

## Calcolo del bilancio idrico della regione Sardegna con il modello idrologico SWAT

### Estimating the water balance of the Sardinian island using the hydrological SWAT model

P. Cau, A. Cadeddu, G. Lecca, C. Gallo e M. Marrocu

Servizio di Scienze Ambientali e dell'Imaging,  
Centro di Ricerca, Sviluppo e Studi Superiori in Sardegna (CRS4)  
Tel.: 070 9250281, Email: pierluigi.cau@crs4.it

#### Riassunto

Una diminuzione del 20% delle precipitazioni nell'ultimo trentennio e perdite del 40% nella rete di distribuzione hanno causato un sensibile abbassamento dei livelli idrici medi nei laghi e negli invasi artificiali della Sardegna, con la conseguenza che negli ultimi anni le municipalità, il comparto agricolo e quello industriale hanno subito le impopolari misure di razionamento. Fino ad oggi, gli enti regionali preposti alla gestione delle acque si sono serviti di modelli a scatola chiusa di tipo *black box*. Tuttavia da un lato appare incerta l'applicabilità di tali modelli in aree prive di misure e dall'altro tale approccio si dimostra carente nel tenere in conto le trasformazioni di uso del territorio e le variazioni climatiche. Questo studio presenta l'applicazione del modello idrologico distribuito e fisicamente basato SWAT per la stima del bilancio idrologico della regione Sardegna. La procedura di caratterizzazione del tipo e della copertura del suolo ha seguito un approccio regionale, utilizzando e valorizzando al massimo le frammentarie informazioni disponibili. Per compensare la mancanza di dati di pioggia a passo giornaliero, necessari al modello idrologico, è stato sviluppato un generatore di tempo basato sull'analisi statistica di dati climatici registrati. In base alla distribuzione spaziale delle grandezze statistiche, le stazioni pluviometriche sono state raggruppate in due gruppi. Lo studio ha prodotto una serie di archivi informatici a scala regionale, creati secondo i formati di input del modello SWAT. L'applicazione del modello ai bacini idrologici della Sardegna ha tenuto conto della qualità dell'informazione descrittiva del territorio come, ad esempio, la risoluzione spaziale delle carte di base, la densità delle reti climatiche e la qualità del dato di pioggia, al fine di garantire la massima verosimiglianza del modello concettuale con le singole realtà in studio. Il sistema informatico è stato progettato ed implementato per supportare studi ed analisi mirati alla pianificazione della gestione della risorsa idrica regionale, all'individuazione di aree soggette a stress idrico e allo studio di fenomeni legati al ciclo dell'acqua, quali il ciclo dei sedimenti e dei nutrienti.

**Parole Chiave:** modelli numerici, bilancio idrologico, SWAT, Sardegna.

#### Abstract

A 20% rainfall decrease in the last 30 years, prolonged periods of drought and 40% losses in the distribution pipes have substantially lowered available water reserves in Sardinia, with the result of unpopular rationing measures on municipal, industrial and agricultural uses. Up to now black-box models have been the most commonly used methodologies to estimate the regional water budget. Despite their wide use, these models have shown severe limitations in estimating watershed outlet outputs far from the monitoring stations and in covering climate changes properly. In this study, we present the application of the hydrological distributed SWAT model to evaluate the water budget at the regional scale. The model parameterizations with regards to the land cover and soil type are estimated at the regional scale on the basis of available geographic data. In order to generate weather daily inputs for the SWAT model a weather generator has been developed on the basis of a statistical analysis of the Sardinian climatic data. Through a clusterization procedure the climatic gages have been grouped into two homogeneous groups. The regional databases have been formatted in the SWAT fashion. The resulting model input data along with the watershed and HRU spatial discretization criteria have been carefully checked to ensure global consistency at the overall scale. The informatics system has been developed and designed to support decision related to the management of the water resources, to identify areas under water stress, or to evaluate complementary phenomena related to the water cycle as the sediment and the nutrient fate at the catchment's scale.

