

# Applicazione del telerilevamento satellitare nella gestione degli interventi irrigui in agricoltura

Luca Domenico Sapia<sup>1</sup>, Gabriele Bitelli<sup>1</sup>, Andrea Spisni<sup>2</sup>, Vittorio Marletto<sup>2</sup>, Giulia Villani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, viale Risorgimento 2, Bologna

<sup>2</sup>ARPA Emilia - Romagna – Servizio Idro Meteo Clima, viale Silvani 6, Bologna

<sup>3</sup>Università di Bologna, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari (DipSA), viale Fanin 50, Bologna

**Autore di riferimento:** lucad.sapia@gmail.com

## Abstract

The knowledge of crop water requirements (CWR) is an essential information in the management of irrigation operations in agriculture, especially in arid and semi-arid regions where irrigation is the largest consumer of water. Starting from observations made today by modern satellite sensors, in the regions of the visible and near infrared electromagnetic spectrum, it is possible to extract information on the status of crops and phenological characteristics of the canopy of vegetation that, combined with the use of agro-meteorological data, and following appropriate methodologies, allow to obtain maps of crop water requirements. In this study, two methods have been applied to evaluate CWR: the first (method  $K_c$ -NDVI) aims to assess the phenological state of the plants through the crop coefficient  $K_c$ , the second (analytical approach), instead, aims to recover the canopy biophysical variables of the vegetation, such as the albedo of the surface ( $r$ ), the leaf area index (LAI) and the height of the crop ( $h_c$ ).

**Parole chiave:** telerilevamento satellitare, fabbisogno idrico delle colture, evapotraspirazione, metodo  $K_c$ -NDVI, approccio analitico.

**Keywords:** remote sensing, crop water requirements, evapotranspiration, method  $K_c$ -NDVI, analytical approach.

## Introduzione

La scarsità della risorsa idrica è una preoccupazione crescente per l'agricoltura mondiale, è ovviamente sentita in maniera molto diversa nei vari Paesi ed assume caratteristiche drammatiche per molti di essi.

Anche quei Paesi dotati di una maggiore disponibilità d'acqua si trovano oggi a fronteggiare inevitabilmente tale problema sia per l'incremento della domanda d'acqua potabile, industriale ed irrigua, sia per i problemi derivanti dalla sempre maggiore irregolarità delle piogge provocata dal cambiamento climatico in corso.

Proprio per questo oggi si parla sempre più frequentemente di risparmio, di uso oculato, di uso razionale e di salvaguardia quantitativa della risorsa idrica, tutti termini che convergono nella necessità di porre maggiore attenzione nell'uso della risorsa stessa (Mannini, 2004).

È interessante riportare, a titolo d'esempio, il dato relativo al quantitativo totale di acqua prelevato dalle fonti di approvvigionamento della Regione Emilia-Romagna che, all'anno 2014, ammonta a circa 2260 milioni di metri cubi. Se si pensa che di questi il 68% sono imputabili al settore irriguo, contro i soli 22% al settore civile e 8% al settore industriale, ci si rende immediatamente conto che il motivo per cui oggi si guarda con maggiore attenzione alla razionalità nell'impiego della risorsa idrica in agricoltura risiede proprio nel notevolissimo volume d'acqua impiegato per l'irrigazione.

Nello stato attuale delle cose uno dei problemi fondamentali in agronomia è diventato, pertanto, capire qual è il momento giusto per fornire acqua alle piante, in modo da evitare inutili sprechi e, nel contempo, irrigare le colture in base alle reali esigenze della pianta.

È evidente che basare le decisioni per gli interventi irrigui esclusivamente sulle osservazioni visive degli agricoltori in campo non può rappresentare un criterio perseguibile per una corretta valutazione dello stato idrico delle colture e dei terreni.

Al contrario, il calcolo del bilancio idrico delle colture, che definisce la quantità d'acqua irrigua come differenza tra l'acqua consumata dalle colture per evapotraspirazione e quella che giunge alle stesse dalle piogge e dalle falde superficiali per risalita capillare, rappresenta oggi l'approccio tradizionalmente utilizzato per una precisa valutazione dello stato idrico delle radici immerse nel terreno e, di conseguenza, dei volumi d'acqua di irrigazione da assegnare.

Ad oggi sono numerosissimi i modelli di simulazione idrologica, che sfruttano il calcolo del bilancio idrico per stabilire l'esatto momento di intervento irriguo e per fornire informazioni quantitative sui volumi di irrigazione da somministrare alle colture.

