

# Sviluppo del tool In-STRHyM per la modellazione del bilancio idrologico in ambiente QGIS

Domenico Fuoco<sup>1</sup>, Giuseppe Mendicino<sup>1</sup>, Alfonso Senatore<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica

## 1. Introduzione

Nella storia dell'idrologia, l'attenzione rivolta dai ricercatori alla comprensione, alla misura ed alla modellazione dei fenomeni idrologici di base ha fatto sì che il tradizionale approccio statistico e la modellazione stocastica venissero ben presto affiancati, ed in un certo senso superati, dalla modellazione matematica dei processi idrologici che si sviluppano a differenti scale di interesse. In particolare, la sempre maggiore disponibilità di dati digitali, unitamente alla possibilità d'uso di sistemi di calcolo sempre più evoluti e potenti, ha consentito di superare prima una modellazione di tipo empirico (in cui la rappresentazione dei fenomeni fisici che concorrono alla formazione dei deflussi è trascurata, identificando invece una funzione di trasferimento che mette in relazione l'ingresso con l'uscita del sistema; Dooge, 1959; Natale e Todini, 1976), poi quella concettuale (in cui i processi idrologici sono rappresentati da elementi concettuali interconnessi tra loro; Crawford e Linsley, 1962; Dawdy e O'Donnell, 1965; Zhao *et al.*, 1980; e molti altri), per lasciare il passo infine ai modelli fisicamente basati, tra i quali si annoverano SHE (*Systeme Hydrologique Europeen*) (Abbott *et al.*, 1986), MIKE-SHE (Refsgaard e Storm, 1995), DHSVM (*Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*) (Wigmosta *et al.*, 1994), THALES (Grayson *et al.*, 1992) TOPOG (Vertessy *et al.*, 1993), TOPKAPI (*TOPographic Kinematic Approximation and Integration*) (Todini e Ciarapica, 2002), LISFLOOD (De Roo *et al.*, 2000) e tRIBS (Ivanov *et al.*, 2004a, 2004b).

Questi ultimi, non solo appaiono coerenti con l'osservazione sperimentale, ma forniscono anche una descrizione accurata e completa del comportamento idrologico del sistema naturale, riproducendone la complessità attraverso equazioni differenziali che descrivono in modo rigoroso il bilancio di massa, di quantità di moto e di energia.

Freeze e Harlan (1969) alla fine degli anni '60 proposero per primi, sebbene solo in termini di proposta progettuale, una modellazione matematica basata sulla descrizione fisica e distribuita dei processi relativi al deflusso superficiale sui versanti e nei canali, il moto dell'acqua nella parte di suolo non saturo e saturo. Innumerevoli sono stati i contributi scientifici a valle di questo lavoro pionieristico, molti dei quali basati sostanzialmente sulle equazioni di Richards per il moto dell'acqua nel suolo saturo e non saturo, di Boussinesq per la circolazione idrica sotterranea bidimensionale, di De Saint-Venant per la propagazione dei deflussi in alveo o lungo i versanti.

Più specificatamente, i modelli basati sulla descrizione fisica e distribuita dei processi idrologici mostrano discretizzazioni spaziali differenti, variabili dalla suddivisione regolare in celle sulle quali le leggi a scala puntuale sono estese e dove i valori effettivi dei parametri devono essere determinati (ad es. MIKE-SHE - Refsgaard e Storm, 1995; TOPKAPI - Todini e Ciarapica, 2002), alla suddivisione spaziale in tubi di flusso ortogonali alle isoipse (ad es. THALES - Grayson *et al.*, 1992; TOPOG - Vertessy *et al.*, 1993), oppure in reticoli di triangoli irregolari TIN (ad es. Ivanov *et al.*, 2004a, 2004b). Alcuni autori ritengono che la suddivisione in celle regolari rappresenti un approccio "riduzionista", poiché è la stessa equazione matematica che diventa una parametrizzazione del processo, assodato che i parametri non possono essere stimati su ogni cella del dominio di calcolo attraverso misure di campo (Beven, 2002). Senza trascurare, inoltre, il problema delle eterogeneità delle grandezze idrologiche, che all'interno delle singole celle sono ignorate. Pertanto, tale tipo di suddivisione non sembrerebbe rispondere alle reali esigenze del processo da rappresentare, piuttosto tenderebbe a soddisfare regole dettate dalla risoluzione dei dati o dalle necessità di *data management and storing*.

