

## **Integrazione di dati meteorologici, pedologici e telerilevati per la stima del bilancio idrico di aree semi-naturali**

Lorenzo Gardin (\*), Lorenzo Bottai (\*\*), Luca Fibbi (\*), Marta Chiesi (\*), Luca Angeli (\*\*),  
Ramona Magno (\*\*), Fabio Maselli (\*)

(\*) IBIMET-CNR, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto F.no (FI), tel. 055 5226024, fax 055444083,  
e-mail: lorenzo@studiogardin.it

(\*\*) Consorzio LaMMA, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto F.no (FI), Italia

### **Riassunto**

La stima del bilancio idrico di una regione è fondamentale per la programmazione e la gestione delle risorse idriche sul territorio, sia esso semi-naturale che agrario. Recentemente è stato messo a punto dall'IBIMET-CNR un metodo operativo, basato sull'utilizzo di dati telerilevati, per stimare l'evapotraspirazione reale ( $ET_A$ ), uno dei termini più importanti del bilancio idrico. L'unione di tale stima con informazioni relative ai suoli ricavabili dalla Banca Dati dei suoli di Regione Toscana realizzata dal Consorzio LaMMA, quali la profondità del suolo esplorabile da parte delle radici, la capacità di campo ed il punto di appassimento, permette di arrivare a stimare il contenuto idrico del suolo. Una valutazione preliminare di questa metodologia è stata effettuata confrontando le stime ottenute con misure di contenuto idrico del suolo raccolte in una querceta mista a Barbiaccia (Toscana). I risultati ottenuti sono promettenti e incoraggiano l'applicazione del metodo in altre aree.

### **Abstract**

The estimation of water balance on a regional scale is a fundamental requirement towards the management of water resources of semi-natural or agricultural areas. Recently the research group of IBIMET-CNR developed an operational method, based on the use of remotely sensed data, to estimate actual evapotranspiration ( $ET_A$ ), one of the major terms of the water balance. These estimates are currently combined with information derived from the Soil Database of Tuscany Region created by the LaMMA Consortium, such as rooting depth, soil water capacity and wilting point, in order to predict soil water content. A preliminary test of the current methodology is performed by comparison with measurements of soil water content collected in an hilly area of Tuscany (Barbiaccia), covered by a mixed deciduous forest. The first results obtained are promising and encourage the application of the method in other areas.

### **Introduzione**

Il contenuto d'acqua del suolo è un importante parametro ambientale che interessa un gran numero di processi ecosistemici. Nella maggior parte degli ecosistemi terrestri la quantità e la variazione stagionale in acqua disponibile è uno degli elementi più importanti che determina funzioni biologiche, come la crescita della vegetazione, lo sviluppo, la fruttificazione e la composizione delle specie. Da un punto di vista pratico, la valutazione del contenuto idrico del suolo è sempre più utilizzata nella pianificazione territoriale, soprattutto a scala di bacino per la stima dei deflussi e dell'erosione del suolo. La stima del contenuto d'acqua del suolo richiede informazioni su tre principali fattori che concorrono a determinare il bilancio idrico, ovvero la meteorologia, le caratteristiche del suolo e della vegetazione. I metodi operativi più semplici per simulare il bilancio idrico del suolo sono basati sul concetto di coefficiente culturale ( $K_c$ ), definito come rapporto tra

l'evapotraspirazione osservata ( $ET_A$ ) per la coltura e l'evapotraspirazione potenziale ( $ET_0$ ) (Allen et al., 1998). Questo approccio, tuttavia, presenta alcuni inconvenienti che possono essere in parte superati introducendo l'uso di stime da telerilevamento del tipo di vegetazione e delle sue condizioni (Glenn et al., 2010). In particolare, il nostro gruppo di ricerca ha recentemente proposto un nuovo metodo di stima che combina l'indice di vegetazione a differenza normalizzata (NDVI) e i dati meteorologici (metodo NDVI-Cws) per valutare operativamente l' $ET_A$  giornaliera, sia localmente che a scala regionale. Questo lavoro ha lo scopo di valutare la possibilità di impiego delle stime di  $ET_A$  ottenute dal modello NDVI-Cws per migliorare la simulazione del contenuto d'acqua del suolo ottenuta con un modello di bilancio idrico convenzionale basato sull'uso di coefficienti colturali ( $K_c$ ) (metodo FAO56). In particolare, le stime di  $ET_A$  vengono utilizzate per sostituire le stesse stime ottenute dai modelli al fine di omogeneizzare le simulazioni nella componente suolo e nella vegetazione. Questo approccio viene applicato in un sito forestale in Toscana (Barbialla) ed i risultati ottenuti sono valutati rispetto a misurazioni giornaliere del contenuto d'acqua del suolo effettuate per quattro anni.

