

Il contributo del telerilevamento satellitare per il monitoraggio della coltura riso e la stima delle produzioni

Mirco Boschetti (*), Daniela Stroppiana (*), Pietro Alessandro Brivio (*),
Roberto Confalonieri (**), Stefano Bocchi (**)

(*) Consiglio Nazionale delle Ricerche -IREA, Via Bassini 15 20133 Milano, +390223699297, +390223699300
boschetti.m@irea.cnr.it, Stroppiana.d@irea.cnr.it, Brivio.pa@irea.cnr.it

(**) Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale, via Celoria 2, 20133 Milano
roberto.confalonieri@unimi.it, stefano.bocchi@unimi.it.

Riassunto

Il riso è una delle colture più importanti al mondo rappresentando l'alimento base per oltre la metà della popolazione mondiale. In Italia questa coltivazione ha una grande importanza sia economica che paesaggistico culturale. L'Italia detiene da tempo il primato europeo nella produzione di riso che richiede metodi di produzione razionali nonché sistemi di supporto per la gestione e pianificazione. In quest'ottica il monitoraggio delle risorse agricole riveste un ruolo fondamentale perché consente di ottenere stime sulle future produzioni evidenziando eventuali situazioni critiche. Modelli di crescita, che si sono dimostrati efficaci nella stima delle rese, necessitano di input spazialmente distribuiti per garantire delle stime affidabili nello spazio. Le immagini telerilevate da satellite permettono di monitorare lo sviluppo della coltura e di derivare, nello spazio e nel tempo, parametri della vegetazione di interesse modellistico. In questo contesto, il presente lavoro descrive l'integrazione dei dati telerilevati in un modello di crescita della coltura riso per la stima delle rese. Il modello è stato applicato per un'area di studio che ricopre il distretto risicolo lombardo-piemontese che si estende per oltre 250.000 ha. I dati satellitari MODIS sono stati utilizzati per derivare informazioni sulla fenologia della coltura (es. emergenza, massimo LAI e maturità della stagione di crescita) e per stimare parametri biofisici per l'applicazione di un modello di *radiation use efficiency*. La fenologia del riso monitorata da satellite è risultata in buon accordo con le osservazioni di campo e le produzioni stimate dal modello hanno mostrato un'accuratezza soddisfacente (RRMSE < 16%) per applicazioni di monitoraggio. Questa sperimentazione ha dimostrato come un sistema operativo di monitoraggio delle colture a scala regionale possa avvantaggiarsi dell'utilizzo di dati di Osservazione della Terra.

Abstract

Rice is one of the most important crops in the whole world, providing staple food for more than 3000 million people. In Italy it is one of the most economically important cereal crops, in view of foreign exchange, and rice cropping system characterizes the landscape of the north of Italy (Po Valley) with a continuous district of more than 250 000 ha. Italian rice production is the most important of the entire Europe and requires support for a more sustainable and environmental sound management. In this context crop monitoring is necessary to forecast crop production and to identify possible critical condition. Crop growth models can be useful tools for estimating growth, development and yield but they require complex spatial distributed input parameters to produce reliable maps. Satellite Remote Sensing techniques provide spatially distributed information for crop models. In this framework, the paper describes a study devoted to derive and integrate satellite remote sensing products in a radiation use efficiency model to estimate crop production over the Italian rice district. MODIS satellite vegetation indices have been exploited to derive phenological information and to estimate fAPAR. Results show that crop production can be efficiently estimated with a mean error within 16%. This study demonstrates how remote sensing information can effectively contribute to a crop monitoring operation system for regional applications.

