

## UN SISTEMA INTEGRATO DI ANALISI DEI DATI AMBIENTALI PER IL MONITORAGGIO DELLA RISORSA IDRICA

Luca ANGELI (\*), Roberto COSTANTINI (\*), Raffaella FERRARI (\*),  
Lucia INNOCENTI (\*), Letizia COSTANZA (\*\*)

(\*) CNR - Ibimet, via G. Caproni 8 – 50145 Firenze, e-mail: ferrari@lamma-cres.rete.toscana.it

(\*\*) Fondazione per il Clima e la Sostenibilità, via G. Caproni 8 – 50145 Firenze

### Riassunto

Sulla base di ciò che emerge dalle analisi del WMO (*World Meteorological Organization*), gli eventi climatici estremi possono aver un impatto devastante sullo sviluppo socio-economico. Riuscire a monitorare questi eventi, predirne l'evoluzione ed emanare dei bollettini di allerta, diventa essenziale per mitigare il loro impatto sulla popolazione, sull'economia e sull'ecosistema in generale. Inoltre, anche a seguito delle variazioni climatiche, spesso causa della scarsità di acqua ma anche del dissesto idrogeologico, nasce l'esigenza di una gestione sostenibile della risorsa che tenga conto delle dimensioni sociale, economica, ambientale e tecnica.

Il LaMMa-CRES, nel contesto del progetto INTERREG IIIB MEDOCC "HYDRANET" al quale ha partecipato dando supporto tecnico al partner Regione Toscana, ha messo a punto un sistema integrato di analisi dei dati ambientali (morfologia, clima, suolo, vegetazione) per il monitoraggio della risorsa idrica. La metodologia sviluppata ha permesso la realizzazione di un bollettino di allerta sulla disponibilità di acqua nel bacino naturale di studio del fiume Ombrone (a sud della Toscana) tramite l'utilizzo del modello idrologico SWAT calibrato sul bacino e la parallela analisi di indici di vegetazione correlati al fenomeno della siccità derivanti da dati satellitari MODIS.

L'analisi integrata rappresenta una sintesi delle informazioni necessarie per il monitoraggio dei cambiamenti nella disponibilità della risorsa idrica: i risultati del modello trovano un riscontro nell'analisi dell'indice NDVI a dimostrazione che i parametri idrologici sono strettamente correlati con l'attività fotosintetica della vegetazione. Pertanto, la metodologia si è dimostrata un efficace strumento di gestione della risorsa e di previsione dei fenomeni di deficit idrico.

### Abstract

According to the World Meteorological Organization, weather and climate-related extreme events can have a devastating impact on socio-economic development. Monitoring these events, predicting their movements and issuing early warnings are essential to mitigate their disastrous impact on population, economy and ecosystems at large. An integrated water resources perspective ensures that social, economic, environmental and technical dimensions are taken into account in the sustainable development of water resource.

The LaMMa-CRES laboratory, as technical and scientific support to the partner Regione Toscana, took the opportunity to join to the INTERREG IIIB MEDOCC project "HYDRANET". In that context it developed an integrated analysis system of environmental data (morphology, climate, soil, vegetation) for the monitoring of water resource. The methodology allowed the creation of an early warning bulletin on water availability in the natural basin of Ombrone river (area of study in south of Tuscany). This aim was reached through the employment of a hydrological model (SWAT) calibrated on the basin and the analysis of vegetation drought indices, derived from MODIS satellite data.

The integrated analysis is a summary of the information necessary to monitor changes in the availability of water resources: the results of the model are reflected in the index NDVI

demonstrating that the hydrological parameters are closely correlated with the photosynthetic activity of vegetation. Therefore, the applied methodology turned out to be an efficient analysis and monitoring instrument of hydrological deficit.