### Area di studio

Lo studio è stato condotto nel sito di Barbialla (Toscana, Italia centrale, latitudine  $43^\circ 35' 30''$  N, longitudine  $10^\circ 50' 55''$  E), ad un'altitudine di 135 m s.l.m.. Secondo la classificazione di Thornthwaite, il clima della zona è sub-umido, con una piovosità media annua di 920 mm e temperatura media annua di  $15.1^\circ\text{C}$ . La copertura vegetale corrisponde ad un bosco misto di latifoglie ed è composta principalmente da carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop.), pioppo (*Populus alba* L.) e querce caducifoglie (*Quercus cerris* L., *Q. pubescens* L.). La superficie del terreno è coperta da vegetazione erbacea spontanea e da piccole comunità arbustive costituite da *Cornus mas*, *C. sanguinea*, *Coronilla hemerus*, *Crataegus monogyna*, *Pyracantha coccinea* e *Rubus canescens*. Il suolo dell'area di studio, classificato secondo la Soil Taxonomy come *Typic Ustothents coarse loamy, mixed, calcareous, thermic*, è profondo circa 140 cm, privo di ghiaie e pietre, ben drenato.

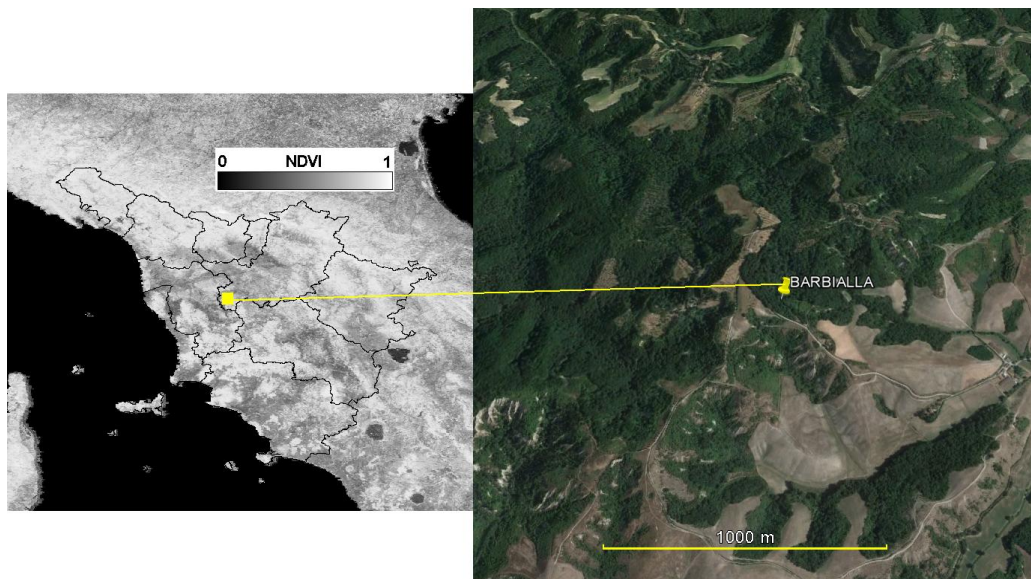


Figura 1 - Immagine MODIS NDVI di Agosto 2009 con indicata la posizione geografica del sito di misura di Barbialla; l'immagine a più alta risoluzione è stata presa da GoogleEarth.

## Dati di studio

Le simulazioni del bilancio idrico sono state guidate dai dati meteorologici giornalieri (temperatura minima e massima, precipitazione) ottenuti con l'algoritmo DAYMET a partire dai dati misurati a terra (Thornton et al., 1997). L'algoritmo MT-CLIM è stato successivamente applicato per la stima della radiazione solare (Thornton et al., 2000).

