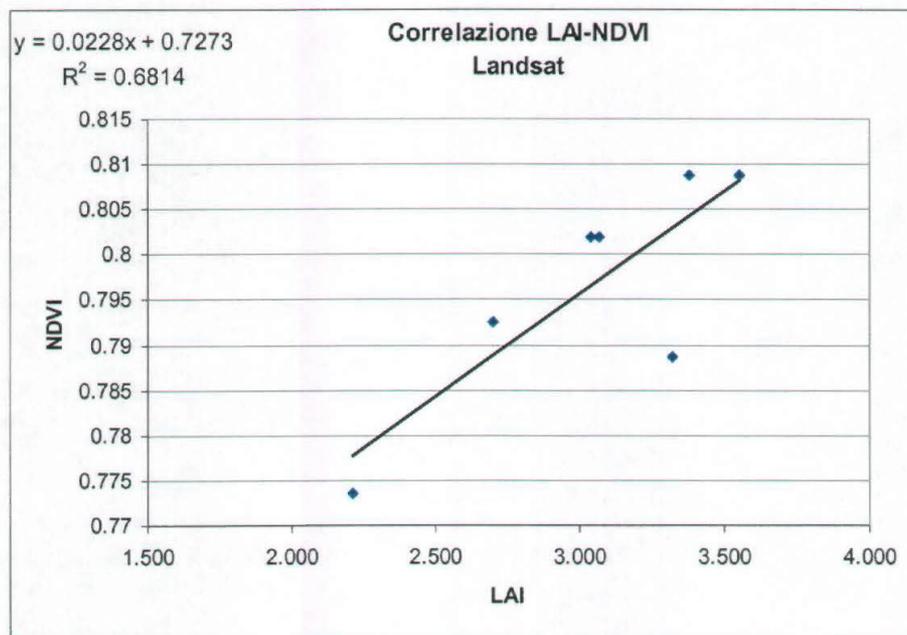
R	0.84
gdl	5
p (%)	1.801

Fig. 6.23 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e il sensore MODIS.



R            0.84  
gdl          5  
p (%)        1.801

Fig. 6.23 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e il sensore MODIS.



R            0.824  
gdl          5  
p (%)        2.265

Fig. 6.24 Correlazione tra LAI con il LAI-2000 e il Landsat nei medesimi punti in cui è stata calcolata la correlazione con il MIVIS.

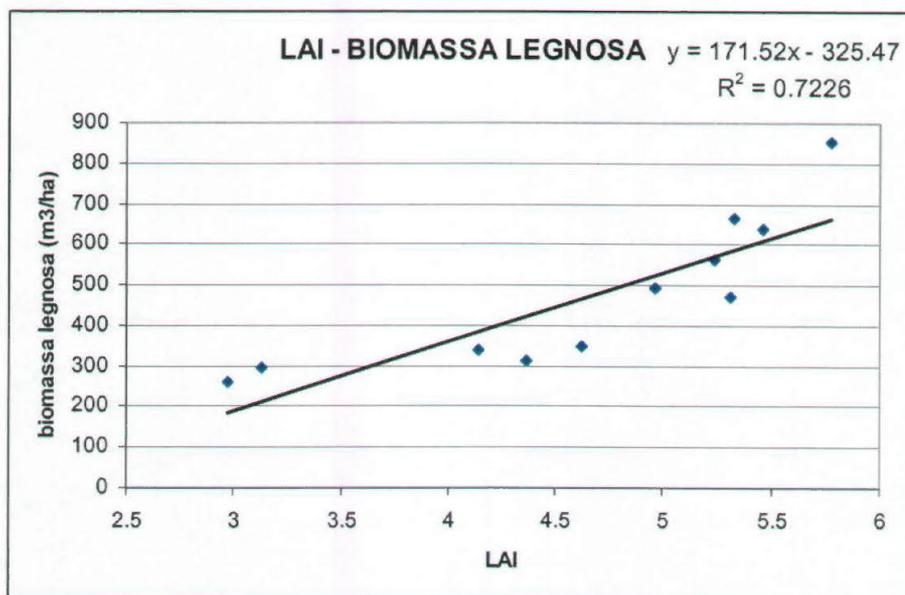
### 6.1.14 Correlazione tra il LAI e le misure di biomassa legnosa.

I dati dendrometrici, forniti dal Dipartimento di Scienze Agrarie e ambientali dell'Università degli Studi di Udine, con i corrispettivi dati di LAI misurati nei siti di Paluzza (pecceta), Pramósio (pecceta), Platischis (faggeta e acero-frassineto), sono riassunti in tabella 6.5. La correlazione risulta significativa quando si applica il fattore di correzione per le conifere proposto da Norman e Gower (1990), che consiste nel moltiplicare il valore di LAI ottenuto in campo per un valore di 1.5. Questo valore serve per ridurre l'effetto della distribuzione non casuale delle foglie, che risultano raggruppate e per trasformare il LAI misurato in un indice di area opportuno per le foglie aghiformi.

Tab. 6.5. I risultati delle misure di biomassa legnosa e del LAI.

sito	tipologia	numero piante (ha)	area basimetrica (m <sup>2</sup> /ha)	area transetto (mq)	volume (m <sup>3</sup> /ha)	LAI	LAIc
Pramósio	piceo-abietetto	550	73.78	400	852.68	3.85	5.75
Pramósio	piceo-abietetto	600	61.06	400	661.9	3.55	5.35
Pramósio	piceo-abietetto	500	48.94	400	490.2	3.31	4.95
Pramósio	piceo-abietetto	400	49.19	400	562.85	3.49	5.25
Paluzza	pecceta	350	52	400	638	3.60	5.46
Paluzza	pecceta	375	43.3	400	469.43	3.50	5.31
Paluzza	pecceta	625	36.8	400	344.8	3.00	4.62
Paluzza	pecceta	425	31.6	400	310.2	2.90	4.35
Platischis	faggeta	3830	44	1000	293	3.10	3.10
Platischis	acero frax	1450	27	1000	259	2.90	2.90
Taipana	acero frax	1000	28.78	1000	336	4.10	4.10

La correlazione tra il LAI corretto e la biomassa legnosa è raffigurata in fig. 6.25.



R	0.85
gdl	9
p (%)	0.092

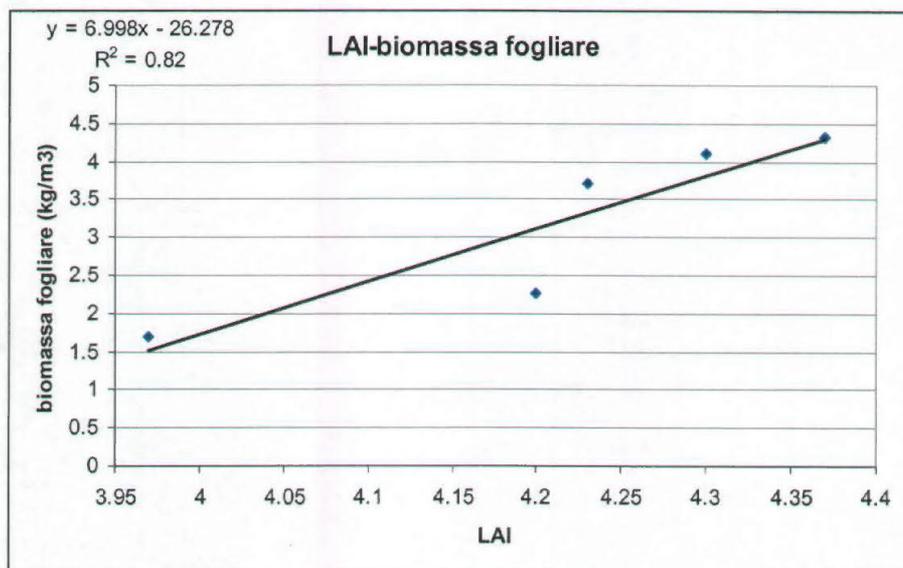
Fig. 6.25 Correlazione tra il LAI corretto e la biomassa legnosa delle aree in ta. 6.5.

#### 6.1.15 I risultati ottenuti nella foresta Cecconi.

La foresta Co. G. Ceconi ricade nei comuni di Vito d'Asio, Clauzetto e Tramonti di sotto. La Direzione Regionale delle Foreste della regione Friuli-Venezia Giulia, su richiesta della Provincia di Pordenone – Settore Agricoltura Aziende Sperimentali e Dimostrative (SAASD), ha messo a disposizione due aree (ciascuna di 18m x 18m): una all'interno della particella 36 A posta più a valle, l'altra collocata all'interno della particella 26 ubicata quasi alla sommità del monte. La particella 26 è stata suddivisa in 4 quadranti di 9 x 9 m. In entrambe le aree sono state fatte, nel giugno 2003, le misurazioni di diametro e di altezza degli alberi e del LAI con il LAI-2000. Nel mese di luglio 2003 è stato effettuato il taglio raso delle due aree. Il CETA (Centro di Ecologia Teorica e Applicata) ha poi elaborato le informazioni relative alle classi diametriche, al peso dei rami, dei tronchi e delle foglie, comparando i dati ottenuti dal taglio con quelli ottenuti applicando le equazioni allometriche. Confrontando il peso totale (9.9887 t) della particella 26 con quello previsto utilizzando le tavole stereometriche e alsometriche dell'ISAF (11.182 t) si ottiene uno scarto di 1.295 t. Per la particella 36 A il peso totale è di 17.839 t, contro i 16.439 stimati, con uno scarto di 0.128 t. I risultati dei dati di biomassa legnosa ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), di LAI e della biomassa fogliare pesata ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) sono riassunti nella tab. 6.6.

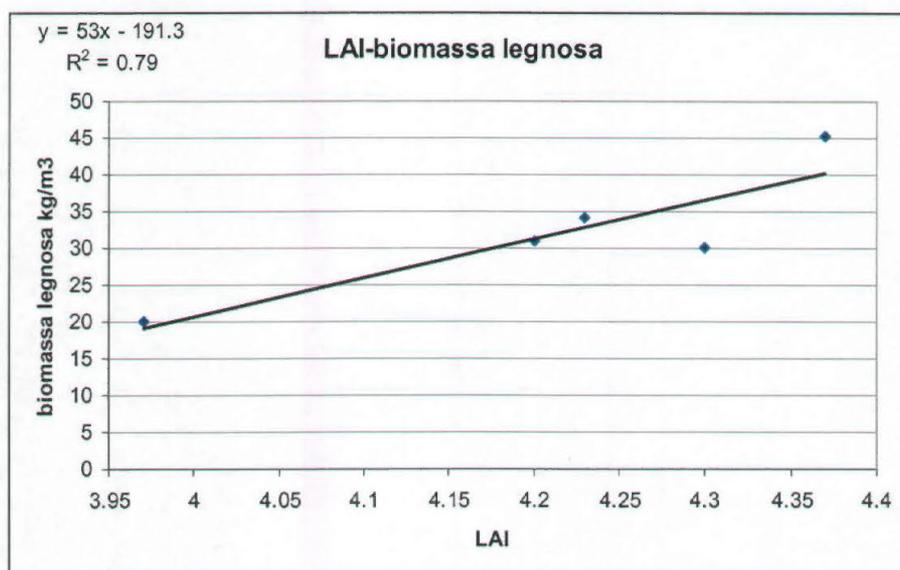
Tab. 6.6 Dati di biomassa legnosa e verde e del LAI per le particelle della foresta Cecconi.

Particella	biomassa kg/m <sup>3</sup>	LAI	biomassa fogliare (kg/m <sup>3</sup> )
26: I quad	31	4.2	2.25
26: II quad	34	4.23	3.7
26: III quad	30	4.3	4.1
26: iV quad	20	3.97	1.69
36 A	45.2	4.37	4.32



R           0.904  
gdl          3  
p (%)       3.519

Fig. 6.26 Correlazione tra il LAI e la biomassa fogliare pesata.



R           0.867  
gdl          3  
p           4.482

Fig. 6.27 Correlazione tra il LAI e la biomassa legnosa.

