

SIMONETTA PALOSCIA (*) - GIOVANNI MACELLONI (*)
EMANUELE SANTI (**)

APPLICAZIONI DI TECNICHE DI TELERILEVAMENTO A MICROONDE PER L'OSSERVAZIONE DI ECOSISTEMI FORESTALI

FDC 585

Il crescente interesse per i problemi ambientali e i cambiamenti climatici ha portato alla ribalta gli ecosistemi forestali per il loro ruolo nei processi idrologici e biochimici. Ricerche sperimentali e teoriche hanno messo in evidenza che il telerilevamento a microonde può dare un contributo significativo allo studio dei parametri della vegetazione arborea.

In questo articolo sono riassunti alcuni dei principali risultati ottenuti con sensori a microonde sia attivi (SAR) che passivi (radiometri IROE) su siti forestali per quanto riguarda la classificazione di boschi e la stima della biomassa arborea.

Studi condotti sull'area sperimentale di Montespertoli fra il 1990 e il 1994 con radar tipo SAR (Synthetic Aperture Radar), montato sia a bordo di aerei (AIRSAR/JPL) che di satelliti (ERS e JERS), hanno messo in evidenza una buona sensibilità del segnale radar alla biomassa arborea, soprattutto alle frequenze più basse (bande L e P).

Un altro tipo di indagine è stata invece condotta con i radiometri a microonde del gruppo IFAC (operanti nelle bande L, C, X, Ku, e Ka) nel giugno 1999 su sei boschi di latifoglie in Toscana (faggio, cerro e leccio). Su questi boschi esistevano dati di verità a terra, raccolti nell'ambito di un progetto europeo (MONITO), che sono stati resi disponibili dalla Regione Toscana. Dall'analisi dei risultati si è riscontrata una buona sensibilità alla biomassa forestale da parte dell'1.4 GHz e anche una discreta capacità delle frequenze più alte a distinguere diversi tipi di boschi.

INTRODUZIONE

Le foreste agiscono come un'interfaccia fra il suolo e l'atmosfera per gli scambi dei flussi di ossigeno, biossido di carbonio e vapore acqueo attra-

(*) Ricercatori presso l'Istituto di Fisica Applicata - IFAC/CNR via Panciatichi, 64 - 50127 Firenze s.paloscia@ifac.cnr.it

(**) Dottorando presso l'Istituto di Fisica Applicata - IFAC/CNR via Panciatichi, 64 - 50127 Firenze.

verso i processi di respirazione, fotosintesi e evapotraspirazione. Sono inoltre coinvolte nel ciclo del carbonio (specialmente come responsabili dell'immagazzinamento dell'anidride carbonica), che è un elemento fondamentale per l'effetto serra ed i cambiamenti globali del clima. Negli ultimi anni è notevolmente aumentato l'interesse per il telerilevamento degli ecosistemi forestali perché un'osservazione efficace dei cambiamenti sia naturali che antropici può aiutare a comprendere meglio i processi idrologici e biochimici che regolano gli scambi di gas ed acqua fra il suolo e l'atmosfera, attraverso la vegetazione. D'altra parte, i cambiamenti globali sono una seria minaccia per gli ecosistemi forestali, a loro volta ormai indeboliti dall'impatto antropico (incendi, deforestazione e inquinamento). In ogni caso, una pronta osservazione dei cambiamenti negli ecosistemi forestali è molto importante ed un controllo continuo con tecniche di telerilevamento può fornire informazioni utili per mettere in evidenza le future evoluzioni dei processi in atto. Studi teorici e indagini sperimentali hanno evidenziato che il telerilevamento a microonde può contribuire in modo significativo allo studio dei parametri del suolo e della vegetazione boschiva a causa della forte sensibilità delle microonde all'acqua contenuta nei corpi osservati. Attualmente sono disponibili dati sperimentali a microonde raccolti per la maggior parte su foreste boreali di conifere nell'Europa e nell'America del Nord, mentre pochi dati sono disponibili sulle foreste dell'Europa Centrale e Meridionale, caratterizzate principalmente da alberi di latifoglie. Lo scopo di questa ricerca è quello di esplorare le potenzialità dei sensori a microonde nello studio delle caratteristiche dei boschi Mediterranei per definire i reali cambiamenti nello stato delle foreste e la loro risposta alle diverse condizioni ambientali. Due aspetti significativi si riferiscono alla classificazione delle foreste ed al calcolo della biomassa arborea.

METODI DI TELERILEVAMENTO A MICROONDE

La radiazione a microonde, il cui spettro è compreso circa fra 0.1 e 100 cm, è fortemente influenzata dalle proprietà dielettriche dei corpi osservati, che sono caratterizzati dalla loro costante dielettrica complessa. La costante dielettrica è una misura della risposta del mezzo ad un'onda elettromagnetica e, nell'intervallo spettrale delle microonde, essa è compresa fra valori molto piccoli (1-5) per la sostanza secca e circa 80 per l'acqua libera. Questo forte divario è la ragione dell'elevata sensibilità delle microonde alla presenza di acqua nelle superfici osservate. Questa banda spettrale inoltre presenta anche altre caratteristiche interessanti, quali l'indipendenza dall'illuminazione solare, che rende possibile la visione notturna.

na, e l'elevata capacità penetrazione che consente l'osservazione anche attraverso le nubi e permette di avere informazioni su interi strati di vegetazione e di terreno e non solo sulla superficie (ULABY *et al.*, 1981). La possibilità di utilizzare diverse frequenze all'interno dell'intervallo spettrale esalta questa proprietà consentendo di analizzare maggiormente il terreno o la vegetazione utilizzando lunghezze d'onda diverse. Di conseguenza le microonde possono dare un contributo notevole alla stima di diversi parametri rappresentativi del ciclo idrologico quali l'umidità del terreno, l'equivalente in acqua e l'umidità della neve, la copertura e la biomassa vegetale sia erbacea che arborea. Nel caso degli ecosistemi forestali l'utilizzo di lunghezze d'onda piuttosto elevate (da 20 cm in su) permette di penetrare attraverso la spessa copertura vegetale di un bosco e di avere perciò informazioni sull'intero strato della vegetazione o per lo meno su una porzione consistente di questo. Utilizzando invece lunghezze d'onda più corte si ottengono informazioni prevalentemente dallo strato superficiale e quindi più legate ad aspetti di classificazione della superficie.