Introduzione

Negli ultimi anni, la modellistica di simulazione e il telerilevamento si sono rivelati supporti efficaci per il monitoraggio degli agroecosistemi a larga scala e diversi sistemi sono stati proposti per la previsione delle rese. I sistemi più semplici propongono l'uso di relazioni empiriche tra elaborazioni di immagini telerilevate e dati di campo (Tucker et al., 1981; Benedetti e Rossini, 1993). Sistemi più complessi cercano invece di integrare simulazioni modellistiche e informazioni da telerilevamento (Genovese et al., 2001). Un esempio operativo è quello del MARS (*Monitoring Agricultural ResourceS*; <http://mars.jrc.ec.europa.eu/>) della commissione Europea realizzato e gestito dal *Joint Research Center* (JRC) che svolge da anni monitoraggio delle colture e previsioni delle rese agricole a scala europea. In particolare, il *MARS Crop Yield Forecasting System* utilizza un sistema integrato basato su analisi statistiche di serie storiche, indicatori provenienti da dati meteorologici, derivati da simulazioni modellistiche e da immagini satellitari a bassa risoluzione. In questo contesto sperimentazioni significative di integrazioni di dati telerilevati nella modellistica sono ad esempio quelle del prototipo (TOPFERT) basato sul modello di simulazione WARM (Confalonieri et al., 2006). Tale prototipo consente infatti di utilizzare informazioni esogene provenienti da telerilevamento satellitare per sopperire alla scarsa affidabilità di dati spazialmente distribuiti riguardanti le agrotecniche (Confalonieri et al., 2008).

Il presente lavoro mostra il contributo del telerilevamento nella stima delle rese della coltura riso in nord Italia. I dati satellitari sono stati usati per monitorare lo sviluppo della coltura e per derivare, nello spazio e nel tempo, parametri della vegetazione di interesse modellistico.

In particolare informazione sulla fenologia della coltura e stime di parametri biofisici sono state derivate da immagini satellitari ed integrate in un modello semplificato di *radiation use efficiency*. In questo lavoro vengono presentati e discussi i risultati ottenuti per gli annate 2002-2004.

Materiali

L'area di studio ricopre l'intera area risicola del Nord Italia tra le province di Milano, Pavia, Vercelli e Novara dove il riso rappresenta la coltivazione predominante tanto da creare il più grande distretto risicolo in Europa (figura 1a). In quest'area di circa 250 000 ha viene prodotto il 90% del riso coltivato in Italia.

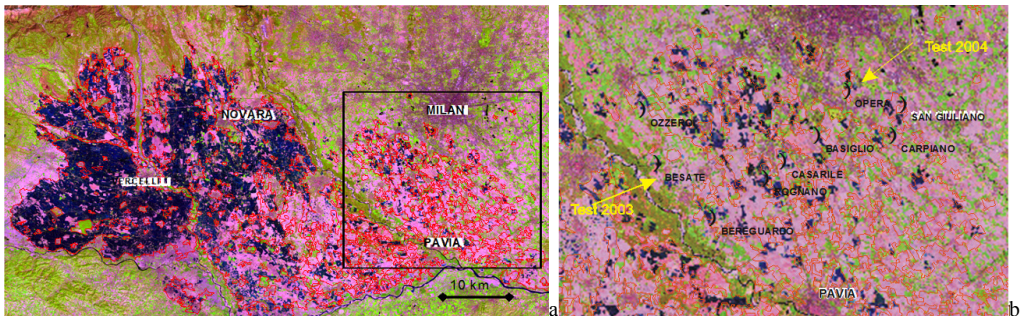


Figura 1 – Immagine Landsat ETM+ (RGB 543) in nero sono visibili le estese risaie del distretto risicolo italiano (a). Indicazione delle zona dove sono state svolte le misure di campo (b).

I dati satellitari utilizzati sono quelli acquisiti dal sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo della piattaforma TERRA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>); il prodotto MOD13Q1 è stato scaricato dal sito della NASA (<https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>) per il periodo 2002-2005. Questo prodotto operativo fornisce ogni 16 giorni sintesi temporali di Indici di Vegetazione (VI) ad una risoluzione spaziale di 250 m. L'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*, Huete et al., 1994) sono stati analizzati in relazione alla stima di parametri fenologici e dell'fAPAR.