Tuttavia, seppur preciso, un servizio di assistenza all'irrigazione basato sul calcolo del bilancio idrico ha il limite nella laboriosità delle misurazioni e dei calcoli da effettuare in campo per ricavare i parametri di input da immettere nel modello di simulazione; specialmente, poi, quando le aree di indagine interessano ampie superfici come nel caso dei comprensori irrigui in cui, per di più, si aggiunge la complicazione rappresentata dall'elevata variabilità di colture e di suoli presenti (D'Urso e Palladino, 2007).

Per questo motivo, negli ultimi decenni, la ricerca scientifica si è mossa nel tentare di trovare soluzioni alternative per migliorare l'efficienza degli interventi irrigui in agricoltura.

Questo ha portato ad un notevole progresso nella comprensione dei processi fisici che intercorrono tra superficie terrestre e atmosfera e della loro parametrizzazione nella gestione dei terreni e delle risorse idriche.

Questa conoscenza è stata poi combinata, nel recente passato, con la potenzialità delle tecniche di Osservazione della Terra dallo spazio che oggi, grazie alla disponibilità di nuove generazioni di sensori e alla conoscenza approfondita della risposta della superficie terrestre nelle diverse regioni dello spettro elettromagnetico, sono in grado di fornire informazioni dettagliate per una pianificazione, senza sprechi, degli interventi irrigui in un sistema agricolo (D'Urso, 2010). La facilità nel reperire dati multispettrali ad alta risoluzione spaziale e i tempi di rivisitazione sempre più bassi dei satelliti moderni sono caratteristiche particolarmente adatte per la realizzazione di mappe di fabbisogno idrico delle colture con una precisione soddisfacente e in un modo economicamente efficace. Al giorno d'oggi, per giunta, le immagini satellitari sono distribuite via internet entro poche ore dal momento di acquisizione e possono quindi essere rapidamente trattate per ottenere prodotti finali da distribuire agli utenti in tempo quasi reale. Nell'ottica di un uso più razionale dell'acqua in agricoltura, le applicazioni ad oggi conosciute del telerilevamento satellitare fanno ben sperare e potrebbero portare, nel prossimo futuro, ad ottenere grandi risultati in termini di riduzione degli sprechi di un bene così prezioso.

## Materiali e Metodi

Il presente lavoro intende offrire un excursus delle applicazioni oggi conosciute, nel campo del telerilevamento satellitare, per la determinazione dei fabbisogni idrici delle colture. In particolare viene posta l'attenzione su due differenti metodologie che consentono di generare mappe di fabbisogno idrico delle colture, grazie al contemporaneo utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione opportunamente elaborate e di dati meteorologici misurati a terra.

Il primo prende il nome di metodo  $K_c$ -NDVI e si basa sulla correlazione esistente tra l'indice vegetazionale NDVI e il cosiddetto coefficiente colturale  $K_c$ , che sintetizza al suo interno le informazioni relative allo stato fenologico della coltura. Secondo tale metodo esiste una relazione lineare che lega l'NDVI al coefficiente colturale  $K_c$ , del tipo:

$$K_c = 1.25 \cdot NDVI + 0.2$$

Il coefficiente colturale  $K_c$  permette quindi di ricavare, nota  $ET_0$  [ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ] (evapotraspirazione potenziale), l'evapotraspirazione delle colture sotto la disponibilità illimitata di acqua nel terreno  $ET_c$  [ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ] (evapotraspirazione in condizioni standard), per mezzo della seguente relazione:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

Il fabbisogno idrico delle colture CWR (dall'inglese "Crop Water Requirement") rappresenta la quantità di acqua necessaria a compensare la perdita idrica che si verifica per evapotraspirazione da un campo coltivato in condizioni standard. Dalla definizione, quindi, è evidente che CWR ed  $ET_c$  sono due termini rappresentativi dello stesso quantitativo d'acqua: il primo si riferisce alla quantità di acqua che è necessario fornire per compensare la perdita, il secondo rappresenta proprio la quantità d'acqua persa per evapotraspirazione, sempre nell'ipotesi di condizioni ottimali di acqua nel terreno.

