

Potenzialità del sensore WorldView-2 nella stima del Leaf Area Index (LAI)

Maurizio Laterza, Antonio Novelli, Eufemia Tarantino, Andrea Gioia

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECH)
Politecnico di Bari, via Orabona 4, 70126 Bari (BA) – Italy,
Tel: +39 080 5963417, e-mail: eufemia.tarantino@poliba.it

Abstract

L'indice di area fogliare (LAI) è un parametro importante in applicazioni forestali, agronomiche, idrologiche e climatiche. Generalmente il calcolo del LAI proviene dall'elaborazione di dati acquisiti da sensori satellitari a media/moderata risoluzione geometrica. Pur avendo innumerevoli vantaggi, tali prodotti hanno la limitazione di non essere validati localmente in ogni parte del globo (validazione di livello 3).

Nella presente lavoro vengono indagate le potenzialità del sensore satellitare WorldView-2 (risoluzione geometrica pari a 2 m; 8 bande multispettrali nel visibile e nell'infrarosso vicino) nella validazione di mappe del LAI generate da dati a più bassa risoluzione geometrica.

Tradizionalmente, due sono gli approcci più comunemente utilizzati per la stima del LAI da dati ottici telerilevati: i metodi statistici e i modelli biofisici diretti o inversi. A causa della difficoltà nel reperire misure in situ contemporanee alle acquisizioni satellitari e della complessità intrinseca dei modelli biofisici, per la stima del LAI si è optato per un compromesso tra i due approcci: il modello semi-empirico di Clevers (1989). I parametri del modello verranno stimati con il solo utilizzo dei dati WV-2 in un'area di studio compresa nel territorio di Taranto, analizzando le criticità di un simile approccio. I risultati ottenuti verranno inoltre esaminati per aree omogenee in base alla classe di copertura del suolo e confrontati con i valori presenti in letteratura.

Abstract

Leaf area index is an important parameter for forest, agronomy, hydrology, climatic application fields. Generally, LAI calculation is generated by processing medium/moderate spatial resolution satellite data. Despite their numerous advantages, such products have limits of lacking local validation for every side of the earth (level 3 validation).

In this work the potentiality of WorldView-2 sensor data in validating LAI maps generated through lower spatial resolution data. Two approaches are generally used to retrieve LAI from surface reflectances: statistic methods and indirect or direct physical-based methods. Lacking contemporary in-situ measurements, the semi-empiric method of Clevers (1989) was tested using WV-2 data on the study area of Taranto (Italy). Results were examined on homogeneous land cover classes and compared with recent results obtained in literature.

1. Introduzione

L'indice di area fogliare (LAI, *Leaf Area Index*) è definito come il rapporto tra la superficie fogliare totale, da un solo lato, e la superficie del suolo su cui le foglie si proiettano. È un parametro di grande importanza in molte applicazioni, dal momento che gli elementi fotosintetici della vegetazione sono la principale sede di scambio di materia ed energia tra superficie terrestre ed atmosfera (Alberti et al., 2013; Figorito et al. 2013), potendo costituire uno degli strati informativi consultabili in ambiente GIS (Piragnolo et al., 2014).

Pur avendo innumerevoli vantaggi, tali prodotti hanno la limitazione di non essere validati localmente in ogni parte del globo (validazione di livello 3); a questo scopo sarebbe conveniente usare dati satellitari ad alta risoluzione geometrica, invece che misure del LAI *in situ* (Rinaldi et al., 2010). Tradizionalmente, due sono gli approcci più comunemente utilizzati per la stima del LAI da dati ottici telerilevati: i metodi statistici e i modelli biofisici diretti o inversi. I primi sono di facile implementazione, ma richiedono misure del LAI *in situ* contemporanee all'acquisizione dell'immagine per la loro calibrazione e validazione. I secondi poggiano su una solida base fisica, ma sono intrinsecamente complessi e richiedono informazioni sulle proprietà ottiche delle foglie. Una soluzione di compromesso tra gli approcci menzionati è offerta dai modelli semi-empirici, i quali semplificano l'equazione del trasferimento radiativo legando l'estinzione della radiazione che penetra nel manto vegetale agli indici di vegetazione. A fronte della ormai grande varietà di sensori e di tecniche di elaborazione, è necessario perciò in primo luogo esplorare le peculiarità e le potenzialità di ciascun sensore nella stima del LAI.

