

Valutazione dello stato sanitario delle piante forestali: quali prospettive dal telerilevamento nel visibile e nell'infrarosso?

Paolo Gonthier*⁽¹⁾, Guglielmo Lione⁽¹⁾, Enrico Corrado Borgogno Mondino⁽²⁾

(1) Dipartimento di Valorizzazione e Protezione delle Risorse Agroforestali (Di.Va.P.R.A.), Settore Patologia Vegetale, Università di Torino, v. Leonardo Da Vinci 44, I-10095 Grugliasco (TO - Italy); (2) Dipartimento di Economia e Ingegneria Agraria Forestale e Ambientale, Settore Topografia, Università di Torino, v. Leonardo Da Vinci 44, I-10095 Grugliasco (TO - Italy) - *Corresponding Author: Paolo Gonthier (paolo.gonthier@unito.it).

Abstract: *Tree health monitoring: perspectives from the visible and near infrared remote sensing.* Based on a comprehensive literature analysis, we present a critical review of those optical remote sensing techniques operating with the visible (VIS) and near infrared (NIR) bands for the assessment of health in forest trees. Physical, biological and physio-pathological issues of VIS-NIR reflectance of leaves are described pointing out that a decrease of NIR reflectance is highly influenced by stress conditions on tree caused by abiotic and biotic factors. In many cases the NIR spectral band is more sensitive than the VIS one, allowing to detect plant stress long before the appearance of visible symptoms. A description of the main remote sensing methods is provided, including radiometric measurements and multispectral imaging approaches. False colour infrared (FCIR) images collection and their photointerpretation and processing are shown as they represent the most relevant means to acquire information of canopy from its reflectance properties. The amount and the quality of the obtainable data depend on: (i) field conditions; (ii) the type of the adopted instrument (camera, radiometer); (iii) the recording system position (ground platforms, aircraft, satellite); (iv) the format of the data (analogical, digitalised or digital); and (v) the photointerpretation technique. Results from literature are discussed stressing the limits of remote sensing methods. Remote sensing in VIS and NIR spectral bands is generally a powerful classification tool to detect and score tree stress. Nevertheless, it is not a diagnostic tool in that it does not provide information on the cause of stress. Moreover, the method should be adequately tested at single tree level for many important pathogens, in particular root rot, butt rot and stem rot fungi. In perspective, new high spatial resolution satellite images and their GIS software elaboration might be suitable to improve remote sensing analysis.

Keywords: Fungal pathogens, Remote sensing, FCIR, Canopy reflectance, Forest health monitoring, NIR

Received: Nov 02, 2011; Accepted: Mar 01, 2012; Published online: May 07, 2012

Citation: Gonthier P, Lione G, Borgogno Mondino EC, 2012. Valutazione dello stato sanitario delle piante forestali: quali prospettive dal telerilevamento nel visibile e nell'infrarosso? *Forest@* 9: 89-102 [online 2012-05-07] URL: <http://www.sisef.it/forest@/contents/?id=efor0691-009>

Principi bio-fisici che regolano la risposta spettrale delle piante forestali

Il telerilevamento o *remote sensing* è costituito dall'insieme delle tecniche e delle metodologie per l'acquisizione a distanza e l'elaborazione di dati concernenti le diverse componenti della superficie terrestre (Gomasasca 2004). Esso rappresenta uno strumento di indagine non invasivo e non distruttivo, che permette sessioni di rilievo ripetute senza danno alcuno

per gli oggetti analizzati (Nilsson 1995). Il mezzo fisico che veicola l'informazione è rappresentato dalle radiazioni elettromagnetiche (Chirici & Corona 2005), il cui insieme ordinato per lunghezza d'onda crescente definisce lo spettro elettromagnetico (Halliday et al. 2000). Ciascun intervallo individuato internamente allo spettro elettromagnetico costituisce una banda: nella maggioranza delle applicazioni fitopatologiche del *remote sensing* le bande prese in con-

siderazione sono il visibile (VIS) e l'infrarosso vicino (NIR - Murtha 1982, Nilsson 1995). Il visibile (400-700 nm) rappresenta la luce percepibile dall'occhio umano in condizioni normali ed è formato da tre bande: banda del blu (B: ~ 400-500 nm), banda del verde (G: ~ 500-600 nm), banda del rosso (R: ~ 600-700 nm - Murtha 1982, Nilsson 1995). L'infrarosso vicino si colloca su lunghezze d'onda maggiori (~ 700-1300 nm) che non sono in grado di impressionare la retina umana (Murtha 1982, Nilsson 1995).

Quando una radiazione elettromagnetica colpisce un corpo viene in parte assorbita, in parte trasmessa ed in parte riflessa (Halliday et al. 2000). La riflettanza è definita come una grandezza adimensionale che esprime in percentuale il rapporto tra radiazione riflessa e radiazione incidente (Nilsson 1995). Ogni corpo è in grado di riflettere solo alcune lunghezze d'onda dello spettro appartenente alla radiazione incidente (Jones & Vaughan 2010). Rappresentando il valore di riflettanza al variare della lunghezza d'onda si realizza il grafico della firma spettrale, che caratterizza il comportamento di un corpo investito da un fascio di radiazioni elettromagnetiche (Jones & Vaughan 2010).

La vegetazione è dotata di una firma spettrale caratteristica: una foglia verde in condizioni normali manifesta mediamente una riflettanza ripartita come segue: 20% nel verde, 10% nel blu e nel rosso, 70% nell'infrarosso vicino (Fig. 1 - Hildebrandt 1976, Murtha 1982). Tra 690 e 740 nm si verifica un deciso e repentino incremento della riflettanza noto come *red edge* che separa la riflettanza VIS dalla riflettanza NIR (Curran et al. 1990).

I fattori che naturalmente contribuiscono alla variabilità nella firma spettrale di una medesima specie sono molteplici e tra questi si possono annoverare le condizioni stazionali, l'età, lo stadio fenologico, l'orientamento delle foglie rispetto alla radiazione incidente, la struttura fogliare, il contenuto idrico, la concentrazione dei composti biochimici, il *Leaf Area Index* (LAI) e la presenza di tessuti legnosi (Murtha 1982, Asner 1998, Jones & Vaughan 2010). È stato altresì evidenziato come in alberi ed arbusti i tessuti legnosi forniscano un contributo trascurabile alle variazioni registrabili a livello di firma spettrale (Asner 1998).

Strumenti analogici e digitali disponibili per la valutazione dello stato sanitario delle piante forestali

Le fotocamere, in particolare quelle digitali, sono ampiamente utilizzate nel telerilevamento poiché

producono un'immagine le cui caratteristiche sono determinate dalla sensibilità dello strumento a specifiche lunghezze d'onda e a prefissati valori di intensità della radiazione riflessa (Jones & Vaughan 2010).

I radiometri sono invece strumenti più sofisticati in grado di fornire, per un numero assegnato di bande dello spettro elettromagnetico, i rispettivi valori di intensità della radiazione (Jones & Vaughan 2010). I radiometri iperspettrali permettono di tracciare un grafico pressoché continuo della firma spettrale, poiché possono registrare su bande contigue di ampiezza molto ridotta (<10 nm); i radiometri multispettrali invece consentono analisi meno approfondite in quanto sono in grado di acquisire un numero inferiore di bande a maggiore ampiezza (Asner 1998, Meroni et al. 2009). Alcuni radiometri registrano immagini simultanee dell'oggetto, una per ciascuna banda riflessa (Malthus & Younger 2000, Jones & Vaughan 2010, Updike & Comp 2010).

Sulla base delle modalità che portano alla formazione dell'immagine si possono distinguere le immagini analogiche e quelle digitali (Jacobson et al. 2000).

Le immagini analogiche si ottengono mediante specifiche reazioni chimiche che avvengono sulla superficie di una pellicola fotografica (Jacobson et al. 2000). Le pellicole sono sensibili a determinate bande dello spettro elettromagnetico; ad esempio le pellicole pancromatiche rimangono impressionate solo dalla banda visibile, mentre esistono altre pellicole in grado di rilevare anche l'infrarosso vicino (Jacobson et al. 2000). L'impiego di tali pellicole è generalmente subordinato all'utilizzo di appositi filtri ottici. Questi filtri sono in grado di schermare le lunghezze d'onda del blu, che degradano la qualità dell'immagine interagendo negativamente con le emulsioni presenti negli strati della pellicola (Verhoeven 2008).

Un apposito procedimento di sviluppo e stampa permetterà di visualizzare l'immagine dell'oggetto (Jacobson et al. 2000). In passato per l'analisi numerica delle immagini analogiche veniva utilizzato il densitometro (Nilsson 1995). Questo strumento misura la densità di una immagine stampata, cioè il rapporto tra intensità della luce incidente e della luce riflessa su scala logaritmica decimale (Peres 2007). Essendo una grandezza inversamente proporzionale alla riflettanza, di fatto fornisce una stima di quest'ultima (Peres 2007).