I sensori a microonde si dividono in due categorie: attivi (radar) e passivi (radiometri). Fra i primi, che hanno una propria sorgente di illuminazione, il più potente e versatile è senza dubbio il radar ad apertura sintetica (SAR) che può operare indifferentemente sia da aereo che da satellite con la stessa risoluzione a terra, dell'ordine di pochi metri. Il parametro principale utilizzato per l'analisi dei dati SAR è il coefficiente di backscattering (σ°).

I radiometri sono strumenti che captano la radiazione a microonde emessa dalla superficie e, se montati a bordo di satelliti, hanno il difetto di una scarsa risoluzione a terra, che è di diverse decine di chilometri. In questo caso sono perciò utilizzati prevalentemente per il monitoraggio a larga scala ai fini dello studio dei cambiamenti climatici globali. Occorre però considerare che la prossima generazione di sensori (ESTAR, SMOS, AMSR) raggiungerà una risoluzione migliore della precedente, dell'ordine per l'AMSR di circa 5 Km alla frequenza più alta (85 GHz) e circa 50 Km a quella più bassa (6.8 GHz). I radiometri aerotrasportati, a causa della bassa quota a cui possono volare, hanno ovviamente una risoluzione più spinta (circa 30-50 metri, a seconda della frequenza) e possono essere utili per analisi dettagliate di alcune aree particolari e per la sorveglianza di foreste che sono soggette a incendi o ad altre calamità improvvise. I parametri radiometrici comunemente utilizzati sono la temperatura di brillantezza (T_b) e la temperatura normalizzata (T_n , ovvero il rapporto fra le temperature di brillantezza a microonde e ad infrarosso).

DESCRIZIONE DEGLI ESPERIMENTI

Campagne SAR

Sull'area di Montespertoli sono state effettuate due campagne SAR nell'ambito del progetto internazionale SIR-C/X-SAR, di cui una nell'estate del 1991 con un SAR multifrequenza aerotrasportato della NASA/JPL (AIR-SAR). Le bande del SAR erano la P (corrispondente a 0.45 GHz, circa 60 cm di lunghezza d'onda), L (1.2 GHz, circa 21 cm) e C (5.3 GHz, circa 6 cm) (MACELLONI *et al.*, 1999, HELD *et al.*, 1988). La seconda campagna è stata effettuata in aprile e ottobre 1994 con lo Shuttle SIR-C (bande L, C e X (9.5 GHz, circa 3 cm)). Durante le campagne è stata realizzata un'accurata mappa di classificazione del territorio e sono stati raccolti dati di verità a terra sui principali parametri del terreno e della vegetazione sia erbacea che arborea. La zona di Montespertoli è prevalentemente agricola, con scarsa urbanizzazione, attraversata da un piccolo fiume (Pesa); nel fondo valle, nella zona pianeggiante lungofiume, ci sono prevalentemente campi agricoli (grano, orzo, sorgo, mais, medica, colza), mentre sulle colline circostanti sono presenti vigneti, oliveti e boschi. I boschi sono misti, dominati da roverella (*Quercus pubescens*), leccio (*Quercus ilex*) e cerro (*Quercus cerris*), con presenza limitata di cipresso (*Cupressus sempervirens*) e carpino (*Carpinus betulus*), e anche molto densi. L'area basimetrica è infatti compresa fra 70 e 150 m²/ha. Per un'analisi quantitativa dei dati sono stati calcolati i coefficienti di backscattering medi per ogni campo, mediando il valore di σ^0 su tutti i pixel dell'immagine.

Campagne con radiometri IROE

Nel Giugno 1999 sono state effettuate misure radiometriche a microonde multifrequenza da aereo usando il sensore IROE (Instrument of Radio-Observation of the Earth) su sei foreste in Toscana, nell'ambito del Progetto Europeo STAAARTE 1999. Le misure sono state effettuate il 15-16 ed il 24-25 Giugno 1999. In quel periodo il tempo era caldo e asciutto senza nessuna precipitazione importante fra i due voli. I radiometri a microonde, sviluppati dall'IROE, hanno operato a 1.4 GHz (banda L), 6.8 GHz (banda C), 10 GHz (banda X), 19 GHz (banda Ku) e 37 GHz (banda Ka), corrispondenti alle lunghezze d'onda di circa 21, 4.4, 3.0, 1.6 e 0.8 cm. I canali ad alta frequenza sono stati installati in una configurazione «side-looking» sull'aereo francese ARAT (Fokker 27) per osservare con un angolo di incidenza di 30° (Fig. 1a). Il radiometro in banda L, polarizzato verticalmente, è stato installato su un aereo ultra leggero (Fig. 1b) (MACELLONI *et al.*, 2001). Entrambe le configurazioni comprendevano anche una telecamera, usata per avere un riferimento a terra, e un sensore nell'infrarosso termico (8-14 mm) per stimare la temperatura superficiale e normalizzare la temperatura di brillantezza a microonde.