### **Obiettivi**

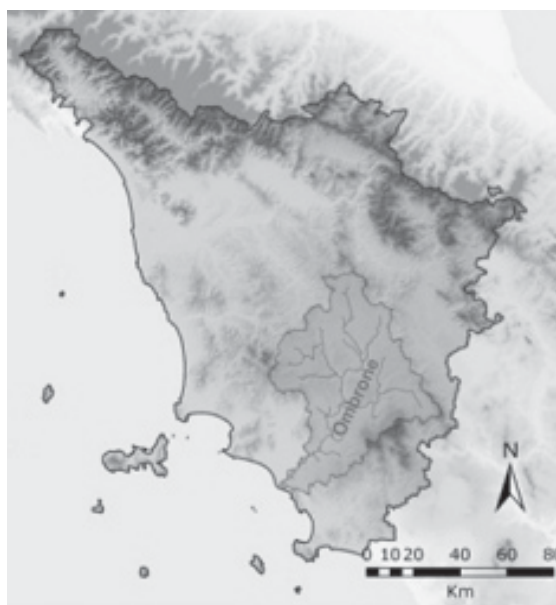
L'obiettivo dell'attività consiste nella realizzazione di un sistema integrato di analisi dei dati ambientali per il monitoraggio dei cambiamenti nella disponibilità della risorsa idrica. Tale obiettivo è stato perseguito sfruttando l'integrazione fra due differenti linee di indagine:

1. analisi idrologica realizzata attraverso tecniche GIS con l'utilizzo di un modello per la determinazione del deficit idrico calibrato sull'area di studio;
2. analisi spaziale dell'indice di vegetazione per valutare gli effetti dei cambiamenti in atto sullo stato della vegetazione.

La metodologia sfrutta la correlazione tra evidenzia i parametri idrologici e l'attività fotosintetica della vegetazione. Infatti, se da una parte l'indagine derivante dal telerilevamento con l'utilizzo dell'analisi delle immagini satellitari può fornire informazioni di carattere qualitativo sullo stato di stress della vegetazione e quindi sui fenomeni di siccità mettendo in evidenza le aree più sensibili, il modello idrologico calibrato sul bacino è in grado di quantificarne gli effetti sugli ecosistemi naturali, sulle attività agricole e sulla disponibilità idrica nei corsi d'acqua.

### **Area di studio**

L'area di studio è costituita dal bacino naturale del fiume Ombrone, localizzato nella parte meridionale della Regione Toscana. La sua estensione areale è di 3541 Km<sup>2</sup>. Le quote variano tra 0 e 1800 m s.l.m. mentre le precipitazioni tra 650 e 1450 mm annui. Il bacino presenta una forte variabilità spaziale dei parametri morfometrici (altimetria, pendenze, ecc) e di conseguenza meteorologici (precipitazioni, temperature, ecc).



*Figura 1- Area di studio- Bacino del fiume Ombrone*

Il clima della zona rientra nella classe di clima Mediterraneo umido/semi-arido con una temperatura media annuale di 15° C (+8° C Gennaio, +24° C Luglio). Presenta le criticità ambientali di un tipico bacino costiero Mediterraneo con una netta distinzione fra stagione asciutta (estate) e umida (autunno-inverno), un'alta richiesta di acqua durante i mesi estivi quando le risorse idriche superficiali sono al loro minimo e di conseguenza una possibile contaminazione della falda dovuta alla penetrazione del cuneo salino nelle aree costiere per l'eccessivo emungimento sotterraneo.

Il territorio è per la maggior parte collinare (67%); comprende alcune zone montane, circa il 6,2%, e una vasta pianura alluvionale costiera (il 26,9%). E' ricoperto per quasi il 55% da aree coltivate che occupano prevalentemente la pianura (seminativi), e le zone di medio-bassa collina (vigneti e oliveti); le zone boscate rappresentano il restante 44,2%; solo l'1,1% è costituito da aree modellate artificialmente dall'attività antropica.

### **Analisi idrologica**

Il modello che è stato individuato per l'analisi di tipo idrologico è SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). E' un modello idrologico che consente di definire gli effetti dei tematismi relativi al clima, ai suoli e all'uso del suolo sulle portate liquide e solide delle aste fluviali, appoggiandosi all'interfaccia GIS ArcView della ESRI.

#### **1. Preparazione dei dati di input**

Essendo SWAT un modello complesso in grado di simulare l'intero ciclo idrologico, necessita di una notevole quantità di parametri in input, i quali devono essere adattati all'esatto formato accettato per l'elaborazione. Una parte non trascurabile dell'attività ha riguardato il reperimento, l'omogeneizzazione e la formattazione degli strati informativi richiesti dal modello, processo che è risultato alquanto complesso. A tal proposito è stato anche utile il contatto diretto con gli sviluppatori del programma che in varie occasioni ci hanno supportato nella risoluzione di problemi che impedivano la messa a punto del modello.