Il secondo metodo si chiama approccio analitico e si basa sull'applicazione diretta della nota equazione di Penman-Monteith, al cui interno entrano in gioco alcune variabili biofisiche della chioma della vegetazione (albedo della superficie ( $r$ ), indice di area fogliare (LAI), altezza media del manto vegetale ( $h_c$ )), che vengono stimate a partire dai dati satellitari. Nella sua formulazione più generale tale equazione può essere così espressa:

$$ET_c = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\Delta(R_{ns} - R_{nl} - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

con:

$ET_c$  = flusso evapotraspirativo [ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ];

$\lambda$  = calore latente di vaporizzazione [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$\Delta$  = pendenza della curva che esprime la tensione di vapore saturo in funzione della temperatura [ $\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$ ];

$R_{ns}$  = radiazione netta a onde corte [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ];  
 $R_{nl}$  = radiazione netta a onde lunghe [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ];  
 $G$  = flusso di calore nel suolo [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ];  
 $\rho_a$  = densità media dell'aria [ $\text{kg m}^{-3}$ ];  
 $c_p$  = calore specifico dell'aria a pressione costante [ $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ];  
 $e_s$  = tensione di vapore saturo [kPa];  
 $e_a$  = tensione di vapore dell'aria [kPa];  
 $r_a$  = resistenza aerodinamica al flusso di vapore [ $\text{s m}^{-1}$ ];  
 $r_c$  = resistenza del manto vegetale al flusso di vapore [ $\text{s m}^{-1}$ ];  
 $\gamma$  = costante psicrometrica [ $\text{kPa °C}^{-1}$ ].

L'albedo, il LAI e  $h_c$  intervengono nel calcolo della radiazione ad onde corte  $R_{ns}$  e delle resistenze  $r_c$  ed  $r_a$  secondo le seguenti relazioni (Akdim et al., 2014):

$$R_{ns} = (1 - r) \cdot R_s$$

$$r_{c,min} = \frac{100}{0.5 \cdot LAI}$$

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_u - \frac{2}{3}h_c}{0.123h_c}\right) \ln\left(\frac{z_h - \frac{2}{3}h_c}{0.0123h_c}\right)}{0.168u_z}$$

con:

$R_s$  = radiazione solare incidente [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ];  
 $r$  = albedo [-];  
 $LAI$  = indice di area fogliare [-];  
 $z_u$  = altezza di misura anemometrica [m];  
 $z_h$  = altezza di misura termo-igrometrica [m];  
 $h_c$  = altezza della coltura [m];  
 $u_z$  = velocità del vento all'altezza  $z$  [ $\text{m s}^{-1}$ ].

Se si assume che l'altezza della coltura  $h_c$  sia legata al LAI da una relazione di tipo lineare, la resistenza aerodinamica al flusso di vapore  $r_a$  può essere riscritta nel seguente modo (e.g., D'Urso e Palladino, 2007):

$$r_a = \frac{a - b \cdot \ln(c \cdot LAI)}{u_z}$$

dove i parametri  $a$  e  $b$ , nel caso frequente di  $z_u = z_h = 2$  m assumono entrambi il valore  $a = b = 66$ , mentre il valore  $c$  può essere approssimato a 0,2.

Uno degli approcci più comunemente utilizzati per la stima del LAI da dati ottici telerilevati è il modello semi-empirico CLAIR proposto da Clevers (1989), che si basa su una relazione semi-empirica tra il LAI e l'indice vegetazionale WDVl (dall'inglese "Weighted Difference Vegetation Index"):

$$LAI = -\frac{1}{\alpha^*} \ln\left(1 - \frac{WDVI}{WDVI_\infty}\right)$$

con:

$\alpha^*$  = coefficiente di estinzione della luce;  
 $WDVI_\infty$  = valore limite asintotico del WDVl.

Il  $WDVI_\infty$  viene derivato direttamente dall'immagine satellitare considerando il valore massimo di WDVl su aree vegetate, in corrispondenza di pixel saturi. Il coefficiente  $\alpha^*$ , invece, può essere calibrato utilizzando una tecnica di analisi della regressione applicata a due set di valori di LAI, uno osservato e l'altro stimato. Tale coefficiente descrive l'architettura della chioma della vegetazione e dipende dal tipo di coltura e dal corrispondente valore di LAD (dall'inglese "Leaf Angle Distribution") (Vuolo et al., 2013).