### 6.1.17 La mappa di LAI dall'NDVI del Landsat.

La mappa di LAI (fig. 6.28) basata sull'NDVI del Landsat è stata ricavata dalla seguente formula:

$$\text{LAI} = (\text{NDVI} - 0.4838) / 0.0396$$

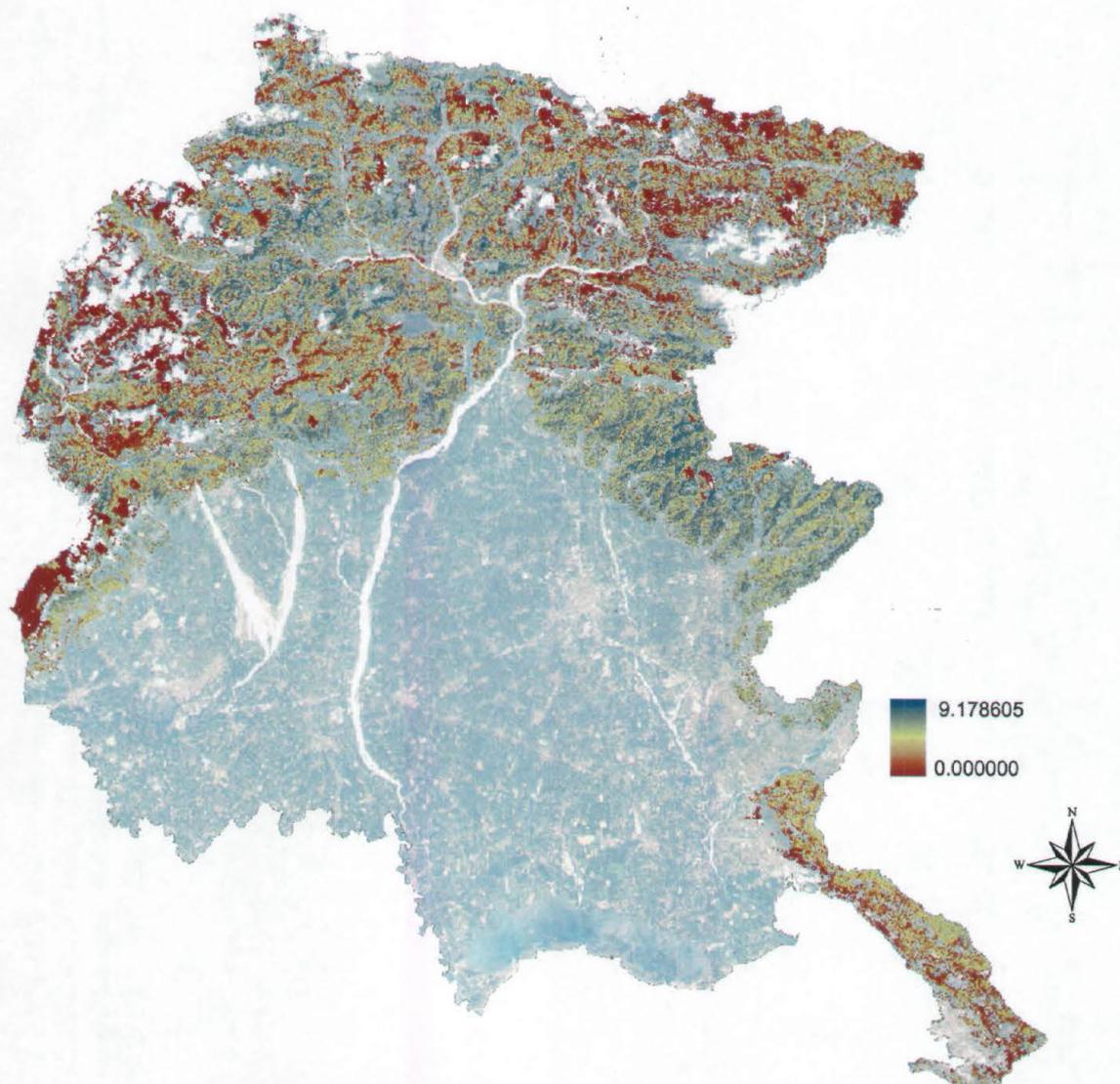


Fig. 6.28 La mappa di LAI sulla base dell'NDVI del Landsat, sovrapposta al composite 321 del Landsat.

### 6.1.19 La mappa di LAI dall'NDVI del MODIS.

La mappa di LAI (fig. 6.30) basata sull'NDVI del MODIS è stata ricavata dalla seguente formula:

$$\text{LAI} = (\text{NDVI} - 4147.1) / 1032.3$$

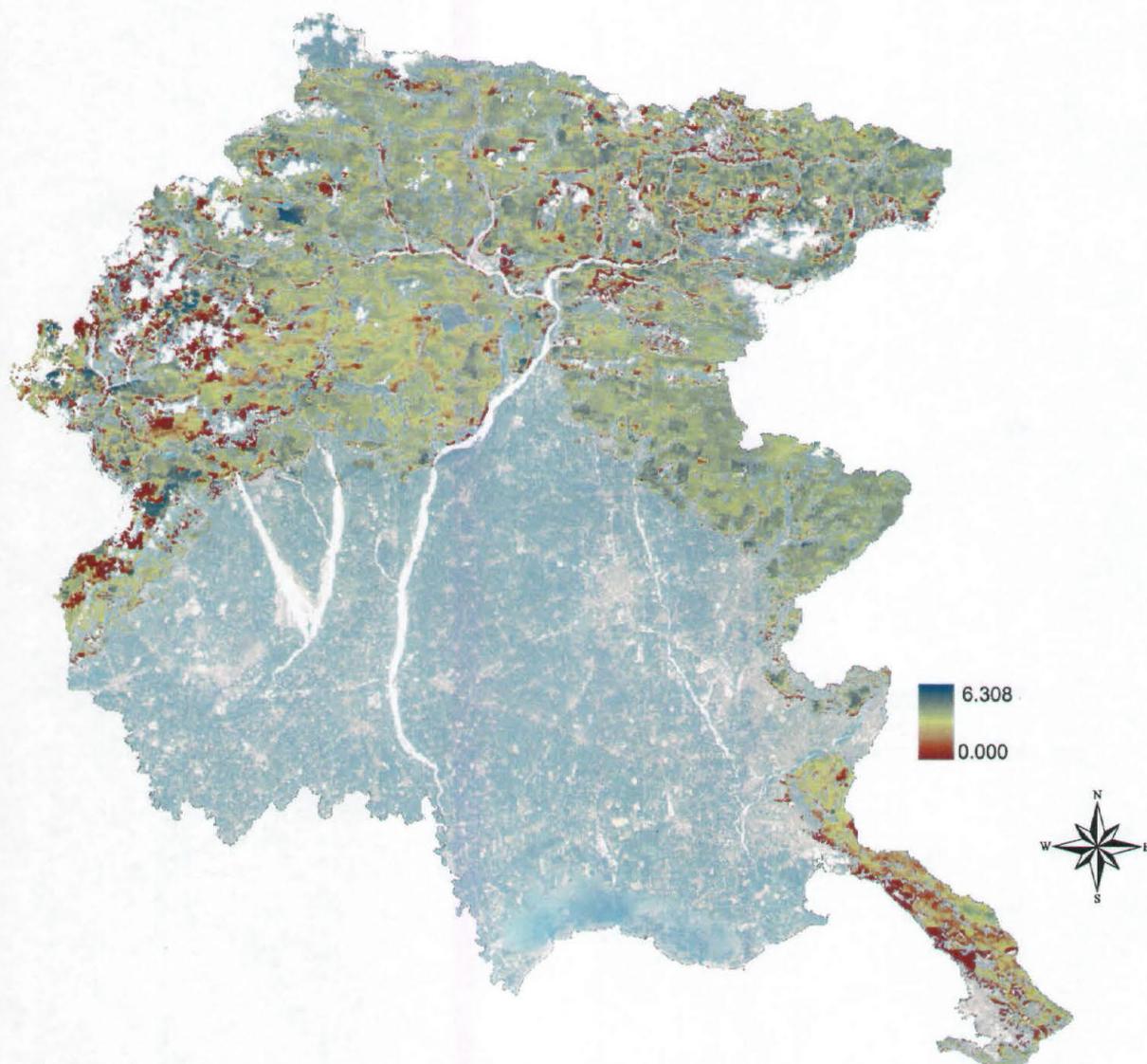


Fig. 6.30 La mappa di LAI sulla base dell'NDVI del MODIS, sovrapposta al composite 321 del Landsat.

### 6.1.19 La mappa di LAI dall'EVI del MODIS.

La mappa di LAI (fig. 6.31) basata sull'EVI del MODIS è stata ricavata dalla seguente formula:

$$\text{LAI} = (\text{NDVI} - 2238.5) / 850.12$$

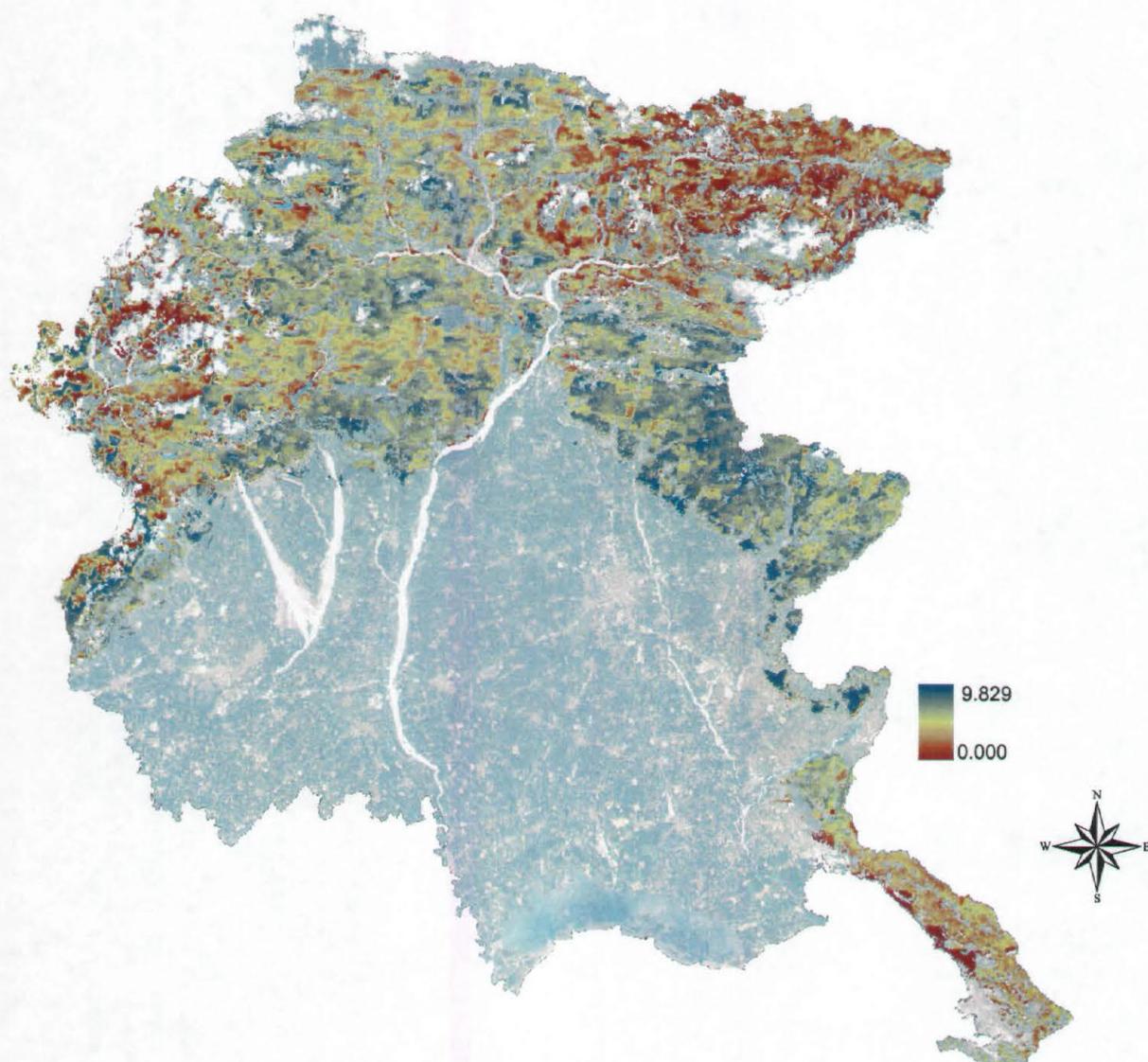


Fig. 6.31 La mappa di LAI sulla base dell'EVI del MODIS, sovrapposta al composite 321 del Landsat.