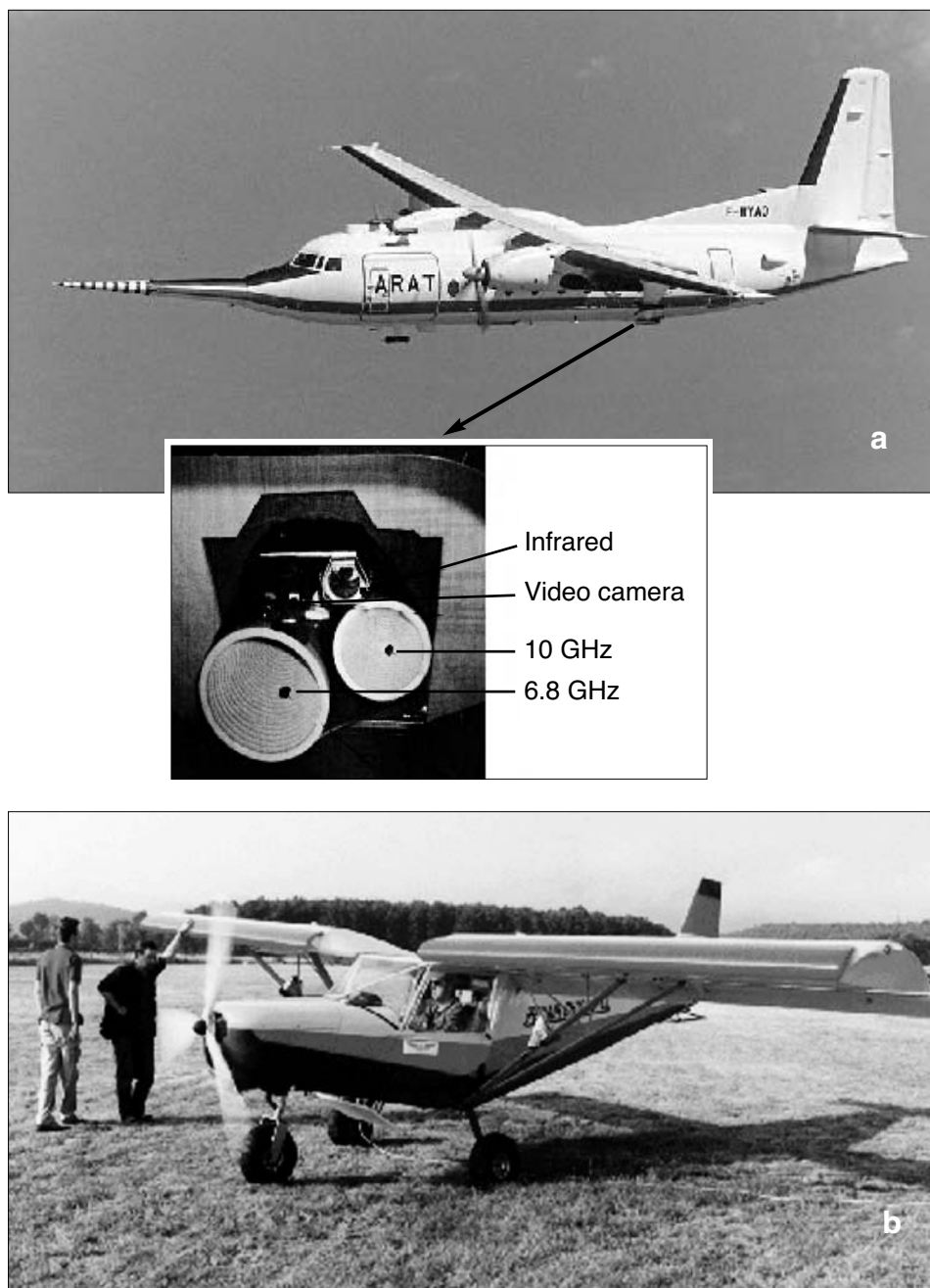


Figura 1 – a) L'aereo ARAT con installati i radiometri alle frequenze più alte (C, X e Ka), b) l'aereo ultraleggero con il sistema in banda L.

– a) Microwave radiometers at the highest frequencies (C, X and Ka) installed on the ARAT aircraft, b) ultralight aircraft with the L-band system.

Sono stati esaminati sei boschi, selezionati fra i tipi più frequenti di ecosistemi di boschi di latifoglie in Toscana che includevano: il faggio (*Fagus sylvatica*), il cerro (*Quercus cerris* L.) e il leccio (*Quercus ilex* L.). Le aree selezionate si trovavano a diverse altitudini situate fra la costa e l'Appennino Tosco-Emiliano. I parametri a terra (altezza e densità delle piante, diametro del tronco, indice di area fogliare, analisi fogliari, vegetazione di sottobosco, caratteristiche del terreno, ecc.), raccolti nel corso di misure intensive da Linnæa Ambiente di Firenze nell'ambito del Progetto Europeo (MONITO), sono stati resi disponibili dalla Regione Toscana. I dati a terra adoperati in questo articolo sono elencati in Tabella 1. Durante i voli sono stati raccolti dati a microonde anche su alcuni boschi di conifere (in particolare, una zona di abeti vicino alla foresta del Teso), sebbene nessun dato a terra sia disponibile su di loro. Questi dati sono stati utilizzati soltanto per mettere in evidenza la possibilità di distinguere con sistemi a microonde tipi diversi di bosco e in particolare le latifoglie dalle conifere.