Di seguito sono elencati gli strati informativi utilizzati:

1. DTM con risoluzione a 25 m ricavato dal ricampionamento sull'area di studio del DEM con risoluzione a 10 m del Servizio Geografico della Regione Toscana. Il modello realizza a partire da tale strato informativo il calcolo dei principali parametri morfometrici che si conclude con la definizione del corso d'acqua e dei sottobacini. Dopo vari test realizzati sul bacino in esame, è risultato ragionevole il settaggio di 5000 ha per il valore dell'area minima contribuente alla definizione del corso d'acqua, la quale influisce di conseguenza sulla superficie dei sottobacini. Il numero dei sottobacini è risultato pari a 37.
2. Dati sui suoli ricavati a partire dalla Carta dei Suoli 1:250.000 della Regione Toscana. Per definire le proprietà del suolo, 54 diverse classi sono state introdotte nel modello. Per ciascuna di esse e per ciascun orizzonte che la compone, sono stati assegnati parametri fisici caratteristici come profondità, conducibilità idraulica, tessitura, contenuto di argilla, limo e sabbia, ecc.
3. Dati di uso del suolo derivati a partire dal CORINE 2000 in scala 1:100.000 (Varanou et al., 2000) con l'inserimento delle pratiche di gestione delle principali colture agricole. Il modello include nel suo database 102 vari tipi di copertura vegetale ciascuno dei quali è caratterizzato da un diverso valore del CNII (*Curve Number*). Infatti, ogni coltura presenta un diverso indice di copertura fogliare che protegge il terreno da fenomeni di ruscellamento e di conseguenza influisce sul contenuto idrico. Nel caso del bacino in esame sono stati individuati 27 diversi tipi di copertura vegetale, ognuno dei quali è stato incrociato con l'appropriata classe di uso suolo del database di SWAT.

Dall'incrocio degli strati informativi suolo e copertura vegetale il modello determina le HRU (*Hydrologic Response Units*) ovvero le unità di risposta idrologica identificate in modo univoco dalla combinazione di copertura del suolo, tipo di suolo e pratica gestionale; ciò influisce direttamente sul deflusso superficiale e sull'infiltrazione che alimenta la falda sotterranea.

4. Dati climatici giornalieri registrati negli anni 2000-2004. In particolare: precipitazioni cumulate, temperature massime e minime, radiazione solare. In aggiunta, allo scopo di poter utilizzare l'equazione di Penman-Monteith per stimare l'evapotraspirazione potenziale, il modello ha richiesto anche i dati relativi a velocità del vento e umidità relativa.
5. Dati di portata giornalieri relativi al periodo di calibrazione del modello: forniti dall'Autorità di Bacino del fiume Ombrone.

L'elaborazione dei dati di input è avvenuta in due passi successivi: il primo, di calibrazione e validazione, ha reso possibile la messa a punto e la taratura del modello sulla base dei dati di portata a disposizione e dell'area di studio (anni 2000- 2002); il secondo, di previsione, ha permesso il calcolo del bilancio idrico in corrispondenza degli anni successivi, 2003 e 2004, per i quali non sono noti i dati di portata.

## 2. Calibrazione e validazione del modello

La calibrazione di un modello consiste nella ricerca dei giusti parametri che minimizzano l'errore tra grandezza misurata e grandezza stimata. Allo scopo di valutare la bontà previsionale del modello SWAT è stata svolta una fase di calibrazione e validazione sulla base dei dati di portata di una stazione idrometrica all'interno del bacino in esame. I dati disponibili riguardano le portate giornaliere misurate nel periodo 2000-2002 dalla stazione di Poggi del Sasso ricadente nel sottobacino 28. In tal modo il periodo di analisi è stato suddiviso in due: 2000-2002 per la calibrazione-validazione e 2003-2004 per la previsione.

Facendo variare alcuni dei coefficienti di set up, come da suggerimento degli sviluppatori del modello, sono state elaborate 13 differenti tarature per ciascuna delle quali sono stati calcolati, come parametri di confronto, la correlazione  $R^2$ , il RMSE e il coefficiente C di Nash-Sutcliffe raccomandato dall'*ASCE Task Committee on Evaluation Criteria for Watershed Models*:

$$C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i')^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad [1]$$

$Q_i$  = misura reale di portata;  
 $Q_i'$  = portata stimata dal modello;  
 $\bar{Q}$  = media delle portate misurate nel periodo di riferimento.