## 6.2 I risultati ottenuti per il Brasile

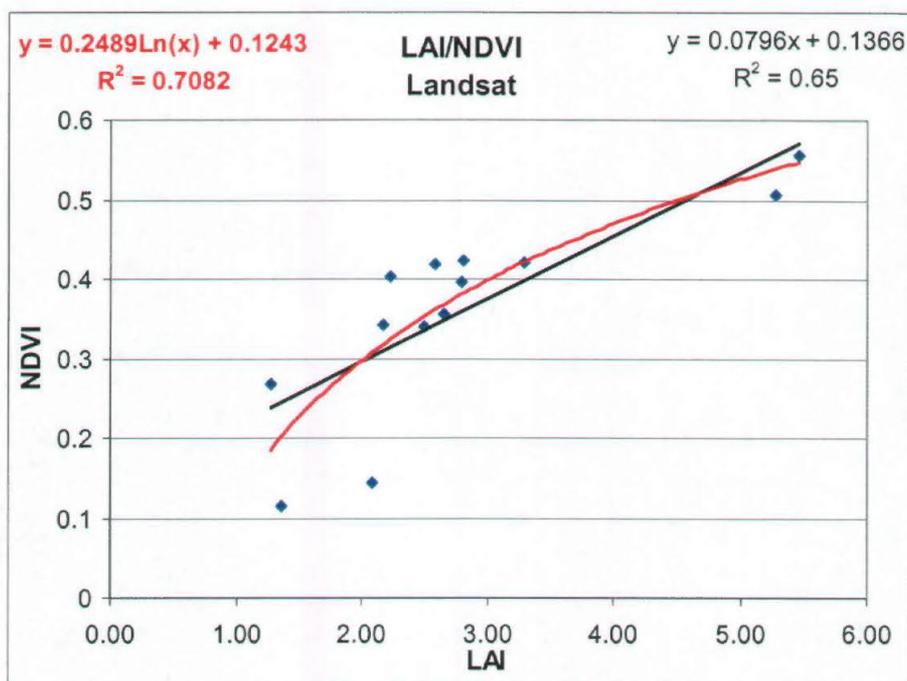
### 6.2.1 Le misure di LAI con il LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer*

Nel giugno 2003 è stata effettuata una campagna di rilievi nel bacino del *Rio Cachoeria* con il LAI-2000. I dati sono stati raccolti in diverse tipi di vegetazione: nei pascoli, nella *cabruca*, nella foresta, nella *capoeira* e in alcune piantagioni di albero da frutto, come il cocco, le banane e il cupuaçu (tab. 6.7).

Tab. 6.7 Le stazioni di campionamento del Brasile.

data	tipologia	località	LAI
18/06/2003	pascolo	Teimoso	1.27
27/06/2003	pascolo	vicino Firmino Alves	1.36
27/06/2003	pascolo alto	vicino Firmino Alves	2.04
27/06/2003	pascolo alto	vicino Firmino Alves	2.09
18/06/2003	capoeira	Teimoso	2.17
26/06/2003	cabruca	CEPLAC	2.22
		fazenda vicino Mata de	
20/06/2003	cocco/banane	Esperanca	2.36
26/06/2003	cupuacu/banane	CEPLAC	2.50
17/06/2003	cabruca	Salomeia (fazenda Venturosa)	2.58
17/06/2003	cabruca	Salomeia (fazenda Venturosa)	2.65
		fazenda vicino Mata de	
20/06/2003	cocco/banane	Esperanca	2.76
28/06/2003	cabruca	Salomeia (fazenda Venturosa)	2.80
17/06/2003	cabruca	Salomeia (fazenda Venturosa)	2.81
28/06/2003	cabruca	Salomeia (fazenda Venturosa)	3.29
30/06/2003	foresta	Teimoso	5.28
25/06/2003	foresta	Mata de Esperanca	5.30
18/06/2003	foresta	Teimoso	5.46
25/06/2003	foresta	Mata de Esperanca	5.77

I valori medi per tipologia sono riassunti in tabella 6.8.

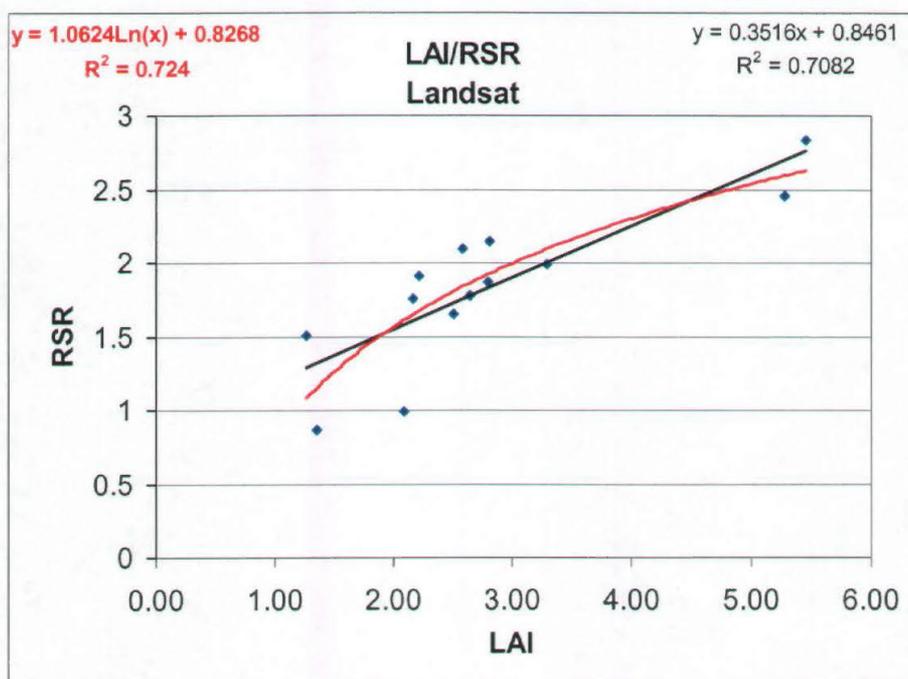


R	0.81	<b>R</b>	<b>0.84</b>
gdl	11	<b>gdl</b>	<b>11</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

6.32 Correlazione tra il LAI-2000 e l'NDVI del satellite Landsat.

### 6.2.3 Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'RSR del satellite Landsat.

Anche la correlazione tra il LAI misurato con il LAI-2000 e l'RSR del Landsat è significativa (fig. 6.33).



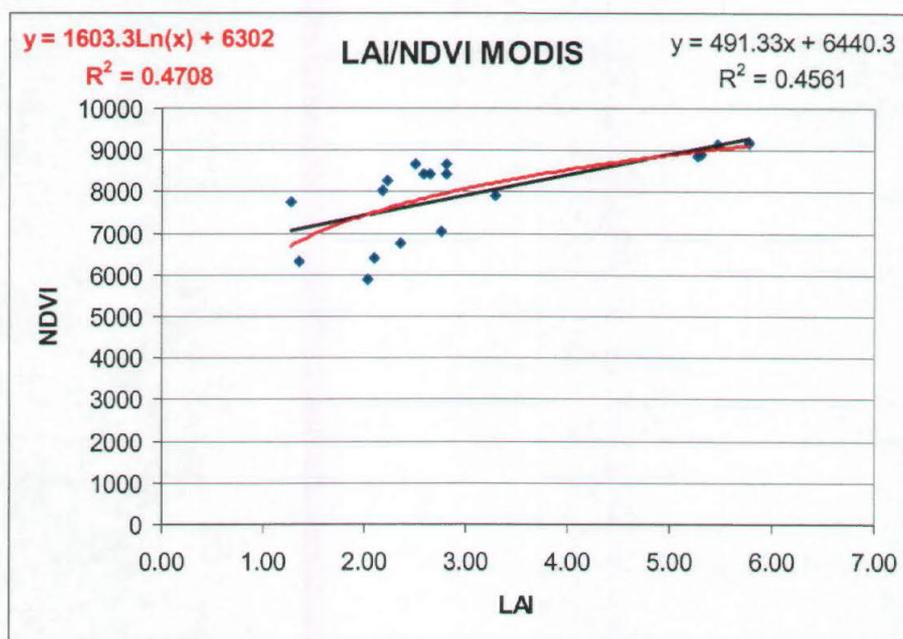
R	0.84	<b>R</b>	<b>0.85</b>
---	------	----------	-------------

gdl	11	<b>gdl</b>	<b>11</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0</b>

6.33 Correlazione tra il LAI-2000 e l'NDVI del satellite Landsat.

### 6.2.3 Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'NDVI del satellite MODIS.

Poichè le immagini MODIS coprono tutta l'area di studio, è stato possibile utilizzare tutti i 18 rilievi presi in campo. Sono state utilizzate due immagini: una che ricopre i 16 giorni che vanno dal 10 giugno al 25 giugno, la seconda copre i 16 giorni successivi (fino al 11 luglio). La correlazione è risultata significativa (fig. 6.34).

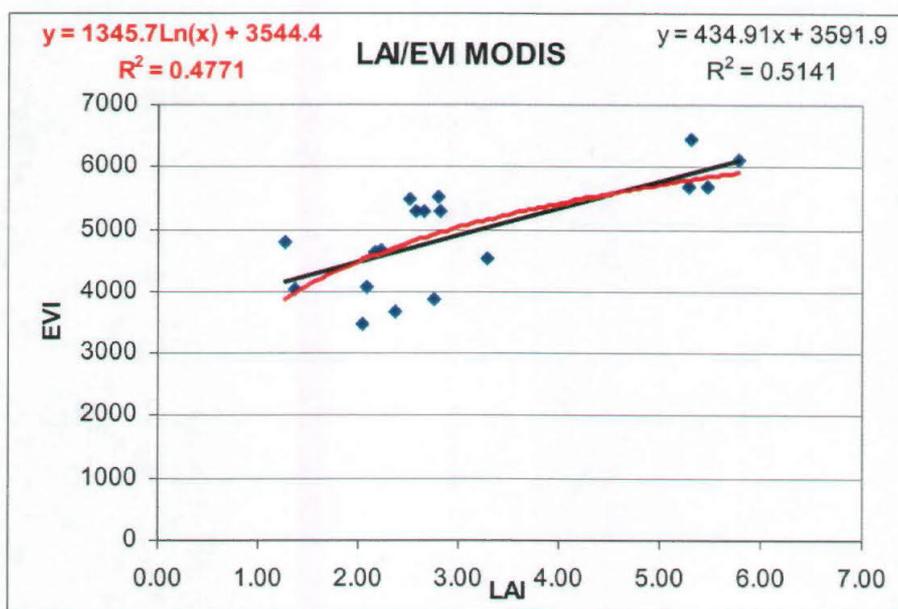


R	0.675	<b>R</b>	<b>0.686</b>
gdl	16	<b>gdl</b>	<b>16</b>
p (%)	0.212	<b>p (%)</b>	<b>0.167</b>

6.34 Correlazione tra il LAI-2000 e l'NDVI del MODIS.

### 6.2.3 Correlazione tra il LAI del LAI-2000 e l'EVI del satellite MODIS.

Nel caso dell'area di studio brasiliana, l'EVI ha dato risultati migliori, soprattutto per la relazione lineare (fig. 6.35).



R	0.717	<b>R</b>	<b>0.691</b>
gdl	16	<b>gdl</b>	<b>16</b>
p (%)	0	<b>p (%)</b>	<b>0.150</b>

6.35 Correlazione tra il LAI-2000 e l'EVI del MODIS.

#### 6.2.4 Le misure di biomassa legnosa agli hot-spot.

Le misurazioni di biomassa legnosa sono state fatte in due transetti per ognuno degli hot-spot: Mata da Esperança (foresta igrofila principalmente secondaria), Serra do Teimoso (foresta igrofila matura, primaria), Saloméia (*cabruca*: piantagione di cacao, al di sotto della foresta naturale, della zona di transizione tra la foresta mesofila e igrofila). Per stimare la biomassa legnosa sono state utilizzate le equazioni di Nelson *et al.* (1999) per calcolare la biomassa degli alberi con DBH inferiore a 25 cm, l'equazione di Overman *et al.* (1994) per gli alberi con DBH maggiore o uguale a 25 cm, l'equazione di Lu *et al.* (2002) per calcolare la biomassa superficiale totale. I risultati per i 6 transetti sono riassunti in tabella 6.9.

Tab. 6.9 Risultati delle applicazioni delle equazioni allometriche per i transetti degli hot-spot.

Sito	LAI	numero di alberi	biomassa totale (kg)	biomassa totale (kg/m <sup>2</sup> )	diametro medio (cm)	altezza media (m)
Esperança 1	5.30	96	9606,530	38,42	7,4	8,9
Esperança 2	5,77	116	2430,098	9,72	5,7	8,2
Teimoso 1	5,46	93	61768,130	247,07	11,4	10,7
Teimoso 2	5,28	87	7244,998	38,02	8,4	7,6
Salomeia 1	2,8	20	18805,570	75,22	20,8	6,8
Salomeia 2	3.29	19	20768,417	83,07	17	8,1

Per stimare la biomassa totale, la biomassa secca e il carbonio per le piante di cacao sono state usate le equazioni di Hernandez (2002). I risultati sono riassunti in tabella 6.10

Tab. 6.10 Risultati ottenuti applicando le equazioni allometriche specie-specifiche per il cacao.

	biomassa secca (kg)	biomass totale (kg)	biomass totale (kg/m <sup>2</sup> )	carbonio fissato (kg)	carbonio fissato (kg/m <sup>2</sup> )
Salomeia 1	2771,87	19008,40	76,03	1342,55	5,37
Salomeia 2	2630,58	17134,28	68,54	1274,11	5,09

Condiderando i tre hot-spot è stata elaborata una distribuzione degli alberi per intervalli di altezza (fig. 6.36) e di diametro (fig. 6.37).