Tali osservazioni, pur se condivisibili, sono state completamente tralasciate alla luce delle grosse potenzialità fornite dai Sistemi Informativi Geografici (GIS) e dal telerilevamento satellitare. Discipline, queste, basate prevalentemente su strutture di dati a griglia regolare (raster). Attraverso l'uso dei GIS problemi di gestione di cospicue moli di dati e di parametri, spesso derivati da differenti metodologie di misura (per esempio, pluviometri e immagini radar per la pioggia) e con diverse scale spaziali e temporali, sono stati ampiamente superati e risolti.

Nel prosieguo della nota sarà introdotto un tool per la simulazione del bilancio idrologico basato sul modello spazialmente distribuito In-STRHyM (*Intermediate Space-Time Resolution Hydrological Model*, Senatore *et al.*, 2011), sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica dell'Università della Calabria. Il modello è stato inizialmente sviluppato in IDE Visual Studio utilizzando le funzionalità offerte dal controllo ActiveX Map Window GIS. Al fine di consentire un più ampio utilizzo di In-STRHyM da parte della comunità idrologica, è in via di sviluppo un plugin Python che consente di usufruire di tutte le potenzialità offerte dal modello in ambiente QGIS. Fornendo in ingresso informazioni relative a caratteristiche geomorfologiche e proprietà idrauliche del suolo insieme a dati di precipitazione e temperatura, questo tool consente la stima distribuita a scala giornaliera delle principali componenti del bilancio idrologico (es. accumulo nivale, evapotraspirazione, umidità del suolo, contenuto idrico in falda) insieme ai valori di deflusso nelle sezioni di interesse.

Nel paragrafo seguente è brevemente descritta la schematizzazione idrologica operata dal modello, in quello successivo invece sono forniti alcuni dettagli relativi alla struttura ed alle funzionalità del tool. Infine, nelle conclusioni si evidenziano alcune delle prospettive di utilizzo.

## 2. Il modello idrologico distribuito In-STRHyM

Il modello idrologico distribuito In-STRHyM è stato concepito principalmente allo scopo di stimare i deflussi giornalieri su lunghi periodi temporali, al fine di valutare l'evoluzione della disponibilità della risorsa idrica nei principali bacini dell'Italia Meridionale.

La fig. 1 mostra lo schema del modello In-STRHyM per una cella generica. La risoluzione temporale del modello è di 1 giorno, e quella spaziale di 1 km<sup>2</sup>. Ogni colonna di suolo sottostante la superficie è suddivisa in due strati: la *root zone* (con una profondità pari a  $RZ$  [mm]), ed uno strato sottostante a sua volta ulteriormente suddiviso in una zona insatura ( $UZ$  [mm]) ed una satura ( $SZ$  [mm]), nella quale si ipotizza la presenza di un acquifero. Il drenaggio dell'acqua avviene lungo l'intera verticale (infiltrazione  $I$  [mm d<sup>-1</sup>] e percolazione dalla *root zone* verso la zona insatura  $P_1$  [mm d<sup>-1</sup>] e dalla zona insatura verso quella satura  $P_2$  [mm d<sup>-1</sup>]) seguendo la legge di Darcy (per la stima della permeabilità è usata l'equazione di Brooks e Corey). Anche se la somma  $UZ + SZ$  è costante, la profondità dei singoli strati è variabile in funzione della variazione di quota del livello di falda. Se l'acquifero raggiunge la *root zone* (cioè se  $UZ = 0$ ), l'acqua in eccesso è restituita alla *root zone* ( $Ret_2$  [mm d<sup>-1</sup>]), e lo stesso accade tra la *root zone* e l'interfaccia con l'atmosfera ( $Ret_1$  [mm d<sup>-1</sup>]). Data la risoluzione del modello, la generazione del deflusso superficiale è ipotizzata solo in funzione del meccanismo di eccesso di saturazione, ma in inverno e in primavera un ulteriore contributo è dato dallo scioglimento nivale (calcolato seguendo lo schema del modello SWAT, Neitsch *et al.*, 2002). L'intercezione ( $Int$  [mm d<sup>-1</sup>]), calcolata secondo Kristensen e Jensen, 1975) influenza la stima della precipitazione al suolo  $P$  [mm d<sup>-1</sup>], mentre l'evapotraspirazione ( $ET$  [mm d<sup>-1</sup>]) riduce il contenuto idrico nella *root zone*. La grandezza  $ET$  è calcolata, distinguendo tra evaporazione da suolo nudo ed evapotraspirazione da vegetazione, tramite il metodo del coefficiente colturale (Allen *et al.*, 1998).