Il WDVl è un indice radiometrico calcolato a partire dai valori di riflettanza nella banda del rosso  $r_r$  e dell'infrarosso vicino  $r_{ir}$ :

$$WDVI = r_{ir} - C \cdot r_r \quad \text{con} \quad C = \frac{r_{s,ir}}{r_{s,r}}$$

con:

$r_{ir}$  = valori di riflettanza nella banda del NIR;

$r_r$  = valori di riflettanza nella banda del RED;  
 $r_{s,ir}$  = valori di riflettanza nella banda del NIR corrispondenti a pixel di suolo nudo;  
 $r_{s,r}$  = valori di riflettanza nella banda del RED corrispondenti a pixel di suolo nudo.

Tra i tanti indici che permettono la stima del LAI, il WdVI ha il vantaggio di ridurre in larga misura l'influenza dello sfondo del suolo sul segnale spettrale mediante il fattore C, che rappresenta la pendenza della linea del suolo.

### Caso studio e Risultati

Lo studio sui fabbisogni idrici delle colture è stato condotto su un'area test appartenente alla frazione di San Vittore nel comune di Cesena (FC), gestita dal Consorzio di Bonifica della Romagna. È stata valutata la variabilità spaziale e temporale del fabbisogno idrico, stimato a partire da dati satellitari, per le seguenti specie colturali: bietola, erba medica, girasole, mais, sorgo, susino, albicocco, pero, pesco e vite. Il monitoraggio è stato eseguito all'interno di una finestra temporale che intercorre tra giugno e agosto dell'anno 2013, grazie all'acquisizione di cinque immagini satellitari multispettrali ad alta risoluzione del satellite Landsat 8.

L'obiettivo del lavoro è stato quello di verificare il livello di accuratezza raggiunto nella stima del fabbisogno idrico delle colture, in seguito all'applicazione delle due metodologie alle immagini satellitari acquisite, confrontando, per ciascuna specie colturale, i valori di CWR ottenuti dalle immagini con i corrispettivi valori provenienti da un modello matematico per la simulazione del bilancio idrico dei suoli agricoli sviluppato presso ARPA-SIMC: il modello Criteria (Marletto et al., 2007).

Dal confronto tra i valori di  $ET_c$  estratti dalle immagini e quelli forniti da Criteria emerge che la variabile  $ET_c$  stimata da satellite, per la maggior parte delle colture, approssima il valore fornito dal modello con un ottimo livello di accuratezza.

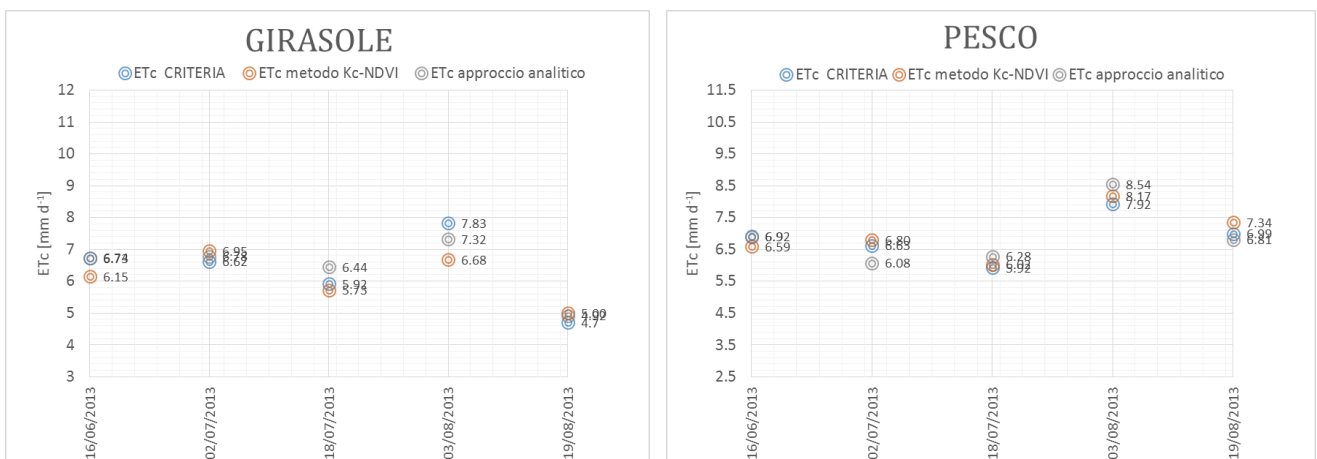


Fig. 1: Confronto tra i valori giornalieri di  $ET_c$  stimati attraverso Criteria, il metodo  $K_c$ -NDVI e l'approccio analitico, per le specie colturali 'GIRASOLE' e 'PESCO'.