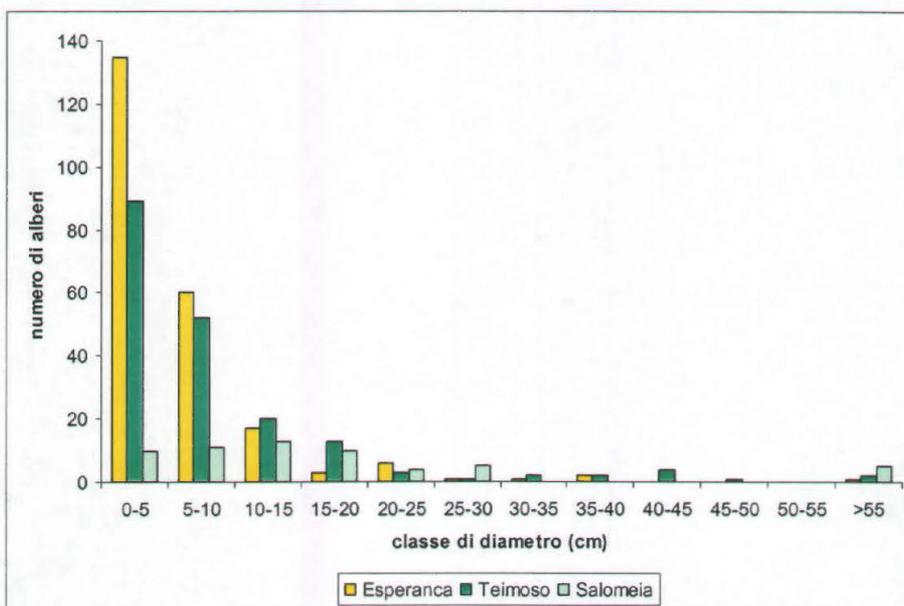


Fig.6.36 Numero di alberi per classi di diametro, nei tre hot-spot.

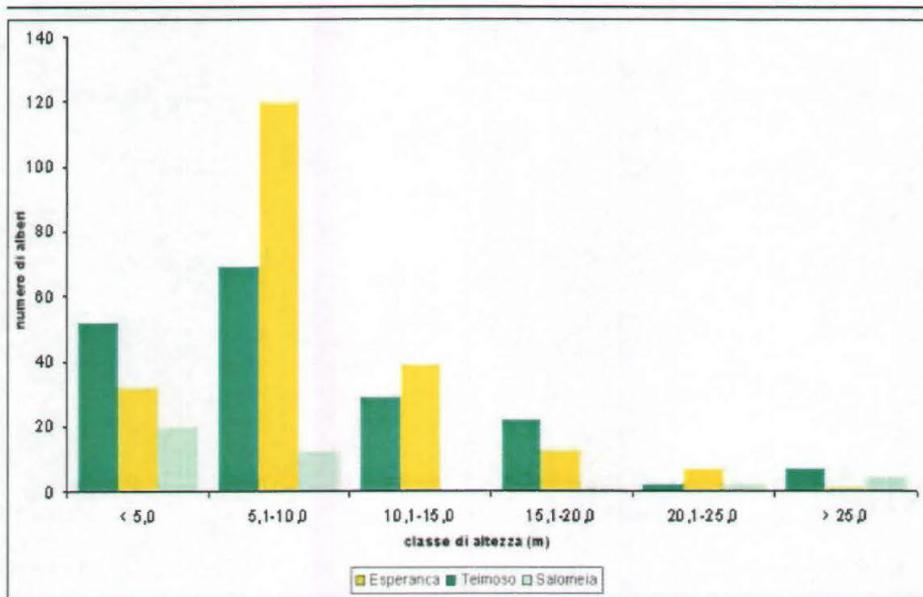
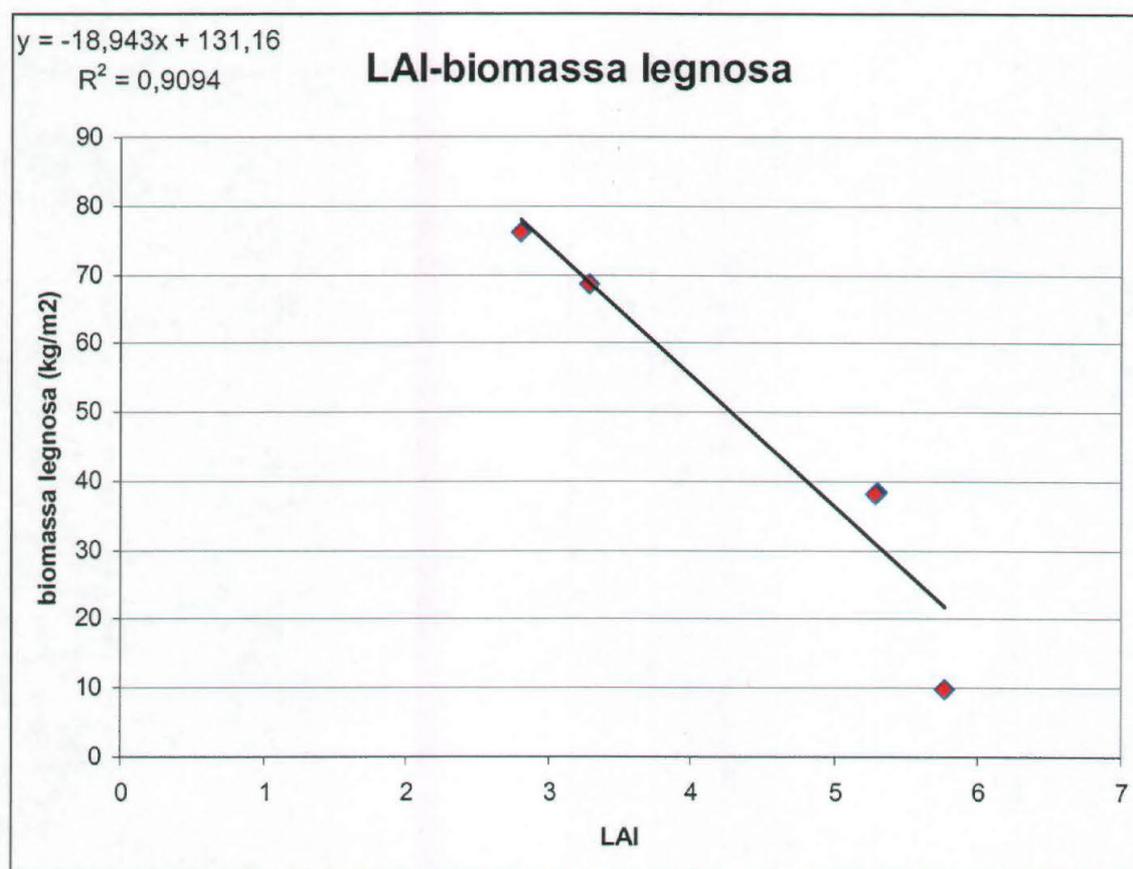


Fig 6.37 Numero di alberi per classi di altezza.

Per la distribuzione dell'altezza degli alberi sono stati considerati 6 intervalli: uno strato più alto ( $H \geq 25$  cm), 4 strati intermedi ( $5 \leq H < 25$ ) e uno strato più basso ( $H < 10$ ). I transetti nella Mata de Esperança hanno una maggior concentrazione degli individui nelle due classi più basse, una biomassa media di 24,07 kg/m<sup>2</sup>, un numero medio di alberi stimato di 4240 individui per ettaro e un LAI medio di 5.54. Il diametro massimo riscontrato nel primo transetto è di 73.5 cm, nel secondo di 34.3 cm. I transetti di Teimoso hanno una biomassa media di 142.5 kg/m<sup>2</sup> con una media di 3600 alberi per ettaro e un LAI medio di 5.37. Quindi ci sono meno alberi, ma essi sono più alti e più grossi (il diametro massimo misurato è di 150 cm, nel secondo transetto di 48.8 cm), con una maggior percentuale di *gap fraction* (per questo il LAI è inferiore) rispetto a quelli della Mata de Esperança. La *cabruca* (Salomeia) ha una biomassa media di 79.11 kg/m<sup>2</sup> con una media di 780 alberi per ettaro e un LAI medio di 3.04. Il valore di biomassa è maggiore rispetto alla Mata de Esperança, per la presenza di alberi molto grossi (il diametro massimo è di 104 cm nel primo transetto, di 84 cm nel secondo), non appartenenti alla specie di cacao, ma alla foresta naturale, e perchè la pianta di cacao è costituita da più polloni. Ogni singolo pollone contribuisce alla stima della biomassa legnosa, ma tra una pianta e l'altra c'è dello spazio che contribuisce ad un aumento della *gap fraction* e di conseguenza ad un valore più basso di LAI. Questo spiega perché nel caso del Brasile la correlazione tra il LAI e la biomassa legnosa ha una correlazione inversa.(fig.6.38). Nel grafico è stato tolto il punto corrispondente al primo transetto di Teimoso, in cui la presenza di alcuni alberi molto grossi causa una sovrastima eccessiva della biomassa legnosa.



R	0.954
gdl	3
p (%)	1.176

Fig. 6.38 Correlazione tra il LAI e la biomassa legnosa dei tre hot spot.

### 6.2.5 Le mappe di LAI

Per realizzare le mappe di LAI del Brasile utilizzando le immagini Landsat è stato necessario prima di tutto mascherare le numerose nuvole che ricoprivano le aree di studio. Avendo a disposizione anche i dati riguardanti il pascolo, la mappa di LAI è stata applicata su tutta l'area di studio.

### 6.2.6 La mappa di LAI dall'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) del Landsat.

La mappa di LAI basata sull'NDVI del Landsat è stata ricavata dalla seguente formula:

$$\text{LAI} = (\text{NDVI} - 0.1366) / 0.0796$$

La mappa è stata poi suddivisa in classi (fig. 6.39)

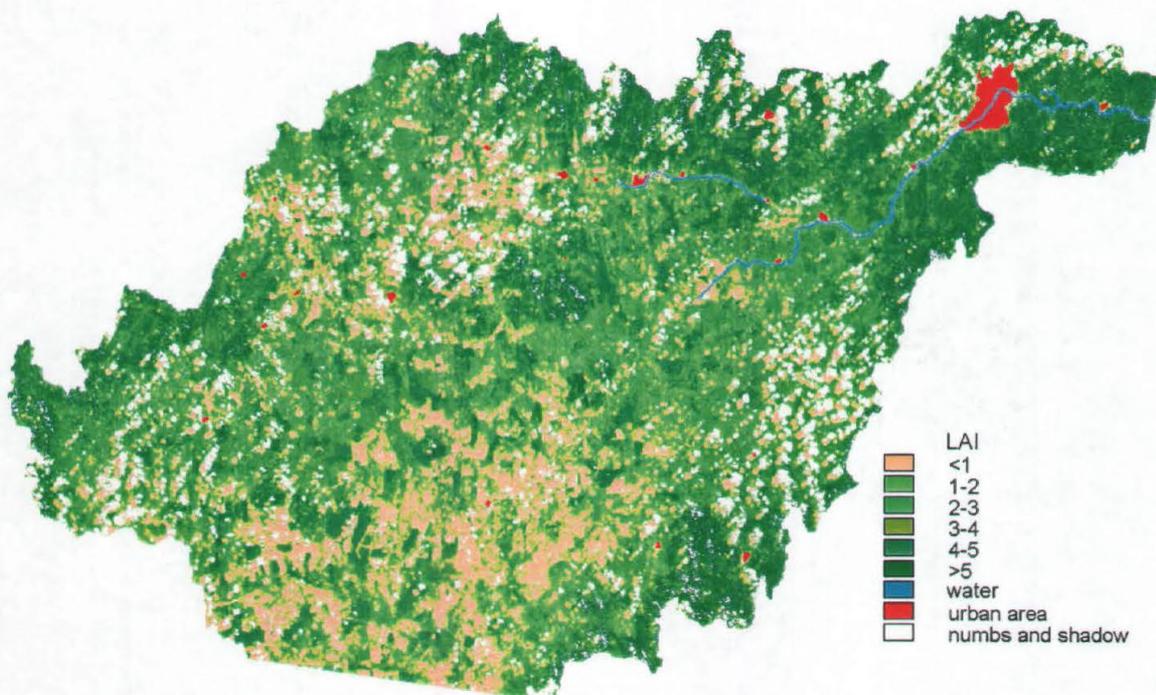


Fig. 6.39 La mappa di LAI dall'NDVI del Landsat, suddivisa in classi.