**Keywords:** numerical models, water balance, SWAT, Sardinia.

#### 1. Introduzione

I modelli idrologici hanno raggiunto un grado di sofisticazione e accuratezza molto elevato e le loro potenzialità predittive e descrittive dipendono in gran misura dalla potenza degli attuali strumenti di calcolo e dalla disponibilità di dati ambientali alla scala di riferimento. Il loro utilizzo comporta un importante investimento iniziale sia in termini di acquisizione di dati che di sviluppo di un approccio multidisciplinare allo studio. A scala di bacino le differenti tipologie di dati relative a suolo, sottosuolo, e atmosfera provenienti da misure in situ o da satellite, devono essere combinate in modo ottimale con i modelli idrologici di nuova generazione per ottenere previsioni modellistiche significative.

In questa nota si descrive lo sviluppo e l'applicazione di una procedura informatica automatizzata per la stima delle componenti del bilancio idrologico della regione Sardegna basata sul modello SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

[Neitsch et al., 2001]. La procedura è applicabile, mediante l'interfaccia GIS AVSWAT 2000, a qualunque bacino o gruppo di bacini fino ad ottenere la stima integrata del bilancio idrologico esteso all'intera regione.

A scala regionale la descrizione dettagliata del tipo di suolo e del suo utilizzo e la distribuzione spazio-temporale del campo di precipitazione e di temperatura sono di fondamentale importanza per quantificare la disponibilità della risorsa idrica e valutare gli effetti del trasporto di inquinanti provenienti da fonti diffuse e puntuali. Il modello SWAT fornisce una descrizione dettagliata, mediante equazioni empiriche, dei processi fisici che governano le interazioni atmosfera - superficie terrestre - sottosuolo, vale a dire: la partizione della precipitazione in infiltrazione e ruscellamento, il rapporto tra evaporazione potenziale e reale e la suddivisione dell'acqua tra superficie, suolo, acquifero sottostante e corpi idrici superficiali.

Parte della ricerca è rivolta allo sviluppo, integrazione e adattamento del modello idrologico con i dati ambientali distribuiti del sistema in studio in modo da realizzare una integrazione dinamicamente consistente. L'altra parte è focalizzata, invece, sullo sviluppo di un'accurata parametrizzazione fisica, sulla verifica della consistenza della distribuzione spazio-temporale delle reti termo-pluviometriche e sulla definizione del grado di incertezza dei diversi dati utilizzati per evidenziare il campo di applicazione delle elaborazioni e del modello ed analizzare in maniera critica punti di forza, limiti e le incertezze. In particolare, non disponendo di serie storiche complete di piogge a passo temporale giornaliero, è stata sviluppata una procedura per disaggregare a passo temporale giornaliero i dati pluviometrici mensili [Cau et al., 2002]. Il bilancio idrico è stato calcolato in condizioni di naturalità senza tener conto di estrazioni e prelievi d'acqua per uso agricolo, industriale e civile, di scarichi e/o apporti idrici derivanti dalle suddette attività, di eventuali trasferimenti di risorsa idrica, dei programmi di gestione degli invasi ecc., in quanto non si disponeva di tale tipo di informazione. Questo è senza dubbio un limite del presente lavoro, che non riguarda peraltro né la metodologia né il sistema informatico ma soltanto i dati di input. Pur con questa limitazione lo strumento implementato risulta in grado di fornire indicazioni preziose sullo stato quantitativo naturale dei diversi corpi idrici del territorio Sardo, e ciò rappresenta un utile termine di paragone rispetto al quale analizzare gli effetti e impatti di usi alternativi del territorio e di programmi di gestione della risorsa idrica.

## 2. Descrizione del modello idrologico

SWAT è un modello idrologico distribuito a scala di bacino, sviluppato dall'USDA Agricultural Research Service (ARS). Sebbene i processi fisici modellizzati da SWAT siano molteplici, nella presente nota si è preso in esame esclusivamente il bilancio idrologico tralasciando tutti gli altri processi collegati quali ad esempio il trasporto di nutrienti (fosfati e nitrati). Tuttavia, è importante rilevare che le schematizzazioni fatte valgono indipendentemente dal processo fisico che di volta in volta si prende in considerazione ovvero sono di validità generale dal momento che il ciclo dell'acqua è quel processo a cui tutti gli altri risultano essere vincolati. Nel seguito si riportano solo le equazioni principali del modello e si rimanda alla documentazione ufficiale di SWAT per gli approfondimenti. L'equazione del bilancio dell'acqua è sintetizzata dalla seguente relazione:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_{sup,i} - ET_i - W_i - Q_{gw,i}) \quad (1)$$