Le immagini di NDVI derivano dal sensore MODIS Terra; hanno una risoluzione spaziale di 250 m e sono composizioni di scene giornaliere a 16 giorni: ciò avviene tramite un algoritmo che seleziona il valore più alto del pixel per tutto il periodo (*Maximum Value Composite*, MVC), limitando così valori anomali a causa di nubi. Sono state liberamente scaricate dall'archivio USGS (<http://lpdaac.usgs.gov>) per il periodo coincidente con le misure a terra, da gennaio 2009 fino a dicembre 2012.

Nell'ambito del progetto MAGNATUM che ha consentito di caratterizzare il suolo dell'area di studio (Zambonelli et al., 2012) (vedi Tabella 1), sono state installate delle sonde capacitive di umidità del suolo ad una profondità di 20 cm. I dati orari misurati sono stati registrati e conservati da un data-logger ED50 per tutto il periodo dal 2009 al 2012.

Tabella 1 □ Risultati delle analisi fisiche e chimiche con metodologie standard (MIPAAF, 1999) del profilo di suolo a Barbiolla; l'applicazione di pedotransfer function produce un contenuto idrico alla capacità di campo di  $0.32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e al punto di appassimento di  $0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

Orizzonte	A	AC	C
profondità (cm)	8	30	70
sabbia (g/100 g)	61	60.1	57.6
limo (g/100 g)	30	30	30.3
argilla (g/100 g)	9.9	9.9	12.2
Carbonato di calcio totale (%)	2.6	5.1	7
pH	7.8	8.4	8.5
C.S.C. (meq/100 g)	20	13.7	14.3
EC (dS/m) 1:5	0.1	0.09	0.09
Carbonio organico (g/100 g)	4.2	1.25	0.71
Densità apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.1	1.2	1.4

## Metodologia applicata

Il modello di bilancio idrico utilizzato, ovvero il modello FAO56, utilizza dati meteorologici giornalieri, le caratteristiche del suolo ed alcuni parametri relativi alla vegetazione.

L' $ET_A$  viene calcolata moltiplicando l'evapotraspirazione di riferimento,  $ET_0$ , per un coefficiente colturale e per un coefficiente di stress idrico ( $K_s$ ). Il primo è generalmente derivato dalla letteratura, il secondo viene invece calcolato utilizzando l'acqua prontamente disponibile (frazione dell'acqua disponibile di cui la pianta può disporre senza arrivare allo stress idrico).

Il metodo di stima NDVI-Cws è stato proposto per applicazioni regionali ed è capace di considerare l'effetto a breve termine della carenza idrica (Maselli et al., 2014). La stima dell' $ET_A$  viene effettuata simulando separatamente il contributo della traspirazione e quello dell'evaporazione, dovuti rispettivamente alla biomassa verde ed al suolo. Ciò è possibile introducendo la stima della frazione di copertura della vegetazione (*Fractional Vegetation Cover*, FVC). Si introducono inoltre dei fattori di correzione, Cws ed AW, capaci di simulare l'effetto dello stress idrico a breve termine (Maselli et al. 2009, 2014). In sintesi, il metodo NDVI-Cws stima l' $ET_A$  di qualsiasi superficie vegetata secondo la formula:

$$ET_A = ET_0 (FVC K_{cVeg} Cws + (1-FVC) K_{cSoil} AW) \quad [1]$$

dove  $K_{cVeg}$  e  $K_{cSoil}$  sono i valori massimi di  $K_c$  di vegetazione e del suolo rispettivamente, Cws (coefficiente di stress idrico) e AW (Acqua Disponibile) sono i due fattori meteorologici calcolati

per tenere in considerazione l'effetto dello stress idrico a breve termine e si applicano rispettivamente alla vegetazione ed al suolo (Maselli et al. 2009; 2014).