### 6.2.7 La mappa di LAI dall'RSR (*Reduced Simple Ratio*) del Landsat.

La mappa di LAI basata sull'RSR del Landsat (fig. 6.40) è stata ricavata dalla seguente formula:

$$\text{LAI} = (\text{RSR} - 0.8461) / 0.3516.$$

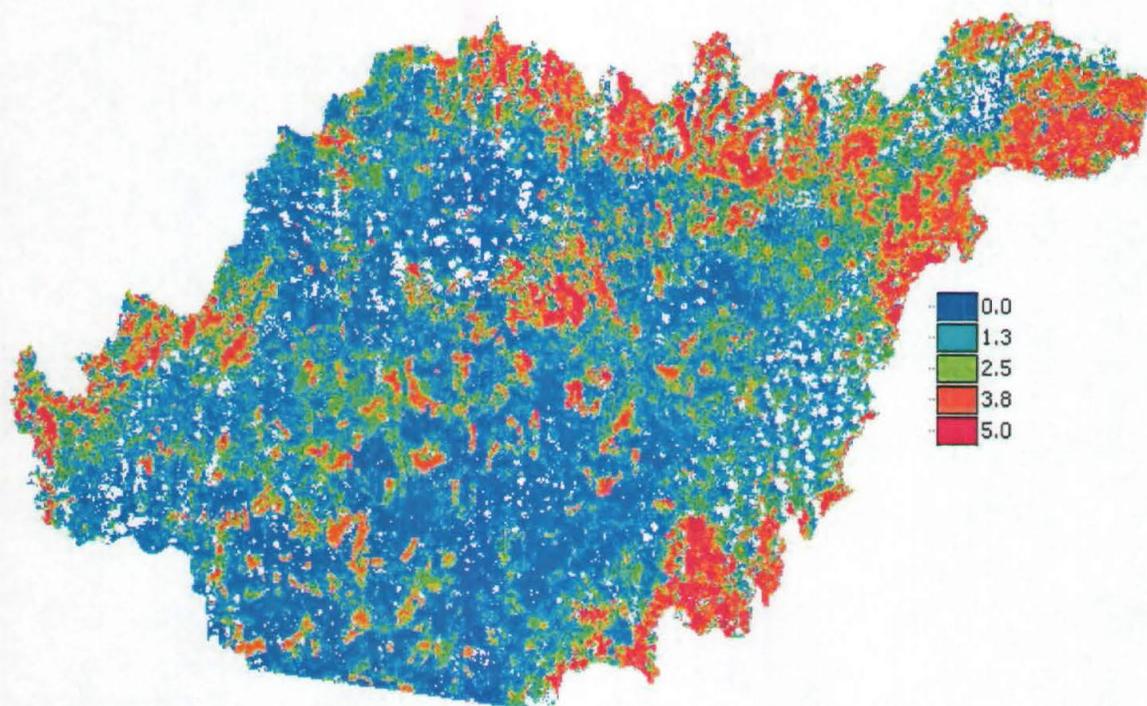


Fig. 6.40 La mappa di LAI dall'RSR del Landsat.

### 6.2.8 La mappa di LAI dall'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) del MODIS.

La mappa di LAI basata sull'NDVI del MODIS (fig. 6.41) è stata ricavata dalla seguente formula:

$$\text{LAI} = (\text{NDVI} - 6440.3) / 491.33$$

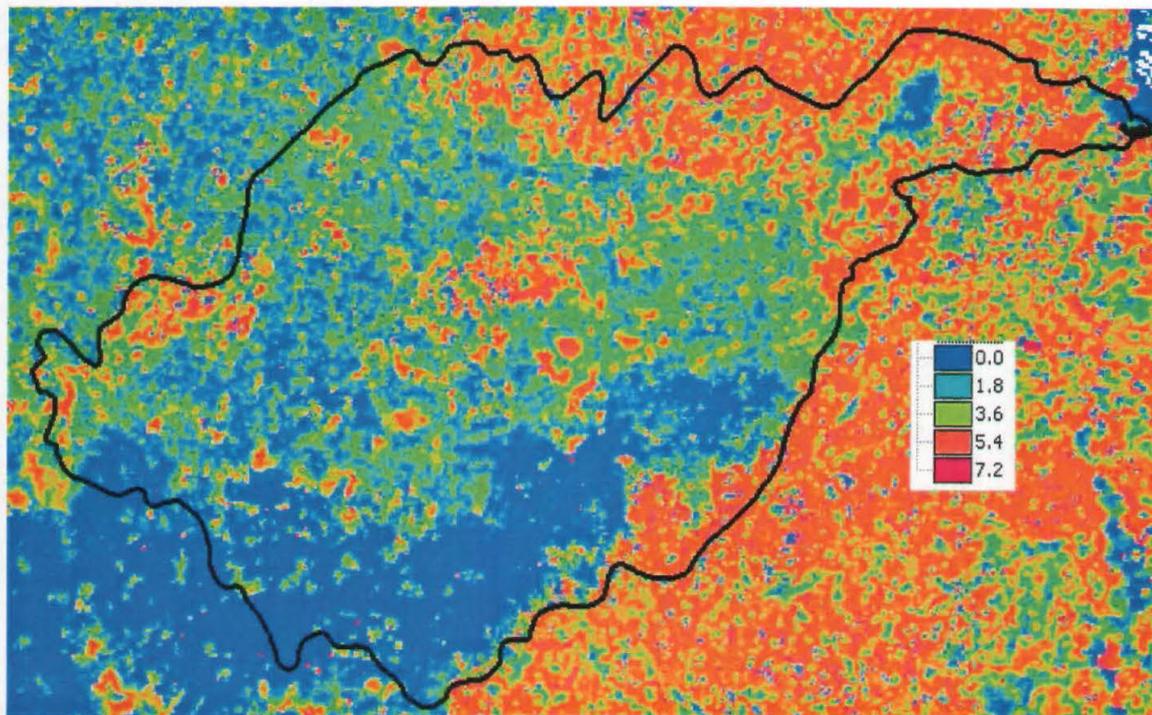


Fig. 6.41 La mappa di LAI dall'NDVI del MODIS, con sovrapposto il confine dell'area di studio.

### 6.2.8 La mappa di LAI dall'EVI (*Enhanced Vegetation Index*) del MODIS.

La mappa di LAI basata sull'EVI del MODIS (fig. 6.42) è stata ricavata dalla seguente formula:

$$\text{LAI} = (\text{EVI} - 3591.9) / 434.91$$

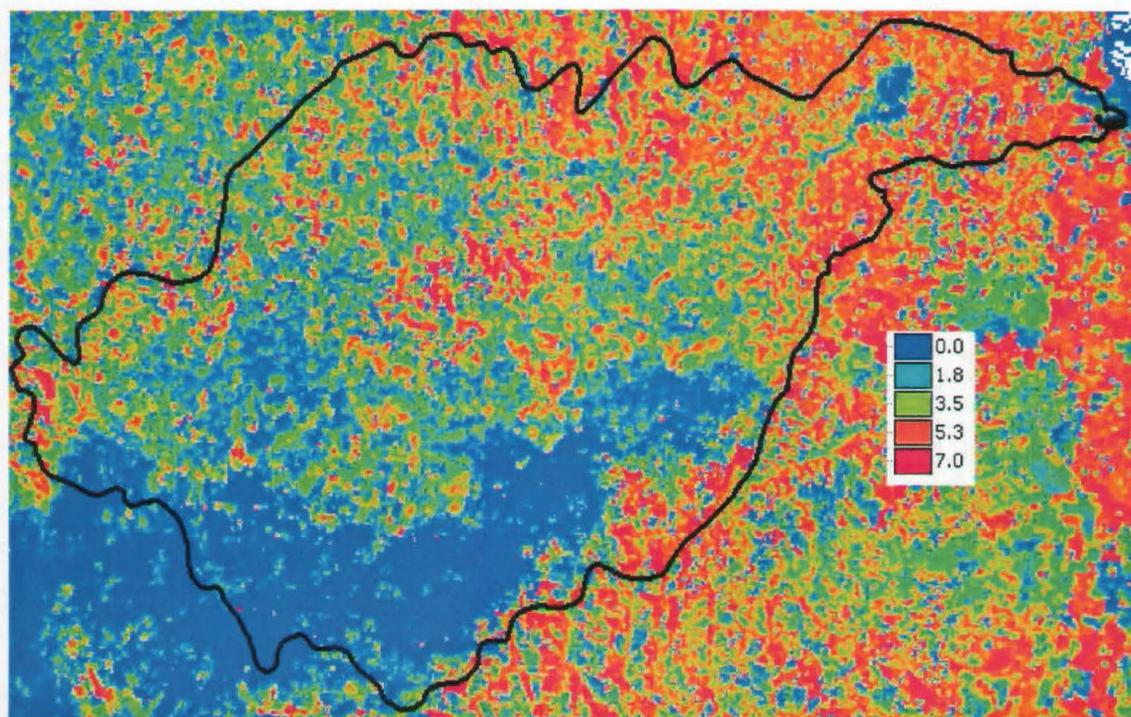


Fig. 6.42 La mappa di LAI dall'EVI del MODIS con sovrapposto il confine dell'area di studio.

## 7. DISCUSSIONE

### 7.1 Il LAI

Quando si confrontano dati di LAI bisogna tener conto, innanzi tutto, della definizione di LAI utilizzata, del tipo di vegetazione e del metodo analitico utilizzato (Martens *et al.*, 1993). Gli stessi autori, suggeriscono quindi, di usare sempre lo stesso strumento e la stessa metodologia per studi di LAI prolungati nel tempo e nello spazio. In questa tesi di dottorato sono stati messi a confronto due strumenti a *fish-eye* per la misurazione indiretta senza contatto del LAI, che si basano sulla stessa definizione di LAI e sull'analisi delle *gap fraction* (frazione delle aperture): il LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer* e la foto emisferica. Per rendere le due metodologie il più confrontabili possibile le misure sono state fatte nei medesimi punti di campionamento, con i sensori alla stessa altezza e orientati a nord. Le correlazioni tra i valori di LAI misurati con i due strumenti sono significative, in particolar modo alcune tipologie (l'acero-frassineto, il rimboschimento a pino nero e la faggeta) hanno un  $R^2$  elevato (rispettivamente 0.93, 0.96 e 0,80).

Un altro fattore di cui tener conto è che il LAI letteralmente è l'indice di area fogliare, ma gli strumenti considerati includono tutti gli oggetti "opachi" come rami, frutti, fusti ecc., quindi una terminologia più corretta per descrivere ciò che in realtà misurano sarebbe indice di area della chioma (FAI: *Foliage Area Index*) o indice di area della pianta (PAI: *Plant Area Index*). Gli strumenti non sono quindi in grado di distinguere se l'oggetto che blocca il passaggio della luce ha il tessuto fotosintetico oppure no. Per questo motivo, come suggerito da Fang *et al.* (2003), sono state fatte delle misurazioni anche in inverno in due tipologie forestali (acero-frassineto e faggeta) per valutare quanto la parte legnosa influenza il valore di LAI misurato in primavera estate. Il LAI medio misurato di inverno per l'acero-frassineto è di 0.26, quello della faggeta di 0.46. Inoltre, anche l'analisi della *gap fraction* non fa distinzioni tra i tronchi e le foglie, così pure la stima dell'angolo di orientamento delle foglie risulta soggetta ad errori.

Un altro dei fattori principali che causano errori nelle stime del LAI sono i raggruppamenti delle foglie (Jonckheere *et al.* 2004) e la distribuzione non casuale delle foglie. Per questo motivo sono stati introdotti dei fattori di correzione per le misurazioni fatte nelle conifere (si moltiplica il LAI per il fattore 1.5, secondo quanto proposto da Norman e Gower, 1990). Un altro fattore che influenza la misura del LAI in campo è

l'effetto della pendenza, poiché un terreno molto scosceso inevitabilmente ostruisce parte del campo di vista di un sensore a *fish-eye*, determinando una sovrastima del LAI (Walter e Torquebiau, 2000).

C'è da aggiungere che in linea generale gli strumenti per la misurazione ottica indiretta senza contatto del LAI sono stati creati per lo studio della copertura delle coltivazioni (Chen, 1996) e non per le foreste. Ma, in accordo con Jonckheere *et al.* (2004) tutti gli strumenti hanno dei problemi specifici e delle limitazioni e la scelta su quale strumento utilizzare deve tener conto dell'accuratezza richiesta, del periodo di tempo delle misurazioni, della scala della ricerca e della disponibilità di denaro ecc. Qui di seguito verranno elencati i principali problemi e vantaggi riscontrati in campo e nelle successive elaborazioni.