dove  $SW_t$  è il contenuto finale di acqua del suolo,  $SW_0$  è il contenuto iniziale di acqua del suolo,  $t$  è il tempo espresso in giorni,  $R_i$  è l'afflusso meteorico,  $Q_{sup,i}$  è il ruscellamento,  $ET_i$  è l'evapotraspirazione,  $W_i$  è la percolazione e  $Q_{gw,i}$  è l'ammontare d'acqua che una volta attraversato lo strato di suolo arriva al canale. Tutti i termini del bilancio qui e nel seguito, se non diversamente specificato, sono espressi in millimetri d'acqua equivalenti.

Nel calcolo si fa riferimento all'evapotraspirazione effettiva sulla base dell'evapotraspirazione potenziale. Questa può essere calcolata tramite i metodi di Hargreaves, Penman-Monteith e Priestley-Taylor. Valutata l'evapotraspirazione potenziale, quella effettiva viene suddivisa dal modello nei seguenti contributi parziali: evaporazione dell'acqua intercettata dalle piante e perdita per traspirazione, sublimazione ed evaporazione dal suolo.

Per il calcolo del ruscellamento si fa riferimento a due metodi: il metodo dell'infiltrazione di Green & Ampt [Green & Ampt, 1911] e il metodo del *curve-number* [USDA Soil Conservation Service, 1972] riportato nell'equazione (2).

$$Q_{sup} = \frac{(R - I_a)^2}{(R - I_a + S)} \quad \text{con} \quad S = 25.4 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

dove  $Q_{sup}$  è la porzione di pioggia che si trasforma in ruscellamento,  $R$  è l'altezza di pioggia del giorno,  $I_a$  è la perdita iniziale,  $S$  è il parametro di ritenzione, che esprime il massimo volume specifico d'acqua che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione e  $CN$  è il *curve number* funzione del tipo e dell'uso del suolo.

L'acqua nel suolo può essere assorbita dalle piante, rimossa per evaporazione e percolare negli strati più profondi per ricaricare l'acquifero. Alle nostre latitudini, i primi due termini predominano rispetto all'ultimo. Le caratteristiche del suolo, come tessitura, contenuto di argilla, dimensioni dei vuoti, ecc., hanno un effetto fondamentale sulle dinamiche con cui l'acqua si muove in esso. Le dimensioni dei vuoti, ad esempio, controllano i processi di drenaggio durante e dopo gli eventi di pioggia, l'aerazione del suolo, il movimento dell'acqua anche quando i macropori ( $> x \mu m$ ) sono ormai privi d'acqua e la ritenzione idrica. Per definire le proprietà del suolo si fa riferimento ai termini capacità di campo (FC) e il punto di appassimento (WP) direttamente correlati alle dimensioni dei vuoti.

Il termine di percolazione è calcolato in SWAT tramite l'equazione:

$$W = SW_{\text{excess}} \cdot \left( 1 + \exp \left[ \frac{-\Delta t}{TT_{\text{perc}}} \right] \right) \quad \text{con} \quad TT_{\text{perc}} = \frac{SAT - FC}{K_{\text{sat}}} \quad (3)$$

dove  $SW_{\text{excess}} = SW - FC$  se  $SW > FC$   
e  $SW_{\text{excess}} = 0$  se  $SW < FC$

Nell'equazione (3) per ogni strato di suolo  $SW_{\text{excess}}$  è l'acqua drenata giornalmente,  $SW$  è il volume d'acqua giornaliera dello strato che può essere drenata,  $FC$  è il contenuto d'acqua alla capacità di campo,  $\Delta t$  è il passo temporale,  $TT_{\text{perc}}$  [ora] è il tempo necessario ad attraversare lo strato di suolo,  $SAT$  è l'ammontare d'acqua presente nel terreno quando questo è completamente saturo e  $K_{\text{sat}}$  è la conducibilità idraulica in condizione di saturazione [mm/ora].