Complessivamente la fotografia analogica e l'analisi dei suoi derivati è caratterizzata da processi ottico-meccanici e chimici (Jacobson et al. 2000). Tuttavia le immagini analogiche vengono spesso convertite nel-

riflettanza (%)

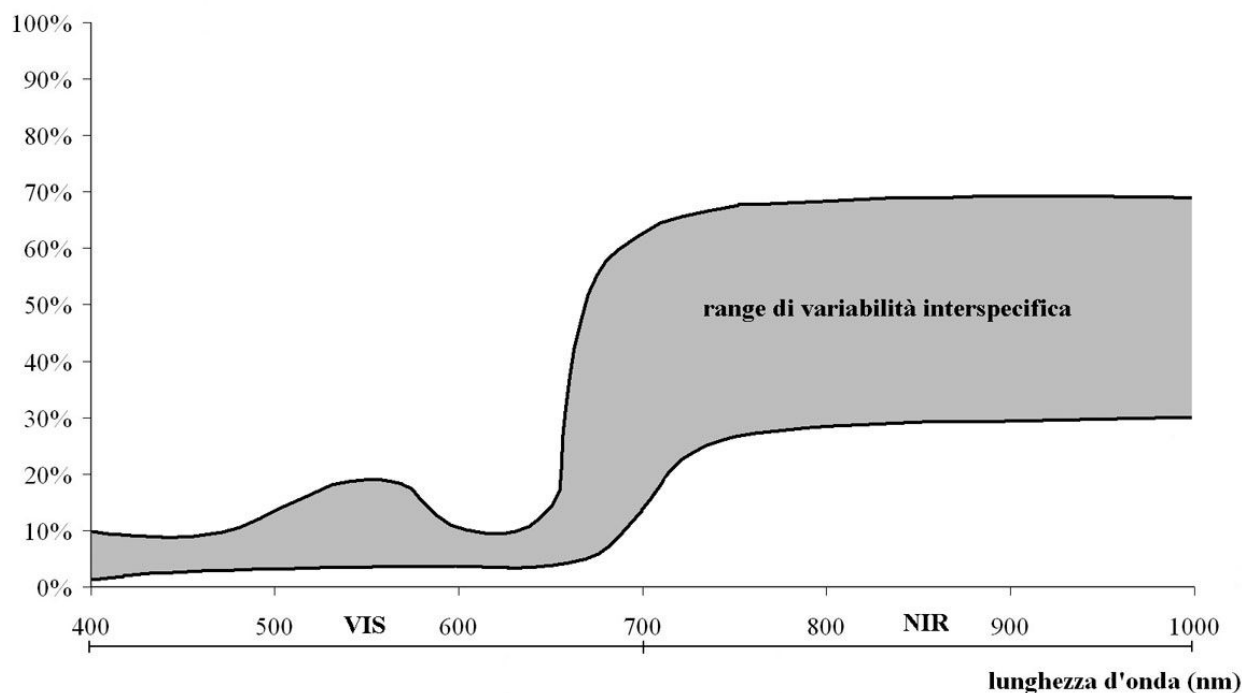


Fig. 1 - Firma spettrale media di una foglia verde in condizioni normali. L'asse delle ascisse indica i valori di lunghezza d'onda in nanometri e le relative bande VIS (400-700 nm) e NIR (700-1300 nm), mentre l'asse delle ordinate mostra la riflettanza in percentuale. Appaiono chiaramente i picchi di riflettanza nelle regioni G (500-600 nm) e NIR e l'incremento di riflettanza denominato *red edge* tra le bande R (600-700 nm) e NIR. Lo spazio compreso tra le due curve tiene conto delle differenze dovute alla variabilità interspecifica (da: Murtha 1982, Jones & Vaughan 2010 - modificate).

le corrispondenti immagini digitali (dette "digitalizzate") mediante l'acquisizione tramite sistemi di scansione dedicati (*scanner*). L'impiego delle fotografie analogiche è limitato a piattaforme terrestri o aeree, mentre non è normalmente adottato nelle piattaforme satellitari.

Le immagini digitali native sono invece create da un sensore che trasforma il flusso di radiazione elettromagnetica in impulsi elettrici convertiti successivamente in formato numerico (Jacobson et al. 2000). L'immagine che ne deriva è costituita da elementi fondamentali, generalmente di forma quadrata, denominati *pixel* (*picture element* - Jacobson et al. 2000). Ogni *pixel* è dotato di coordinate cartesiane ortogonali, che ne definiscono la collocazione spaziale all'interno dell'immagine, e di un valore numerico chiamato DN (*Digital Number*) che ne definisce la luminosità (Jones & Vaughan 2010). Le immagini digitali sono pertanto suscettibili di analisi quantitative di tipo deterministico o statistico in quanto strutturalmente assimilabili ad una matrice numerica (Jones & Vaughan 2010).

Il DN generalmente rappresenta un punteggio numerico della radianza media riflessa dalla porzione di superficie che ricade all'interno del *pixel* (Jones & Vaughan 2010). L'intervallo di variazione dei DN (cioè il numero di toni di grigio osservabili sull'immagine) dipende dalla profondità del dato (risoluzione radiometrica), una grandezza espressa in bit che determina la quantità di informazione veicolabile (Jones & Vaughan 2010). Le immagini digitali più comuni hanno una risoluzione radiometrica di 8 *bit* (256 livelli), ma alcune raggiungono anche gli 11 *bit* (2048 livelli), i 12 *bit* (4096 livelli), fino ad arrivare a 16 *bit* (65536 livelli). Ogni livello può essere rappresentato visivamente in scala di grigio (Jones & Vaughan 2010).

Nelle immagini digitali a colori ciascun *pixel* è dotato di un colore la cui codifica avviene in forma numerica mediante apposite coordinate in sistemi di riferimento noti come spazi colore (Jones & Vaughan 2010). Per le immagini digitali il sistema colorimetrico più comunemente utilizzato è quello della sintesi additiva RGB, acronimo dei colori rosso, verde e blu

in lingua inglese (Jones & Vaughan 2010). È infatti possibile creare qualsiasi colore utilizzando opportune combinazioni di questi tre colori primari, tecnicamente denominati canali (Jones & Vaughan 2010). Nel sistema RGB qualunque colore è univocamente individuato da una stringa di tre numeri che rappresentano rispettivamente la quantità di rosso, verde e blu (Jones & Vaughan 2010).

Le immagini digitali sono adottate da tutte le piattaforme: terrestri, aeree e satellitari.

In base all'informazione spettrale registrata nell'immagine è possibile distinguere tra immagini pancromatiche e multispettrali (Jones & Vaughan 2010). Le immagini pancromatiche sono ottenute da strumenti sensibili unicamente alla banda VIS (Peres 2007) che viene acquisita come un singolo segnale. Le immagini multispettrali sono invece derivanti da apparecchiature in grado di registrare specifiche bande dello spettro elettromagnetico (Peres 2007).

Le modalità in cui avviene l'associazione tra le radiazioni elettromagnetiche riflesse dagli oggetti e i colori con i quali questi appaiono nell'immagine finale permette di classificare le immagini in *grayscale* (a scala di grigio), *true-color* (a colori reali) e *false color* (in falso colore - Jones & Vaughan 2010).

Un'immagine in *grayscale* rappresenta gli oggetti con tonalità di grigio variabili dal bianco al nero proporzionalmente al quantitativo di radiazione registrata. Un'immagine *true-color* è generata a partire dalle tre bande del visibile (rosso, verde e blu) acquisite separatamente da un sensore multispettrale e a cui sono assegnati i canali di rappresentazione del rosso, del verde e del blu in una sintesi additiva RGB. In questa modalità gli oggetti appaiono esattamente come sono percepiti nella realtà dall'occhio umano.

Un'immagine in falso colore non rispetta invece la corrispondenza tra banda elettromagnetica e canale assegnato (Jones & Vaughan 2010). Questa tipologia è particolarmente utile per visualizzare bande che non appartengono alla regione del visibile (Jones & Vaughan 2010). Ad esempio, per osservare un'immagine satellitare che comprenda le bande VIS e NIR occorrerà necessariamente ricorrere al falso colore. Essendo disponibili solo tre canali (R, G, B) per quattro bande (B, G, R, NIR), per visualizzare il NIR occorrerà attribuirgli un canale; conseguentemente i due canali restanti verranno assegnati ad altre due bande del visibile, mentre l'ultima banda verrà esclusa dalla sintesi. Generalmente un'immagine all'infrarosso falso colore (FCIR - Fig. 2) viene rappresentata assegnando alla banda del NIR il canale R, alla ban-

da del verde il canale B, alla banda del rosso il canale G; la banda del blu non viene rappresentata (Jones & Vaughan 2010). Le fotocamere analogiche ottengono questo effetto montando apposite pellicole in grado di filtrare il segnale e fissare le componenti di interesse (verde, rosso e NIR), mentre nel digitale il filtraggio avviene ad opera di filtri ottici che dividono il segnale nelle n bande desiderate e lo indirizzano verso il sensore di pertinenza. In questo modo si formano n rappresentazioni della scena in toni di grigio ciascuna delle quali definisce la radianza registrata dal sensore per quella specifica banda. La formazione delle immagini a colori avviene in questo caso a posteriori mediante la desiderata associazione banda-canale da parte dell'utente.