Il metodo  $K_c$ -NDVI fornisce, in generale, valori di  $ET_c$  più accurati rispetto a quelli ottenuti con l'approccio analitico. Entrambi i metodi restituiscono valori di  $ET_c$  leggermente più accurati per le colture arboree, rispetto alle colture erbacee.



Fig. 2: Immagini satellitari a colori naturali della data 20130718 prima della raccolta del mais (centro) e della data 20130803 dopo la raccolta (destra) e confronto tra i valori giornalieri di  $ET_c$  stimati attraverso Criteria, il metodo  $K_c$ -NDVI e l'approccio analitico, per la coltura 'MAIS' (sinistra).

Le tecniche che sfruttano le immagini satellitari per la stima dell'evapotraspirazione, per mezzo di un'osservazione diretta della realtà, inoltre, permettono di cogliere alcune peculiarità che un modello matematico non può apprezzare. Osservando, infatti, l'andamento temporale di  $ET_c$  per la coltura 'MAIS' (fig. 2) si vede che in data 20130803 e in data 20130819 si ha uno scostamento importante tra il valore di  $ET_c$  stimato da entrambe le metodologie e il valore fornito dal modello. Tale differenza è dovuta alla raccolta del mais (evidenziato in verde in fig. 2), avvenuta tra la data 20130718 e la data 20130803, che ha determinato un netto calo del flusso evapotraspirativo.

I problemi di maggiore entità si sono verificati in corrispondenza di alcuni campi di erba medica. Osservando l'andamento temporale di  $ET_c$  per tale specie colturale (fig. 3) si nota che entrambi i metodi forniscono valori fortemente discordanti rispetto a quelli in uscita dal modello. Gli errori commessi da entrambi i metodi nella stima di  $ET_c$ , in particolar modo per la data 20130616, dove il valore stimato per mezzo dell'approccio analitico si discosta dal valore del modello di oltre il 70% di quest'ultimo, sono legati alla saturazione degli indici vegetazionali coinvolti. Quando l'indice vegetazionale NDVI tende alla saturazione la relazione  $ET_c = K_c \cdot ET_0$  restituisce valori di  $K_c$  troppo elevati che, conseguentemente, causano una sovrastima dei valori di  $ET_c$ .

In maniera ancora più significativa, quando l'indice vegetazionale WdVI tende alla saturazione, la relazione che lega il LAI al WdVI fornisce valori di LAI che arrivano addirittura a sfiorare punte di 24 (valore fortemente discordante se si pensa che tale indice varia normalmente tra 0 e 6). Dal momento che il LAI rientra all'interno del calcolo di varie quantità ( $r_{c,min}$ ,  $r_a$ , G) nella formula di Penman-Monteith, questo porta alla stima di valori di  $ET_c$  ancor più anomali rispetto a quelli stimati per mezzo del metodo  $K_c$ -NDVI.