Tabella 1 – Parametri misurati a terra sulle diverse aree forestali in Toscana.
– *Parameters measured on ground on different forest areas in Tuscany.*

Area	Specie	Altitudine (m)	Densità (n/ha)	Area Basimetrica (m ² /ha)	Altezza (m)	Trasparenza della Chioma (%)
Teso	Faggio	1350	348	35	20.1	42.8
Vallombrosa	Faggio	1170	396	51	28.1	30.2
Colognole	Leccio	250	608	18	13.3	28.8
Cala Violina	Leccio	5	1420	24	13.9	36.1
Ulgignano	Cerro	440	1136	16	12.3	20.5
Amiata	Cerro	650	1519	24	15.6	27.0

RISULTATI SPERIMENTALI

SAR

a) Classificazione

Analizzando un'immagine SAR a due frequenze (C ed L, in fig. 2 a e b) si distingue bene in entrambe il torrente Pesa che attraversa l'immagine da Est a Ovest e che è identificato da un backscattering piuttosto alto, causato soprattutto dagli alberi che bordano il fiume. Anche la piccola città di Cerbaia appare come una area brillante. Si nota anche che in banda C (a) non c'è distinzione fra diversi tipi di vegetazione (a parte il campo di colza lungo la Pesa molto brillante sulla sinistra dell'immagine), ma si evidenzia prevalentemente la topografia generale della superficie (risalta bene, per esempio, il reticolo idrografico). Invece le varie caratteristiche del territorio sono ben rilevate in

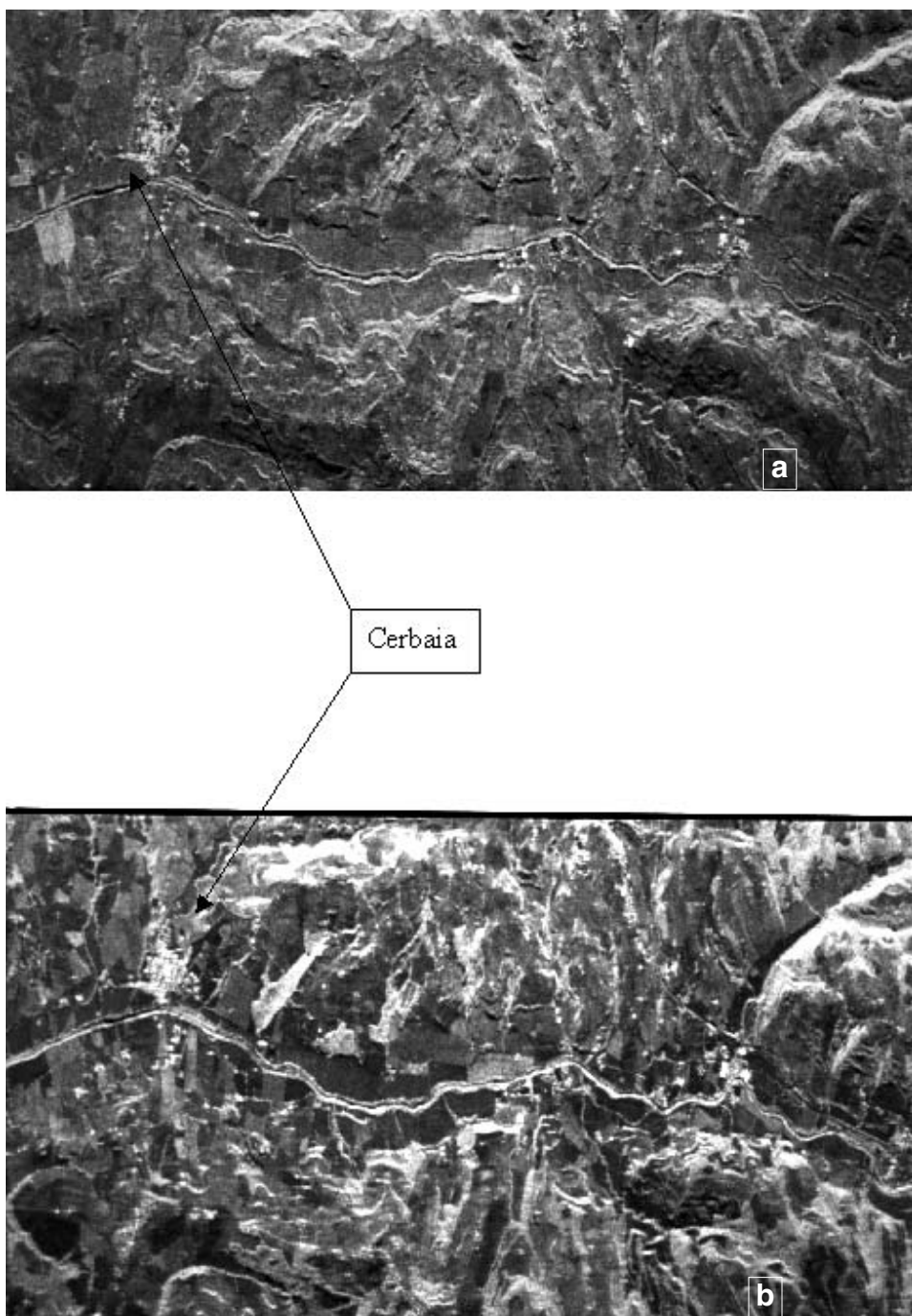


Figura 2 – Immagini in banda C (a) e in banda L (b) , polarizzazione HV, dell’area di Montespertoli ottenute dal SAR della NASA/ JLP (AIRSAR) nel 1991.

