

# APPROCCIO OPEN SOURCE ALLA MODELLAZIONE IDROLOGICA

Maria Antonia BROVELLI(\*), Massimiliano CANNATA(\*\*)

(\*)Politecnico di Milano – Polo Regionale di Como, Via Valleggio 11 – 22100 Como  
+390313327517, fax +390313327519, e-mail maria.brovelli@polimi.it

(\*\*) Istituto Scienze della Terra - SUPSI, via Trevano, Canobbio, 6952, Switzerland  
+41058666218, fax +41058666209, e-mail massimiliano.cannata@supsi.ch

## Sommario

Molti modelli idrologici distribuiti oggi in commercio utilizzano funzioni GIS per eseguire il pre-trattamento e l'analisi dei risultati dotandosi di apposite funzioni di esportazione ed importazione dati che collegano questi due sistemi. Un modello completamente integrato in un ambiente GIS e che sia quindi in grado di sfruttare tutte quelle funzioni geografiche di elaborazione, archiviazione e visualizzazione di dati spaziali (indispensabili nella modellazione idrologica distribuita) e che sia in grado di integrarsi con modelli che simulano altri processi fisici è fortemente auspicabile. L'accessibilità e la fruibilità non ristretta fanno dei "Free and Open Source Software" un ambiente di sviluppo ideale: tra questi software il GIS GRASS è uno dei sistemi informativi territoriali più diffusi e che meglio si presta alla modellazione ambientale potendo avvalersi di numerosi moduli (r.sun, r.watershed, r.terraflow, etc.), di un efficiente ambiente di sviluppo (linguaggio C) e sull'esistenza d'interfacce di integrazione con altri programmi (ad es. al programma statistico R: [www.r-project.com](http://www.r-project.com)).

Il modello idrologico "HydroFOSS" qui presentato è quindi il risultato di una serie di nuovi moduli idrologici (ad es.: stima dell'evapotraspirazione, dell'intercettazione vegetale, dello scioglimento ed accumulo nivale e dei deflussi ipodermici, superficiali e fluviali) da noi sviluppati in GRASS che vengono richiamati, unitamente a comandi già presenti, in opportuna sequenza.

Questo approccio modulare consente di avere a disposizione un ambiente di modellazione altamente personalizzabile, in cui l'utente ha la piena libertà di scelta e controllo delle funzioni utilizzate. I risultati sono inoltre direttamente accessibili per successive analisi e visualizzazioni.

## Abstract

Nowadays most of the distributed hydrological models available are using GIS functionality for handling with pre- and post-processing procedures by using importing and exporting functions.

A full GIS embedded model is able (i) to access all the functionality of such a system in term of elaborations, data storage and visualization (i.e.: geostatistic, map algebra, optimized raster management, database connections and map plotting) and (ii) to make the outputs directly available for further analysis or as an input for other environmental models. The "Free and Open Source Software", because of its open and not restricted nature, results in an ideal programming environment: in this category the GRASS is one of the more widely used GIS and is particularly prone to modellization. In fact it can count on: a huge number of modules (i.e. r.sun, r.watershed, r.terraflow, etc.), a powerful and well documented programming environment (C language) and certain number of integration interfaces with other free software (i.e. the statistical program R: [www.r-project.com](http://www.r-project.com)).

The new hydrological model "HydroFOSS" presented in this paper is the result of a series of new developed hydrological GRASS modules (evapotranspiration, canopy interception, snow melt and accumulation, runoff calculation) called in conjunction of the existents GRASS functionalities in the right sequence.

This kind of modular approach gives to the expert user the ability to access at a true environment for modelling, where the choice of the functions to call is transparent, the building of the model is easy and highly customizable and the resulting data are directly available for further analysis.

## Introduzione

La conoscenza della distribuzione delle risorse idriche nel tempo e nello spazio rappresenta a scala globale un problema attualissimo, con implicazioni economiche, politiche e sociali di rilievo. Oltre che per altri obiettivi legati all'utilizzo delle risorse idriche, anche per lo studio, la descrizione e la previsione di eventi estremi, quali le piene nei corsi d'acqua, nel corso degli ultimi decenni sono stati sviluppati i più diversi modelli idrologici (Beven, 2000).