Le variabili meteorologiche sono state estratte dai dati provenienti da differenti stazioni sperimentali (Facoltà di Agraria dell'Università Statale di Milano e *Institute for Environment and Sustainability del Joint Research Center*) e dalle reti di misura dell' Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA), dell'Agenzia Regionale Protezione Ambiente Lombardia (ARPAL) e della Rete AgroMeteorologica del Piemonte (RAM). Mappe giornaliere di temperatura e radiazione globale alla stessa risoluzione spaziale delle immagini satellitari sono state realizzate interpolando con media spaziale pesata i dati disponibili tra le diverse stazioni.

I dati raccolti nelle aziende (figura 1b) e le statistiche ufficiali dell' Ente Nazionale Risi (ENR) sono stati usati per derivare la distribuzione delle cultivar presenti nell'area di studio e per valutare l'accuratezza dei risultati della modellistica confrontandoli con i dati sulle produzioni.

Metodi

La stima della rese è stata eseguita modificando un modello di *Radiation Use Efficiency* basato sull'equazione di Monteith (1977). In condizioni non limitanti di acqua e nutrienti la biomassa accumulata dalla coltura, *Above Ground Biomass* (AGB), può essere stimata in funzione della radiazione fotosinteticamente attiva intercettata dalla *canopy*, *fraction of Photosynthetically Active Radiation* (fPAR) e dell'efficienza d'uso della radiazione, *Radiation Use Efficiency* (RUE) considerando come fattori di limitazione quelli legati a temperature non ottimali. Tale formulazione è descritta nell'equazione 1:

$$AGB = \sum_{d=SOS}^{Maturity} \varepsilon^* \times 0.45 \times Rad_d \times fAPAR_d \times Tlim_d \quad [1]$$

dove

- AGB (g m⁻²) è la biomassa secca totale prodotta cumulata dall'inizio della stagione (*Start Of Season* SOS) alla maturità fisiologica (*Maturity*).
- ε^* è il massimo valore potenziale di RUE (g MJ⁻¹) non affetto da fattori limitanti (Prince, 1991);
- Rad_d (MJ m⁻² day⁻¹) è la radiazione solare globale che moltiplicata per 0.45 fornisce una buona approssimazione della PAR (Photosynthetic Active Radiation, 400 - 700 nm) incidente;
- fAPAR_d è il valore giornaliero della frazione di PAR assorbita dalla coltura in funzione del suo;
- T_{limd} rappresenta il valore giornaliero del fattore di limitazione per condizioni di temperature non ottimali.

La stima delle rese può poi essere ricavata come proporzione della AGB totale applicando uno *Harvest Index* (HI) specifico per ogni varietà colturale.

Specifici esperimenti di campo sono stati condotti nell'area di studio (figura 1b) per stimare i parametri ε^* e HI. Boschetti et al. (2006) descrivono i dettagli dei protocolli di misura e forniscono le stime dei vari parametri per le differenti cultivar analizzate. In questo lavoro è stato utilizzato un unico valore di ε^* pari a 2.9 MJ m⁻², mentre sono stati impiegati specifici valori di HI per varietà Indica (0.53) e Japonica (0.39). La distribuzione spaziale delle coltivazioni di riso sono state derivate dalla cartografia Corine Land Cover (CLC, <http://image2000.jrc.it/clc/index.html>) mentre la distribuzione delle diverse varietà è stata desunta per ogni anno dai dati ENR.

I dati satellitari sono stati analizzati per monitorare lo sviluppo colturale e determinare in maniera spazialmente distribuita le fasi fenologiche del riso. L'analisi dei profili temporali consente infatti di individuare con buona accuratezza momenti quali l'emergenza e il massimo sviluppo vegetativo da cui è poi possibile stimare con maggior dettaglio la maturità fisiologica. Nel presente lavoro sono stati utilizzati i risultati prodotti da Boschetti et al. (2009) sull'area di studio di interesse.