– C- (a) and L- (b) band images in HV polarizations of Montespertoli area, obtained with NASA/ JLP SAR (AIRSAR) in 1991.

banda L (b), dove i campi agricoli hanno backscattering generalmente piuttosto basso e livelli di grigio diversi a seconda del tipo di coltura, mentre i boschi e le aree urbane sono molto brillanti e ben evidenziate. Queste osservazioni di tipo qualitativo, estese anche alla banda P, hanno permesso di metter a punto un algoritmo di classificazione di tipo «supervised box classifier» basato sui meccanismi di scattering. L'algoritmo è stato poi valicato per i dati dei tre voli dell'AIRSAR del 1991 su una base pixel per pixel (FERRAZZOLI *et al.*, 1997). Si è ottenuto in questo modo il riconoscimento di 9 classi: boschi, urbano, acqua libera, terreno nudo, vigneto, oliveto, colza, piante caratterizzate da foglie piccole e steli sottili (grano e medica) e piante caratterizzate da foglie larghe e fusti spessi (come girasole e mais), più una classe di non-classificato. La matrice di confusione ottenuta per un singolo volo (22 Giugno 1991) è rappresentata in Tabella 2. Come si vede per alcune classi la capacità di riconoscimento è superiore al 90% (per es. urbano, bosco, terreno nudo e acqua libera), mentre altre classi, soprattutto la vegetazione mista, tendono a confondersi maggiormente fra loro ed in questo caso con la colza e il terreno nudo. La bontà di questo tipo di classificazione risiede principalmente nella disponibilità di dati a tre frequenze polarimetriche, mentre le attuali configurazioni da satellite, che presentano solo una frequenza con una o più polarizzazioni, non permettono ancora di raggiungere risultati altrettanto validi.

b) Stima di biomassa legnosa

Da questa analisi si è potuto stabilire che i dati SAR raccolti sui boschi hanno una scarsa dipendenza dalla frequenza e un discreta stabilità nel

Tabella 2 – Matrice di confusione ottenuta sull'area di Montespertoli per il 22 Giugno 1991 con l'algoritmo di classificazione su una base «pixel per pixel». O= oliveto, B=bosco, U=urbano, VM=vegetazione mista a foglia piccola (grano, medica e prati), C=colza, TN=terreno nudo, FL=vegetazione a foglia larga (girasole, mais), V=vigneto, A=acqua libera, NC=non classificato. I valori sono percentuali.

– Confusion matrix obtained on Montespertoli area on June 22, 1991 by using the classification algorithm on a «pixel by pixel» basis. O=olivegroves, B=forests, U=urban areas, VM=mixed vegetation, C=colza, TN=bare soil, FL=broad-leaf vegetation, V=vineyards, A=water body, NC=not classified. Values are in percentage.

	O	B	U	VM	C	TN	FL	V	A	NC
O	76.0	–	–	3.0	–	20.5	–	–	–	0.5
B	–	92.1	3.0	–	–	–	–	1.9	–	3.0
U	–	2.5	92.0	–	–	–	–	5.5	–	–
VM	4.8	–	–	65.5	12.2	10.6	7.4	–	–	–
C	–	–	–	0.6	80.8	–	13.6	–	–	5.0
TN	–	–	–	2.9	–	96.4	–	0.7	–	–
FL	–	–	–	2.8	6.3	5.1	80.0	1.8	–	4.0
V	–	4.5	12.5	–	–	–	–	79.0	–	4.0
A	3.1	–	–	3.9	–	0.7	–	–	92.3	–

corso delle stagioni. In Fig. 3 si vede la relazione diretta ottenuta fra coefficiente di backscattering e volume legnoso (WV, in m³/ha) dei singoli boschi, alle diverse frequenze (P, L e C), in polarizzazione HV. Il volume legnoso (cioè il volume dell'intero cilindro dell'albero) è stato calcolato, in modo un po' approssimativo, a partire dall'area basimetrica moltiplicata per l'altezza media degli alberi. I dati sono quelli dei boschi misti di Montespertoli raccolti sia con AIRSAR nel 1991 che con SIR-C nel 1994. Come si vede la banda P (a) è quella che mostra la sensibilità maggiore, con assenza di saturazione anche per i valori più alti di volume legnoso e con un coefficiente di correlazione molto alto ($R^2=0.9$).

La banda L (b) presenta un coefficiente di correlazione buono, ma più basso ($R^2=0.78$) con un ottimo riconoscimento fra aree scarsamente vegetate e boschi, ma il segnale radar tende a saturare non appena il WV supera i 1500 m³/ha. La banda C (c), invece, pur mostrando un graduale aumento del backscattering all'aumentare del WV, presenta una notevole dispersione dei dati sperimentali, con un R^2 di 0.58 (FERRAZZOLI *et al.*, 1997). Per la banda C sono stati aggiunti nella figura anche dei dati raccolti su foreste di conifere (Pino Scozzese e Abete Norvegese) in Svezia durante un esperimento (NOPEX) condotto nel 1994 con un radar polarimetrico (EMISAR) (PALOSCIA *et al.*, 1999a, ATTEMA *et al.*, 1994) e che non si discostano dalla linea di regressione. Anche in questo caso la presenza della banda P e della polarizzazione HV, che è la più sensibile alla struttura della vegetazione, dà la possibilità di raggiungere delle ottime correlazioni con la biomassa boschiva. Analizzando i risultati ottenuti sulla stessa area con i satelliti allora disponibili: JERS-1 (satellite giapponese in banda L, polarizzazione HH) e ERS-1 (satellite europeo in banda C, polarizzazione VV) si è avuto per la banda L un peggioramento a causa della polarizzazione meno adeguata ($R^2 \approx 0.7$); mentre per la banda C, si è riscontrata una correlazione piuttosto alta ($R^2 = 0.84$). Questo miglioramento rispetto al risultato precedente può essere in parte dovuto al basso angolo di incidenza di ERS (23°), rispetto ai 35-40° di AIRSAR e SIR-C, che penetrando maggiormente all'interno della vegetazione favorisce una maggiore correlazione con la biomassa (DOBSON *et al.*, 1992, PALOSCIA *et al.*, 1999b).