Per descrivere il modo in cui un'immagine digitale è stata trattata durante il procedimento di assegnazione dei canali alle bande, è consuetudine indicare i canali RGB seguiti da una tripletta di numeri indicanti le bande assegnate (il numero delle bande dipende dalla numerazione adottata dal sistema di ripresa - GeoEye 2009).

Si ritiene che la capacità di identificazione di uno stato fisiopatologico o fitopatologico alterato sia maggiore nel telerilevamento basato su immagini FCIR rispetto al telerilevamento effettuato nelle sole lunghezze d'onda del visibile (Murtha 1982). In una immagine FCIR una foglia in condizioni normali appare di colore rosso-magenta, mentre in individui sottoposti a stress tende a schiarire fino al bianco o assume altri colori quali il viola o il giallo a seconda dei casi (Murtha 1982).

Le immagini per il telerilevamento si possono inoltre distinguere per la scala e la prospettiva con le quali viene ritratto l'oggetto da analizzare. Nel caso del monitoraggio dello stato sanitario di piante arboree, tra le varie modalità possibili sono utilizzate le seguenti:

- immagini da piattaforme terrestri (*proximal sensing*): caratterizzate da distanza ravvicinata (da pochi metri ad alcune centinaia di metri) con soggetto ripreso in genere frontalmente;
- immagini aeree: acquisite da distanze maggiori (da poche centinaia ad alcune migliaia di metri) con visione nadirale (perpendicolare al piano normale) o pseudo-nadirale del soggetto;
- immagini satellitari: simili a quelle aeree ma acquisite generalmente a scale più piccole a causa della distanza del satellite dalla superficie terrestre (dell'ordine di centinaia di chilometri).

Definito l'ambito di indagine, tra i parametri da tenere in considerazione nella scelta dell'immagine più

idonea rientrano:

- la sua risoluzione spaziale (o geometrica): espressa in $m \text{ pixel}^{-1}$, indica la dimensione fisica del pixel a terra e condiziona il grado di dettaglio con cui risultano visibili i particolari (Vinciková et al. 2010). Attualmente le massime risoluzioni geometriche dei dati satellitari disponibili in commercio arrivano a $0.41 m \text{ pixel}^{-1}$ per bande pancromatiche e $1.64 m \text{ pixel}^{-1}$ per bande multispettrali (Vinciková et al. 2010). I satelliti che montano questo tipo di sensori

sono detti “ad altissima risoluzione” e identificati dall’acronimo VHRS (*Very High Resolution Satellites*). In genere dispongono di un sistema di ripresa duale che realizza una acquisizione pancromatica a più alta risoluzione geometrica e una acquisizione multispettrale a 4 bande (B, G, R, NIR) con risoluzione geometrica ridotta a circa un quarto rispetto a quella pancromatica. In tali condizioni è possibile utilizzare una procedura informatica nota come *pan-sharpening* che permette di combinare l’infor-

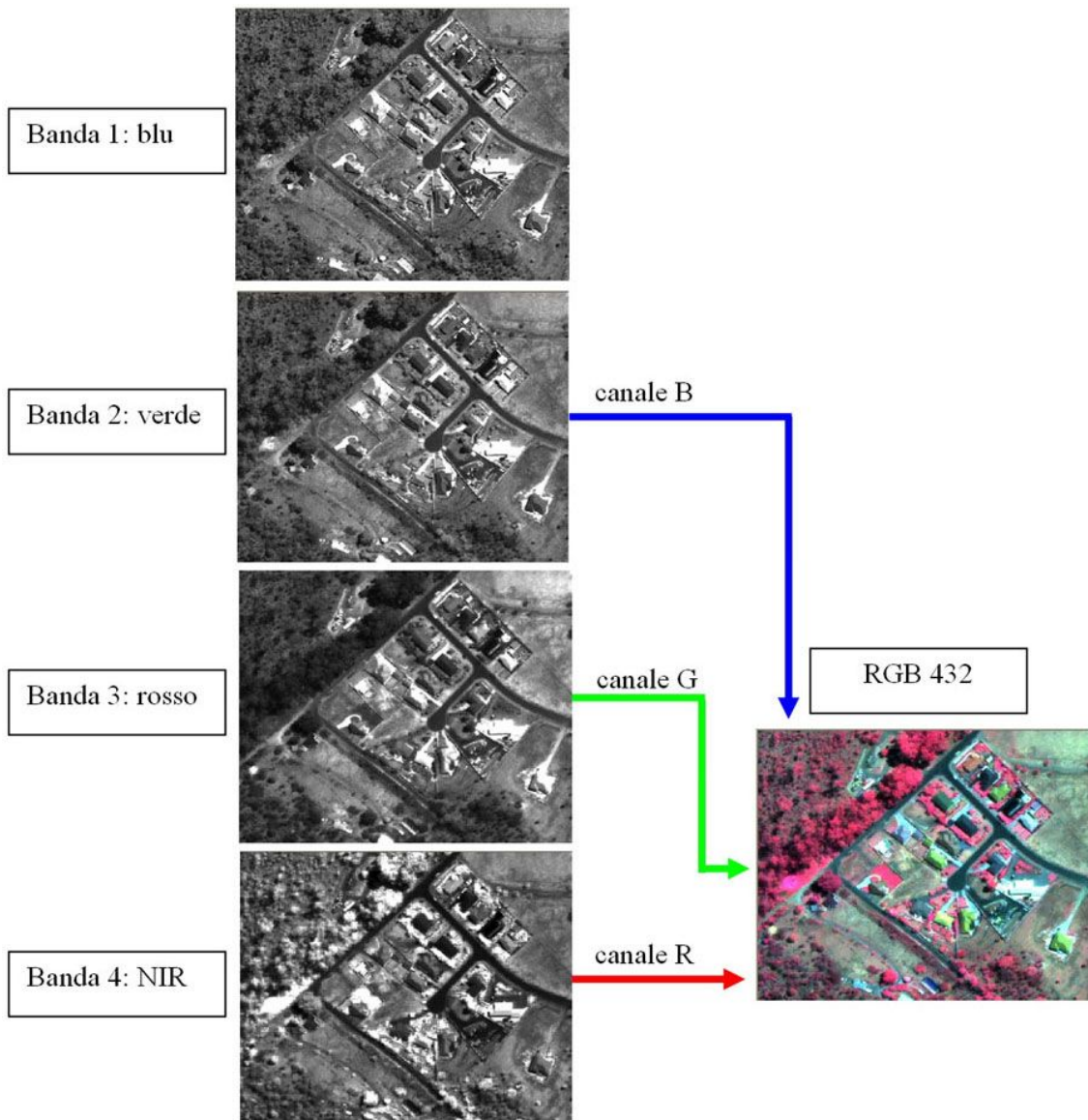


Fig. 2 - Esempio di immagine satellitare all’infrarosso falso colore. La figura mostra il procedimento di associazione dei canali RGB a bande spettrali rilevate in digitale dal satellite GeoEye-1 (GeoEye 2010) per ottenere un’immagine all’infrarosso falso colore (RGB 432). In questo caso alle bande viene conferito un colore dettato da necessità interpretative. Alla banda NIR è assegnato il rosso mentre alla banda del blu non è assegnato alcun canale. La numerazione delle bande segue il criterio della lunghezza d’onda crescente adottato dall’azienda fornitrice delle immagini.

mazione spettrale delle immagini multispettrali con l'informazione spaziale più accurata del pancromatico (Pohl & Van Genderen 1998) generando immagini multispettrali fittizie alla risoluzione geometrica della banda pancromatica;

- la sua risoluzione spettrale: definisce il numero e l'ampiezza delle bande spettrali disponibili, oltre alla loro collocazione all'interno dello spettro elettromagnetico (Vinciková et al. 2010);
- la sua risoluzione radiometrica: indica la sensibilità del sensore alla radianza ed è misurata in numero di *bit* per *pixel*. Determina conseguentemente la profondità del dato ed i livelli di grigio disponibili entro ciascuna banda e nel pancromatico (Vinciková et al. 2010);
- la risoluzione temporale: indica l'intervallo di tempo che intercorre tra due acquisizioni successive della stessa area (Vinciková et al. 2010).