Mappe giornaliere di fAPAR sono state prodotte calibrando una relazione empirica tra indici di vegetazione (VI) e stime di campo del parametro (Kiniry, 2004). Misure di LAI2000 sono state effettuate in 17 siti rappresentativi tra il 2002-2004, fAPAR è stata poi stimata utilizzando la formula di Lambert Beer (Monsi and T. Saeki, 1953) (Eq.2).

$$fAPAR = 1 - e^{-kLAI} \quad [2]$$

differenti valori di k (coefficiente di estinzione) sono stati usati per le varie cultivar come riportato da Boschetti et al. (2006). La validazione dei modelli empirici (VI-fAPAR) è stata condotta usando dati indipendenti acquisiti nel 2005 in 21 siti provenienti da cinque differenti aziende (figura 1b).

Risultati

La figura 2 mostra le mappe di emergenza, massimo sviluppo (momento del picco di LAI) e maturità per l'anno 2004 derivate dall'analisi dei profili temporale degli indici di vegetazione.

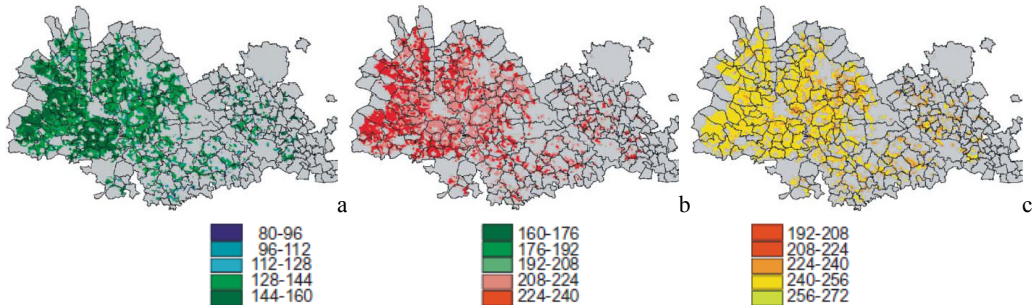


Figura 2 – Mappe fenologiche relative a emergenza (a), massimo LAI (b) e maturità (c) per l'anno 2004 (da Boschetti et al. 2009).

Boschetti et al. (2009) hanno mostrato come l'analisi pixel a pixel dei profili temporali consenta di stimare le fasi con buona accuratezza con un errore medio di circa una settimana (< 9 giorni). Inoltre l'analisi fenologica consente di individuare con buona approssimazione dove siano distribuite le differenti cultivar presenti nell'area di studio e di derivare indirettamente informazioni circa la gestione (date di semina ed eventuali trattamenti) Le mappe così prodotte hanno consentito di determinare la modellistica della crescita definendo momenti di inizio e fine per la stima dell'AGB.

Stima di fAPAR

Le equazioni 3 e 4 riportano il modello regressivo lineare derivato dalla correlazione tra VIs MODIS e stime di campo di fAPAR:

$$fAPAR = 1.64*EVI - 0.24 \quad [3]$$

$$fAPAR = 1.85*NDVI - 0.73 \quad [4]$$

Entrambi i modelli sono risultati statisticamente significativi e con un alto coefficiente di determinazione (tabella in figura 3).

VI	Calibrazione		Validazione							
	17 siti, 3 aziende, anni 2002-2004		21 siti, 5 aziende anno 2005							
	r ²	p	r ²	p	Slope	inter.	RMSE	RRMSE	EF	CD
EVI	0.82	***	0.91	***	0.98	-0.09	0.13	19.20%	0.78	1.18
NDVI	0.82	***	0.93	***	1.24	-0.28	0.17	24%	0.65	1.83

Figura 3 – Tabella riportante i valori di performance dei modelli di stima del fAPAR in calibrazione e validazione.