La componente di base che ricarica il canale è calcolata tramite la seguente relazione:

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-a_{gw} \cdot \Delta t] + W_{rch,i} \cdot (1 - \exp[-a_{gw} \cdot \Delta t]) \quad (4)$$

$$W_{rch,i} = W_i \cdot \left( 1 - \exp \left[ -\frac{1}{d_{gw}} \right] \right) + W_{rch,i-1} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{d_{gw}} \right] \quad (5)$$

dove  $a_{gw}$  è la costante di esaurimento,  $\Delta t$  è il passo temporale,  $W_{rch}$  la ricarica della falda e  $d_{gw}$  è il ritardo con il quale l'acqua drenata dallo strato superiore diviene effettivamente ricarica. La stima della costante di esaurimento può essere effettuata analizzando i valori di deflusso durante i periodi di assenza di pioggia nel bacino, infatti quando l'acquifero non riceve alcuna ricarica l'equazione (4) diviene:

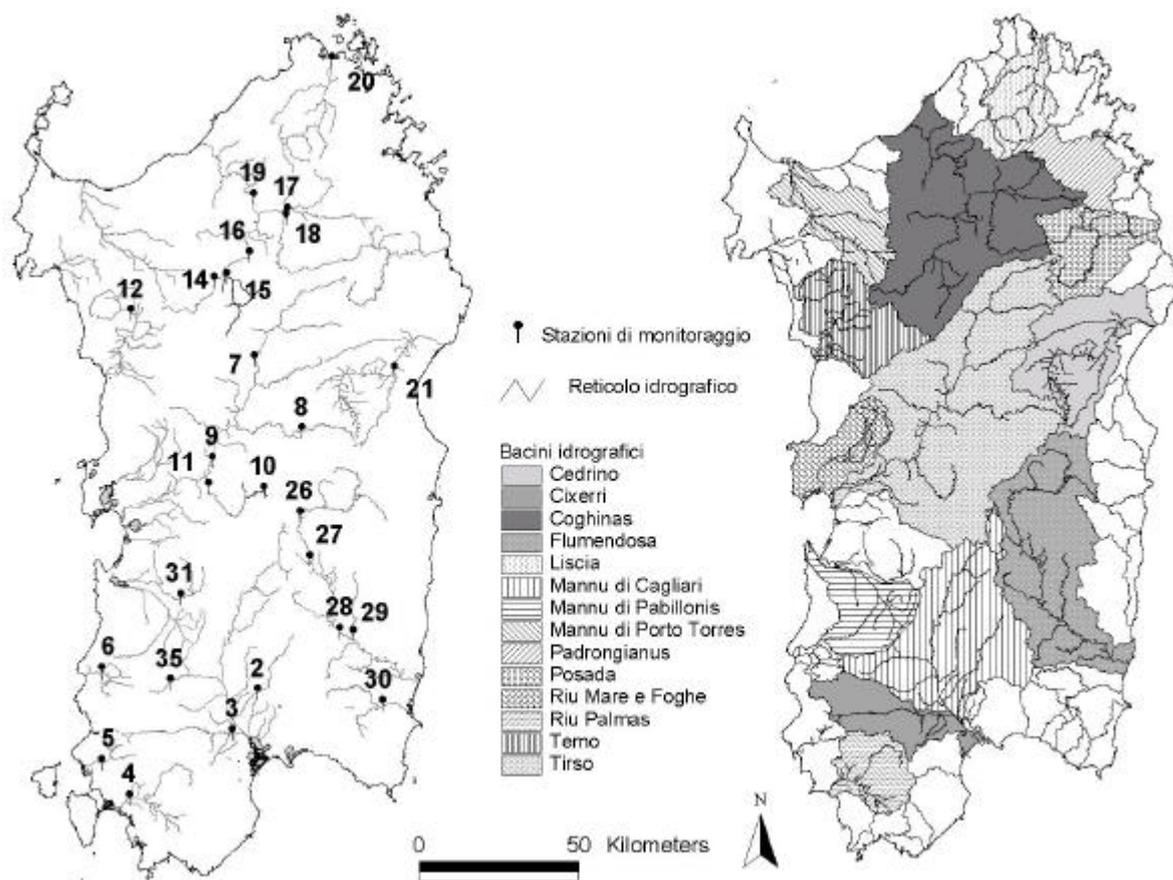
$$Q_{gw,i} = Q_{gw,0} \cdot \exp[-a_{gw} \cdot t] \quad (6)$$

dove  $Q_{gw,0}$  è la ricarica di falda all'inizio del periodo di esaurimento ( $t=0$ ) e  $t$  (espresso in giorni) è l'intervallo di tempo dall'inizio di tale periodo.