In fase di scelta del dato da acquisire presso i distributori commerciali è sempre concesso all'utenza di definire alcuni parametri:

- il livello di copertura nuvolosa: individua la percentuale massima di copertura nuvolosa accettabile sulla scena. Tenuto conto che le nubi non sono trasparenti al segnale nelle bande considerate, la loro presenza sull'immagine può rappresentare un forte limite all'utilizzo della stessa (Vinciková et al. 2010);
- il livello di correzione e pre-processamento: all'atto dell'acquisto di un dato satellitare è possibile selezionare diversi livelli di correzione per il prodotto selezionato (Jones & Vaughan 2010, Vinciková et al. 2010). Si può propendere per l'acquisto di immagini con diversi livelli di correzione sia geometrica che radiometrica (GeoEye 2009). Si ricorda che è sempre possibile risalire in modo approssimato ai valori di riflettanza delle superfici attraverso l'utilizzo di curve di calibrazione del sensore (note e fornite con i dati); queste hanno il compito di tradurre i DN (mere rappresentazioni simboliche della radianza al sensore) nel loro corrispondente valore di radianza, convertito a sua volta in valore di riflettanza a terra mediante l'applicazione di formulazioni più o meno rigorose (Soudani et al. 2006, Updike & Comp 2010). Inoltre, al fine ottenere una corretta stima quantitativa della riflettanza, è necessario apportare apposite correzioni per tener conto degli effetti che l'atmosfera produce sulla radiazione elettromagnetica che la attraversa (Jones & Vaughan 2010). Per coprire aree molto estese, che superano l'estensione di una singola scena, le immagini possono essere ricomposte in mosaico e

rese radiometricamente omogenee (GeoEye 2009, Updike & Comp 2010). Alcune missioni satellitari, soprattutto di tipo VHRS, sono in grado di procedere ad acquisizioni stereoscopiche delle scene utili per applicazioni fotogrammetriche tridimensionali (GeoEye 2009).

Metodi manuali ed automatici per l'interpretazione delle informazioni

La fotointerpretazione è un procedimento mediante il quale a partire dall'osservazione visiva di immagini telerilevate si derivano informazioni relative all'oggetto di studio (Jones & Vaughan 2010). L'obiettivo di fondo è il riconoscimento e la classificazione degli oggetti in categorie (Vinciková et al. 2010). Tra le diverse metodologie possibili, nel contesto del presente lavoro sono state esaminate quelle ritenute potenzialmente più idonee ad una concreta applicazione in campo fitopatologico.

La fotointerpretazione visiva, in cui è l'operatore ad eseguire la classificazione, a volte con l'ausilio di tecniche informatiche per l'elaborazione dell'immagine (Nilsson 1995), è la più utilizzata in campo forestale e ambientale (Lillesand et al. 2004).

La classificazione *pixel-based* di tipo assistito (*supervised*) è invece una procedura informatica basata su algoritmi che assegnano ciascun *pixel* della scena ad una classe di pertinenza rappresentata dalla firma spettrale media di un campione significativo e rappresentativo di *pixel* di riferimento (*training pixels*) estratti dalla medesima immagine e indicati dall'operatore (Vinciková et al. 2010).

La classificazione di tipo automatico (*unsupervised*) rispetto alla precedente non richiede firme spettrali di riferimento ottenibili dai *training pixels*; l'algoritmo classifica autonomamente i *pixel* della scena in un predefinito numero di classi (Vinciková et al. 2010). Le classi risultanti costituiranno gruppi di *pixel* spettralmente omogenei (firma spettrale simile) ma il cui significato non è dichiarato esplicitamente.

Questi metodi, eventualmente combinati, possono anche essere di supporto ad un processo di vettorializzazione, cioè di generazione dei poligoni che circoscrivono un dato oggetto dotato di attributi di interesse, come ad esempio la chioma di un albero. La vettorializzazione potrà avvenire per mezzo dell'intervento di un operatore (delineazione manuale) o tramite algoritmi di segmentazione, fase operativa preliminare che appartiene al processo di classificazione delle immagini detto *object oriented* (Baatz & Schape 2000). Secondo questa metodologia, una volta che la fase di segmentazione ha individuato e se-

parato gli oggetti spettralmente simili in poligoni indipendenti, sulla base delle loro proprietà spettrali, morfologiche e tessiturali viene operata una classificazione (*supervised* o *unsupervised*) che definirà l'immagine tematica finale.

A partire dai dati iperspettrali o multispettrali telerilevati sono stati derivati numerosi indici per l'analisi numerica della riflettanza e la sintesi dell'informazione residente nelle bande originali. Questi differiscono per la scala a cui possono essere applicati (foglia o chioma), per il parametro biologico a cui sono principalmente correlati (clorofilla, LAI, stato di stress, biomassa, contenuto in azoto, pigmenti totali, contenuto idrico), per il grado di correlazione, per la specie su cui sono stati sperimentati (Tucker 1979, Le Maire et al. 2004).

L'indice più utilizzato per studi vegetazionali è il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), un indice multispettrale fortemente correlato al contenuto di clorofilla e definito mediante la seguente formula (Tucker 1979 - eqn. 1):

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

dove NIR e RED rappresentano la riflettanza delle bande dell'infrarosso vicino e del rosso. Sebbene sia generalmente raccomandato l'uso dei valori di riflettanza, spesso a fini pratici vengono usati i valori grezzi dei DN nelle rispettive bande NIR e RED (Jones & Vaughan 2010). L'indice NDVI varia tra -1 e +1, tendendo ad assumere valori positivi in presenza di alti contenuti di clorofilla (Xiao & McPherson 2005). Tradizionalmente utilizzato per realizzare carte vegetazionali mediante procedimenti automatizzati a partire da dati multispettrali, ha trovato proficue applicazioni in campo fitopatologico (Vinciková et al. 2010) ed in particolare nel monitoraggio dello stato sanitario di piante arboree (Xiao & McPherson 2005). Tra gli altri numerosi indici vegetazionali (per una rassegna completa si consulti Le Maire et al. 2004 e Jones & Vaughan 2010) se ne evidenziano alcuni che includono correzioni specifiche volte ad attenuare certi svantaggi intrinseci all'indice NDVI. Il *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) ed il *Perpendicular Vegetation Index* (PVI) limitano l'effetto della riflettanza del suolo, l'*Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI) tiene conto degli effetti atmosferici sulla trasmissione delle onde elettromagnetiche, il *Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index* (SARVI) e l'*Enhanced Vegetation Index* (EVI) combinano le proprietà di ARVI e SAVI.

Potenzialità e limiti del telerilevamento nella valutazione dello stato sanitario delle piante forestali

Gli alberi in ambiente forestale, agrario e urbano possono essere sottoposti a una vasta gamma di stress dovuti a cause biotiche (come attacchi da parte di funghi, insetti, nematodi, batteri, virus, fitoplasmi) o abiotiche (quali siccità, inquinamento, salinità, ferite meccaniche, scottature, gelate) nonché alle loro molteplici sinergie ed interazioni (Moriando et al. 2006).

Gli effetti di un'alterazione dello stato di salute possono essere riscontrabili tanto a livello fisiologico, quanto a livello morfologico; in entrambi i casi la riflettanza caratteristica dell'individuo sano subisce delle modificazioni più o meno marcate (Murtha 1982, Nilsson 1995, Asner 1998). Ad esempio, una sintomatologia che preveda la diminuzione del livello di clorofilla, l'alterazione dei cloroplasti e l'ingiallimento delle foglie sarà evidenziata nel grafico della firma spettrale da una traslazione del picco nella banda del visibile dalle lunghezze d'onda del verde verso quelle del rosso (Murtha 1982) e da un progressivo slittamento verso lunghezze d'onda inferiori del *red edge* (Everitt et al. 1999). Ma prima che i sintomi si manifestino nel visibile dovrebbero evidenziarsi nella banda dell'infrarosso vicino con un decremento della riflettanza (Murtha 1982, Spicciarelli & Arpaia 1991, Martini et al. 2007, Pernar et al. 2008), la quale continuerà a diminuire con il progressivo aggravarsi della sintomatologia (Everitt et al. 1999). La riflettanza NIR delle foglie è infatti maggiormente suscettibile nel subire variazioni rispetto alla riflettanza VIS, risultando particolarmente sensibile al contenuto idrico dei tessuti fogliari (Asner 1998).

Concentrandosi sulle esperienze legate a soprassuoli arborei, è possibile annoverare diversi contributi significativi, alcuni dei quali, seppure effettuati in ambito agronomico, presentano spunti interessanti per le applicazioni forestali dell'analisi di riflettanza VIS e NIR.

In uno studio relativo al monitoraggio degli effetti negativi di fumaggini, ragnetto rosso e cocciniglie sulle chiome delle piante in un agrumeto sono state impiegate fotografie analogiche FCIR e pancromatiche a colori, da supporto fisso e distanza ravvicinata con prospettiva frontale sui soggetti (Spicciarelli & Arpaia 1991). Gli Autori sottolineano la maggiore efficacia delle foto FCIR nell'evidenziare i sintomi, anche quando questi sono poco evidenti o addirittura non visibili nelle corrispondenti pancromatiche (Spicciarelli & Arpaia 1991). Inoltre, nelle foto FCIR è

emersa una minore influenza delle condizioni di luminosità sulla qualità dell'immagine e una più agevole interpretazione dei sintomi grazie al maggiore contrasto con lo sfondo (Spicciarelli & Arpaia 1991). Le considerazioni incluse nel lavoro sono basate su una interpretazione visiva di tipo qualitativo delle immagini.