La propagazione del deflusso è simulata sia superficialmente (deflusso di versante  $Q_o$  [mm d<sup>-1</sup>] e di canale  $Q_c$  [mm d<sup>-1</sup>]), che all'interno della *root zone* ( $Q_s$  [mm d<sup>-1</sup>]) e della zona satura ( $Q_g$  [mm d<sup>-1</sup>]). Nel caso del deflusso superficiale ed ipodermico è seguito un approccio cinematico simile a quello proposto dal modello TOPKAPI (Todini e Ciarapica, 2002). La direzione del flusso è guidata dalle caratteristiche topografiche del terreno (metodo D8). La propagazione del deflusso profondo si basa invece su uno schema bidimensionale (equazione di Boussinesq) risolto esplicitamente.

Di default l'input del modello è totalmente distribuito, anche se in assenza di dati alcune grandezze possono essere considerate costanti nel bacino. Per la validazione del modello In-STRHyM in Calabria sono stati

distribuiti i parametri relativi alle caratteristiche topografiche, alle proprietà idrauliche del suolo (mappa pedologica ARSSA), alla profondità della root zone ed agli usi del suolo (progetto Corine Land Cover). Inoltre, sono state fornite per l'input meteorologico mappe giornaliere di precipitazione, temperatura e radiazione netta. Infine, per il calcolo dell' $ET$  sono state utilizzate mappe da remote sensing (MODIS) che hanno fornito una stima distribuita degli indici di vegetazione  $NDVI$  e  $LAI$ . La calibrazione del modello è stata inizialmente eseguita sulla sezione idrometrica "Crati a Conca" dal 01/10/1961 al 31/12/1966 (coefficiente di Nash-Sutcliffe  $E^2=0.83$ , fig. 2), procedendo in seguito con altri bacini strumentati all'interno del territorio regionale.