### 3. Descrizione del territorio

La Sardegna si estende per 24.000 km<sup>2</sup>, con un territorio ricco di ecosistemi, paesaggi e realtà storiche (Figura 1). I rilievi della Sardegna sono totalmente estranei a quelli di qualsiasi altra parte d'Italia. I movimenti della crosta terrestre avvenuti durante l'era terziaria, hanno condizionato i sistemi montuosi dell'isola, determinando la formazione di massicci isolati derivati dalle fratturazioni dei preesistenti rilievi. La morfologia del territorio regionale è caratterizzata principalmente da distese collinari (67,9% del territorio) e pianure (18,5%), cosicché le aree montane corrispondono al restante 13,6% della superficie insulare con un'altitudine media che non supera i 500 metri. Nell'isola non si ritrova un andamento unitario nei rilievi. La parte nord-ovest dell'isola è caratterizzata da affioramenti granitici. La cima più alta in questa zona è il Monte Limbara (1362 m s. l. m.) ai piedi del quale nasce il fiume Coghinas, che dà il nome alla vallata e all'omonimo lago. A sud di questo monte comincia una catena di altopiani che attraversa diagonalmente l'isola e si interrompe nella zona centrale. Verso sud, tra Macomer e Oristano, incontriamo il massiccio montuoso dei Monti Ferru (1050 m) di origine vulcanica, a sud del quale scorre il fiume Tirso nell'omonima vallata. Questo fiume, con i suoi 159 km di lunghezza e un bacino di oltre 3300 km<sup>2</sup>, è il più lungo e importante della Sardegna. Sul lato Nord-orientale dell'isola, superato l'altopiano del Goceano, si ritrova l'altopiano calcareo del Supramonte. Più a sud arriviamo alla zona montuosa più alta della Sardegna: il Gennargentu, la cui cima più alta è Punta la Marmora (1.834 m) sui cui versanti si affacciano i bacini idrografici del Flumendosa e del Cedrino.

Superata la parte montuosa, riprendono gli altopiani questa volta calcarei e aridi che raccolgono le acque piovane in fiumi e laghi sotterranei. Nella regione centro occidentale dell'isola, a sud del Monti Ferru fino al Golfo di Cagliari, si estende la pianura del Campidano. Essa è delimitata da altopiani di origine vulcanica detti Giare. La distribuzione irregolare dei rilievi, di altopiani e pianure è all'origine di una idrografia frammentata, povera di fiumi importanti. Conseguenza di un regime idrologico marittimo, tipico del Mediterraneo, il regime dei corsi d'acqua è fortemente variabile. I fiumi sardi hanno carattere torrentizio, con piene primaverili alle quali si contrappongono magre estive anche assolute. I fiumi più importanti dell'isola sono il Tirso, il Coghinas, e il Flumendosa, con portate medie annue nel settantennio 1922-1992, di 14,0, 15,5 e 12,7 mc/s rispettivamente. La regione è sottoposta all'influsso di due determinanti correnti d'aria: alla fine dell'autunno prevalgono i venti temperati e umidi provenienti dall'Atlantico, cioè da nord-ovest, e all'inizio della primavera quelli caldi e asciutti provenienti dall'Africa. Le temperature hanno medie abbastanza contenute, sia estive sia invernali; la media annua si aggira in quasi tutta la regione tra 14 e 18 °C. Le temperature estive più elevate (medie sui 30 °C) si registrano in alcune aree interne (con massimi anche superiori a 40 °C), mentre nelle fasce costiere si aggirano sui 24 °C; le medie invernali sono di 9-10 °C sulle coste, ma scendono anche sotto 0 °C sulle sommità del Gennargentu.