Calibrazione	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
C	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33	0.3	0.3	0.36	0.34	0.35	0.38	0.26	0.34
$R^2$	0.34	0.35	0.35	0.34	0.35	0.35	0.32	0.37	0.35	0.41	0.4	0.39	0.35
RMSE (m <sup>3</sup> /s)	1	0.99	0.99	0.99	0.99	1.01	1.02	0.98	0.99	0.98	0.96	1.04	0.99

Tabella 1- Confronto tra le varie calibrazioni

Sulla base dei risultati ottenuti è stata scelta la taratura messa a punto per la calibrazione n° 11.

In letteratura (Cao W. et al. *Hydrol. Process*, 2006) è noto come per bacini caratterizzati da un'elevata variabilità spaziale dei parametri morfometrici (altimetria, pendenze, ecc) e di conseguenza meteorologici (precipitazioni, temperature, ecc), la calibrazione del modello necessita di un processo lungo e oneroso. Pertanto l'analisi condotta nel bacino dell'Ombrone che presenta tali peculiarità, si pone come un primo passo i cui risultati sono migliorabili con l'ausilio di ulteriori stazioni per la fase di calibrazione-validazione e ulteriori anni di confronto.

## 3. Risultati ottenuti tramite il modello

Uno dei risultati più importanti della sperimentazione è stato il buon esito dell'implementazione del modello nel bacino di studio nonostante le difficoltà riscontrate nel reperimento dei dati di input e nella formattazione degli stessi secondo i database di SWAT. L'applicazione ha riguardato principalmente l'analisi del deficit idrico a livello di sottobacino attraverso l'elaborazione dei parametri idrologici "naturali", sia perché le finalità del progetto riguardavano gli aspetti climatici e di allerta siccità, sia per le difficoltà di reperimento delle informazioni riguardanti i prelievi antropici (pozzi, derivazioni di acque superficiali). Pertanto gli output ottenuti che hanno valore ai fini del progetto riguardano le portate giornaliere nelle sezioni di chiusura dei sottobacini e del bacino principale e il bilancio di tutte le componenti del ciclo idrologico (portata, infiltrazione, ruscellamento, umidità del suolo, deflusso sottosuperficiale, evapotraspirazione reale e potenziale, ecc). Tali parametri sono stati aggregati per ogni sottobacino e mediati a livello annuale sul periodo analizzato (2000-2004). Di seguito se ne riportano le mappe derivate.

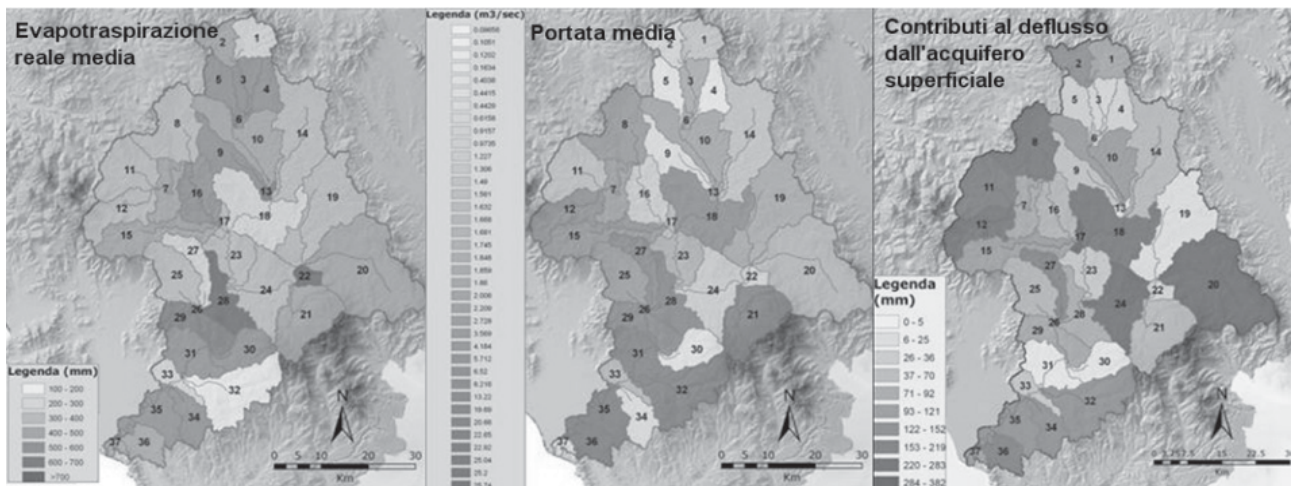


Figura 2 - Caratterizzazione idrologica del bacino del fiume Ombrone sul periodo 2000-2004