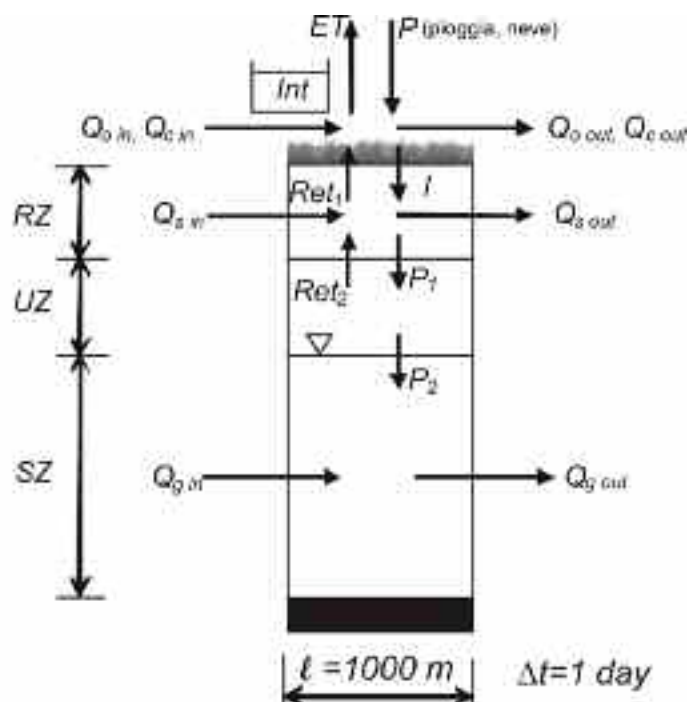


Figura 1. Bilancio idrologico in una generica cella del modello In-STRbyM

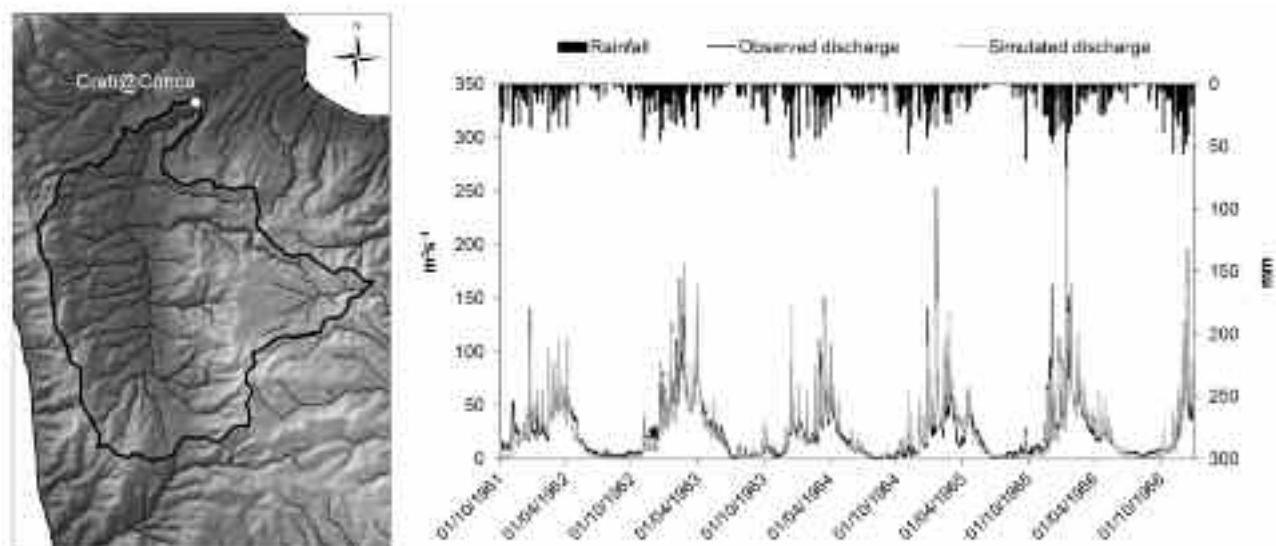


Figura 2. Calibrazione del deflusso alla sezione di chiusura "Crati a Conca", periodo 1961-1966

### 3. Struttura e funzionalità del tool

A partire dai primi sistemi proposti da Tomlinson (1972), caratterizzati da un uso prevalentemente cartografico, i GIS si sono sviluppati in maniera esponenziale implicando significativi cambiamenti nel generale approccio sia dell'investigazione sia della pratica idrologica ed ambientale, rappresentando pertanto dei potenti strumenti di analisi, specie nella fase di *pre- e post-processing* dei modelli deterministici spazialmente

distribuiti.

Nel corso degli anni si è passati dalla semplice determinazione dei parametri di interesse alla mappatura delle variabili simulate, dal *set up* del modello ad una vera e propria modellazione integrata. In particolare, tre differenti approcci sono stati formalizzati per integrare i GIS con i modelli (Wesselung *et al.*, 1996):

- 1 semplice scambio di dati tra GIS e modelli (*loose coupling*);
- 2 sviluppo di funzionalità GIS per l'input automatico del modello e la corrispondente rappresentazione spaziale dei risultati (*tight coupling*);
- 3 sviluppo del modello all'interno del GIS stesso (*embedded coupling*), come nel caso presentato in questa nota.

Il GIS scelto per lo sviluppo integrato del tool è Quantum GIS (QGIS), principalmente perché è un GIS Desktop open-source, sviluppato tramite un progetto comunitario. Inoltre, si tratta di un software molto diffuso (dopo il rilascio della versione 1.0 nel 2009, si è assistito ad un incremento esponenziale del numero di utenti), che fornisce una potente interfaccia di programmazione con cui estendere le funzionalità di base del software.