La crescente disponibilità di dati spazialmente distribuiti e le opportunità offerte dagli strumenti informatici hanno permesso negli ultimi anni lo sviluppo di modelli matematici di tipo distribuito, vale a dire di schemi computazionali nei quali la rappresentazione delle variabili di ingresso e delle caratteristiche del bacino possono essere assunte variabili nello spazio e nel tempo.

Nel corso dell'articolo verrà presentato lo stato dell'arte dei modelli idrologici in relazione con i GIS, la motivazione che ci ha spinto a scegliere un approccio integrato nell'ambiente “*free and open source*”, i dati di *input* ed il loro modello di archiviazione; la modellazione dei singoli processi considerati, i risultati preliminari ed infine le conclusioni e gli sviluppi futuri.

## Modelli idrologici distribuiti e GIS

Questi tipi di modelli devono essere in grado di gestire grosse moli di dati e di parametri, spesso derivati da differenti metodologie di misura (pluviometri e immagini radar per la pioggia ad esempio) e con diverse scale spaziali e temporali. In questo senso i GIS sono da ritenersi uno strumento molto potente ed utile anche nella modellazione idrologica.

Tre diversi tipi di approccio sono stati studiati per collegare i GIS e tali modelli (Wasseling et al., 1996):

1. semplice scambio di dati tra i due sistemi (*loose coupling*);
2. sviluppo nei GIS di funzionalità d'importazione degli *output* del modello (*tight coupling*);
3. sviluppo del modello idrologico all'interno del GIS stesso (*embedded coupling*).

Tra i modelli che ricadono nei primi due tipi di approccio ricordiamo DHSVM, MIKE-SHE, WaSiM e TOPKAPI (Ciarapica, Todini, 2002), mentre tra quelli del terzo tipo TOPMODEL, CASC2D e LISFLOOD.

Come già ricordato il ciclo idrologico è un fenomeno spazialmente distribuito e fortemente legato alle condizioni locali di alcune variabili, tra cui quelle meteorologiche (pioggia, vento, umidità, etc.), la tipologia di terreno, il tipo e lo stato della vegetazione; il suo studio quindi non può prescindere dall'utilizzo di funzioni spaziali. Al fine di evitare l'implementazione di tali funzioni all'interno del modello stesso o di ricorrere ad importazione ed esportazione di dati (processi che richiedono tempo e sono soggetti a errore) l'approccio *embedded coupling* consente di disporre di tutte le funzionalità GIS di:

1. modellazione spaziale (svariate funzioni d'interpolazione, *map algebra*, etc.);
2. gestione dei dati ottimizzata (compressione carte raster, accesso e scrittura delle stesse e archiviazione ed accesso di attributi in *database*)
3. visualizzazione ed analisi dei risultati (generazione di grafici, calcolo di informazioni statistiche e visualizzazione di carte).

In considerazione di quanto appena esposto l'approccio da noi adottato per lo sviluppo del modello è quello pienamente integrato in ambiente GIS (*embedded coupling*).

HydroFOSS (*Hydrological Free & Open Source Software*) è un modello di deflusso superficiale:

- distribuito, descrive i campi delle variabili idrologiche (carte raster);
- fisicamente basato, tutte le grandezze che lo caratterizzano sono grandezze fisiche;
- continuo, elabora le soluzioni in istanti di tempo successivi;
- modulare, generato dalla combinazione di differenti moduli che simulano i singoli processi fisici che intervengono nella trasformazione afflussi-deflussi;

- integrato, pienamente integrato in ambiente GIS GRASS.

### **Ambiente di sviluppo.**

L'ambiente FOSS (*Free and Open Source Software*) è costituito da tutti quei programmi gratuiti, distribuiti solitamente sotto licenza GPL (*General Public License*), che consentono di accedere al codice. I vantaggi offerti da questi programmi, oltre all'abbattimento dei costi, sono principalmente da individuarsi nella possibilità di leggere (e quindi comprendere nei dettagli) i sorgenti e di modificarli a seconda delle necessità.