WorldView-2 è uno dei più avanzati strumenti commerciali per il telerilevamento passivo ottico di tipo *imaging*, grazie alla sua alta risoluzione geometrica (2 m nel multispettrale) e all'elevato numero di bande a disposizione (ben otto). Obiettivo di questo lavoro è stato esplorare le potenzialità del sensore WorldView-2 offerte dall'alta risoluzione e dal maggior numero di bande nella stima del LAI attraverso il modello semi-empirico CLAIR (Clevers, 1989) senza l'ausilio di misure *in situ*.

2. Dati e metodi

2.1. Scena telerilevata

La scena telerilevata usata in questo studio è stata acquisita dal satellite WorldView-2 (le cui bande sono presentate nella Tabella 1) il 7 febbraio 2011 e comprende la parte settentrionale del comune di Taranto e parte dei comuni vicini (Figura 1).

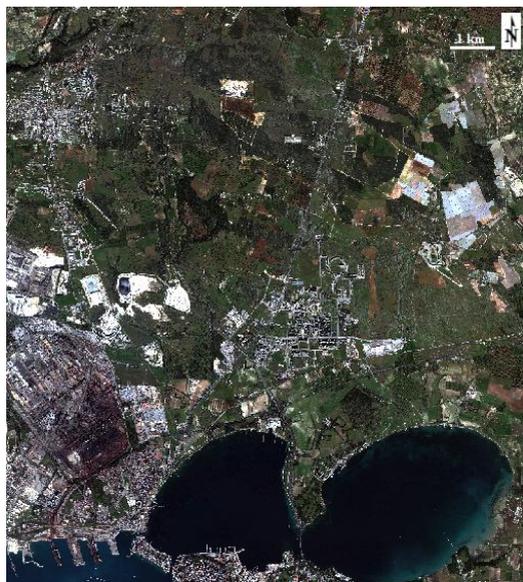


Figura 1 □ La scena tele rilevata.

Banda spettrale	Intervallo (nm)
Pancromatico	450-800
Coastal	400-450
Blu	450-510
Verde	510-580
Giallo	585-625
Rosso	630-690
Red Edge (RE)	705-745
Infrarosso vicino 1 (NIR 1)	770-895
Infrarosso vicino 2 (NIR 2)	860-1040

Tabella 1 □ Bande spettrali del sensore WorldView-2.

2.2. Scelta del metodo di LAI retrieval

I modelli semi-empirici possono essere considerati delle forme semplificate dei modelli fisicamente basati. Essi esprimono il LAI in funzione logaritmica di un indice di vegetazione estratto da misure

di radianza (SVI) e dei suoi valori corrispondenti a LAI nullo (SVI_{back}) e LAI asintoticamente infinito (SVI_{∞}), oltre che da un opportuno coefficiente di estinzione (k):

$$LAI = -\frac{1}{k} \ln \left[\frac{SVI - SVI_{\infty}}{SVI_{back} - SVI_{\infty}} \right] \quad [1]$$

Un simile approccio non richiede l'utilizzo di complessi algoritmi di inversione e permette di ricavare i parametri SVI_{back} e SVI_{∞} direttamente dall'immagine.

L'assenza di informazioni per la calibrazione dei parametri necessari all'inversione dei modelli fisicamente basati porta subito all'esclusione di questo tipo di approccio per la scena in esame; l'assenza di misure di riflettanza o di stime del LAI da dati a terra porta all'esclusione anche di approcci totalmente empirici, tanto più che l'esame della letteratura disponibile non ha fornito indicazioni chiare sulla stabilità temporale delle relazioni così trovate né sull'applicabilità di tali relazioni a siti diversi da quello per il quale sono state dedotte. La scelta dell'approccio di LAI *retrieval* non può che ricadere su metodi semi-empirici. Tra questi si è ritenuto adatto il modello CLAIR.