QGIS supporta il linguaggio di scripting Python (PyQGIS). Il tool In-STRHyM, in particolare, è stato sviluppato nel linguaggio di scripting Python versione 2.7.13. Il codice per l'analisi del bilancio idrologico è stato strutturato secondo la logica Object Oriented al fine di ottimizzare l'esecuzione dei vari cicli di calcolo e di sviluppare un'interfaccia grafica per il rilascio di un plugin di semplice utilizzo indirizzato a tutta la comunità idrologica.

La fig. 3 mostra uno schema a blocchi della procedura di calcolo generale del tool. La configurazione iniziale richiesta all'utente per l'esecuzione del programma si articola in tre fasi.

Il primo step consiste nel fornire gli input necessari al programma. Tali input sono di tre tipi: 1) parametri costanti nel tempo e nello spazio; 2) parametri spazialmente distribuiti ma costanti nel tempo; 3) grandezze variabili nello spazio e nel tempo. Nel primo tipo di parametri sono da includere coefficienti come quello dell'equazione di Priestley e Taylor (1972) per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento, alcune grandezze idrauliche come larghezza massima e minima dell'alveo ed area soglia (per la discriminazione tra celle-versante e celle-canale), o eventualmente valori medi rappresentativi di grandezze di cui non si ha una conoscenza sufficiente da consentirne la rappresentazione distribuita sul territorio. Per quanto riguarda la seconda tipologia di parametri, la più importante grandezza spazialmente distribuita è la quota, rappresentata nel modello digitale del terreno. Altri parametri distribuiti, se si dispone delle informazioni necessarie, sono l'altezza della vegetazione, il coefficiente di scabrezza di Manning, proprietà idrauliche del suolo come grado di saturazione e porosità del terreno e capacità di campo, profondità dello strato permeabile. È necessario inoltre inizializzare le variabili di stato, come la copertura nevosa, la temperatura nivale, il deflusso su celle-versante e celle-canale ed il contenuto d'acqua nei diversi strati di suolo. Infine, nell'ultima tipologia di input (grandezze variabili nello spazio e nel tempo) vi sono i valori giornalieri opportunamente interpolati di tutte le grandezze meteorologiche osservate come temperatura, radiazione netta e precipitazione.

Il secondo step consiste nell'inserimento delle coordinate della sezione di chiusura del bacino in analisi. A partire da tale informazione, è eseguito il calcolo della Flow Direction secondo l'algoritmo D8 fornito dalla suite TauDEM (<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/>) ed è successivamente creata una maschera dell'area drenante a monte della sezione di chiusura, utilizzata per delimitare l'area di calcolo.

Il terzo ed ultimo step consiste nell'inserimento, da parte dell'utente, dei limiti temporali entro cui eseguire l'analisi. In base a tali limiti viene determinato il numero di giorni su cui eseguire il calcolo e si dà il via ai quattro cicli principali in cui si articola il codice. Tali cicli sono eseguiti in serie e fanno riferimento ai diversi metodi definiti nella classe principale.

Il primo ciclo consiste nell'acquisire le grid delle variabili di stato spazialmente distribuite calcolate nel giorno precedente (ovvero fornite dall'utente nel caso la data di calcolo sia quella iniziale) e nel calcolare per il giorno corrente i valori distribuiti di intercezione, accumulo e scioglimento nivale, infiltrazione, percolazione, surplus di contenuto idrico disponibile per la propagazione del deflusso superficiale, ipodermico e profondo ed evapotraspirazione effettiva su tutta l'area della grid mask.

Il secondo ciclo, a partire dai risultati del ciclo precedente, propaga il deflusso profondo attraverso le celle dell'area del bacino, il terzo ciclo restituisce il deflusso ipodermico e superficiale (inclusa la portata in uscita dalla sezione di chiusura) e, infine, il quarto ciclo esegue il calcolo del bilancio di massa sull'intera area del bacino restituendo gli output sotto forma di file di testo facilmente consultabili anche tramite foglio elettronico.