### Elaborazione dati

Tutte le simulazioni di bilancio idrico del suolo sono state effettuate con dati ambientali completamente indipendenti dalle misurazioni a terra; il tipo di uso del suolo è derivato dal CORINE Land Cover della Toscana (Maricchiolo et al., 2004). Le informazioni sulle proprietà del suolo sono state ottenute dalla carta e dalla Banca Dati regionale dei suoli (Gardin e Vinci, 2006). I dati meteorologici giornalieri sono stati interpolati a 1 km di risoluzione a partire da misurazioni a terra prese dalla rete regionale. L'interpolazione è stata effettuata mediante l'applicazione sequenziale degli algoritmi DAYMET e MT-CLIM (Thornton et al., 1997; 2000; Chiesi et al. 2007). Il bilancio idrico del sito di studio è stato calcolato prima applicando il modello a coefficiente culturale FAO56 in modo convenzionale (Allen et al. 1998). A tale scopo, i dati meteorologici giornalieri di temperatura, precipitazioni e radiazione solare, interpolati per il sito di studio, sono stati usati per stimare l' $ET_0$  applicando la formula empirica di Jensen e Haise (1963). La capacità di campo e il punto di appassimento sono stati ottenuti applicando le PTF (*pedotransfer function*) ai dati di granulometria (sabbia, limo e di argilla) e di densità apparente (Schaap et al., 2001). La profondità del suolo risultante è 143 cm, mentre il contenuto idrico alla capacità di campo e al punto di appassimento è rispettivamente di  $0.29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0.08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ; questi valori sono leggermente diversi da quelli misurati nel sito e riportati in Tabella 1. Il coefficiente  $p$  richiesto dal metodo FAO56 è stato fissato a 0.4 seguendo dati tabulari opportunamente modificati in funzione del tipo di suolo, delle condizioni dell' $ET_0$  e dell'apparato radicale (Allen et al., 1998). Infine, il  $K_c$  della foresta è stato impostato a 0.2 durante l'inverno e di 0.5 durante la stagione di crescita (da aprile a ottobre) in base ad Allen et al. (1998).

Con questa parametrizzazione, il modello ha prodotto stime giornaliere del contenuto d'acqua del suolo la cui accuratezza è stata valutata effettuando il confronto con le misurazioni effettuate in bosco durante i quattro anni di misura. La valutazione dell'accuratezza è stata effettuata utilizzando il coefficiente di correlazione ( $r$ ), *root mean square error* (RMSE) e *mean bias error* (MBE).

L'applicazione del metodo di stima dell' $ET_A$  con NDVI-Cws necessita la combinazione dell' $ET_0$  con le precipitazioni per calcolare i due fattori di stress idrico a breve termine (AW e CWS). Le immagini MODIS NDVI disponibili sono stati pre-trattate come descritto in Maselli et al. (2009). I valori NDVI del sito sono stati estratti dal corrispondente pixel MODIS e temporalmente interpolate su una base quotidiana. Dai valori NDVI giornalieri, sono stati ottenuti i corrispondenti valori di FVC applicando l'equazione lineare proposta da Gutman e Ignatov, (1998), con  $NDVI_{\min} = 0.15$  e  $NDVI_{\max} = 0.9$  (vedi Maselli et al. (2014) per i dettagli). Infine, l' $ET_A$  giornaliera è stata stimata applicando l'equazione [1] per l'intero periodo di studio (2009-2012).

La disponibilità di queste stime di  $ET_A$  ha permesso l'integrazione delle stesse con il modello FAO56. In particolare, le stime giornaliere di  $ET_A$  ottenute da quest'ultimo sono state sostituite con quelle calcolate con il metodo NDVI-Cws. Ciò ha portato a produrre nuove stime di contenuto d'acqua del suolo, la cui precisione è stata nuovamente valutata per confronto con le misure del sito descritte in precedenza.