Una analoga esperienza è stata condotta per la valutazione dei danni provocati su pino dal lepidottero *Dendrolimus punctatus* Walker e dal nematode *Bursaphelenchus mucronatus* Mamiya & Enda (Knapp et al. 1998). In questo caso però la ripresa FCIR è avvenuta in digitale ed è stata realizzata da distanze maggiori (fino a 1.5 km), adeguate ad includere vaste porzioni di territorio (Knapp et al. 1998). Le immagini sono state successivamente elaborate con *software* grafici per aumentare specifici parametri colorimetrici, quali il contrasto o la saturazione di alcune tonalità, e stampate per una fotointerpretazione visiva volta a stimare entità ed estensione dei danni (Knapp et al. 1998). Nell'ambito della stessa campagna di studi sono state scattate anche immagini digitali FCIR da aereo per il monitoraggio dei danni da insetti in foresta (Knapp et al. 1998). Le immagini FCIR sono risultate idonee al raggiungimento degli obiettivi prefissati, dimostrandosi adatte all'uso anche in condizioni di luminosità che avrebbero reso di difficile interpretazione le corrispondenti pancromatiche a colori (Knapp et al. 1998).

In un altro lavoro, fotografie analogiche FCIR scattate da aereo hanno permesso un efficace monitoraggio del deperimento della palma *Phoenix canariensis* Chabaud lungo un viale di 25 esemplari: sono stati eseguiti 9 scatti a cadenza mensile, verificando nel contempo la concordanza tra informazione dedotta dalla fotointerpretazione visiva e monitoraggio *in situ* delle condizioni di chioma (Ingle et al. 1982).

In ambito più propriamente forestale, il controllo delle condizioni fitosanitarie di foreste miste di abete bianco e faggio deperienti è stato realizzato mediante l'analisi assistita di immagini aeree FCIR digitali in ambiente GIS, con creazione di apposite carte tematiche (Pernar et al. 2008). Per effettuare la fotointerpretazione è stata costruita una chiave di fotolettura mediante rilievi in campo di punti noti sulle immagini (Pernar et al. 2008). In un altro studio, le farnie del Parco del Ticino sono state monitorate mediante immagini aeree riprese da un sensore iperspettrale dotato di una risoluzione spaziale di 4 m *pixel*⁻¹ (Rossini et al. 2007). Confrontando i rilievi effettuati in campo con i dati telerilevati è stata riscontrata una correlazione tra indici ottici iperspettrali e concentrazione

di clorofilla che, essendo notoriamente legata allo stato di salute generale dell'albero, ha permesso la successiva mappatura delle condizioni fitosanitarie dei querceti del Parco (Rossini et al. 2007). La mappatura di aree forestali soggette a fenomeni di deperimento è stata oggetto di un altro lavoro condotto mediante tecniche di classificazione *pixel oriented* e *object oriented* di immagini satellitari multispettrali del satellite IKONOS (risoluzione spaziale multispettrale 4 m *pixel*⁻¹; risoluzione spaziale pancromatica 1 m *pixel*⁻¹ - Grignetti et al. 2011). Il confronto tra le elaborazioni dei dati spettrali e i rilievi effettuati a terra ha evidenziato come non sia possibile distinguere tramite fotointerpretazione tra discontinuità della copertura arborea ascrivibile al deperimento e altre discontinuità attribuibili a cause non patologiche (Grignetti et al. 2011).

Il telerilevamento ha trovato anche applicazioni nel monitoraggio dei danni causati da diversi funghi fitopatogeni. Ad esempio, immagini aeree analogiche FCIR sono state proficuamente impiegate per il monitoraggio dei centri di mortalità e dei danni causati da *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. (Hanson & Lautz 1969), *Phellinus weirii* (Murr.) Gilbertson (Wear 1971, Williams 1973), *Armillaria mellea* (Vahl) P. Kumm. (Williams 1973) e in generale da agenti di marciumi radicali (Williams & Lephart 1978, Wallis & Lee 1984). Nei lavori citati, l'utilizzo di scale diverse (da 1:35000 fino a 1:1200) ha permesso l'individuazione delle piante sofferenti, anche se con risultati migliori a grande scala. Occorre però precisare che queste piante manifestavano chiaramente sintomi in chioma. In altri lavori, tuttavia, è stata evidenziata la possibilità di una diagnosi precoce sugli alberi infetti da *Heterobasidion annosum* (Murtha & Hamilton 1969, Murtha & Kippen 1969) sempre però su ospiti suscettibili di marciume radicale e dunque di deperimento e morte. Nel monitoraggio di *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. soggetta ad attacchi da parte di agenti di marciume radicale quali *Phellinus noxius* (Corner) G. Cunn. e *Rigidoporus lignosus* (Berk. & M.A. Curtis) Murrill, fotografie aeree analogiche digitalizzate FCIR sono state interpretate visivamente e mediante misurazioni densitometriche (Nandris et al. 1985). Sopralluoghi in campo sono stati accompagnati da misure radiometriche sulle foglie di alberi sani ed infetti, ma sia le fotointerpretazioni, sia le misure di riflettanza non hanno permesso la discriminazione tra individui sani e malati (Nandris et al. 1985). Analogamente, una ricerca sul cancro basale del pino strobo effettuata comparando le immagini aeree analogiche FCIR con rilievi effet-

tuati in campo ha sottolineato l'impossibilità di diagnosi precoce mediante fotointerpretazione, riportando inoltre come sia spesso difficile distinguere tra piante sane e piante infette in assenza di evidenti sintomi in chioma (Houston 1972). In uno studio su tracheomicosi da *Ceratocystis fagacearum* (Bretz) Hunt a carico di *Quercus fusiformis* Small, il monitoraggio della malattia è stato condotto tramite immagini aeree analogiche e digitali FCIR con risoluzioni equivalenti a 1.08 e 2.15 m $pixel^{-1}$ (Everitt et al. 1999). Contestualmente sono state acquisite delle misure radiometriche a terra con un radiometro multispettrale, accompagnate da verifica visiva delle condizioni fitosanitarie di alcuni esemplari e da esami diagnostici in laboratorio volti a confermare la presenza del patogeno (Everitt et al. 1999). L'impiego del radiometro multibanda ha comportato l'asportazione di rami dagli individui esaminati e l'uso di uno standard (disco riflettente bianco in solfato di bario) per convertire le misure radiometriche in valori esatti di riflettanza (Everitt et al. 1999). L'andamento della firma spettrale in funzione dell'aggravarsi della sintomatologia ha confermato quanto noto da precedenti lavori (Murtha 1982), mentre le immagini FCIR hanno dimostrato di essere utilizzabili per la ripartizione dei soggetti in classi stabilite in base alla gravità dei sintomi (Everitt et al. 1999). Anche in questo caso gli effetti della malattia (clorosi, necrosi, trasparenza) erano rilevabili in chioma (Everitt et al. 1999). L'espansione dei centri di infezione da *Ceratocystis fagacearum*, i livelli di defogliazione delle chiome e la mortalità sono stati studiati con successo mediante l'analisi assistita da *software* di fotografie FCIR aeree digitali riprese ad intervalli di tempo regolari (Appel et al. 1989).

In contesti urbani e periurbani vi sono esperienze altrettanto significative. Nel 2004, l'Azienda dei Servizi Territoriali ha realizzato uno studio nel comune di Genova per valutare lo stato di salute delle alberate urbane mediante foto aeree analogiche FCIR (Martini et al. 2007). Tra gli agenti di stress delle varie specie arboree sono stati individuati insetti ed inquinamento atmosferico (Martini et al. 2007), mentre non sono stati riportati dati concernenti le malattie fungine. Di notevole interesse scientifico è lo studio condotto con un radiometro aviotrasportato e le immagini digitali da esso derivate per la valutazione dello stress delle alberate urbane (Malthus & Younger 2000). Le immagini digitali sono state realizzate impostando lo strumento al fine di ottenere una risoluzione spaziale di 1 m $pixel^{-1}$ su 13 bande spettrali (Malthus & Younger 2000). Contemporaneamente

sono state effettuate in campo accurate indagini dei parametri biometrici ritenuti rilevanti per caratterizzare lo stato sanitario degli alberi (Malthus & Younger 2000). Il confronto tra rilievi a terra e dati spettrali è stato eseguito vettorializzando manualmente le chiome sulle immagini in ambiente GIS e sottoponendo a correlazione i valori biometrici (o gli indici da questi derivati) con la risposta spettrale (Malthus & Younger 2000). Nei risultati sono riportate significative correlazioni tra NDVI e condizioni complessive di salute degli alberi. Durante le elaborazioni, immagini *raster* dell'indice NDVI sono state impiegate come supporto alla vettorializzazione delle chiome (Malthus & Younger 2000).

Gli Autori precisano infine che per ottenere una risoluzione spaziale congruente con le necessità di valutazione delle condizioni di salute delle alberate è opportuno ricorrere ad immagini aeree, anche se ipotizzano in futuro un possibile e fruttuoso impiego delle immagini satellitari ad alta risoluzione (Malthus & Younger 2000).