Questi *software* sono in genere gestiti, mantenuti e sviluppati da vere e proprie comunità di utilizzatori/sviluppatori i quali testano il software, segnalano gli errori, correggono e sviluppano nuove procedure. Oltre alla spesso dettagliata ed ampia documentazione (manuali per l'utilizzo e per la programmazione) il centro di scambio d'informazione di queste comunità sono le *mailing list*. Qui si può trovare supporto di ogni genere, dalle istruzioni sull'installazione, alla risoluzione di specifiche problematiche, a chiarimenti sulla programmazione.

Questo ambiente offre al mondo scientifico un inestimabile strumento di sviluppo, validazione e condivisione delle più svariate applicazioni.

In quest'ottica il GIS GRASS ([www.grass.itc.it](http://www.grass.itc.it)), da noi scelto come ambiente di sviluppo per il modello idrologico HydroFOSS, è certamente un esempio di successo potendo contare su migliaia di utilizzatori sparsi per il mondo e su una dettagliata documentazione. Il linguaggio di programmazione utilizzato per lo sviluppo dei moduli è il C, mentre quello per l'automatizzazione delle procedure è lo *Shell script*.

### **Modello dei dati**

I dati di base necessari si suddividono in dati geografici e non (che contengono il solo livello informativo). Tra i primi si trovano:

(i) i dati misurati dalle stazioni meteorologiche *on-line* (archiviati in maniera automatica in un database e collegati a *feature* puntuali), (ii) le carte di base delle quote del terreno (DTM, *Digital Terrain Model*), dell'uso del suolo (*landuse*) e della pedologia (tipologia del suolo); tali carte sono di tipo *raster*.

Tra i dati di tipo non geografico si trovano i valori di letteratura di alcuni parametri (associati a differenti intervalli di tempo, tipi di terreno e usi del suolo). In particolare si hanno:

(i) il LAI (*Leaf Area Index*) indicatore delle dimensioni della superficie fogliare, l'RSC (*Resistance Surface Canopy*) indicatore della resistenza aerodinamica delle foglie, l'altezza (*Vh*) e la densità (*Vc*) della vegetazione, che dipendono dalla stagione, dalla quota e dalla copertura del suolo, (ii) l'albedo (*A*), indice di riflettività del suolo, ed il LINKE, indice di torbidità dell'aria, che sono funzione del mese e della copertura del suolo, (iii) il coefficiente di Manning, indice di resistenza idrodinamica, dipendente dal solo uso del suolo, (iv) il massimo contenuto d'acqua del terreno, il minimo contenuto d'acqua del terreno, la conducibilità del terreno, lo spessore del terreno e l'esponente dell'equazione di connessione tra permeabilità e trasmissività, tutti funzione del solo tipo di terreno.

Mentre la componente informativa è archiviata in una banca dati, la componente geometrica è archiviata nel formato nativo di GRASS. Questa struttura consente al sistema informativo territoriale, grazie alla capacità di GRASS di connessione con banche dati esterne, di accedere direttamente ai dati, visualizzarli, analizzarli e di produrre carte in uscita direttamente disponibili per eventuali successive analisi.

### **Derivazione delle carte meteorologiche**

Le informazioni climatologiche di temperatura, velocità del vento, umidità dell'aria e precipitazione sono registrate dalle stazioni meteorologiche distribuite sul territorio; essendo il modello di tipo distribuito occorre derivare delle carte che rappresentino i campi di queste grandezze nello spazio.

La derivazione di queste carte avviene per interpolazione delle osservazioni puntuali. Purtroppo, in ambito idrologico, queste osservazioni sono generalmente poco dense e la natura variabile dell'osservazione rende presumibilmente poco precisa l'estrapolazione del campo desiderato. In

letteratura si osserva come generalmente la scelta adottata per queste operazioni è l'utilizzo del criterio della minima distanza (poligoni di Thiessen), o dell'inverso della distanza: strumenti d'interpolazione entrambi disponibili in GRASS tramite il comando *s.surf.idw*.