Radiometri

a) Identificazione di tipi diversi di boschi

Dall'analisi dei dati radiometrici raccolti sulle diverse aree di test forestali in Toscana, si è visto che alla frequenza più bassa (1.4 GHz) foreste della stessa specie (leccio), ma con diversa biomassa, come ad esempio quelle di Cala Violina e Colognole, hanno invece un valore molto diverso di Temperature normalizzata (Tn, ovvero il rapporto fra la temperatura di brillantezza e quella nell'infrarosso termico). D'altra parte, il terreno, che

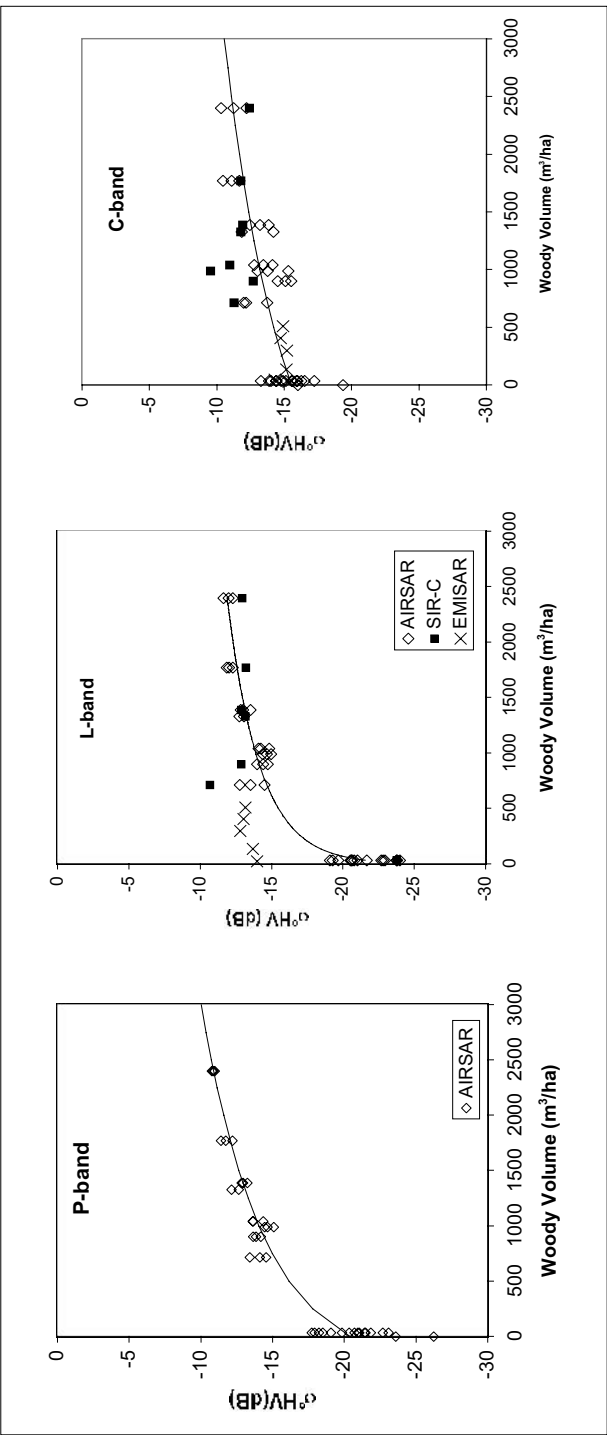


Figura 3 – Il coefficiente di backscattering (σ°) ottenuto con l'AIRSAR in banda P (a), L (b) e C (c) in funzione del volume legnoso dei boschi dell'area di Montespertoli.
 – The backscattering coefficient (σ°) obtained with AIRSAR at P (a), L (b) and C (c) bands as a function of the woody volume (WV) of forests in Montespertoli area.

poteva essere il responsabile delle variazioni di T_n in banda L, aveva caratteristiche simili in tutti i tipi di foreste studiate e umidità molto bassa (MACELLONI *et al.*, 2001). Alle frequenze più alte T_n sembra mostrare una apprezzabile sensibilità al tipo di bosco. Il diagramma bidimensionale di Fig. 4 conferma che, usando i dati in banda Ka (37 GHz) e X (10 GHz), possono essere individuati quattro tipi di bosco: faggio, corrispondente ai valori più bassi di T_n ad entrambe le frequenze; cerro e leccio, che mostrano valori intermedi e simili di T_n e sono alberi affini; infine abete, che è caratterizzato dai valori più alti di T_n . Inoltre, il diverso comportamento delle latifoglie e delle conifere è bene identificato dal grafico, dove si può notare che, mentre per i boschi di latifolia la T_n in banda X è più alta che la T_n in banda Ka, per gli abeti succede l'opposto.