Una ricerca analoga è stata condotta a Berna e Losanna per valutare le potenzialità di immagini aeree FCIR analogiche nella discriminazione tra piante sane e piante sofferenti a causa di inquinamento atmosferico e sali distribuiti sul manto stradale per agevolare la circolazione dei veicoli in inverno (Fuhrer et al. 1981). Le fotografie aeree sono state digitalizzate e sottoposte ad analisi assistita da *software*, con vettorializzazione manuale delle chiome per il calcolo dei parametri relativi all'immagine e le statistiche associate (Fuhrer et al. 1981). Contestualmente sono stati rilevati in campo dati biometrici, fisiologici e fitopatologici di un sottocampione di piante per realizzare una chiave su cui basare la fotointerpretazione (Fuhrer et al. 1981). In base ai risultati ottenuti gli autori riportano come il metodo applicato consenta la corretta classificazione degli individui sofferenti e di quelli sani, a patto di disporre di sufficienti dati raccolti in campo (Fuhrer et al. 1981). Inoltre, prove comparative effettuate confrontando la classica interpretazione visiva con la *supervised classification* computerizzata mostrano come l'errore di classificazione si riduca del 75% attestandosi al 5% con quest'ultima procedura, essendo meno influenzata da valutazioni soggettive (Fuhrer et al. 1981). Si noti tuttavia come anche in questo caso le piante malate censite manifestassero sintomi in chioma quali necrosi dei margini fogliari e microfillia (Fuhrer et al. 1981).

Uno studio simile è stato condotto più di recente per determinare le condizioni fitosanitarie delle albe-

rature e delle zone boscate presenti in un campus universitario della California (Xiao & McPherson 2005). A tale scopo sono state impiegate immagini aeree multispettrali analogiche digitalizzate singolarmente per le bande B, G, R, NIR ed elaborate in ambiente GIS (Xiao & McPherson 2005). La mappatura della vegetazione è stata realizzata mediante il calcolo dell'indice NDVI e la successiva vettorializzazione manuale delle chiome (Xiao & McPherson 2005). Per la valutazione delle condizioni fitosanitarie sono state adottate delle soglie di NDVI applicate prima ai singoli *pixel* e successivamente alla chioma (Xiao & McPherson 2005). La classificazione ottenuta è stata verificata con valutazioni in campo basate sull'osservazione dello stato vegetativo di un campione rappresentativo, ottenendo una percentuale di individui correttamente classificati pari a 88% (Xiao & McPherson 2005).

Uno studio sperimentale condotto su un viale di *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. mediante immagini aeree analogiche FCIR ha verificato la concordanza dei risultati tra analisi di fluorescenza della clorofilla e metodologie fotointerpretative (Hermans et al. 2003). Le misure di fluorescenza delle piante campionate sono state realizzate su foglie di rami recisi da operatori in *tree-climbing*, mentre le valutazioni delle condizioni delle chiome sono state effettuate esaminando visivamente un modello tridimensionale ottenuto con tecniche fotogrammetriche applicate alle immagini FCIR (Hermans et al. 2003). Le classificazioni ottenute dall'impiego delle due tecniche sono risultate altamente correlate, confermando come l'infrarosso falso colore percepisca alterazioni dell'efficienza fotosintetica a carico della chioma (Hermans et al. 2003).

La disamina della letteratura fitopatologica che si è avvalsa di tecniche di telerilevamento delle bande VIS e NIR ha permesso di prendere nota di alcuni aspetti interessanti collegati alle peculiarità del *remote sensing* in specifiche condizioni e di sottolineare quali fattori possano risultare determinanti nella produzione dei risultati.

Specialmente in riprese nadirali o pseudo-nadirali di formazioni forestali rade, la firma spettrale di un individuo arboreo può essere soggetta a significativi errori di misura a causa della lettiera e della copertura vegetale sottostanti. Inoltre la riduzione della riflettanza collegata al deperimento di alcune specie forestali può non essere percepita correttamente in quanto compensata dalla riflettanza di altre specie sane che si insediano sotto copertura (Grignetti et al. 2011). Questa colonizzazione sotto copertura è dovuta

alla maggiore luminosità che filtra dal soprassuolo dominante attraverso le chiome divenute rade a causa del deperimento (Grignetti et al. 2011). Nei popolamenti forestali densi è invece l'angolo di riflessione a condizionare pesantemente la riflettanza NIR (Asner 1998, Jones & Vaughan 2010). Infatti la struttura della chioma dell'albero e l'angolo di riflettanza con il quale lo strumento rileva i dati influiscono sull'accuratezza della fotointerpretazione (Xiao & McPherson 2005, Jones & Vaughan 2010). Inoltre, la presenza di ombre e la sovrapposizione tra la chioma e lo sfondo possono portare ad una errata valutazione di parametri quali l'indice NDVI (Xiao & McPherson 2005). Pertanto, il telerilevamento su piante isolate risulta più efficace in quanto non si riscontrano gli effetti negativi dovuti all'ombra delle chiome vicine (Xiao & McPherson 2005). Tuttavia, anche in questo caso, un *pixel* può contenere oggetti diversi tra loro, la cui firma spettrale non coincide; in tal caso si parla di *mixed picture element* (*mixel*) che può causare notevoli problemi in fase di fotointerpretazione nel classificare gli oggetti, in particolare quando la risoluzione spaziale è bassa in confronto al grado di dettaglio degli oggetti che si stanno analizzando (Zhang et al. 2008). Anche l'immagine analogica derivante da riprese aeree è influenzata da molteplici fattori limitanti quali variazioni della sensibilità spettrale della pellicola, l'invecchiamento della pellicola, la tipologia di filtri utilizzati, le modalità di esposizione, il procedimento di sviluppo e stampa, gli effetti di distorsione atmosferica e la scala (Fleming 1978). Tanto nelle immagini analogiche quanto in quelle digitali, la scala e gli effetti atmosferici possono assumere un ruolo rilevante nello schermare modeste variazioni spettrali a carico delle piante stressate (Murtha 1982, Jones & Vaughan 2010). Occorre anche considerare come in riprese nadirali o pseudo-nadirali problemi fitopatologici concentrati in un settore della chioma possano essere mascherati dalle condizioni delle restanti porzioni della chioma stessa (Xiao & McPherson 2005). Si pensi ad esempio a molte malattie fogliari (es. attacchi da *Mycosphaerella pini* Rostr. ap. Munk, *Phacidium infestans* P. Karsten su pino) che manifestano i sintomi a partire dalle parti basse della chioma o a disseccamenti causati da alcuni cancri (ad es., *Cryphonectria parasitica* (Murrill) Barr. su castagno, *Cronartium flaccidum* (Alb. Et Schw.) Wint. su pino) che viceversa si manifestano a partire dalle parti alte della chioma.

Un limite importante che sembra emergere riguarda il fatto che il *remote sensing* valuta esclusivamente lo stato della chioma. In certi casi le condizioni della

chioma possono non essere direttamente correlate a problemi afferenti l'apparato radicale ed il cilindro centrale delle piante (ad es., carie - Lee 1989, Xiao & McPherson 2005), che determinano però gravi difetti tecnologici e possono essere causa di instabilità meccanica e schianti.

Valutazioni critiche conclusive

La validità del metodo ed i risultati conseguibili dipendono tanto dalle modalità di attuazione quanto dagli obiettivi perseguiti, oltre che dalle condizioni operative in cui si esercita.

L'uso di piattaforme terrestri a supporto di radiometri è tecnicamente complessa in quanto comporta la necessità di recidere i rami degli individui arborei su cui poi effettuare le analisi a terra. Questo implica l'impiego di maestranze abilitate ad operare in *tree-climbing* o all'uso di cestelli, con tempi di lavoro prolungati e difficoltà logistiche notevoli. Tali pratiche paiono incompatibili con l'esecuzione dei rilievi nei comprensori forestali. Inoltre, la loro esecuzione comporta ferite da taglio e danni alla vegetazione che potrebbero favorire l'infezione e la propagazione di patogeni di varia natura, soprattutto agenti di batteriosi e di micosi. L'impiego di fotocamere digitali o analogiche capaci di produrre immagini FCIR da postazioni a terra risulta più semplice ed economico nella fase di acquisizione dei dati, ma decisamente sconsigliabile per la modesta qualità dei dati stessi. Le immagini sono infatti difficilmente analizzabili sotto il profilo quantitativo e statistico essendo prospettive centrali riprese da distanze diverse, in condizioni di luminosità variabili e con uno sfondo non omogeneo. Foto analogiche FCIR potrebbero essere utilizzate come ulteriore dato qualitativo a sostegno di altri strumenti di indagine su aree di studio di ridotte dimensioni.

Il ricorso a supporti aerei per la realizzazione di immagini FCIR tramite fotocamere o radiometri aviotrasportati è la metodologia maggiormente utilizzata tanto a livello di ricerca quanto ai fini applicativi per il monitoraggio delle foreste. Un rilievo di questo tipo è in grado di coprire vaste superfici in tempi brevi, ma con costi elevati. Una volta stabilita la quota di volo, le immagini ottenute garantiscono una scala di lavoro adeguata e la possibilità di eseguire indagini accurate dello stato fitosanitario. Inoltre la rotta di volo può essere pianificata per riprendere unicamente le zone di interesse, scartando le aree prive di vegetazione. Il periodo di volo deve però essere individuato in funzione delle condizioni meteorologiche e di luminosità.