**Figura 1.** Si mostra l'idrografia superficiale e la rete di monitoraggio delle portate della Sardegna (sinistra) e i bacini idrografici in studio (destra).

#### 4. Implementazione del modello

Nel presente studio la scala spaziale di riferimento è il bacino idrografico. La regione Sardegna è formata da oltre 300 bacini di superficie variabile da qualche ettaro a più di 336.500 ha (bacino del Tirso). La grande ricchezza dei suoli, delle coperture vegetali e la complessità dei paesaggi rendono ognuno dei bacini una realtà a sé stante. Prima di implementare la procedura di calcolo del bilancio è stato eseguito uno studio di dettaglio su ognuno dei bacini d'interesse al fine di costruire un modello concettuale a scala locale. Partendo da informazioni geo-morfologiche è stata definita l'articolazione del reticolo idrografico, ossia il numero e l'estensione dei sottobacini afferenti al bacino di studio. La suddivisione del bacino principale in sottobacini determina quali stazioni termo-pluviometriche afferiscono al singolo sottobacino, condizionando in tal modo la distribuzione spazio-temporale degli afflussi e il regime delle temperature. Nel presente lavoro si è scelta un'area minima drenante di 4000 ha considerando che la geomorfologia è basata su un modello digitale del terreno a passo di cella di 400 m. Questo valore soglia è stato, in alcuni casi, diminuito per tenere conto di elementi geografici quali invasi, traverse e stazioni di monitoraggio. Per ogni sottobacino sono state analizzate le principali classi di copertura e di tipo di suolo per definire le unità idrologiche di riferimento (Hydrologic Response Unit, HRU). Ogni HRU rappresenta quella porzione elementare del sottobacino caratterizzata da una medesima combinazione di tipo ed uso del suolo e per la quale si effettua la valutazione di tutte le componenti dell'equazione di bilancio. L'algoritmo scelto per rappresentare l'uso e il tipo di suolo del sottobacino è quello che associa a quest'ultimo la combinazione predominante (*dominant land use and soil*) tra quelle presenti nel sottobacino stesso.

Nel seguito si descrivono in dettaglio le parametrizzazioni adottate per il clima e il suolo della regione Sardegna.

##### 4.1 Caratterizzazione climatologica

Il motore di tutti gli eventi meteorologici è la distribuzione non uniforme della radiazione solare che ha come effetto principale quello di far variare la temperatura dell'aria. Quest'ultima è soggetta sia a variazioni temporali che spaziali. Per quanto riguarda le prime, come è noto, la temperatura cresce durante il giorno per poi diminuire nella notte, l'entità di questa fluttuazione varia a seconda che ci sia o meno una copertura dovuta alla presenza delle nuvole ed in particolare si nota come la presenza di queste ne determini un'attenuazione. La variabilità spaziale si scompone in quella orizzontale e verticale. Nel primo caso si intende l'andamento delle isoterme che seguono grosso modo quello dei paralleli con deviazioni in corrispondenza delle terre emerse, mentre nel secondo caso si fa riferimento alla