2.3. Il modello CLAIR

Secondo il modello CLAIR (Clevers, 1989) il LAI è una funzione logaritmica dell'indice di vegetazione WDV (Weighted Difference Vegetation Index):

$$LAI = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{WDVI}{WDVI_{\infty}} \right) \quad [2]$$

in cui $WDVI_{\infty}$ è il valore di WDV per LAI asintoticamente infinito, mentre α è una combinazione dei coefficienti di estinzione e di diffusione della radiazione attraverso la copertura vegetale. WDV è un indice non normalizzato ideato per ridurre l'influenza delle proprietà ottiche del suolo di *background* nella risposta spettrale misurata dal sensore; non è altro che una differenza tra la riflettanza nel NIR e quella nel rosso [3], pesata per il coefficiente angolare [4] della *linea dei suoli* (la retta lungo quale si dispongono i punti rappresentativi di suolo nudo nello spazio bidimensionale delle riflettanze nel NIR e nel rosso):

$$WDVI = \rho_{NIR} - a \cdot \rho_R, \quad \frac{\rho_{s,NIR}}{\rho_{s,R}} = a \quad [3], [4]$$

$\rho'_{s,NIR}$ e $\rho'_{s,R}$ rappresentano le riflettanze nel NIR e nel rosso di pixel di suolo nudo; il loro rapporto (il coefficiente a , appunto) è infatti costante per una grande varietà di suoli e sostanzialmente indipendente dal contenuto d'acqua (Stoner et al., 1980).

2.4. Potenzialità della banda Red Edge

È opportuno a questo punto ricordare che il sensore WorldView-2 è il solo sensore multispettrale attualmente attivo a combinare un'alta risoluzione geometrica (2 m) con un elevato numero di bande (otto) nel visibile e nell'infrarosso vicino. In particolare esso dispone della banda Red Edge (RE), centrata nella fascia dello spettro elettromagnetico in cui la firma spettrale della vegetazione presenta un brusco aumento dal minimo del rosso al massimo del NIR. Inoltre essa è altamente sensibile a variazioni dell'indice di area fogliare della copertura (Asner, 1998). Per questi motivi le informazioni spettrali da dati satellitari raccolte nella regione RE sono state utilizzate per determinare il LAI: si veda ad esempio Herrmann et al. (2010) e Tillack et al. (2014). Nei lavori citati la banda RE viene usata per lo più per il calcolo di nuovi indici spettrali di vegetazione (SVI), andando a sostituire altre bande in indici già esistenti oppure creandone di nuovi. È sulla scorta di queste esperienze sono state esplorate le potenzialità della banda Red Edge nel LAI *retrieval*. Si è ipotizzato che, in maniera analoga alla [2], siano valide le espressioni [5] e [6]:

$$LAI = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{WDRE1}{WDRE1_{\infty}} \right), \quad LAI = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{WDRE2}{WDRE2_{\infty}} \right) \quad [5], [6]$$

in cui al posto di WDMI sono stati sostituiti gli indici (basati sulla banda RE) WDRE1 e WDRE2 (*Weighted Difference Red Edge 1 e 2*):

$$WDRE1 = \rho_{NIR} - b \cdot \rho_{RE} , \quad WDRE2 = \rho_{RE} - c \cdot \rho_R \quad [7], [8]$$

$$\frac{\rho_{s,NIR}}{\rho_{s,RE}} = b , \quad \frac{\rho_{s,RE}}{\rho_{s,R}} = c \quad [9], [10]$$

La riflettanza corretta nel NIR è espressa come una differenza pesata (attraverso il coefficiente b) tra la riflettanza nel NIR e quella nel RE [7]; analogamente la riflettanza corretta nel RE è stata espressa come una differenza pesata (attraverso il coefficiente c) tra la riflettanza nel RE e quella nel rosso [8].