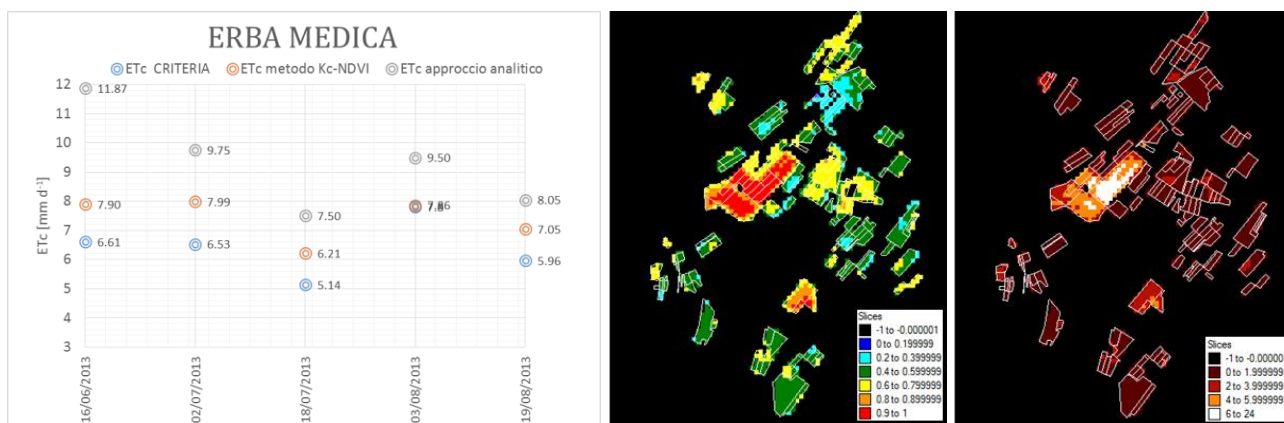


Fig. 3: Confronto tra i valori giornalieri di  $ET_c$  stimati attraverso Criteria, il metodo  $K_c$ -NDVI e l'approccio analitico, per la coltura 'ERBA MEDICA' (sinistra) e visualizzazioni delle mappe di NDVI (centro) e di LAI (destra) relative alla data 20130616. I pixel di colore rosso (mappa NDVI) e quelli di colore bianco (mappa LAI) rappresentano i campi di medica caratterizzati da valori degli indici che tendono alla saturazione e che causano una sovrastima nei valori della variabile  $ET_c$ .

## Conclusioni

Lo studio condotto sui terreni agricoli dell'area di San Vittore ha confermato che il fabbisogno idrico delle colture (CWR) può essere stimato con un'accuratezza soddisfacente utilizzando due algoritmi semi-empirici, che sfruttano immagini satellitari multispettrali e che non richiedono una preventiva classificazione delle colture.

Mettendo a confronto i risultati ottenuti dall'applicazione di entrambe le metodologie con i valori provenienti dal modello Criteria, si può concludere che il metodo  $K_c$ -NDVI e l'approccio analitico forniscono valori medi di  $ET_c$  piuttosto simili tra loro e altresì coerenti con quelli provenienti dal modello. Il metodo  $K_c$ -NDVI risulta però più semplice ed immediato rispetto all'approccio analitico ed in più produce risultati leggermente più accurati, grazie ad una minor sensibilità dell'indice vegetazionale NDVI all'effetto di saturazione dei pixel. Entrambi i metodi sono comunque rapidamente e facilmente applicabili a grandi insiemi di dati e, per questo, risultano particolarmente adatti allo sviluppo di applicazioni operative in tempo reale per la gestione delle risorse irrigue.

Facendo convergere all'interno di un Sistema Informativo Geografico (GIS) mappe di fabbisogno idrico delle colture e dati vettoriali contenenti i confini del territorio, è dunque oggi pensabile l'implementazione di sistemi di supporto alle decisioni per l'irrigazione che siano in grado di produrre, per la singola azienda agricola o per il gestore delle risorse idriche, un consiglio irriguo, costituito dall'informazione quantitativa dei volumi d'acqua richiesti dalle colture presenti nelle parcelle monitorate. Dopo aver elaborato le immagini satellitari, le informazioni relative al consiglio irriguo possono essere rapidamente distribuite agli utenti finali grazie ai moderni strumenti di ICT (dall'inglese "Information and Communication Technology"): posta elettronica, servizi di telefonia mobile SMS o MMS e applicazioni di web-mapping, che permettono di accedere alle informazioni relative alla propria azienda agricola tramite pagine ad accesso riservato su Internet.

Se nel futuro si andrà avanti in questa direzione, e lo sviluppo odierno di tecnologie sempre più avanzate e a minor costo fanno ben sperare in tal senso, si potranno ottenere risultati importanti nella salvaguardia quantitativa della risorsa idrica (i sistemi già esistenti indicano risparmi attestabili attorno al 20÷30% dell'acqua attualmente utilizzata a scopo irriguo), obiettivo diventato oramai prioritario per le politiche europee e mondiali.

### **Bibliografia**

Akdim N., Alfieri S. M., Habib A., Choukri A., Cheruiyot E., Labbassi K., Menenti M. (2014). Monitoring of irrigation schemes by remote sensing: phenology versus retrieval of biophysical variables. *Remote Sens.*, 6, 5815-5851.

Clevers J.G.P.W. (1989). The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimation leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sens. Environ.*, 29, 25-37.

D'Urso G., Palladino M. (2007). L'impiego di sensori ottici satellitari per la stima dei fabbisogni irrigui. *Atti Progetto AQUATER*, 101-110.

D'Urso G. (2010). Current Status and Perspectives for the Estimation of Crop Water Requirements from Earth Observation. *Ital. J. Agron.*, 5, 107-120.

Mannini P. (2004). Le buone pratiche agricole per risparmiare acqua. *I supplementi di Agricoltura*, 18.

Marletto V., Ventura F., Fontana G., Tomei F. (2007). Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. *Agric. For. Meteorol.* 147, 71-79.

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 Sens.*, 5, 1274-1291.