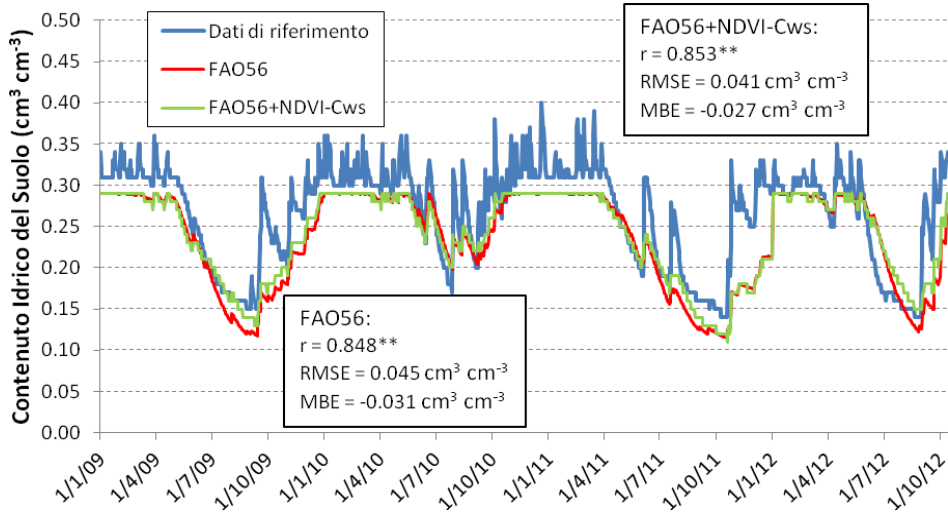
### Risultati

Le temperature e le precipitazioni relative al sito di Barbiolla mostrano rilevanti variabilità inter-annuali durante il periodo di studio. In particolare, le temperature medie sono intorno a  $15^\circ\text{C}$  e le precipitazioni annue vanno da 550 mm nel 2011 a 1200 mm nel 2010. Le precipitazioni hanno un minimo in estate nei mesi più caldi; di conseguenza, la stagione secca è concentrata intorno a Luglio e Agosto, ma con lunghezza variabile.

Le misurazioni del contenuto idrico del suolo mostrati in Figura 2 indicano una riduzione della disponibilità d'acqua durante i mesi estivi, generalmente seguita da una fase di ricarica durante l'autunno, stagione mediamente più piovosa. Questa è dovuta alle piogge e ad una riduzione

dell'evapotraspirazione. Tra i quattro anni considerati, il 2010 è il più umido e di conseguenza mostra un più elevato contenuto idrico in estate. Il modello FAO56 riproduce abbastanza bene l'evoluzione del contenuto idrico generale di tutti e quattro gli anni ( $r = 0.848$ ,  $RMSE = 0.045 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $MBE = -0.031 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). L'integrazione delle stime di evapotraspirazione derivate dal metodo NDVI-Cws migliora i risultati del modello sia in termini di correlazione che di errore ( $r = 0.853$ ,  $RMSE = 0.041 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $MBE = -0.027 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

Figura 2 - Contenuto idrico del suolo misurato e stimato con il metodo FAO56 combinato con le stime di  $ET_A$  da NDVI-Cws; tutte le correlazioni sono altamente significative (\*\*,  $P < 0.01$ ).



## Discussione e Conclusioni

Il potenziale di questo approccio è supportato dai risultati dell'esperimento corrente. Il modello FAO56, basato sul concetto di coefficiente colturale  $K_c$ , riproduce le variazioni temporali del contenuto idrico del suolo con una certa imprecisione. Questo deriva in parte dalle assunzioni di base della teoria applicata. Tale modello, infatti, non considera la natura multi-strato dei sistemi suolo e rappresenta solo in parte alcuni processi che hanno un impatto variabile sul contenuto idrico del suolo (es. intercettazione delle precipitazioni delle piante e del sottobosco, percolazione profonda, ruscellamento, ecc). In particolare, il modello simula il contenuto idrico del suolo medio di un terreno a singolo strato avente uno spessore di 143 cm, mentre le misure di campo si riferiscono ad una specifica profondità (20 cm). Il possibile impatto di questo fattore è stato simulato con l'uso di un più complesso modello multistrato, SWAP (Van Dam et al., 2008), implementato con dati locali del suolo disponibili. Gli errori nel contenuto idrico del suolo provenienti dal non considerare la profondità di misura reale, sono in media piuttosto bassi (-2 %) e vanno da -13 % in estate a +5 % in autunno. La fonte di errore più rilevante, tuttavia, è dovuta alla caratterizzazione delle caratteristiche della vegetazione che determinano la resistenza dell'ecosistema alla perdita di acqua. Questo ultimo fattore viene parzialmente affrontato integrando le stime di  $ET_A$  ottenute con il metodo NDVI-Cws, migliorando così l'accuratezza delle stime ottenute.