2.5. Parametri del modello

I parametri del modello CLAIR vengono usualmente stimati empiricamente usando un insieme di valori del LAI dedotto da misure *in situ* e misure di riflettanza da satellite acquisite contemporaneamente alle prime (Clevers, 1989). Uno degli obiettivi di questo lavoro è invece applicare il modello CLAIR senza ricorrere a misure del LAI *in situ*.

In assenza di dati sperimentali è stato necessario attribuire ad α un valore arbitrario, pur se giustificato. Il parametro α è nominalmente compreso tra 0 e 1, ma un esame della letteratura disponibile ha permesso di restringere il campo dei valori (Tabella 2). In particolare Vuolo et al. (2013), a proposito dell'applicabilità del modello CLAIR alla generazione di mappe del LAI per due aree agricole, fissano $\alpha = 0,35$ come valore iniziale del procedimento iterativo di calibrazione del coefficiente e trovano α compresi tra 0,32 e 0,40. Vista la prevalente natura agricola delle aree vegetate presenti nella scena oggetto di studio si è preferito seguire quest'ultima indicazione e fissare pertanto $\alpha = 0,35$.

Anche per la scelta di $WDVI_{\infty}$ è stata esaminata la letteratura disponibile sul tema (Tabella 2). Il parametro $WDVI_{\infty}$ ha un'importanza cruciale nel modello CLAIR, dal momento che esso costituisce la soglia di WDMI oltre la quale non è possibile effettuare una stima del LAI, a causa del vincolo di positività dell'argomento del logaritmo nella [2]; in altre parole: non è possibile stimare il LAI per quei pixel il cui WDMI è maggiore o uguale a $WDVI_{\infty}$ (Figura 2). $WDVI_{\infty}$ viene generalmente derivato direttamente dall'immagine considerando il massimo WDMI in corrispondenza di alti valori di LAI ottenuti da misure a terra. In assenza di indicazioni empiriche si è però scelto di fissare come $WDVI_{\infty}$ proprio il WDMI massimo presente nella scena; a motivo di questa scelta c'è la volontà di assicurarsi che il LAI venga stimato per ogni pixel dell'immagine.

Per il calcolo di $WDRE1_{\infty}$ e $WDRE2_{\infty}$ sono state fatte valere le stesse considerazioni fatte in precedenza per $WDVI_{\infty}$: anche per $WDRE1_{\infty}$ e per $WDRE2_{\infty}$ si è scelto di usare i rispettivi valori massimi calcolati nella scena.

2.6. Elaborazioni delle immagini e applicazione del modello CLAIR

Il primo passo per l'applicazione del modello CLAIR è la determinazione dei coefficienti **a**, **b** e **c** rispettivamente tramite la [4], la [9] e la [10]. Ottenute, a partire dai valori di DN, le riflettanze nelle tre bande già citate (attraverso elaborazioni radiometriche e l'applicazione dell'algoritmo di correzione atmosferica della *Dark Subtraction*; non è stata effettuata alcuna correzione geometrica), sono stati identificati alcuni gruppi di pixel rappresentativi di suolo nudo, ma allo stesso tempo diversi da superfici artificiali (cave, suoli rimaneggiati, cumuli di materiali, ecc.). Sono quindi stati calcolati gli indici WDMI, WDRE1 e WDRE2 per ogni pixel della scena rispettivamente attraverso la [3], la [7] e la [8]. È stato quindi possibile assegnare i rispettivi valori ai parametri del modello e quindi applicare la [2], la [5] e la [6] per le tre modalità di calcolo del LAI.

	α	$WDVI_{\infty}$
Bouman et al. (1992)	0,400	0,470
D'Urso et al. (1999)	0,42	0,51
Clevers (1991)	0,252 *	0,686 *
	0,530 **	0,579 **
Vuolo et al. (2013)	0,32-0,40	0,469-0,588

Tabella 2 □ Valori dei parametri del modello CLAIR riscontrati in letteratura (* nello stadio di crescita; ** nello stadio generativo).