Una variante a questo tipo d'approccio è quella della modellazione dell'osservazione in funzione di altre informazioni. Ad esempio: nota una serie di osservazioni di temperatura ( $T$ ) a quote differenti ( $Z$ ) è possibile stimare i parametri del modello lineare  $T=aZ+b$  ed applicarlo tramite della *map algebra* con il comando *r.mapcalc* di GRASS a tutta l'area d'interesse estrapolando la carta delle temperature.

### **Spazializzazione degli indici tematici**

Per poter modellare i singoli processi, occorre disporre di informazioni sulla struttura del sistema stesso, fattore che determina le dinamiche dei processi che intervengono. Le informazioni devono essere "spazializzate", ovvero si devono generare delle carte distribuite che descrivano con continuità nello spazio i valori assunti da questi parametri. La soluzione adottata per derivare le carte del  $LAI$ ,  $V_h$  e  $V_c$  è quella seguita dal modello WaSiM (Schulla, Jasper, 2000) che considera un'interpolazione lineare nel tempo, con applicazione di un ritardo in funzione della quota, in funzione di alcuni valori di riferimento. I parametri  $A$ ,  $R_{sc}$  e  $LINKE$  non sono invece dati in funzione della quota ma della sola tipologia d'uso del suolo; in questo caso è allora sufficiente considerare un'interpolazione lineare nel tempo in funzione dell'uso del suolo.

Il nuovo comando sviluppato *h.parameters* accede ai dati estraendo i valori limiti dell'intervallo in cui ricade l'istante temporale del dato in ingresso, ne calcola il valore con un'interpolazione temporale e, se necessario, applica un ritardo in funzione della carta delle altezze del terreno.

### **Calcolo della radiazione solare netta**

Il valore energetico in ingresso del sistema è determinato principalmente dall'energia irradiata dal sole: è quindi necessario calcolare una carta dell'energia solare effettiva (radiazione solare netta) necessaria per modellare i successivi processi.

Il comando *r.sun* di GRASS permette il calcolo dell'energia solare diretta, riflessa e diffusa in condizioni di cielo sereno in un determinato istante di tempo, dando la possibilità di considerare l'effetto dell'ombra generata dalla topografia e della torbidità dell'aria, la quale svolge una funzione di attenuazione (Hofierka, Suri, 2002). Sommando poi le tre componenti si ottiene la carta di radiazione solare in condizione di cielo sereno.

Un effetto che attenua notevolmente l'energia irraggiata dal sole che raggiunge la superficie terrestre è quello della nuvolosità; per tenerne conto bisogna derivare una carta dell'indice di nuvolosità ottenuta tramite interpolazione del rapporto tra i valori misurati dalle stazioni meteorologiche e quelli calcolati in condizioni ideali di cielo sereno. Moltiplicando poi questa carta per i valori ideali calcolati si deriva la carta di radiazione solare netta.

### **Calcolo dell'evapotraspirazione**

L'approccio adottato, ed implementato nel nuovo comando di GRASS *h.evapo.PM*, appositamente sviluppato per il calcolo dell'evapotraspirazione a scala oraria, è quello indicato dalla FAO (Allen et al., 1998) che raccomanda l'uso dell'equazione di Penman-Monteith. Nel nuovo comando si applica quindi la formula di Penman-Monteith per le aree vegetate e quella di Penman per gli specchi liquidi: si osserva di conseguenza che l'evapotraspirazione in presenza di aree lacustri è superiore rispetto a quella dove è presente la vegetazione.

### **Calcolo dell'intercettazione**

Discretizzando per passo temporale orario l'approccio proposto da Zeng et al. (2000) si è implementato il comando *h.interception*. Tale modello simula la capacità d'intercettazione della vegetazione con un serbatoio che viene riempito dalla pioggia, drena istantaneamente in caso di livello superiore ad una quota massima e viene svuotato dall'evaporazione.

## Calcolo dell'accumulo e dello scioglimento nivale

L'approccio seguito nello sviluppo del comando *h.snow* è in genere simile a quello adottato in SHE (Abbott et al., 1986) corretto secondo il modello UEB (Tarboton, Luce, 1996) per la separazione della componente solida e liquida della precipitazione e per il calcolo dell'energia introdotta nel sistema da queste frazioni.