## 7.2 Il LAI-2000

Una debolezza potenziale dello strumento LAI-2000 è la misurazione al di fuori della vegetazione, poiché c'è la possibilità che le condizioni del cielo varino tra una misura e l'altra e non sempre è facile trovare una radura (Welles, 1990). Tale problema è stato riscontrato soprattutto in Brasile, dove in alcuni casi sono passate un paio d'ore tra la misura A e le misure B, proprio per l'impossibilità di trovare una radura nei pressi del transetto scelto. A questo inconveniente si potrebbe sopperire utilizzando due sensori che prendono contemporaneamente le misure una al di fuori della foresta, una al di sotto della copertura vegetale (Welles, 1990). Ma il problema persiste in ambienti piuttosto intricati come la foresta tropicale e, inoltre, lo strumento è relativamente costoso.

Lo strumento è stato pensato per una vegetazione omogenea e continua, come ad esempio le coltivazioni o le coperture erbacee, mentre nelle coperture eterogenee e discontinue è stata riscontrata una certa tendenza a sottostimare il LAI (Jonckheere *et al.*, 2004). In questo caso è possibile, utilizzando uno dei tappi, includere nel campo di vista del sensore zone dense e zone rade in misure diverse. I tappi sono utili anche nel caso in cui si abbia bisogno di mascherare l'operatore o il sole dal campo di vista del sensore o di evitare di includere nel campo di vista del sensore anche la chioma, nel caso la radura sia troppo piccola. Per sopperire all'inconveniente dei terreni scoscesi, invece, non è sufficiente orientare il sensore *fish-eye* parallelamente al terreno. Una procedura comune è quella di mascherare gli anelli più esterni dell'immagine, che comporta una perdita di dati

riguardante la *gap fraction* sull'orizzonte, quindi un'alterazione dei dati di LAI. Quand'è possibile, è meglio scegliere terreni la cui ripidità non superi il 20%.

I vantaggi di questo strumento sono la facilità di utilizzo, la rapidità, la trasportabilità e la possibilità di rendersi conto in campo se le misurazioni sono state fatte in modo corretto. Inoltre il poter elaborare i dati successivamente tramite il software C-2000 permette di calcolare il LAI, la frazione di cielo visibile e l'angolo di inclinazione delle foglie per ogni singolo punto del transetto. I dati così ottenuti possono essere confrontati con quelli delle foto emisferiche e con i valori degli indici di vegetazione di immagini con alta risoluzione spaziale.

### 7.3 La foto emisferica

I vantaggi dell'utilizzo della foto emisferica sono così riassunti:

- un'immagine della copertura vegetale fatta con la lente emisferica fornisce informazioni dettagliate sulla struttura della vegetazione. La *gap fraction* può essere ricalcolata determinando la frazione di cielo entro bande o anelli attorno al centro della foto (Welles, 1990);
- le informazioni angolari contenute nei dati di *gap fraction* possono essere analizzate in dettaglio in tutte le direzioni;
- gli effetti della riflessione e della diffusione possono essere controllati scegliendo una soglia opportuna per separare il cielo dalle foglie, sull'immagine digitale;
- è una valida alternativa alle altre tecniche quando la luce è troppo scarsa per permettere di lavorare con la trasmissione diretta della radiazione e quando l'assenza di una grande radura rende impraticabile le misurazioni di un cielo completamente libero da vegetazione;
- il controllo visivo delle fotografie sono un aiuto prezioso per l'analisi della struttura della vegetazione;
- le fotografie costituiscono un archivio permanente e possono essere utilizzate da altri ricercatori per altri scopi o quando nuovi modelli diventano disponibili (Martens *et al.*, 1993; Jonckheere *et al.*, 2004)

- le fotografie possono venir utilizzate anche per altre misure, come ad esempio la dimensione frattale, l'architettura e il regime di luce al di sotto della copertura vegetale (Walter e Torquiebau, 2000).

Gli svantaggi sono i seguenti:

- non dà risultati istantanei in campo come gli altri strumenti;
- la necessità di sviluppare il rullino, trasformarlo in digitale tramite uno scanner, analizzare le immagini al computer, oltre a richiedere un certo periodo di tempo, può introdurre errori ad ogni passaggio (Rich, 1990);
- l'inaccuratezza della dimensione delle aperture può derivare dalla scelta soggettiva della soglia della fotografia (Becker et al., 1989);
- le foglie illuminate dal sole possono essere facilmente confuse, nel momento dell'analisi, con piccole aperture della chioma.

Alcuni svantaggi possono essere superati con l'utilizzo di una macchina fotografica digitale al posto di quella analogica: innanzitutto il tempo perso per lo sviluppo e la scansione vengono eliminati, ma si riducono anche gli errori che possono essere introdotti con queste procedure. L'inconveniente è dato dalla necessità di una buona risoluzione che la macchina fotografica digitale deve avere per essere equiparabile alla qualità delle macchine tradizionali, influenzando però notevolmente sul prezzo.

Il metodo della soglia dovrebbe essere rimpiazzato da una tecnica di classificazione più efficiente e non soggettiva, come ad esempio, come è stato fatto per questa tesi, l'utilizzo del software Otsu che calcola automaticamente la soglia, senza interferenze da parte dell'operatore. Gli errori nella metodologia della fotografia emisferica, possono essere introdotte a diversi livelli (Rich, 1990):

- acquisizione dell'immagine: posizionamento della macchina fotografica, posizione orizzontale/verticale, esposizione, irregolarità della luce del cielo, irregolarità dell'illuminazione delle foglie (luce diretta), distorsione ottica;
- analisi dell'immagine: distinzione tra le foglie e le aperture della chioma, ipotesi di una distribuzione della luce solare diretta, ipotesi di una distribuzione della luce del cielo diffusa, ipotesi di una superficie di intercettazione, miglioramento/modifica dell'immagine;
- violazione dei modelli di assunzione: valutazione delle variazioni delle *gap fraction*, variabilità dell'angolo fogliare, considerazione dei raggruppamenti delle foglie.

Per ridurre l'introduzione di errori bisognerebbe cercare di usare sempre lo stesso tipo di pellicola, lo stesso scanner, lo stesso programma di elaborazione immagini nel caso sia necessario schiarire l'immagine e fare le misure con le medesime condizioni ambientali.

## 7.4 L'allometria

L'uso di modelli matematici che usano come variabili parametri degli alberi come il diametro all'altezza del petto, l'altezza dell'albero, il diametro della chioma ecc., per stimare la biomassa superficiale indirettamente, presentano dei limiti di accuratezza (Santos, 2003). È importante notare che queste misurazioni sono fatte in campo e che è possibile un accumularsi di errori (sistematici e strumentali) che possono comportare una sovrastima o una sottostima delle misurazioni, influenzando naturalmente il risultato del modello applicato. Resta il fatto che questo metodo, se pur laborioso, è uno dei più affidabili per la stima della biomassa legnosa, con il vantaggio di non essere distruttivo. I risultati ottenuti per la faggeta della foresta Cecconi e per l'acero-frassineto di Taipana, ad esempio, con le equazioni allometriche, sono molto simili a quelli ottenuti con il taglio. Naturalmente anche la scelta del modello è importante: la scelta migliore è quella di applicare delle equazioni specie-specifiche, ma nel caso della foresta tropicale ciò è risultato complicato per l'eterogeneità della composizione arborea, per l'abbondanza del numero di specie e in alcuni casi anche per la difficoltà nella determinazione della specie. In bibliografia è più semplice trovare delle equazioni che distinguono la foresta in primaria o secondaria o che si basano sulla classe dendrometrica. Per questo motivo sono state scelte due equazioni generiche per il calcolo della biomassa di piante con diametro maggiore o minore a 25 cm, in modo da ridurre la sovrastima della biomassa nel caso di alberi molto grossi. Le misure di biomassa in campo, soprattutto per il Friuli Venezia Giulia, sono risultate correlate significativamente con le misurazioni di LAI nei medesimi transetti.

Houghton *et al.* (2001) si domandano come migliorare l'accuratezza delle stime di biomassa su grande scala, ad esempio se è conveniente aumentare la dimensione dei transetti, o il numero degli stessi, se tener conto anche della biomassa morta, della biomassa epigea, delle liane ecc. La conclusione è che il fare misure solo in alcuni transetti isolati non dà l'idea del modello di distribuzione spaziale della biomassa, perché la

variabilità della foresta è notevole da un punto all'altro e l'approccio è statico, dà un'idea del modello di distribuzione della biomassa, ma non dei suoi cambiamenti.

## 7.4 Il telerilevamento

I maggiori problemi di cui tener conto quando ci si occupa della convalida dei dati di LAI sono (Chen, 2002):

1. l'accuratezza dei metodi di misurazione dei dati di LAI misurati in campo;
2. l'uso della definizione di LAI più appropriata;
3. i metodi per scalare spazialmente i dati di campo al pixel delle immagini satellitari;
4. l'accuratezza delle immagini di LAI.

Come espresso da Lu *et al.* (2002) la relazione tra la biomassa misurata in campo e i dati derivati dal telerilevamento dipendono da molti fattori:

- variazioni stagionali: bisogna tener conto sia delle variazioni stagionali del LAI (e del contenuto di clorofilla) che di quelle del *background* (sottobosco, muschio, suolo, erba). Anche per le piante sempreverdi, ci possono essere delle differenze importanti tra il LAI massimo annuale e il LAI medio durante la stagione di crescita.
- Tipo di vegetazione: morfologia della foglia, posizione della foglia sull'albero (in ombra o al sole), luminosità, composizione delle specie, struttura della vegetazione, stress della vegetazione, chiusura della vegetazione, riflettanza del sottobosco e del suolo.
- Esposizione e pendenza del suolo, che possono influenzare l'illuminazione solare e la distribuzione dell'umidità che direttamente influenzano la fotosintesi e l'accumulo di biomassa.
- Tipo di suolo: i suoli hanno diverse strutture fisiche, componenti e nutrienti che direttamente influenzano la crescita della vegetazione.
- Condizioni climatiche, principalmente il regime pluviometrico che influenza il rigore della vegetazione.
- Attività umane, come ad esempio la costruzione di strade, uso del suolo, ceduzione e pressioni antropiche sulle risorse forestali che comportano la perdita, il disturbo o la frammentazione di aree vegetate.

Le diverse variabili biofisiche che influenzano lo stato della crescita della vegetazione comportano una differente riflettanza della vegetazione misurata dal telerilevamento. Per

questo motivo i modelli che utilizzano i dati satellitari per la stima della produzione primaria e del carbonio assorbito, sulla base della mappe di LAI, dovrebbero tener conto dei dati ancillari e di molte variabili diverse (temperatura, precipitazioni ecc.)

## 7.5 Relazione tra la biomassa e gli indici di vegetazione

Per quanto riguarda i risultati del Friuli Venezia Giulia, la correlazione tra il LAI del LAI-2000 e la riflettanza del Landsat aumenta quando si separano le conifere dalle latifoglie in confronto all'analisi di entrambi i tipi di insieme, in accordo con Eklundh *et al.* (2003). In particolar modo le conifere risultano maggiormente correlate con gli indici di vegetazione derivati dal satellite Landsat:  $R^2=0.61$  per l'NDVI e  $R^2=0.45$  per l'RSR, con un modello di tipo lineare. Secondo quanto riscontrato in letteratura l'indice RSR dovrebbe normalizzare le differenze tra le foreste decidue e quelle di conifere e di conseguenza migliorare l'interpretazione del LAI nelle foreste miste. Per quanto riguarda le misurazioni fatte nel Friuli Venezia Giulia, ciò non è stato riscontrato. La differenza tra la correlazione del LAI e l'NDVI, e tra il LAI e l'RSR è veramente minima ( $R^2=0.36$  e  $0.37$  rispettivamente).

Per la fotografia emisferica i risultati sono stati meno soddisfacenti probabilmente a causa del minor numero di rilievi fatti in campo, della maggior sensibilità della foto emisferica alle condizioni di tempo non ideali e della introduzione di errori in campo e durante il processamento delle immagini. Le correlazioni tra l'NDVI e la foto emisferica sono significative considerando tutti i rilievi e le conifere, tra RSR e le foto solo nel caso delle conifere. Per questo motivo, per la creazione delle mappe di LAI sono stati considerate solo le equazioni lineari tra gli indici e il LAI del LAI-2000.

Le immagini MODIS sono degli stessi giorni in cui sono state fatte le campagne a terra, quindi è stato possibile utilizzare anche i dati di LAI invernali (Saito *et al.*, 2001; Wunderle *et al.*, 2003; Tian *et al.*, 2004).