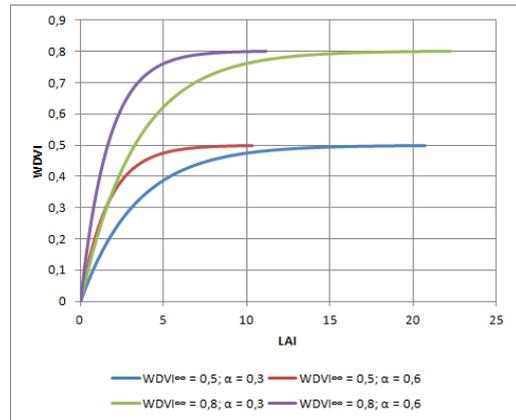


Figura 2 □ Effetto della variazione dei parametri del modello CLAIR.

3. Risultati

Come esempio dei risultati ottenuti con l'applicazione del modello CLAIR si riporta (in Figura 3) la mappa del LAI generata attraverso l'applicazione della [2], in una rappresentazione *density slicing*.

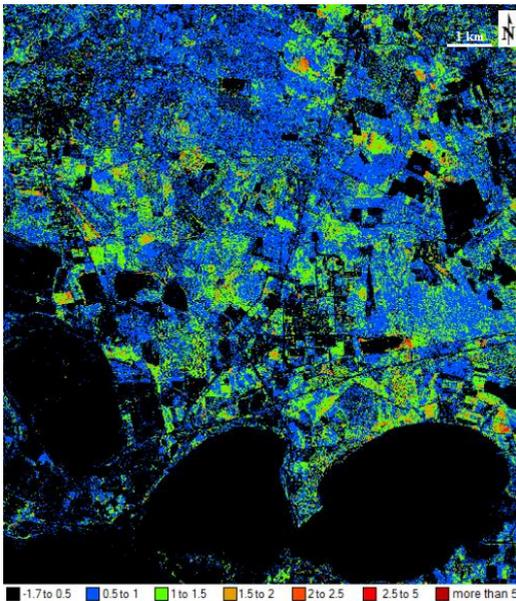


Figura 3 □ Mappa del LAI da modello CLAIR.

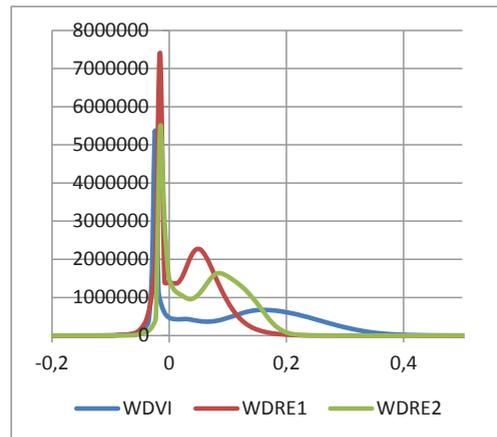


Figura 4 □ Confronto tra gli istogrammi di WDV I, WDER1 e WDER2.

Il LAI generato attraverso l'indice WDV I è compreso tra 0 e 40 (segno di probabile saturazione dell'indice). Tuttavia circa il 99% dei pixel con LAI positivo presenta $LAI \leq 1,7$ (Figura 3); in effetti, il valore medio del LAI è pari ad appena 0,69. Per un esame più approfondito della stima del LAI attraverso il modello CLAIR si è scelto di selezionare alcune aree rappresentative delle classi di vegetazione maggiormente presenti nella scena, delle quali confrontare l'indice di area fogliare stimato con valori presenti in letteratura. Sono state selezionate e identificate cinque aree rappresentative di altrettante classi di copertura presenti nella scena: un'area coperta da macchia

mediterranea; un bosco di conifere; un'area coltivata a seminativi; un oliveto; un frutteto. La stima del LAI effettuata attraverso l'indice WdVI, se confrontata con dati di letteratura per analoghe classi di copertura, si può considerare buona per l'oliveto e compresa negli intervalli di letteratura per tutte le altre classi.

4. Conclusioni

In questo studio l'applicazione del modello CLAIR è stata condotta su cinque aree di una scena WV-2 dell'area di Taranto con copertura vegetale omogenea e confrontando il LAI stimato con corrispondenti valori di letteratura.