Il tool In-STRHyM è dotato di un'interfaccia grafica che consente di guidare l'utente nell'inserimento dei dati in maniera intuitiva (fig. 4). Gli input vengono forniti attraverso dei push button che consentono di raggiungere la destinazione del file e di riportarla nelle rispettive line edit sotto forma di testo che, a sua volta, viene catturato dal programma richiamando il metodo creato ad hoc load\_Grid\_values, tramite cui avviene la trasformazione delle grid in matrici di dati. Le coordinate della sezione di chiusura possono essere inserite manualmente da tastiera oppure, attraverso una check box, è possibile attivarne la cattura automatica al clic del mouse su map canvas. Gli intervalli temporali possono essere definiti tramite le relative spin box o digitati direttamente da tastiera, mentre l'avvio vero e proprio dell'analisi avviene tramite il classico push button.

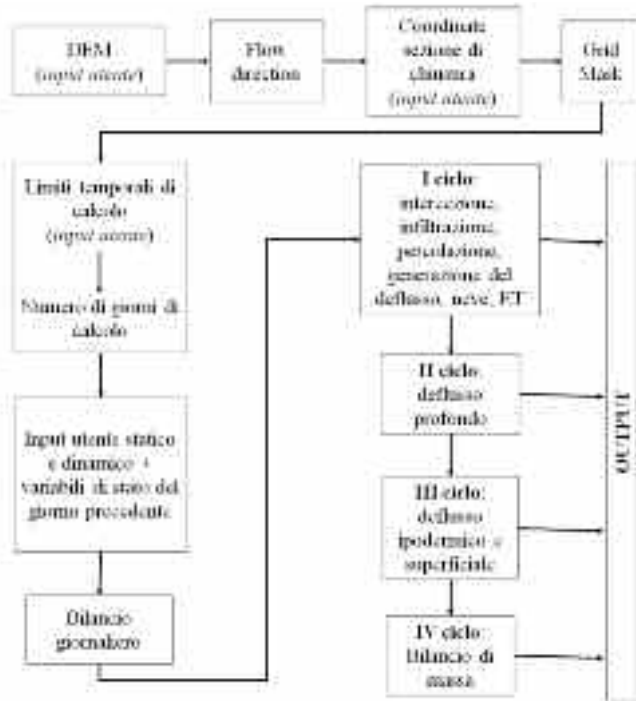
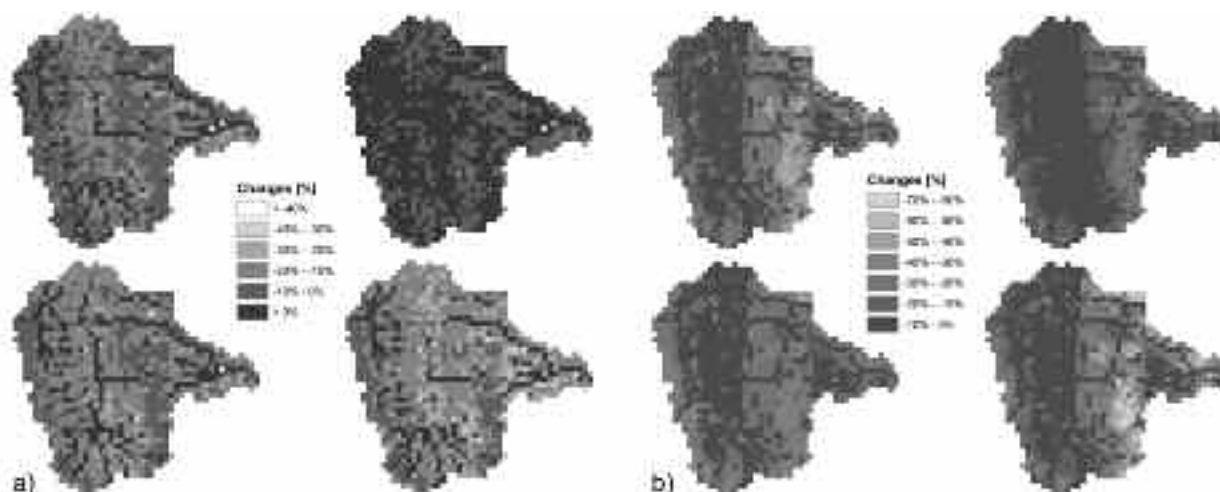