La validazione con un data set indipendente di misure ha però dimostrato come EVI consenta di ottenere stime di fAPAR più robuste rispetto a quelle derivate da NDVI. Quest'ultimo presenta una

significativa sottostima (intercetta = -0.28) in condizioni di bassa copertura vegetale a causa dell'influenza del background e evidenza problemi di saturazione in condizione di densa *canopy* come riportato da altri autori (Gao et al., 2000). La tabella in figura 3 riporta i valori degli indici di agreement (Loague and Green, 1991) per la validazione del modello; i valori mostrano come il modello basato su EVI sia in generale migliore in termini di performance (EF = 0.78 rispetto 0.65) e presenti valori più bassi di errore minore (RRMSE = 19.2% rispetto 24 %). In base a questi risultati si è perciò usato il modello basato su EVI per produrre mappe di fAPAR e stimare la produzione giornaliera di biomassa.

Mappe di AGB e stima delle rese

La figura 4a mostra la mappa di AGB totale per l'anno 2004 come stimata dal modello mentre la figura 4b descrive il profilo temporale dell'AGB giornaliera in confronto alle misure di campo effettuate nell'area test per lo stesso anno. Il grafico indica in maniera qualitativa come il modello grazie alla stima nel corso della stagione delle variabili biofisiche (fAPAR) consenta di riprodurre con buona accuratezza il comportamento di crescita della coltura.

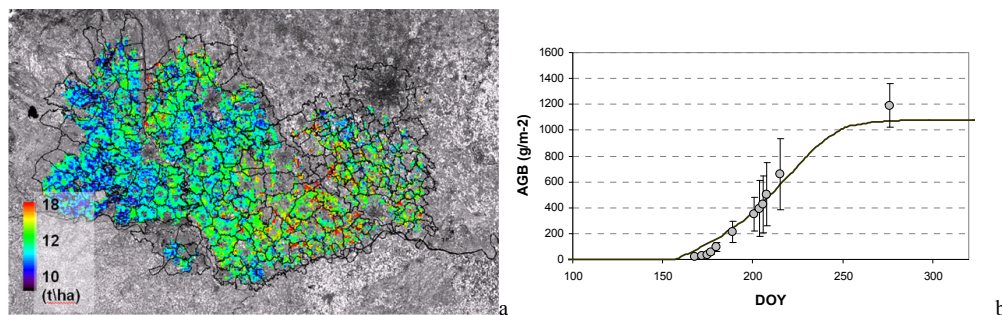


Figura 4 – Mappa di AGB totale per l'area di studio (a) e confronto con i dati di campo di Opera (b).

I valori di resa derivati per diverse aziende (figura 1b, Boschetti et al. 2009) sono stati confrontati con le stime del modello ottenute applicando uno specifico HI alla AGB totale per le diverse varietà di riso coltivate. I risultati mostrano come il modello in questi contesti sia in grado di stimare le rese con buona accuratezza (RMSE = 0.58, RRMSE < 10%). Una valutazione delle performance più sistematica sull'intera area di studio è stata poi condotta confrontando le mappe con le statistiche dell' ENR. L'analisi delle mappe di errore (dati non mostrati) indica come non si apprezzano pattern sistematici di errore. Inoltre, la distribuzione dell'errore presenta valore più frequente la classe centrata su 0% e il valore medio dell'errore per gli anni 2002, 2003 e 2004 risulta rispettivamente del 15.3%, 16.4% e 14.9 %.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro descrive brevemente alcune delle potenzialità del telerilevamento per il monitoraggio di sistemi colturali, nello specifico quello risicolo. L'analisi delle immagini satellitari si è dimostrata efficace per la stima delle fasi fenologiche del riso consentendo di ottenere mappe di emergenza, massimo LAI e maturità. Buona accuratezza si ottiene nella stima dell' fAPAR a partire da indici di vegetazione, in particolare l'EVI risulta più consistente del tradizionalmente usato NDVI. Questi prodotti sono di grande interesse modellistico, soprattutto per applicazioni a scala territoriale, in quanto consentono di contribuire a descrivere il sistema in assenza di dati di input spazialmente distribuiti e di qualità. L'utilizzo dei prodotti da telerilevamento (fenologia e stime di fAPAR) in un modello semplificato di *radiation use efficiency* si è dimostrato efficace nello stimare la crescita della biomassa e le rese. Il modello preso in considerazione non è però in grado di