Sia l'abbondanza di bande multispettrali che l'alta risoluzione WorldView-2 aprono delle prospettive future per l'impiego di questo sensore nel telerilevamento della vegetazione e in particolare nel LAI retrieval. Riguardo la disponibilità di numerose bande multispettrali nel sensore WorldView-2, ulteriori studi sul LAI retrieval si potrebbero aprire considerando anche la banda NIR2 (in origine progettata per fornire informazioni sullo stato dell'atmosfera in procedimenti di correzione atmosferica). Riguardo la sua alta risoluzione geometrica, il sensore WorldView-2 potrebbe trovare applicazione nella validazione di stime del LAI generate da sensori a media risoluzione. Esperienze in questo senso sono ormai di importanza cruciale nel contesto odierno, in cui l'aumento del numero di prodotti ottenuti grazie al telerilevamento ne ha reso diffuso e sistematico l'impiego nei campi più diversi del monitoraggio ambientale, climatico, agronomico, ecc.. L'uso di dati ad alta risoluzione, come quelli del sensore WorldView-2, potrebbe perciò rendere più rapide e convenienti le procedure di validazione di mappe del LAI generate da dati telerilevati.

Bibliografia

- Alberti, G., Boscutti, F., Pirotti, F., Bertacco, C., De Simon, G., Sigura, M., ... & Bonfanti, P. (2013). A LiDAR-based approach for a multi-purpose characterization of Alpine forests: an Italian case study. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 6(3), 156.
- Asner G. P. (1998), "Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance", *Remote sensing of environment*, 64(3), 234-253.
- Bouman B. A. M., Van Kasteren H. W. J., Uenk D. (1992), "Standard relations to estimate ground cover and LAI of agricultural crops from reflectance measurements", *European Journal of Agronomy*, 4, pp. 249-262.
- Clevers J. G. P. W. (1989), "Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture", *Remote Sensing of Environment*, 29(1), 25-37.
- Clevers J. G. P. W. (1991), "Application of the WdVI in estimating LAI at the generative stage of barley", *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 46(1), 37-47.
- D'Urso G., Menenti M., Santini A. (1999), "Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management", *Agricultural Water Management*, 40(2), 291-302.
- Figorito, B., Tarantino, E., Balacco, G., Gioia, A., & Iacobellis, V. (2013). LAI retrieval from SPOT Vegetation in Mediterranean basins. In, *33rd EARSeL Symposium, Matera, Italy, 3-6 June 2013*: <http://www.conferences.earsel.org/abstract/show/39>
- Herrmann I., Pimstein A., Karnieli A., Cohen Y., Alchanatis V., Bonfil D. J. (2010), "Assessment of leaf area index by the red-edge inflection point derived from VEN μ S bands", in *Proc. of the ESA Hyperspectral Workshop, Frascati (Italy)* (pp. 1-7).
- Piragnolo M, Pirotti F, Guarnieri A, Vettore A, Salogni G. Geo-Spatial Support for Assessment of Anthropic Impact on Biodiversity. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2014; 3(2):599-618
- Rinaldi M., Ruggieri S., Garofalo P., Vonella A. V., Satalino G., Soldo P. (2010), "Leaf Area Index Retrieval Using High Resolution Remote Sensing Data", *Italian Journal of Agronomy*, 5(2), 155-166.
- Stoner E. R., Baumgardner M. F., Biehl L. L., Robinson B. F. (1980), "Atlas of soil reflectance properties", *Research Bulletin, Agricultural Experiment Station, Purdue University*, (962).
- Tillack A., Clasen A., Kleinschmit B., Förster M. (2014), "Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-resolution satellite-based vegetation indices", *Remote Sensing of Environment*, 141, 52-63.
- Vuolo F., Neugebauer N., Bolognesi S. F., Atzberger C., D'Urso G. (2013), "Estimation of Leaf Area Index Using DEIMOS-1 Data: Application and Transferability of a Semi-Empirical Relationship between two Agricultural Areas", *Remote Sensing*, 5(3), 1274-1291.