## Calcolo dei deflussi

Nello sviluppo del modulo *h.runoff* di calcolo dei deflussi si è deciso di seguire la strada proposta in TOPKAPI che considera con meccanismo Dunniano i deflussi superficiali, ipodermici e fluviali. La promettente sperimentazione introdotta da TOPKAPI, ha mostrato come questo modello sia applicabile a diverse scale ed abbia parametri con un preciso significato fisico. Questo consente di ottenere un sistema che richiede una calibrazione minima e che consente di interpretare, tramite i valori assunti dai parametri, quali fenomeni influenzino maggiormente il comportamento dei vari bacini.

## Risultati preliminari

Per una prima verifica di alcune grandezze stimate il modello è stato testato su 360 ore consecutive relative al mese di maggio 2004. Ad ogni passo temporale il modello ha prodotto numerose informazioni sotto forma di carte raster, campionando i valori di queste carte in differenti punti relativi a differenti quote, orientamenti, pendenze, ed altre caratteristiche del territorio. E' stato quindi possibile verificare la correttezza dei valori ottenuti sia per l'ordine di grandezza riprodotto, sia per il corretto comportamento temporale delle variabili esaminate, come ad esempio il ciclo diurno/notturno dell'evapotraspirazione o l'innesco dell'intercettazione e della fase di svuotamento del serbatoio (vedi Figure 1 e 2).

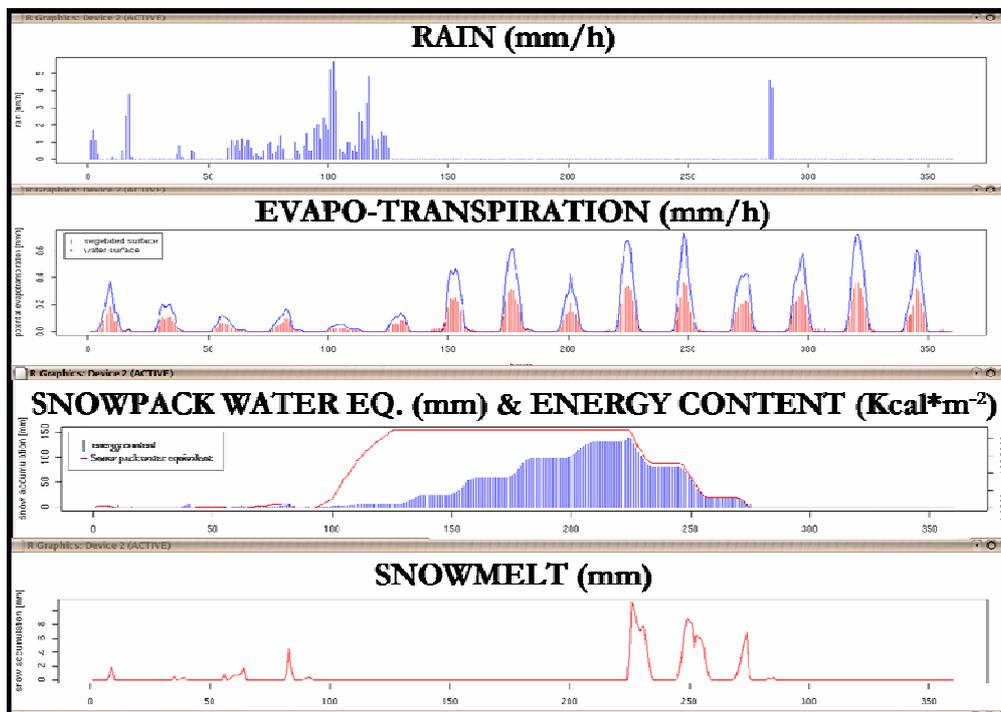


Figura 1 - Comportamento di alcune variabili simulate dai processi in un punto campione.