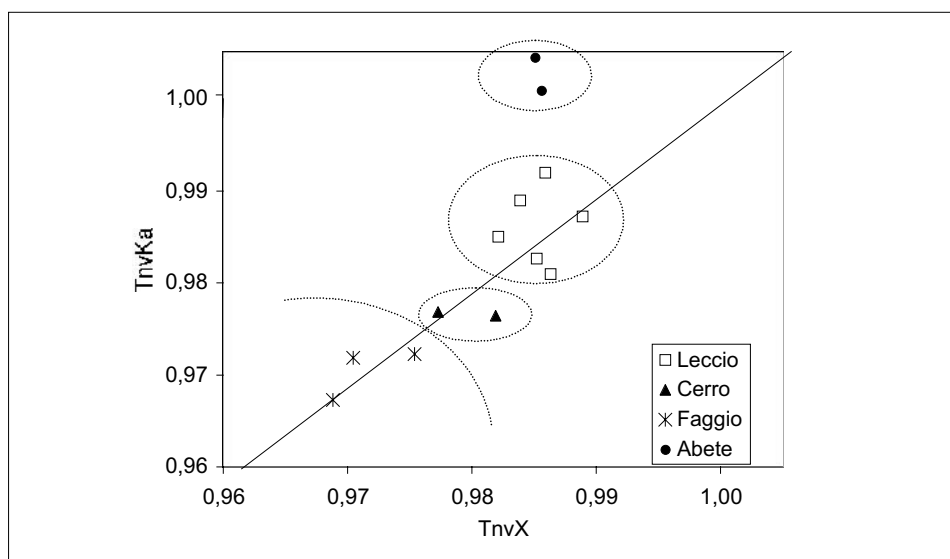


Figura 4 – Discriminazione fra diversi tipi di boschi. La temperatura normalizzata (T_n) misurata a 36 GHz (banda Ka) in funzione della T_n a 10 GHz (X-band), in polarizzazione verticale (V). Si possono identificare quattro tipi di boschi.

– Discrimination among different types of forests. T_n measured at 36 GHz (Ka band) as a function of T_n at 10 GHz (X-band), V polarization. Four types of forests can be identified.

b) Biomassa arborea

Per valutare la sensibilità dell'emissione a microonde alla biomassa arborea, abbiamo preso in considerazione i seguenti parametri: (a) l'area basimetrica, BA, in m^2/ha e (b) il volume legnoso, WV, in m^3/ha . Le relazioni fra la T_n in banda Ka, X, C e L (in polarizzazione V) ed il WV sono rappresentate nella Fig. 5.

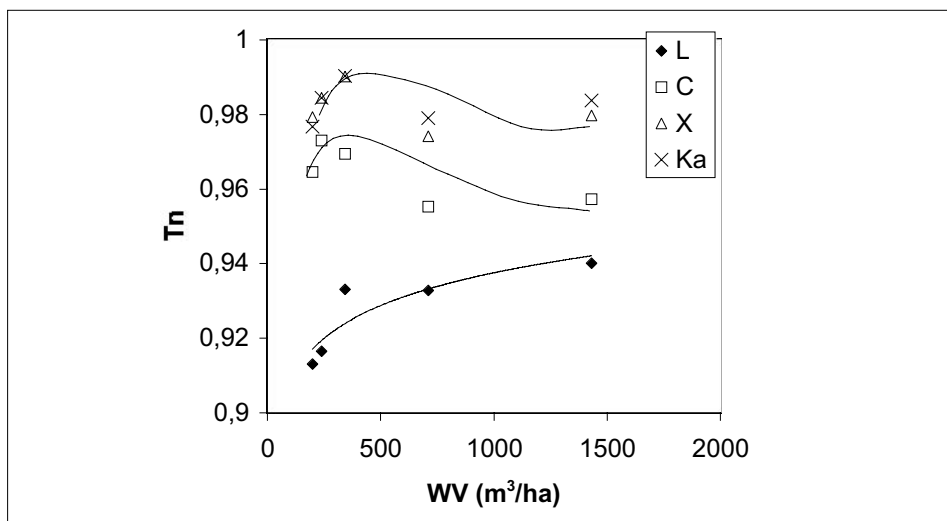


Figura 5 – Sensibilità dell'emissione a microonde alla biomassa arborea. La temperatura normalizzata T_n , misurata a quattro frequenze in funzione della biomassa arborea, WV . Le linee continue rappresentano le rette di regressione: logaritmica in banda L e polinomiali in banda Ka, X e C.

– *Microwave emission sensitivity to arboreous biomass. T_n , measured at four frequencies, as a function of woody volume, WV . Continuous lines represent the regression equations: logarithmic at L-band and polynomial at Ka, X e C bands.*

Come previsto, la sensibilità più alta alla biomassa arborea è stato ottenuta in banda L dove si verifica un aumento di T_n all' aumento della biomassa, conformemente alle seguenti equazioni di regressione:

$$T_n = 0.023 \ln(BA) + 0.85 \quad (R^2 = 0.87)$$

$$T_n = 0.013 \ln(WV) + 0.85 \quad (R^2 = 0.80)$$

Questo prova che le zone boschive agiscono come strati di assorbimento sopra la superficie del suolo. Una simile relazione è stata ottenuta anche da LANG *et al.*, (2000).

Alle frequenze più alte (bande Ka, X ed anche C), si nota un leggero aumento di T_n per valori bassi di biomassa seguito da una diminuzione per ulteriori incrementi della biomassa. Questo andamento può essere spiegato considerando una prima fase dove l'assorbimento è ancora dominante ed uno stadio successivo dove lo scattering ha un ruolo maggiore. Queste tendenze richiamano quelle già osservate sulle colture agricole (PALOSCIA e PAMPALONI 1992, VICHEV *et al.*, 1995).

L'indice di area fogliare (LAI) è un parametro fortemente legato alla biomassa totale delle colture erbacee, mentre, per gli alberi, le foglie rappresentano solo una piccola percentuale della biomassa legnosa. Tuttavia, poiché, come si è visto, le frequenze più alte hanno una scarsa penetrazione

nello strato arboreo, esse sono più influenzate dalle chiome che dai tronchi e mostrano di conseguenza una certa sensibilità al LAI, sebbene piccola. La migliore correlazione è stata raggiunta in banda Ka dove è stata ottenuta la seguente equazione di regressione, con un coefficiente di correlazione $R^2 = 0.55$ (MACELLONI *et al.*, 2001):

$$T_n = 0.0035 \text{ LAI} + 0.97$$

CONCLUSIONI

Il radar ad apertura sintetica (SAR) si è rivelato uno strumento potente per la classificazione del territorio e per la stima della biomassa vegetale, sia erbacea che arborea. I risultati migliori per la stima del volume legnoso sono stati conseguiti in banda P e L, in polarizzazione HV, con coefficienti di correlazione fra backscattering e volume legnoso vicino a 0.9. Comunque anche le bande L e C dei satelliti ERS e JERS, in polarizzazione lineare, hanno indicato una discreta sensibilità a questo parametro, se pur con correlazioni più basse.