Le immagini multispettrali da piattaforma satellitare ad opera di satelliti quali QuickBird, GeoEye-1 e WorldView-2 sono attualmente in condizione di raggiungere risoluzioni geometriche comparabili con quelle delle immagini aeree (Krause 2005, GeoEye 2009, Jones & Vaughan 2010, Updike & Comp 2010). Le immagini satellitari offrono una gamma di opzioni interessanti per le analisi quantitative delle bande spettrali, ma presentano alcune difficoltà di acquisizione. Le aziende garantiscono infatti una copertura nuvolosa al di sotto del 15-20%, ma la copertura residua può interessare aree importanti dal punto di vista sperimentale e gestionale, rendendole insondabili. Inoltre sussistono problemi temporali relativi alla dislocazione del satellite, alla rigidità del sistema nelle ore di acquisizione (che influenzano la luminosità), alla risoluzione temporale e al tempo necessario per espletare l'ordine. L'area ripresa deve essere specificata all'azienda fornitrice mediante un poligono, che quasi inevitabilmente contiene zone prive di interesse per la ricerca. Le immagini possono infine essere complesse da trattare sotto il profilo informatico in virtù della memoria occupata e della profondità del dato. La copertura sistematica di un comprensorio forestale può risultare tecnicamente complessa ed economicamente onerosa. L'impiego dei satelliti ai fini del monitoraggio fitosanitario sembra essere stato sottovalutato fino ad ora, presumibilmente a causa del fatto che i satelliti ad altissima risoluzione QuickBird, GeoEye-1 e WorldView-2 sono stati messi in orbita recentemente, rispettivamente nel 2001, 2008 e 2009 (Krause 2005, GeoEye 2009, Updike & Comp 2010), mentre i satelliti già disponibili precedentemente consentivano risoluzioni spaziali modeste in confronto (dai 4 ai 30 m pixel^{-1} in modalità multispettrale) nonostante si siano dimostrati utili per svariate indagini in campo forestale (Chirici & Corona 2005). A livello sintomatologico ed epidemiologico è indubbiamente consigliabile tendere all'utilizzo di mezzi che garantiscano una risoluzione spaziale tale da cogliere gli aspetti patologici che esplicano la loro azione a scala di singolo albero. L'utilità di questo approccio appare evidente nella gestione forestale di comprensori a prevalente finalità turistico-ricreativa e paesaggistica in cui l'estetica e la stabilità meccanica rivestono un ruolo predominante per la fruizione del bosco e dove diagnosi tempestive potrebbero prevenire parte dei danni ed i relativi costi associati.

Rispetto alle misure effettuate mediante radiometri posti a terra, il dato telerilevato da aereo e satellite necessita talora di apposite correzioni atmosferiche e

topografiche, la cui applicazione rigorosa può risultare particolarmente complessa, anche se i calcoli sono spesso implementati in pacchetti *software*.

La delimitazione delle chiome rappresenta un ulteriore punto da tenere in considerazione: chiome isolate su sfondo uniforme risultano chiaramente delimitabili, mentre chiome sovrapposte non sono talora separabili in modo univoco. L'impiego di tecniche fotogrammetriche per la realizzazione di modelli tridimensionali risolverebbe in parte il problema, ma determinerebbe contemporaneamente un incremento esponenziale delle difficoltà di elaborazione e dei tempi di lavoro. Inoltre, parchi e foreste possono offrire notevoli problemi di analisi per la mescolanza interspecifica, la quale non è percepibile e classificabile senza un oneroso intervento esplorativo a terra o una preliminare classificazione spettrale delle specie. Sebbene l'impiego del telerilevamento per la realizzazione di cartografie vegetazionali sia ampiamente diffuso, sono carenti le informazioni relative alla possibilità di discernere gli spettri di specie arboree diverse in presenza di ulteriore variabilità spettrale dovuta alla mescolanza di individui sani e individui con stato sanitario alterato.

A tal proposito si rammenta che tanto maggiore è la superficie indagata, quanto più numerosi dovranno essere i rilievi in campo per correlare le misure biometriche e fitopatologiche ai dati spettrali: questo vale per le fasi sperimentali del metodo e per le prime fasi applicative su realtà nuove. Sotto il profilo tecnico, il monitoraggio fitosanitario di foreste monospecifiche e coetanee dovrebbe pertanto risultare più agevole da realizzare.

A livello diagnostico la metodologia dell'analisi di riflettanza pone non pochi quesiti, pur presentando delle potenzialità interessanti. È importante sottolineare come le alterazioni spettrali indichino la presenza di uno stato di stress (Murtha 1982) e permettano di stabilirne l'intensità (Nilsson 1995), ma non costituiscono uno strumento diagnostico atto a rilevarne le cause (Murtha 1982, Nilsson 1995, Jones & Vaughan 2010).

Inoltre, come già ribadito, i sintomi individuati nella maggioranza delle esperienze censite in letteratura erano a carico della chioma. Tuttavia, è possibile immaginare piante con chioma vigorosa e fusto cariato da funghi lignivori, accanto a piante con chioma deperiente in seguito all'attacco di insetti fitomizi o fillofagi; mentre le prime appaiono con una firma spettrale nella norma, pur essendo malate e meccanicamente instabili, le altre mostrano un profilo radiometrico anomalo, ma non rappresentano un pericolo.

Tuttavia alcuni lavori indicano come uno stress idrico indotto da danni a livello radicale possa essere precocemente individuato tramite la riflettanza NIR, mentre risulterebbe più difficile da diagnosticare tramite le sole osservazioni effettuate da terra (Xiao & McPherson 2005).

Dalla disamina degli studi condotti appare comunque evidente come le malattie causate da funghi siano state scarsamente esplorate. Future linee di ricerca potrebbero essere proficuamente indirizzate a verificare le potenzialità del telerilevamento nel rilevare precocemente i sintomi di malattie specifiche, con particolare riferimento ai marciumi radicali e alle carie del cilindro centrale.

In conclusione, pur con i limiti precedentemente descritti, il telerilevamento nel visibile e nell'infrarosso può rappresentare una valida metodologia per il monitoraggio sanitario delle foreste, in particolare perché è applicabile su grandi comprensori forestali, non provoca alcun danno alle piante esaminate ed è suscettibile di analisi oggettive, quantitative e ripetibili in ambiente GIS. Inoltre, con il telerilevamento si può rapidamente discriminare tra zone boschive in buone condizioni fitosanitarie e zone potenzialmente compromesse, limitando a queste ultime gli approfondimenti diagnostici da eseguire in campo. Questo consente di economizzare risorse, riducendo ai casi di effettiva necessità il ricorso a sopralluoghi. Inoltre, il telerilevamento effettuato su immagini acquisite in periodi diversi può fornire un quadro esaustivo sull'evoluzione temporale di incidenza e gravità di alcuni fenomeni patologici in atto. Al momento, tra le varie opzioni sembra promettente la prospettiva di utilizzare immagini FCIR ottenute da satelliti ad altissima risoluzione spaziale congiuntamente a fotointerpretazione in ambiente GIS, che preveda l'impiego sinergico di sistemi di classificazione in cui l'operatore è supportato dalle potenzialità operative del calcolatore.

Bibliografia

- Appel DN, Maggio RC, Nelson EL, Jeger MJ (1989). Measurement of expanding Oak Wilt centers in Live Oak. *Phytopathology* 79: 1318-1322. - doi: [10.1094/Phyto-79-1318](https://doi.org/10.1094/Phyto-79-1318)
- Asner GP (1998). Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 64: 234-253. - doi: [10.1016/S0034-4257\(98\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00014-5)
- Baatz M, Schape A (2000). Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. [online] URL: <http://www.agit.at>