trattare tutti gli aspetti relativi alla fisiologia della pianta e agli effetti di fattori limitanti relativi a condizioni nutrizionali o all'impatto di parassiti.

Lo sviluppo di questi lavori richiede perciò di integrare i dati satellitari in modelli più evoluti sfruttando le capacità delle immagini di fornire periodiche stime spazializzate di parametri di interesse modellistico. La possibilità di assimilare dati esogeni provenienti da telerilevamento nei modelli di crescita colturale per migliorare le stime rappresenta perciò la strada più promettente da seguire.

Bibliografia

- Benedetti R., Rossini S. (1993), "On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: the case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna". *Remote Sens. Environ.*, 45: 311-326.
- Boschetti M., Stroppiana D., Brivio P.A., Bocchi S. (2009), "Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images" *International Journal of Remote Sensing*, 30(18), pp. 4643 - 4662.
- Boschetti M., Stroppiana D., Rosenmund A. and Giardino C. (2008), "Estimation of Rice Plant Nitrogen content from MERIS data using a field base empirical model". *Proc. of the '2nd MERIS / (A)ATSR User Workshop'*, Frascati, Italy 22-26 September 2008.
- Boschetti M., Bocchi S., Stroppiana D., Brivio P.A. (2006), "Estimation of parameters describing morpho-physiological features of Mediterranean rice varieties for modelling purposes", *Italian Journal of Agrometeorology*, (3): 40 - 49.
- Confalonieri R., Rosenmund A.S., Mariani L., Boschetti M., Stroppiana D., Acutis M., Chiodini M.E., Perego A., Sacchi G.A., Nocito F. (2008), "Sviluppo di un prototipo per le previsioni di resa a larga scala basato sul modello di simulazione WARM e su dati di concentrazione di azoto nella pianta derivati da satellite". Atti del *Convegno Nazionale della Associazione Italiana di Agrometeorologia*, S. Michele all'Adige, 10-12 giugno.
- Confalonieri, R., Gusberty, D., Acutis, M., (2006). "Comparison of WOFOST, CropSyst and WARM for simulating rice growth (Japonica type-short cycle varieties)". *Italian Journal of Agrometeor.* 3: 7-16.
- Gao X, Huete A.R, Ni W., Miura T. (2000), "Optical-Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination". *Remote Sens. Environ.* 74:609-620.
- Genovese, G., Vignolles, C., Nègre, T., Passera, G., (2001), "A methodology for a combined use of normalized difference vegetation index and CORINE land cover data for crop yield monitoring and forecasting. A case study on Spain", *Agronomie*, 21: 91-111.
- Huete, A., Justice, C., Liu, H. (1994), "Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS", *Remote Sens. Environ.*, 49, 224- 234.
- Kiniry J.R., Bean B., Xie Y., Chen P. (2004), "Maize yield potential: critical processes and simulation modeling in a high-yielding environment". *Agricultural systems*, 82: 45-56.
- Loague, K.M., Green, R.E. (1991), "Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application", *J. Contam. Hydrol.*, 7:51-73.
- Monsi M., Saeki T. (1953), "Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion". *Jpn. J. Bot.* 14:22-52.
- Monteith J.L. (1977) "Climate and crop efficiency of crop production in Britain", *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B* 281: 277-329.
- Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H., McMurtrey, III, J. E., (1981) "Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat", *Remote Sens. Environ.*, 11: 171-189.