Sia l'NDVI che l'EVI del MODIS hanno dato risultati migliori considerando tutti i rilievi e le latifoglie, sia con il LAI-2000 che con la foto emisferica, mentre la correlazione non è significativa considerando separatamente le conifere. In questo caso la relazione migliore è la logaritmica, il LAI-2000 è maggiormente correlata all'EVI rispetto alla foto emisferica, mentre la foto emisferica è più correlata all'NDVI rispetto al LAI-2000.

Per le mappe di LAI, non avendo dati sui boschi planiziali e sull'agricoltura, tutto quello che non faceva parte della mappa delle tipologie forestali è stato mascherato.

Per quanto riguarda il Brasile, è stato utilizzato solo il LAI-2000. Poiché l'immagine Landsat non copre tutta l'area di studio, non è stato possibile utilizzare tutti i dati presi in campo. Inoltre, come per il Friuli Venezia Giulia, l'immagine non corrisponde al periodo delle misurazioni in campo, ma è dell'anno precedente ai rilievi. In questo caso la correlazione con l'NDVI è inferiore rispetto a quella dell'RSR, ma per entrambi gli indici la relazione logaritmica è migliore. Per le immagini MODIS sono stati utilizzati tutti i rilievi e le immagini corrispondono alle date della campagna a terra. L'EVI con l'equazione lineare dà risultati migliori, rispetto a quelli dell'NDVI. I dati di campo sono stati confrontati con quelli del prodotto MOD15 del MODIS, ma i risultati non sono significativi. La mappa di LAI, che ha una risoluzione di un km, non riesce a spiegare bene la frammentarietà del territorio considerato. Per le mappe di LAI del Brasile è stato necessario mascherare le nuvole, presenti su una buona parte dell'area di studio, e le città. Avendo a disposizione anche i dati del pascolo, le mappe di LAI prodotte coprono tutta l'area di studio. È stata comunque prodotta anche una mappa di LAI, mascherando il pascolo, sulla base delle correlazioni tra l'NDVI del Landsat e i punti presi nella foresta, nella *cabruca*, nella *capoeira* e nelle piantagioni di alberi da frutto.

Le misurazioni di biomassa legnosa sono state fatte solo in 6 transetti, suddivisi per tre tipologie: la foresta primaria, la foresta secondaria e la *cabruca*. I transetti di Teimoso hanno una biomassa maggiore rispetto quella degli altri transetti, poiché ci sono meno alberi, ma essi sono più alti e più grossi (il diametro massimo misurato è di 150 cm), con una maggior percentuale di *gap fraction* (per questo il LAI è inferiore) rispetto a quelli della Mata de Esperança. La *cabruca* (Salomeia) ha una biomassa elevata perchè ci sono alcuni alberi molto grossi (il diametro massimo è di 104 cm), non appartenenti alla specie di cacao, ma alla foresta naturale, e perchè la pianta di cacao è formata da più polloni che contribuiscono ad aumentare la biomassa legnosa, ma tra le diverse piante ci sono maggiori aperture e per questo il LAI è inferiore. Per questi motivi la correlazione tra la biomassa legnosa e verde è inversa nei transetti del Brasile.

## 8. CONCLUSIONI

Un confronto effettuato tra i valori medi degli indici ottenuti (LAI con il LAI-2000, LAI con la foto emisferica, NDVI con il Landsat, RSR con il Landsat, NDVI con il MODIS e EVI con il MODIS) e le diverse formazioni forestali mette in evidenza che tutti gli indici considerati sono fortemente correlati con le fasi terminali della successione ecologica nelle diverse formazioni o con le situazioni a maggior umidità, come nel caso del caripineto e del corileto. Il fatto che la foresta tropicale si distingua dalle foreste della regione Friuli Venezia Giulia, può significare che il metodo di confrontare le associazioni vegetali sulla base di questi indici può mettere in evidenza non situazioni di maggiore o minore quantità di biomassa verde, ma anche situazioni diverse per quanto riguarda la struttura.

Questa tesi di dottorato offre quindi una possibile procedura di monitoraggio del territorio basata sull'integrazione delle misure a terra con il telerilevamento. Il telerilevamento infatti fornisce l'unica via per ottenere il LAI su vaste aree. Le mappe di LAI, che derivano dalle immagini satellitari come quelle ottenute in questa tesi di dottorato, sono un'importante base per alcuni modelli di produzione degli ecosistemi dalla scala locale a quella globale, e per modelli di interazione tra la biosfera e l'atmosfera in alcuni modelli di circolazione, quindi per modelli di NPP e per stime di carbonio. E quindi possono essere utilizzate per studi futuri.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 2000. *Tavole dendrometriche regionali*, Regione Emilia-Romagna, assessorato agricoltura ambiente e sviluppo sostenibile, Direzione Generale Programmazione e Pianificazione Urbanistica, Servizio Paesaggio, Parchi e Patrimonio Naturale, Ufficio Risorse Forestali (<http://www.regione.emilia-romagna.it/foreste/risforestali/download%5Ctavole.pdf>).
- AA.VV., 2002. *Analisi multispettrale di dati telerilevati per la verifica dello stato vegetazionale e del suolo montano*, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale della pianificazione territoriale/Direzione regionale delle foreste & Consorzio per l'innovazione dei Sistemi Informativi Geografici dei grandi bacini fluviali.
- Alberti G., Candido P., Peressotti A., Turco S., Piussi P., Zerbi G., in stampa. *Aboveground biomass relationships for ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) mixed stands in Eastern Prealps of Friuli Venezia Giulia (Italy)*.
- Alger K. and Caldas M. 1996. *Cacau na Bahia. Decadência e ameaça à Mata Atlântica*. *Ciência Hoje* 20, 117, 28–35.
- Altobelli A., Napolitano R., Bressan E., Ganis P. and Feoli E., 2003. *Analisi dell'informazione spettrale della vegetazione tramite l'impiego di indici ottenuti da immagini satellitari Landsat*, Proceeding del XIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia, Como, 8-10 settembre 2003. (<http://www.xiiicongresso.societaitalianaecologia.org/articles/Altobelli-72.pdf>)
- Alves M.C., 1990. *The role of cacao plantations in the conservation of the Atlantic Forest of southern Bahia, Brasil*. Non pubblicato, tesi di Master, University of Florida, Gainesville, Florida.
- APAT, 2002. *Assorbimento e fissazione di carbonio nelle foreste e nei prodotti legnosi in Italia*, Rapporti 21/2002, Roma, 68 pp.
- Aronoff S., 1989. *Geographic Information Systems: a management perspective*, WDL Publications, Ottawa, pp. 1-294
- Asner G. P., Scurlock J. M. O., Hicke J. A., 2003. *Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies*. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 195-205.
- Barbour M. G., Burk J. H., Pitt W. D., 1987. *Terrestrial plant ecology*, Menlo Park, CA: Benjamin/Cummings.
- Baret F., Guyot G. e Major D. J., 1989. *TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation*. In: *Proceedings of the 12° Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89*, Vancouver, Canada, 3, 1355-1358.
- Beadle C. L., 1993. *Growth analysis*. In: *Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual*, Hall D. O. ed., Chapman & Hall, London, 36-46.
- Becker P., Erhart D.W., Smith A.P, 1989. *Analysis of forest light environments. Part I. Computerised estimation of solar-radiation from hemispherical canopy photographs*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 44, 217-232.

- Bianchi R., Cavalli R. M., Marino C. M., Pignatti S., 1994. *Mivis Airbone Hyperspectral Remote Sensing in Europe, Proceeding of the first International Airbone Remote Sensing Conference and Exhibition*, Sept. 1994, Strasbourg, France, 205 paper, 2095 pages, 3 vol.
- Boegh E., Soegaard H., Broge N., Hasager C.B., Jensen N.O., Schelde K., Thomsen A., 2002. *Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture*, Remote Sensing of Environment, 81, 179-193.
- Bortoli P. L., Perini P., Moro E., Stroppa M., Missio A., 2001. *Boschi e territori nella regione Friuli Venezia Giulia, tutela e valorizzazione*, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione regionale delle foreste e della caccia, Fagagna (UD).
- Brown S., Gillespie A. J. R., Lugo A. E., 1989. *Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data*, Forest Science, 35, 4, 881– 902.
- Campbell G. S., 1986. *Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution*, Agricultural and Forest Meteorology, 36, 317-321.
- Castellani, 1982. *Tavole stereometriche ed alsometriche costruite per boschi italiani*, Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura.
- CEPLAC, 1976. *Diagnostico socioeconomico da regio cacueira. Comissao Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira* (CEPLAC), Ilheus, Bahia, Vol. 3, 4, 7.
- Chazdon R.L., Field C.B., 1987. *Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique*, Oecologia. 73, 525-532.
- Chen J. M., 1996. *Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands*, Agricultural and Forest Meteorology, 80, 135-163.
- Chen J. M. e Black T. A., 1992. *Defining leaf area index for non-flat leaves*, Plant, Cell and Environment, 15, 421-429.
- Chen J. M., Pavlic G., Brown L., Cihlar J., Leblanc S. G., White H. P., Hall R. J., Peddle D. R., King D. J., Trofymov J. A., Swift E., Van der Sanden J. e Pellikka P. K. E., 2002. *Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements*, Remote Sensing of Environment, 80, 165– 184.
- Coops N. C., Waring R. H., Landsberg J. J., 1998. *Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite derived estimates of canopy photosynthetic capacity*, Forest Ecology and Management, 104, 113-127.
- Cournac L., Dubois M.A., Chave J., Riéra B., 2002. *Fast determination of light availability and leaf area index in tropical forests*, Journal of Tropical Ecology, 18, 295-302.
- Davis F. W., and Roberts D., 2000. *Stand structure in terrestrial ecosystems*. In: Methods in ecosystem science, edito da Sala, Jackson, Mooney, Howarth, New York, Springer, 7-30.
- De Carvalho A. M., Lobao D., De Carvalho D. L., 1997. *Ecossistemas e Agroecossistemas do Sudeste da Bahia- Bioma Mata Atlantica*. In: Kadja Maria Ribeiro Parente e Sergio Novais Dias 1996-1997. Revista dos Mestrados em Direito Economico da UFBA. Edicao Especial Direito Ambianta, 55-84.

- Del Favero R., Poldini L., Bortoli P. L., Lasen C., Dreossi G., Vanone G., 1998. *La vegetazione forestale e la selvicoltura nella regione Friuli-Venezia Giulia*, vol. I. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale delle Foreste, Servizio della Selvicoltura, Udine
- Dermanis A. & Biagi L., 2002. *Telerilevamento. Informazione territoriale mediante immagini da satellite*. Casa Editrice Ambrosiana.
- Dong J., Kaufmann R. K., Myneni R.B., Tucker C. J., Kauppi P. E., Liski J., Buermann W., Alexeyev V., Hughes M. K., 2003. *Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources and sinks*, Remote Sensing of Environment, 84, 393-410.
- Dov Por F., 1992. *Sooretama, the Atlantic rainforest of Brazil*. SPB Academic Publishing. The Hague.
- Eklundh L., Hall K., Eriksson H., Ardö J., Pilesjö P., 2003. *Investigating the use of Landsat thematic mapper data for estimation of forest leaf area index in southern Sweden*, Canadian Journal of Remote Sensing, 29, 349-362.
- Fang H., Liang S., and Kuusk A., 2003. *Retrieving leaf area index using a genetic algorithm with a canopy radiative transfer model*, Remote Sensing of Environment, 85, 3, 257-270.
- Feoli E. e Orloci L., 1991. *Properties and interpretation of observations in vegetation study*, Coenoses, Edizioni LINT Trieste, Italia, 6, (2), 61-70
- Fonseca G.A.B., 1985. *The vanishing Brazilian Atlantic Forest*. Biological Conservation 33, 1-18
- Gardingen van, P.R., Jackson, G.E., Hernandez-Daumas, S., Russell, G., Sharp, L. 1999. *Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography*, Agricultural and Forest Meteorology, 94, 243-257.
- Gomasasca M. A., 2001. *Il telerilevamento nella geomatica*. In: Telerilevamento e ambiente. Atti del seminario sulle applicazioni ambientali del telerilevamento da satellite e da aereo. Bologna, 23 novembre 2001, I quaderni di Arpa.
- Gower S. T., Kucharik C. J., Norman J. M., 1999. *Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems*, Remote sensing of environment, 70, 29-51.
- Gower S. T., Norman J. M., 1991. *Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations*, Ecology, 72, 5, 1896-1900.
- Hardinsky, M. A., Klemas V., Smart R. M et al. , 1983. *The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of Spartina alterniflora canopies*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49, 1, 77-83.
- Henderson F. M. e Lewis A. J., 1998. *Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing*, Wiley, New York, vol. 2.
- Herbert, T.J., 1987. *Area projection of fisbeye photographic lenses*, Agricultural and Forest Meteorology, 39, 215-223.