- [papers/2000/baatz_FP_12.pdf](#)
- Chirici G, Corona P (2005). Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali. Aracne Editrice, Roma, Italia, pp. 192.
- Curran PJ, Dungan JL, Gholz HL (1990). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology* 7: 33-48. [online] URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14972904>
- Everitt JH, Escobar DE, Appel DN, Riggs WG, Davis MR (1999). Using airborne digital imagery for detecting oak wilt disease. *Plant Disease* 83: 502-505. - doi: [10.1094/PDIS.1999.83.6.502](https://doi.org/10.1094/PDIS.1999.83.6.502)
- Fleming J (1978). Exploiting the variability of Aerochrome Infrared film. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44: 601-605.
- Fuhrer J, Erismann KH, Keller HJ, Favre A (1981). A system for quantitative determination of species and vitalities of urban trees on color infrared photographs. *Remote Sensing of Environment* 11: 1-8. - doi: [10.1016/0034-4257\(81\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(81)90002-X)
- GeoEye (2009). GeoEye Product Guide, version 1.0.1. [online] URL: http://www.geoeye.com/CorpSite/products-and-services/imagery-collection/satellite-imagery-products/Product_Guide.aspx
- GeoEye (2010). Sample Imagery. [online] URL: http://www.geoeye.com/CorpSite/resource/sample_imagery.aspx
- Gomasasca M (2004). Elementi di geomatica. Associazione Italiana di Telerilevamento, Milano, Italia, pp. 618.
- Grignetti A, Giannetti F, Coaloa D (2011). Individuazione di morie di alberi mediante tecniche object e pixel orientate applicate ad immagini IKONOS. *Rivista Italiana di Telerilevamento* 43: 3-17.
- Halliday D, Resnick R, Walker J (2000). *Fundamentals of physics* (5th edn). John Wiley and Sons, New York, USA, pp. 1136.
- Hanson JB, Lautz W (1969). Infrared photography for estimating tree mortality caused by *Annosus* root rot and notes on color infrared photography to assess insect damage. In: *Proceedings of biennial Workshop on "Color aerial photography in the plant sciences"*. American Society of photogrammetry, Gainesville, Florida, USA, pp. 89-92.
- Hermans C, Smeyers M, Rodriguez RM, Eyletters M, Strasser RJ, Delhaye J (2003). Quality assessment of urban trees: a comparative study of physiological characterisation, airborne imaging and on site fluorescence monitoring by the OJIP-test. *Journal of Plant Physiology* 160: 81-90. - doi: [10.1078/0176-1617-00917](https://doi.org/10.1078/0176-1617-00917)
- Hildebrandt G (1976). Die spektralen Reflexionseigenschaften der Vegetation. In: *Proceedings of 16th IUFRO World Congress "Remote Sensing in Forestry"* (Hildebrandt G ed). Oslo (Norway) 21-26 June 1976. IUFRO, Subject Group S 6.05 Remote Sensing, Freiburg, Germany, pp. 9-22.
- Houston DR (1972). The use of large scale aerial color photography for assessing forest tree diseases. I. Basal canker of white pine: a case study. Res. Pap. NE-230, North-eastern Forest Experiment Station, USDA Forest Service, Upper Darby, PA, USA, pp. 7.
- Ingle SJ, Kreasky JB, Davis MR, Meyerdirk DE, Hart WG (1982). The use of color infrared aerial photography to monitor the progress of lethal decline of date palms in the lower Rio Grande Valley of Texas. *Proceedings of Florida State Horticultural Society* 95: 260-261.
- Jacobson RE, Ray SF, Attridge GG, Axford NR (2000). *The manual of photography, photographic and digital imaging*. Focal Press, Oxford, UK, pp. 459.
- Jones HG, Vaughan RA (2010). *Remote sensing of vegetation: principles techniques and applications*. Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 353.
- Knapp KA, Disperati A, Sheng ZJ (1998). Evaluation and integration of a colour infrared digital camera system into forest health protection programs in the Western United States, Southern Brazil and Anhui province, China. In: *Proceedings of the "7th US Forest Remote Sensing Applications Conference"* (Greer JD ed). Houston (TX, USA) 6-10 April 1998. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, USA, pp. 257-268.
- Krause K (2005). Radiometric use of QuickBird imagery. Technical note, 2005-11-07, DigitalGlobe Inc., Longmont, Colorado, USA, pp. 18.
- Lee YJ (1989). Aerial photography for detection of soil borne disease. *Canadian Journal of Plant Pathology* 11: 173-176. - doi: [10.1080/07060668909501134](https://doi.org/10.1080/07060668909501134)
- Le Maire G, François C, Dufrêne E (2004). Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 89: 1-28. - doi: [10.1016/j.rse.2003.09.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.09.004)
- Lillesand T, Kiefer M, Chipman JW (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons, New York, USA, pp. 763.
- Malthus TJ, Younger CJ (2000). Remotely sensing stress in street trees using high spatial resolution data. In: *Proceedings of the "2nd International Geospatial Information in Agriculture and Forestry Conference"*, vol 2. Lake Buena Vista (FL, USA) 10-12 January 2000. Rutgers University, FL, USA, pp. 326-333.
- Martini E, Costa G, Grignani P (2007). Censimento dello stato di salute delle alberature nel comune di Genova. In: *"Qualità dell'ambiente urbano"*, IV rapporto APAT, Edizione 2007, Focus su "La Natura in Città, Approfondimenti ed esperienze di buona gestione delle aree verdi e della biodiversità in aree urbane" (Chiesura A, Mirabile

- M, Serafini C eds). I.G.E.R., Roma, Italia, pp. 39-42.
- Meroni M, Rossini M, Guanter L, Alonso L, Rascher U, Colombo R, Moreno J (2009). Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment* 113: 2037-2051. - doi: [10.1016/j.rse.2009.05.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.003)
- Moriondo F, Capretti P, Ragazzi A (2006). Malattie delle piante in bosco, in vivaio e delle alberature. Patron Editore, Bologna, Italia, pp. 238.
- Murtha PA (1982). Detection and analysis of vegetation stress. In: "Remote sensing for resource management" (Johansenn CJ, Saunders JL eds). Soil Conservation Society of America, Ankeny, IA, USA, pp. 141-158.
- Murtha PA, Hamilton LS (1969). Detection of simulated damage on conifers using near infrared film. *Journal of Forestry* 67: 827-829.
- Murtha PA, Kippen FW (1969). *Fomes annosus* infection centres are revealed on false-color aerial photographs. *Canadian Department of Forestry Bi-monthly Research Notes* 25: 15-16.
- Nandris D, Van Cahn T, Geiger JP, Omont H, Nicole M (1985). Remote sensing in plant diseases using infrared colour aerial photography: applications trials in the Ivory coast to root diseases of *Hevea brasiliensis*. *European Journal of Forest Pathology* 13: 65-76.
- Nilsson H (1995). Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Canadian Journal of Plant Pathology* 17: 154-166. - doi: [10.1080/07060669509500707](https://doi.org/10.1080/07060669509500707)
- Peres MR (2007). Focal encyclopedia of photography. Focal Press, London, UK, pp. 846.
- Pernar R, Seletković A, Ančić M, Vedriš M, Teslak K (2008). Assessing the health of beech-fir forests using remote sensing methods. *Periodicum Biologicum* 110: 157-161.
- Pohl C, Van Genderen JL (1998). Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote sensing* 19: 823-824. - doi: [10.1080/014311698215748](https://doi.org/10.1080/014311698215748)
- Rossini M, Panigada C, Meroni M, Busetto L, Castrovinci R, Colombo R (2007). Monitoraggio delle condizioni della farnia (*Quercus robur* L.) nel Parco del Ticino mediante tecniche di telerilevamento iperspettrale. *Forest@* 4: 194-203. - doi: [10.3832/efor0450-0040194](https://doi.org/10.3832/efor0450-0040194)
- Soudani K, François C, Le Maire G, La Dantec V, Dufrêne E (2006). Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment* 102: 1611-175. - doi: [10.1016/j.rse.2006.02.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.004)
- Spicciarelli R, Arpaia S (1991). Esperienze fotografiche con pellicole in falso colore ed infrarossa per la localizzazione di alcuni stati morbosi in un agrumeto lucano. *Informatore Fitopatologico* 1: 49-53.
- Tucker CJ (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150. - doi: [10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Updike T, Comp C (2010). Radiometric use of WorldView-2 imagery. Technical Note, DigitalGlobe, USA, pp. 16.
- Verhoeven G (2008). Imaging the invisible using modified digital still cameras for straightforward and low-cost archaeological near-infrared photography. *Journal of Archaeological Science* 35: 3087-3100. - doi: [10.1016/j.jas.2008.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.012)
- Vinciková H, Hais M, Brom J, Procházka J, Pecharovà E (2010). Use of remote sensing methods in studying agricultural landscapes - a review. *Journal of Landscape Studies* 3: 53-63.
- Wallis GW, Lee YJ (1984). Detection of root disease in coastal Douglas-fir stands using large scale 70 mm aerial photography. *Canadian Journal of Forest Research* 14: 523-527. - doi: [10.1139/x84-097](https://doi.org/10.1139/x84-097)
- Wear JF (1971). Monitoring forest land from high altitude and space. Annual Progress Report, Forestry Remote Sensing Laboratory for Earth Resource Program, NASA, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, CA, USA, pp. 24.
- Williams RE (1973). Color infrared aerial photography for roor disease detection in the northern region. Report 73-22, USDA Forest Service, Missoula, Montana, USA, pp. 7.
- Williams RE, Lephart CD (1978). A system using aerial photography to estimate area of root disease centers in forests. *Canadian Journal of Forest Research* 8: 214-219. - doi: [10.1139/x78-033](https://doi.org/10.1139/x78-033)
- Xiao Q, McPherson EG (2005). Tree health mapping with multispectral remote sensing data at UC Davis, California. *Urban Ecosystems* 8: 349-361. - doi: [10.1007/s11252-005-4867-7](https://doi.org/10.1007/s11252-005-4867-7)
- Zhang L, Wu K, Zhong Y, Li P (2008). A new sub-pixel mapping algorithm based on a BP neural network with an observation model. *Neurocomputing* 71: 2046-2054. - doi: [10.1016/j.neucom.2007.08.033](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.08.033)