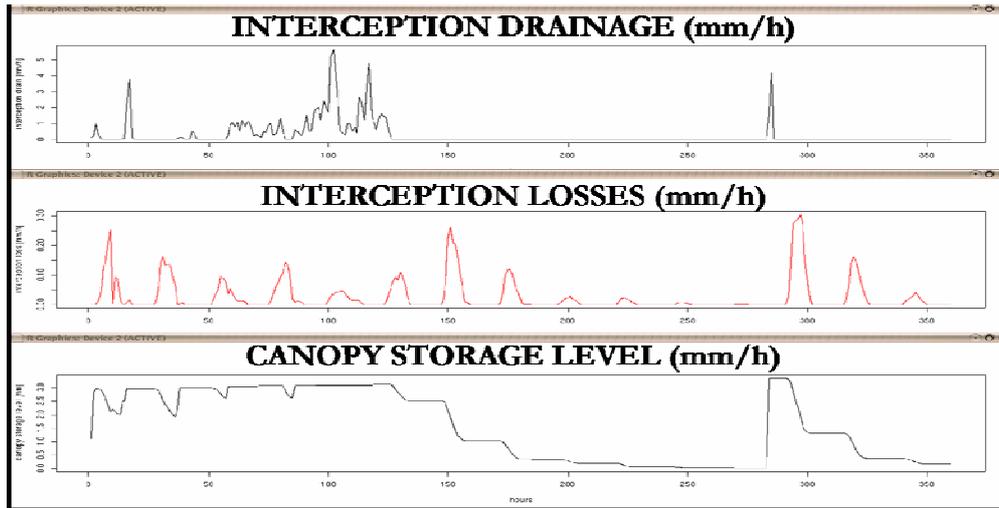


Figura 2 - Comportamento di alcune variabili simulate dai processi in un punto campione.

### Conclusioni e sviluppi futuri

Una procedura automatica di calibrazione, sfruttando il modulo di calibrazione automatica inversa UCODE (<http://water.usgs.gov/software/ucode.html>), è in fase di implementazione; questa consentirà di calibrare e valutare la bontà generale del modello. Lo sviluppo di un'interfaccia grafica (*GUI*, graphical User Interface) ed uno studio per l'ottimizzazione del codice sono due passi successivi auspicabili che renderebbero il codice di più facile utilizzo anche per utenti non esperti del GIS. L'accoppiamento dinamico del modello di deflusso superficiale appena descritto con uno di deflusso sotterraneo consentirebbe di modellare più correttamente anche i periodi secchi, nonché di compiere studi ecologici sullo stato della vegetazione. Il modello *HydroFOSS* per la sua natura modulare è facilmente adattabile alle richieste dell'utilizzatore, che può sia modificare il flusso logico del modello che aggiungere o togliere eventuali altri moduli. In realtà quello che è stato prodotto, oltre al modello in sé, è un ambiente di modellazione idrologica dove l'idrologo decide trasparentemente (codice Open Source) quali processi considerare e come simularli.

### Bibliografia

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J. (1986), "An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, 'SHE'", *Jour. of Hydrology*, 87: 45-59.
- Allen R. G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998), "Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements", *FAO Irrigation and drainage paper 56*, FAO, Rome.
- Beven, K.J. (2000), *Rainfall-runoff modelling: the primer*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Ciarapica, L., Todini, E. (2002), "TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales", *Hydrological Processes* 16: 207-29
- Hofierka, J., Suri, M. (2002), "The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications", *International GRASS users conference proceeding*, Trento, Italy, September 2002
- Schulla, J. and Jasper, K., 2000, Model Description WaSiM-ETH (Water balance Simulation Model ETH), *ETH Zürich*, <http://iacweb.ethz.ch/staff/verbunt/Down/WaSiM.pdf>.
- Tarboton, D.G., Luce, C.H. (1996), "Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model (UEB)," *Computer model technical description and users guide*, Utah Water Research Laboratory and USDA, <http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/snow/snowreptext.pdf>.
- Wesseling, C.G., Karssenbergh, D., Burrough, P.A. and Van Deursen, W.P.A. (1996), "Integrating Dynamic Environmental Models in GIS: The Development of a Dynamic Modelling Language", *Transactions in GIS*, 1 (1): 40-48
- Zeng, N., Shuttleworth, J.W., Gash, J.H.C. (2000), "Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis", *Journal of Hydrology*, 228: 228-41