Mentre l'importanza di questi risultati è evidente, la loro rappresentatività è limitata dalla considerazione di un solo sito forestale sperimentale e pertanto ulteriori test saranno svolti in altre aree della regione, con diversi ecosistemi per i quali saranno disponibili misure di contenuto idrico del suolo. Una volta verificata e validata su un più ampio ventaglio di tipologie vegetazionali, tale metodologia potrà essere integrata pienamente all'interno della catena operativa di monitoraggio e previsione della siccità in Toscana, implementata dal Consorzio LaMMA in collaborazione con

l'IBIMET-CNR. Il servizio operativo, infatti, è attualmente focalizzato sul monitoraggio del fenomeno dal punto di vista meteorologico e climatico, sia quasi in real-time che con previsioni stagionali. A tal scopo vengono utilizzati sia indici diretti di pioggia che di risposta della vegetazione a stress termo-pluviometrici derivati da immagini satellitari.

Per poter ridurre il gap esistente fra il verificarsi di un evento siccitoso e le risposte degli utenti finali, *in primis* agricoltori, nel gestire le emergenze legate al protrarsi del fenomeno, è necessario affiancare al monitoraggio degli apporti idrici anche quello dell'evoluzione del contenuto idrico nei suoli. In tal modo viene fornito uno strumento di tipo proattivo più completo possibile, cercando di ottenere un bilancio idrico che rispecchi le condizioni reali e che sia rapidamente aggiornabile e riproducibile per l'intero territorio regionale.

### Bibliografia

- Allen RG., Pereira LS., Raes D., Smith M. (1998), "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements", *FAO Irrigation and drainage paper* 56. FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300 pp.
- Chiesi M., Maselli F., Moriondo M., Fibbi L., Bindi M., Running SW. (2007), "Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes", *Ecological Modelling*, 206: 179-190.
- Gardin L., Vinci A. (2006), Carta dei suoli della Regione Toscana in scala 1:250.000. Pubblicazione su web: <http://sit.lamma.rete.toscana.it/websuoli/>.
- Glenn EP., Nagler PL., Huete AR. (2010), "Vegetation index methods for estimating evapotranspiration by remote sensing", *Surveys in Geophysics*, 31: 531-555.
- Gutman G., Ignatov A. (1998), "The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models", *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1533-1543.
- Jensen ME., Haise HR. (1963), "Estimating evapotranspiration from solar radiation", *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE*, 89: 15-41.
- Maricchiolo C., Sambucini V., Pugliese A., Blasi C., Marchetti M., Chirici G., Corona P. (2004), "La realizzazione in Italia del progetto europeo I&CLC2000: metodologie operative e risultati", *Atti della VIII Conferenza ASITA*, 1: 113-128.
- Maselli F., Papale D., Puletti N., Chirici G., Corona P. (2009), "Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems", *Remote Sensing of Environment*, 113: 657-667.
- Maselli F., Chiesi L., Angeli L., Papale D., Seufert G. (2014), "Operational monitoring of daily evapotranspiration by the combination of MODIS NDVI and ground meteorological data: Application and evaluation in Central Italy", *Remote Sensing of Environment*, 152: 279-290.
- MiPAF (1999), "Metodi ufficiali di analisi chimica" *Gazzetta Ufficiale Supplemento Ordinario* 248, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, Italia.
- Schaap M., Leij F.J., van Genuchten M.T. (2001), "Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions", *Journal of Hydrology*, 251:163-176.
- Thornton P.E., Running S.W., White M.A. (1997), "Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain", *Journal of Hydrology*, 190: 214-251.
- Thornton P.E., Hasenauer H., White M.A. (2000), "Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria", *Agricultural and Forest Meteorology*, 104: 255-271.
- Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes, (2008), "Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP", *Vadose Zone Journal*, 7(2): 640-653.
- Zambonelli A., Iotti M., Leonardi M., Pacioni G., Salerno E., Perini C. (2012), *Progetto MAGNATUM (Monitoraggio delle attività di gestione delle tartufaie naturali di Tuber magnatum)*, Alimat Edizioni, Cesena (IT).