Figura 3. Schema a blocchi della procedura di calcolo del tool



Figura 4. Interfaccia grafica del tool In-STRHyM (versione alpha)

Al termine della simulazione le grid in output saranno rinominate con il nome della rispettiva grandezza più anno, mese e giorno relativo e saranno disponibili nella cartella di destinazione scelta dall'utente. Oltre al risultato del bilancio di massa ed alla portata nella sezione di chiusura, gli output sono costituiti dalle grid di tutte le grandezze idrologiche in esame, che possono essere utilizzate per successive analisi o per realizzare delle mappe tematiche della grandezza che si intende rappresentare. La figura 5 mostra un esempio di elaborazione dell'output distribuito di In-STRHyM nel contesto dell'analisi di previsione dell'impatto dei cambiamenti climatici sulla risorsa idrica. A partire dalle grid giornaliere di evapotraspirazione effettiva ed immagazzinamento in falda calcolate utilizzando come forzanti meteorologiche la precipitazione e la temperatura fornite da tre modelli climatici regionali (RCM) nel periodo di controllo 1961-1990 e nello scenario 2070-2099, sono state ricavate le mappe della distribuzione percentuale dei cambiamenti dell'evapotraspirazione effettiva e dell'immagazzinamento in falda annuale e stagionale sul bacino del Crati (per approfondimenti si rimanda a Senatore *et al.*, 2011).



**Figura 5.** Esempi di output distribuito del tool In-STRHyM: a) variazione percentuale dell'evapotraspirazione effettiva annuale e stagionale sul bacino del Crati chiuso in prossimità dell'invaso di Tarsia nel periodo 2070-2099 rispetto al periodo di controllo 1961-1990, considerando come input meteorologico gli scenari prodotti da tre diversi modelli climatici regionali (RCM); b) come a), la variabile considerata è l'immagazzinamento in falda (riadattato da Senatore *et al.*, 2011)

#### 4. Conclusioni

La modellazione distribuita fisicamente basata contribuisce in modo insostituibile alla comprensione dei processi idrologici e dei vari feedback tra i diversi compartimenti del ciclo idrologico terrestre, offrendo la possibilità di creare veri e propri laboratori virtuali. Studi relativi all'impatto sulla risorsa idrica del cambiamento climatico, come precedentemente mostrato, oppure di modifiche sostanziali nell'utilizzo del suolo (ad esempio, aumento o riduzione della percentuale di superficie boscata) sarebbero molto meno accurati o addirittura potrebbero fornire risultati opposti se non si tenesse in conto la naturale variabilità delle caratteristiche spaziali del territorio di un bacino idrografico.

Le caratteristiche peculiari del modello In-STRHyM, che pur seguendo un approccio distribuito non richiede capacità di calcolo particolarmente elevate per la sua esecuzione, lo rendono adatto ad analisi su lunghi periodi, quali ad esempio quelle su scenari di cambiamento climatico, ma anche per il monitoraggio e la previsione a scala stagionale della disponibilità della risorsa idrica (rischio siccità). Oltre allo sviluppo e rilascio del codice del modello in un tool disponibile in ambiente QGIS, i prossimi sviluppi prevedono l'individuazione di set di parametri calibrati per tutti i bacini calabresi per cui sono disponibili serie di portate osservate significative. Per ciascuno di questi bacini sarà possibile indagare nel dettaglio la composizione del bilancio idrologico, favorendo la comprensione dei processi di trasferimento tra i vari comparti ed agevolando e migliorando la gestione della risorsa idrica. Da questo punto di vista, il tool In-STRHyM si porrà come un supporto robusto, flessibile e di pratico utilizzo nell'analisi di scenari di rischio attuali e nelle previsioni di scenari futuri.