Le simulazioni hanno messo in evidenza come eventi climatici eccezionali possono creare notevoli squilibri ambientali andando ad influenzare negativamente i deflussi superficiali, la ricarica delle falde e il contenuto idrico dei suoli. Il modello calibrato si è dimostrato in grado di simulare molto bene fenomeni importanti di cambiamento nella disponibilità della risorsa idrica, come ad esempio per l'anno 2003 gli effetti sul bilancio idrico della forte sequenza siccitosa e delle elevate temperature che si registrarono nei mesi estivi (da fine maggio a fine agosto) e per l'anno 2004 i fenomeni alluvionali, realmente verificatisi, in corrispondenza di fine ottobre e di inizio dicembre.

### Analisi dell'indice di vegetazione

Il LaMMA-CRES mantiene un archivio di immagini NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) provenienti da satellite per lo studio dei parametri biofisici della vegetazione (stato fenologico, copertura vegetale). Esso è costituito da: dati del satellite NOAA-AVHRR (1 Km di risoluzione, mappe composte decadali) dal 1986; dati del satellite MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer* 250 m di risoluzione, mappe composte a 16 giorni) dal 2000.

L'indice NDVI rappresenta un buon indicatore dello stato della vegetazione in base alla sua attività fotosintetica: esso sfrutta l'assorbimento del rosso e l'elevata riflettanza nell'infrarosso per riconoscere la vegetazione fotosinteticamente attiva da altre coperture del suolo (acqua, suolo nudo, neve). L'attività svolta per il progetto è consistita nell'applicazione dell'archivio multitemporale di immagini per l'individuazione spaziale dei fenomeni siccitosi.

Per ottenere il gradiente di NDVI (eq. [2]) le mappe relative al satellite MODIS sono state mediate sul periodo 2000-2006; per ciascuna di esse è stata poi considerata la deviazione rispetto al valore medio di riferimento.

$$DEV_{NDVI} = (NDVI_{GG} - NDVI_{GGmedia2000-2006}) / NDVI_{GGmedia2000-2006} \quad [2]$$

GG (giorno giuliano)	145	161	177	193	209	225	241	257
Inizio	25-mag	10-giu	26-giu	12-lug	28-lug	13-ago	29-ago	14-set
Fine	09-giu	25-giu	11-lug	27-lug	12-ago	28-ago	13-set	29-set

Tabella 2- Scene considerate per l'analisi delle anomalie

### Risultati dell'analisi integrata

La metodologia di analisi sviluppata nello svolgimento del progetto che integra gli aspetti idrologici con quelli vegetazionali, si è dimostrata un efficace strumento di analisi e monitoraggio del deficit idrico. Di seguito si riportano le mappe di anomalia dei mesi estivi per gli anni di simulazione.