- Hernandez J. A., Montañez A. G., 2002. *Estimacion de la tasa de fijacion de carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero ( Cordia alliodora) – cacao (Theobroma cacao L) – platano (Musa paradisiaca)*, Tesi di Laurea di Ingegneria Forestale, Università “Francisco José de Caldas”, facoltà dell'ambiente e delle risorse naturali, Bogota, Colombia.
- Hoffer R.M., 1978. *Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data*. In: *Remote sensing: the quantitative approach*, edito da Swain e Davis, McGraw-Hill Book Company, 227-289.
- Houghton R. A. Lawrence K.T., Hackler J.L., Brown S., 2001. *The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: A comparison of estimates*, *Global Change Biology*, 7, 731-746.
- Hu H., Shibasaki R., Elgene O. Box E. O., 1996. *Generation of Global Terrestrial Biomass Map by Integrating Satellite Data and Carbon Dynamics Model*, Proceeding of 17<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Sri Lanka, 4-8 novembre 1996 (<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1996/index.htm>)
- Huete A., (1988). *A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)*, *Remote Sensing of Environment*, 23, 213-232
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F., 2004. *Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photograph*, *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19-35.
- ISAF, 1988. *Inventario forestale 1985*, Ministero dell'agricoltura e delle foreste, Istituto Sperimentale per l'Assessment Forestale e per l'Apicoltura, Trento.
- Jordan C. F., 1969. *Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor*, *Ecology*, 50, 4, 663-666.
- Kueh R.J.H., Lim M. T., 1999. *Forest biomass estimation in Air Hitam Forest Reserve*, 7pp., ([www.geocities.com/EnchantedForest/Palace/1170/biomass.html](http://www.geocities.com/EnchantedForest/Palace/1170/biomass.html)).
- Kucharik, C. J., J. M. Norman, and S. T. Gower. 1999. *Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach*. *Tree Physiology* 19, 695-706.
- Landsberg J. J., Waring R. H., 1997. *A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance, and partitioning*. *Forest Ecology and Management*, 95, 209-228.
- Lang A. R. G., 1986. *Leaf area and average leaf angle from transmittance of direct sunlight*. *Australian Journal of Botany*, 34, 349-355.
- Lang A. R. G., Xiang Y., 1986. *Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies*, *Agricultural and forest meteorology*, 37, 229-243
- Lang A. R. G., 1987. *Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam*, *Agricultural and forest meteorology*, 41, 179-186.
- LI-COR, 1992. *LAI-2000 plant canopy analyzer operating manual*, LI-COR, Lincoln, Nebraska.

- Lieth H.F.H., 1973. *Primary production: terrestrial ecosystems*. Human Ecology, 1, 303-332.
- Lieth H.F.H., Box E., 1972. *Evapotranspiration and primary productivity: C.W. Thornthwaite Memorial Model*. Publications in Climatology, 25, 37-46. Centerton/Elmer, New Jersey.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*, Wiley & Sons, New York, pp. 750
- Liu H. Q. e Huete, A. R., 1995. *A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33, 457– 465.
- Lu D., Mausel P., Brondizio E. e Moran E., 2002. *Above-ground biomass estimation of successional and mature forests using TM images in the Amazon Basin*. Symposium on geospatial theory, processing and application, Ottawa, 2002.
- Martens S. N., Ustin S. L., Rosseau R. A., 1993. *Estimating of tree canopy leaf area index y gap fraction analysis*, Forest Ecology and Management, 61, 91-108
- Middleton M. R., 2004. *Analisi statistica con Excel*, Apogeo.
- Miller J. B., 1967. *A formula for average foliage density*, Australian Journal of Botany, 15, 141-144.
- Mitchell, P. L., Whitmore, T.C. 1993. *Use of hemispherical photographs in forest ecology calculation of absolute amount of radiation beneath the canopy*, Oxford Forestry Institute, Oxford, United Kingdom.
- Monteith J. L., 1972. *Solar radiation and productivity in tropical exosystems*. Journal of Applied Ecology. 9, 747-766
- Monteith J. L., 1977. *Climate and efficiency of crop production in Britain*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 107, 749-774.
- Myneni R. B., Knyazikhin Y., Privette J. L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Hoffman S., Song X., Zhang Y., Smith G. R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J. T., Votava P., Nemani R. R., Running S. W, 2002. *Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data*, Remote Sensing of Environment, 83, 214– 231.
- Nelson B. W., Mesquita R., Pereira J. L. G., de Souza S. G. A., Batista G. T., Couto L. B., 1999. *Allometric regression for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon*, Forest Ecology and Management, 117, 149-167.
- Norman, J. M. e Campbell G.S., 1989. *Canopy structure*. In: Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation, edito da Percy, Ehleringer, Mooney e Rundel, Chapman and Hall, London and New York, 301-325.
- Norman J.M. and Welles J.M., 1983. *Radiative transfer in an array of canopies*. Agronomy journal, 75, 481-488.
- Otsu N., 1979. *A threshold selection method from gray level histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 9, 62-66.

- Overman J. P. M., Witte I. I. J. L., Saldarriaga J. G., 1994. *Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforests*. *Journal of Tropical Ecology*, 10, 207-218.
- Pitea D., De Cesaris A. L., Marchetti G., 1998. *Ricerche & Risultati: Valorizzazione dei progetti di ricerca 1994/97. Individuazione, caratterizzazione e campionamento di ammassi abusivi di rifiuti pericolosi*. Disponibile al sito: [www.flanet.org/download/publications/ricercherisultati/pitea1.pdf](http://www.flanet.org/download/publications/ricercherisultati/pitea1.pdf).
- Poldini L., 1989. *La vegetazione del Carso Isontino e Triestino*, ed. LINT, Trieste, pp. 313
- Purevdorj Ts., Tateishi R., Ishiyama T., Honda Y., 1998. *Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices*. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (18), 3519-3535
- Rich P. M., 1990. *Characterizing plant canopies with hemispherical photographs*, *Remote Sensing Reviews*, 5, 1, 13-29
- Rich P. M., Wood J., Vieglais D. A., Burek K., Webb N., 1999. *HemiView User Manual Version 2.1*, Nick Webb.
- Richardson A. J. e Wiegand C. L., 1977. *Distinguishing vegetation from soil background information*, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 43, 2, 1541-1552.
- Röhrig E., (1991). *Biomass and productivity*. In: E. Röhring and B. Ulrich (Eds.), *Ecosystems of the world*. Temperate deciduous forests, Elsevier, 165-174.
- Rouse J. W. Jr., Haas R.H., Deering D. W., Schell J. A. e Harlan J. C., 1974. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD.
- Ruimy, A., Saugier, B. et al., 1994. *Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data*. *Journal of Geophysical Research*, 99, 5263-5283
- Saito K., Ogawa S., Aihara M., Otowa K., 2001. *Estimates of LAI forest management in Okutama*, *Proceeding of 22<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing*, 5-9 novembre, Singapore.
- Santos J. R., Freitas C. C., Araujo L. S., Dutra L.V., Mura J. C., Gama F.F., Soler L.S., Sant'Anna S.J.S., 2003. *Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest*, *Remote Sensing of Environment*, 87, 482-493
- Scurlock J. M. O., Asner G. P., Gower S. T., 2001. *Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932-2000*. ORNL/TM-2001/268. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA. 34 pp.
- Sena Gomes A. R., 1992. *Sistemas Agrossilviculturais do Sudeste da Bahia*. In: Luiz Roberto Graca ed. 2° Encontro Brasileiro de Economia e Planejamento Forestal :Sistemas Agroforestais no Brasil. Aspectos Tecnicos e Economicos. 1992. ANAIS Vol 1, 109-122.
- Susmel L., 1988. *Principi di ecologia. Fattori ecologici, ecosistemica, applicazioni*. Ed. CLEUP, Padova.

- TBFRA-2000, 2000. *Forest resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/boreal countries)*. UN-ECE/FAO contributions to the global forest resources assessment, New York, United Nations, 155–171.
- Tian Y., Dickinson R. E., Zhou L., Zeng X., Dai Y. J., Myneni R.B., Knyazikhin Y., Zhang X., Friedl M., Yu H., Wu W., Shaikh M., 2004. *Comparison of seasonal and spatial variations of leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Common Land Model*, Journal of Geophysical Research, 109,D0, 1103-1116.
- Thomas WM. W., Carvalho A. M. V., Amorim A. M. A., Garrison J. and Arbeláez A. L. 1998. *Plant endemism in two forests in southern Bahia, Brazil*. Biodiversity and Conservation, 7, 311 – 322.
- Torres M. L. M., Rego N. C., Levy M. C. T. C., Nacif P. G. and Moreau, M. 2001a. *Diagnóstico das bacias hidrográficas dos rios Cachoeira e Almada. Caracterização Climatológica*. In: Bahia: Governo do Estado da Bahia/Secretaria de Infra-estrutura/Superintendência de Recursos Hídricos (Programa de Recuperação das Bacias dos Rios Cachoeira e Almada), Vol. I, Tomo III , 81 pp.
- Torres M. L. M., Rego, N. C., Levy M. C. T. C., Nacif P. G. and Moreau M. 2001b. *Diagnóstico das bacias hidrográficas dos rios Cachoeira e Almada. Caracterização do meio físico*. In: Bahia: Governo do Estado da Bahia/Secretaria de Infra-estrutura/Superintendência de Recursos Hídricos (Programa de Recuperação das Bacias dos Rios Cachoeira e Almada), Vol. I, Tomo I, 76 pp.
- Traviglia A., 2005. *Using remotely sensed MIVIS (Multispectral Infrared & Visible Imaging Spectrometer) images for recognizing archaeological sites in the Aquileia area and the managing G.I.S.*, Tesi di Dottorato in “Geomatica e sistemi informativi territoriali, Università degli Studi di Trieste.
- Uchijima Z., Seino H., 1985, *Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations: (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity*, Journal of Agricultural Meteorology, 40,4, 343-352.
- Uhl C., Buschbacher R., Serraõ E. A. S., 1988. *Abandoned pastures in eastern Amazonia: I. Patterns of plant succession*, Journal of Ecology, 76, 663– 681.
- Walter J.M., Torquebiau E., 2000. *The computation of forest leaf area index on slope using fish-eye sensors*. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Life Sciences, 323, 801–813.
- Wang Y. S., Miller D. R., 1987. *Calibration of the hemispherical technique to measure leaf area index distribution in hardwood forests*, Forest Science, 33, 210-226
- Waring R. H., 1985. *Estimates of forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area*, Advances in Ecological. Research, 13, 327-354.
- Warren Wilson J. e Reeve J. E., 1959. *Analysis of the spatial distribution of foliage by two-dimensional point quadrats*, New Phytology, 58, 92-101.
- Welles J. M., 1990. *Some indirect method of estimating canopy structure*, Remote Sensing Reviews, 5(1), 31-43
- Welles J. M., Norman J. M., 1991. *Instrument for Indirect Measurement of Canopy Architecture*, Agronomy Journal, 83, 5, 818-825

- Whittaker R. H., 1975. *Communities and Ecosystem*, Collier Mac Millan, New York
- Wilson J.W., 1963. *Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats*, Australian Journal of Botany, 11, 95-105.
- Wilson J.W., 1981. *Analysis of growth, photosynthesis and light interception for single plants and stands*, Annals of botany, 48, 507-512.
- Woodward F. I., 1987. *Climate and plant distribution*, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Wunderle S., Oesch D., Hauser A., Foppa N., 2003. *Operational derivation of vegetation parameters (NDVI, vegetation coverage and LAI) for the European alps using NOAA-AVHRR data*, The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Weimar, Germany, 29.09.-03.10.2003, (www.eumetsat.int)

## SITI INTERNET CONSULTATI:

- [http://ambiente.triesteincontra.it/wwf/stories/storyReader\\$811](http://ambiente.triesteincontra.it/wwf/stories/storyReader$811)
- [boscodidattico.provincia.cremona.it/album/alberi](http://boscodidattico.provincia.cremona.it/album/alberi)
- [www.iaa.cnr.it/iaa/images/storia/Foto15e.jpg](http://www.iaa.cnr.it/iaa/images/storia/Foto15e.jpg)
- [www.licor.com](http://www.licor.com)
- [www.sensytech.com/Imaging/MIVIS.html](http://www.sensytech.com/Imaging/MIVIS.html)
- <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>
- [http://www.hyperfvg.org/img\\_fvg/photo/panorami/panorama\\_index.html](http://www.hyperfvg.org/img_fvg/photo/panorami/panorama_index.html)
- <http://www.parcapuane.toscana.it/gallery/>
- <http://www.thic.org/>
- <http://www.uatla.pt/ecoman/>
- <http://modis.gsfc.nasa.gov/>