Le osservazioni radiometriche effettuate hanno sottolineato la sensibilità dell'emissione a microonde multifrequenza al tipo di bosco ed alla biomassa legnosa. I meccanismi di interazione più importanti fra le microonde e gli alberi sono l'assorbimento a bassa frequenza ed a bassa biomassa e lo scattering a frequenza alta e alta biomassa. Le frequenze più alte (Ka e X) hanno avuto buon esito nel distinguere i diversi tipi di foreste, mentre la banda L si è dimostrata la frequenza migliore per valutare il volume legnoso e l'area basimetrica. Una rispondenza abbastanza buona è stata infine trovata fra LAI ed emissione in banda Ka.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata parzialmente finanziata dall'Agenzia Italiana Spaziale (ASI). I voli dell' ARAT Fokker 27 sono stati sostenuti dal Programma STAAARTE del EC-TMR (European Community-Training and Mobility Research). Gli autori desiderano ringraziare il Sig. G. Penazzi e tutto il gruppo dell'ARAT per la gentile collaborazione, la Regione Toscana (Dr. Amerigo Hoffman) per aver messo a disposizione i dati del MONITO ed il Dr. Marco Ferretti di Linnæa Ambiente per l'utile collaborazione nel raccogliere le informazioni necessarie sulle aree dei test.

SUMMARY

**Applications of microwave remote sensing techniques
for observing forest ecosystems**

The increasing interest for the environment problems and climate changes turned the attention to forest ecosystems due their leading role in hydrological and biochemical processes. Both experimental and theoretical investigations pointed out that microwave remote sensing can give a significant contribution to the study of the parameters of arboreous vegetation.

In this paper the main results concerning forest classification, and tree biomass, obtained by using both active and passive microwave sensors on forest sites, are shown.

Studies carried out by our group on the experimental area of Montespertoli between 1990 and 1994 by means of SAR (Synthetic Aperture Radar), both installed on aircrafts (AIRSAR/JPL) and satellites (ERS e JERS), pointed out a good sensitivity of microwave signature to forest biomass, mainly at low frequencies (P and L bands).

Another type of investigation was carried out by using the microwave radiometers of our group (L, C, X, Ku, and Ka bands) on June 1999 on six forest plots in Tuscany beech (Turkey oak, and holms oak). On these sites ground truth data were collected and made available by Tuscan Region within the framework of the European project (MONITO). From the analysis of data a fairly good capability of high frequencies in discriminating different types of forest as well as a good sensitivity of low frequency to forest biomass was pointed out.

BIBLIOGRAFIA

- ATTEMA E., MORIN J., WOODING M., 1994 – *EMAC Experimenters Handbook*.
- DOBSON M.C., MURPHY R., SARABANDI K., ULABY F., SHARIK T., 1992 – *Preliminary analysis of ERS-1 SAR for forest ecosystems studies*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Ge 30, pp. 203-211.
- FERRAZZOLI P., PALOSCIA S., PAMPALONI P., SCHIAVON G., SIGISMONDI S., SOLIMINI D., 1997 – *The potential of multifrequency polarimetric SAR in assessing agricultural and arboreous biomass*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Ge 35, pp. 5-17.
- HELD D.H., BROWN W.E., FREEMAN A., KLEIN J.D., ZEBKER H., SATO T., NGUYEN Q., LOU Y., 1988 – *The NASA/JPL multifrequency multipolarization airborne SAR System*. In: Proc. IGARSS'88, Edinburgh, Scotland, pp.345-349.
- LANG R.H., DE MATTHÆIS P., LE VINE D.M., BIDWELL S., HAKEN M., CHAUHAN N., 2000 – *L-band radiometer measurements of conifer forests*. Proc. of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS 2000), Honolulu, Hawaii, July 2000, pp 1930-1932.
- MACELLONI G., PALOSCIA S., PAMPALONI P., SIGISMONDI S., DE MATTHÆIS P., FERRAZZOLI P., SCHIAVON G., SOLIMINI D., 1999 – *The SIR-C/X-SAR experiment on Montespertoli: sensitivity to hydrological parameters*. International Journal of Remote Sensing, vol. 20, n.13, pp. 2597-2612.

- MACELLONI G., PALOSCIA S., PAMPALONI S., RUISI R., 2001 – *Airborne Multi-frequency L- to Ka - band Radiometric Measurements over Forests*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 39, n. 11, pp. 2507-2513.
- PALOSCIA S., PAMPALONI P., 1992 – *Microwave vegetation indexes for detecting biomass and water conditions of agricultural crops*. Remote Sens. Environ. 40, pp. 15-26.
- PALOSCIA S., PAMPALONI P., MACELLONI G., SIGISMONDI S., 1999a – *Microwave remote sensing monitoring of hydrological parameters on NOPEX area*. Agricultural and Forest Meteorology, 98-99, pp 375-387.
- PALOSCIA S., MACELLONI G., PAMPALONI P., SIGISMONDI S., 1999b – *The potential of C- and L- band SAR in estimating vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments*. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, Vol. 37, N. 4, pp 2107-2110.
- ULABY F.T., MOORE R.M., FUNG A.K., 1981 – *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*. Vol. I, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- VICHEV B.I., KRASTEVA E.N., KOSTOV K.G., 1995 – *Study of seasonal evolution of tree emission using zenith-looking microwave radiometers*. Proc. of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'95), 10-14, Florence (Italy), pp. 981-983.