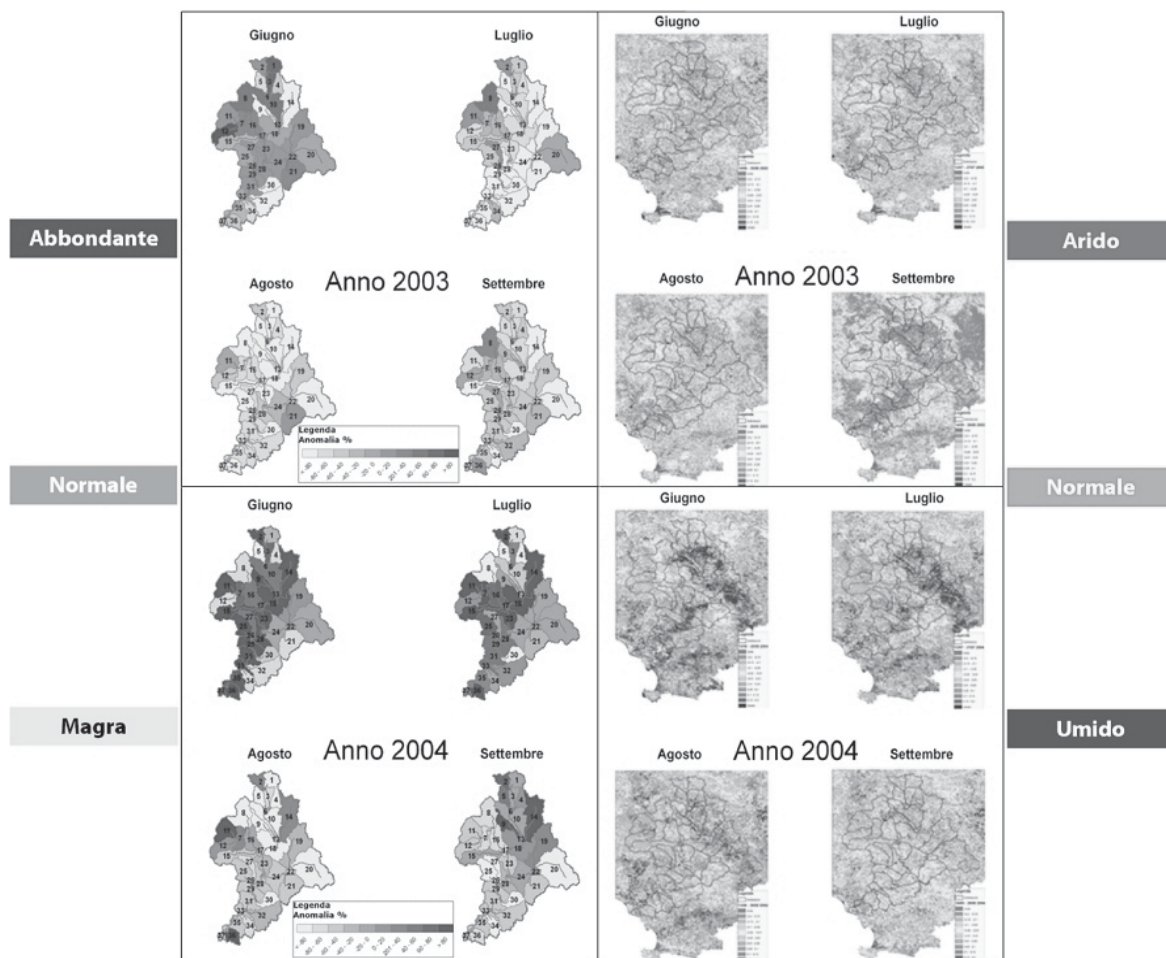


Figura 3 - Anomalia di portata e di NDVI relativamente ai mesi estivi per gli anni 2003 e 2004

I risultati del modello idrologico trovano un buon riscontro nell'analisi dell'indice NDVI a dimostrazione che i fenomeni che influiscono sul ciclo dell'acqua sono strettamente correlati con quelli che agiscono sull'attività fotosintetica della vegetazione. Lo strumento rappresenta un prototipo di bollettino "allerta siccità" in quanto fornisce su tale fenomeno informazioni di carattere qualitativo tramite l'analisi delle immagini satellitari che mette in evidenza le aree più sensibili, e di carattere quantitativo tramite il modello idrologico calibrato sul bacino che permette di valutarne gli effetti sugli ecosistemi naturali, sulle attività agricole e sulla disponibilità idrica nei corsi d'acqua.

### Bibliografia

- Angeli L., Bottai L., Capecchi V., Chiesi M., Costantini R., Ferrari R., Maselli F. (2004), "Valutazione di immagini da diversi sensori per la stima dei flussi di CO<sub>2</sub> forestali", *8a Conf. Naz. ASITA*
- Cao W., Bowden B.W., Davie T., Fenemor A. (2006), "Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability", *Hydrological Processes*, 20(5): 1057-1073
- Di Luzio M., Srinivasan R., Arnold J.G. (2002). "Integration of watershed tools and SWAT model into BASINS". *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4): 1127-1141
- Neitsch, S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R. (2002), *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000*, GSWRL Report 02-02, BRC Report 02-06, Published by Texas Water Resources Institute TR-192, College Station, TX
- Varanou E., Baltas E., Mimikou M. (2000), "Regional Effects of Climate and Land Use Change on the Water Resources and the Risk associated with Flooding", *Proc. European Conference on Advances in Flood Research*, 1 - 3 November 2000, Potsdam, Germany.