## Bibliografia

- Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P. E. and Rasmussen J., 1986, «An introduction to the European hydrological system - Système Hydrologique Européen "SHE"». 1: «History and philosophy of a physically based distributed modelling system», in *J. Hydrol.* 87, pp. 45-59.
- Allen R., Pereira L.S., Raes D. and Smith M., 1998, «Crop Evapotranspiration -Guidelines for Computing Crop Water Requirements», in *FAO Irrigation and Drainage Paper*, no 56, FAO, Rome.
- Beven K.J., 2002, «Towards a coherent philosophy for modelling the environment», in *Proc. R. Soc. London A*, 458, pp. 2465–2484.
- Crawford N.H. and Linsley R.K., 1962, «The synthesis of continuous streamflow hydrographs on a digital computer», *Technical Report 12, Department of Civil Engineering Stanford Univ.*, Palo Alto Calif.
- Dawdy D.R. and O'Donnell T., 1965, «Mathematical models of catchment behavior», in *J. Hydraul. Div.-ASCE, HY4*, 91, pp. 123-137.
- De Roo A.P.J., Wesseling C.G. and Van Deursen W.P.A., 2000, «Physically-based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model», in *Hydrol. Process*, 14, pp. 1981-1992.
- Dooge J.C., 1959, «A general theory of the unit hydrograph», in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 2, pp. 241–256.
- Freeze R.A. and Harlan R.L., 1969, «Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model», in *Journal of Hydrology*, 9, pp. 237-258.
- Grayson R.B., Moore I.D. and McMahon T.A., 1992, «Physically Based Hydrologic Modeling 1. A Terrain-Based Model for Investigative Purposes», in *Water Resour. Res.*, 28(10), pp. 2639-2658.
- Ivanov V.Y., Vivoni E.R., Bras R.L. and Entekhabi D., 2004a, «Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model», in *Water Resour. Res.*, 40(11), pp. W11102.
- Ivanov V.Y., Vivoni E.R., Bras R.L. and Entekhabi D., 2004b, «Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin hydrology: a fully-distributed physically-based approach», in *J. Hydrol.*, 298(1–4), pp. 80–111.
- Kristensen K.J. and Jensen S.E., 1975, «A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration», in *Nord. Hydrol.*, 6, pp. 70-88.
- Natale L. and Todini E., 1976, «A stable estimation for linear models - 1. Theoretical development and Monte-Carlo experiments», in *Water Resour. Res.*, 12., pp. 667-671.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. and King K. W., 2002, *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000*, Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service & Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas, pp. 58-65.
- Priestley C.H.B. and Taylor R.J., 1972, «On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters», in *Monthly Weather Review*, 100, pp. 81–92.
- Refsgaard J.C. and Storm B., 1995, MIKE SHE, in V. P. Singh (Ed.), *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, Chapter 23.
- Senatore A., Mendicino G., Smiatek G. and Kunstmann H., 2011, «Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in southern Italy», in *Journal of Hydrology*, 399(1-2), pp. 70-92.
- Todini E. and Ciarapica L., 2002. «The TOPKAPI model», in V.P. Singh, O.K. Frevert and S.P. Meyer (Eds.), *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, Chapter 12, pp. 471-506.
- Tomlinson R.F., 1972, *Geographical Data Handling*, International Geographical Union Commission on Geographical Data Sensing and Processing, Ottawa, Canada.
- Vertessy R.A., Hatton T.J., O'Shaughnessy P.J. and Jayasuriya M.D A., 1993, «Predicting water yield from a mountain ash forest using a terrain analysis based catchment model», in *Journal of Hydrology*, 150, pp. 665-700.
- Wesseling C.G., Karssenberg 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), pp. 40-48.

Wigmosta M.S., Vail L.W. and Lettenmaier D.P., 1994, «A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain», in *Water Resour. Res.*, 30, pp. 1665-1679.

Zhao R.J., Zhuang Y.L., Fang L.R., Liu X.R. and Zhang Q.S., 1980, «The Xinanjiang model», in *Proceedings of the Oxford Symposium*, IAHS AISH Publ. 129, pp. 351-356.