variazione di temperatura con la distanza dal suolo, rappresentata da una legge di tipo lineare con punti di discontinuità a partire dai quali si manifestano delle inversioni di tendenza. La corretta descrizione della variabilità spaziale delle temperature è alla base della corretta stima dell'evapotraspirazione potenziale/reale. Per sopperire alla lacuna conoscitiva legata alla indisponibilità di serie storiche di temperature giornaliere complete, è stata condotta un'analisi statistica dei dati di temperatura disponibili, e si è utilizzato il modello SWAT per simulare, tramite una distribuzione normale, i campi di temperatura. I dati utilizzati sono costituiti dalle temperature massime e minime su base giornaliera relative al periodo 1951-1992. I periodi di osservazione differiscono per ciascun ente gestore delle reti di monitoraggio. L'Aeronautica Militare fornisce il periodo più lungo (1951-1992) ma solo su 21 stazioni. Il numero maggiore di stazioni (263 stazioni in Italia) appartiene, invece, alla rete del Ministero dei Lavori Pubblici che copre il periodo 1951-1968. Per quanto attiene alla precipitazione, il modello SWAT accetta in ingresso misure cumulate su base giornaliera nelle stazioni pluviometriche di pertinenza del bacino oppure, in assenza di dati misurati, genera serie sintetiche attraverso un generatore di tempo (*weather generator*). I parametri di input del generatore descrivono la statistica della distribuzione della precipitazione giornaliera su base mensile: valor medio, deviazione standard, coefficiente di asimmetria, ecc.. Vista l'importanza fondamentale di questa componente del bilancio idrologico abbiamo scelto di svincolarci dal generatore di SWAT e di sviluppare ex-novo un generatore di tempo più flessibile i cui risultati fossero direttamente verificabili. Le banche dati di pioggia a nostra disposizione sono costituite da: 1) le serie giornaliere incomplete su un numero esiguo di stazioni delle reti pluviometriche del Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste, dell'Aeronautica Militare e del Ministero dei Lavori Pubblici del periodo 1951-1992, 2) le serie registrate mensili incomplete dello Studio per l'Idrografia Superficiale della Sardegna (SISS) [Cao et al., 1998] del periodo 1922-1992 e 3) le serie complete delle altezze di precipitazione mensile del SISS del periodo 1922-1992. Solo l'ultima delle tre serie è completa nel senso che è stata integrata mediante regressioni nei dati mancanti [Cao et al., 1998]. Gli indicatori statistici necessari ad alimentare il nuovo generatore di tempo sono stati estratti dalla prima serie a passo giornaliero e, attraverso una procedura di disaggregazione temporale, sono state generate serie sintetiche di pioggia su base giornaliera che soddisfacevano al requisito di avere i cumulati mensili uguali a quelli della terza serie registrata.

#### 4.1.1 Disaggregazione dei dati mensili

Per realizzare la disaggregazione a scala giornaliera dei dati mensili di precipitazione sono state esaminate diverse alternative [Koutsoyiannis and Xanthopoulos 1990, Mehrotra and Singh 1998, Bindlish and Barros 2000, De Groen and Savenije 2000, Margulis and Entekhabi 2001]. L'approccio scelto, in quanto più adatto rispetto alle informazioni disponibili, è una variante del modello proposto da De Groen e Savenije (2000) basato sulle catene di Markov. Tale approccio è, del resto, simile a quello che viene usato dal generatore interno di SWAT [Nicks, 1974]. È stato costruito un generatore di tempo basato su una catena di Markov asimmetrica. Esso si compone di due fasi: la prima utilizza una catena di Markov del primo ordine per definire se un giorno è piovoso oppure secco e la seconda, se il giorno in esame risulta piovoso, genera la quantità di precipitazione applicando una funzione di distribuzione statistica asimmetrica. In accordo con il modello a catena di Markov del primo ordine, la probabilità di pioggia in un certo giorno è condizionata dal verificarsi di pioggia/non pioggia nel giorno precedente, tenendo presente che un giorno viene definito piovoso se la quantità di precipitazione supera 2 mm. Per la generazione delle serie di precipitazione sono richiesti in ingresso per ogni mese dell'anno i due valori della probabilità che il giorno  $i$  sia piovoso dato il giorno  $i-1$  piovoso  $P(W/W)$  e della probabilità che il giorno  $i$  sia piovoso dato il giorno  $i-1$  secco  $P(D/W)$ . Definite queste due probabilità, per decidere se un dato giorno della sequenza sintetica sia piovoso o secco si utilizza il seguente algoritmo:

1. si inizializza il generatore di numeri casuali;
2. si memorizza lo stato di pioggia o non pioggia del giorno precedente;
3. si estrae un numero casuale  $r_0$  fra 0 e 1;
4. se il giorno precedente è piovoso e  $r_0 < P(W/W)$  il giorno corrente viene considerato piovoso o altrimenti secco;
5. se, invece, il giorno precedente è secco e  $r_0 < P(D/W)$  il giorno corrente viene considerato piovoso o altrimenti secco.

La distribuzione asimmetrica proposta da Nick (1974), che si basa a sua volta su quella usata da Fiering (1967), viene utilizzata per definire le quantità d'acqua di ogni giorno piovoso secondo la formula:

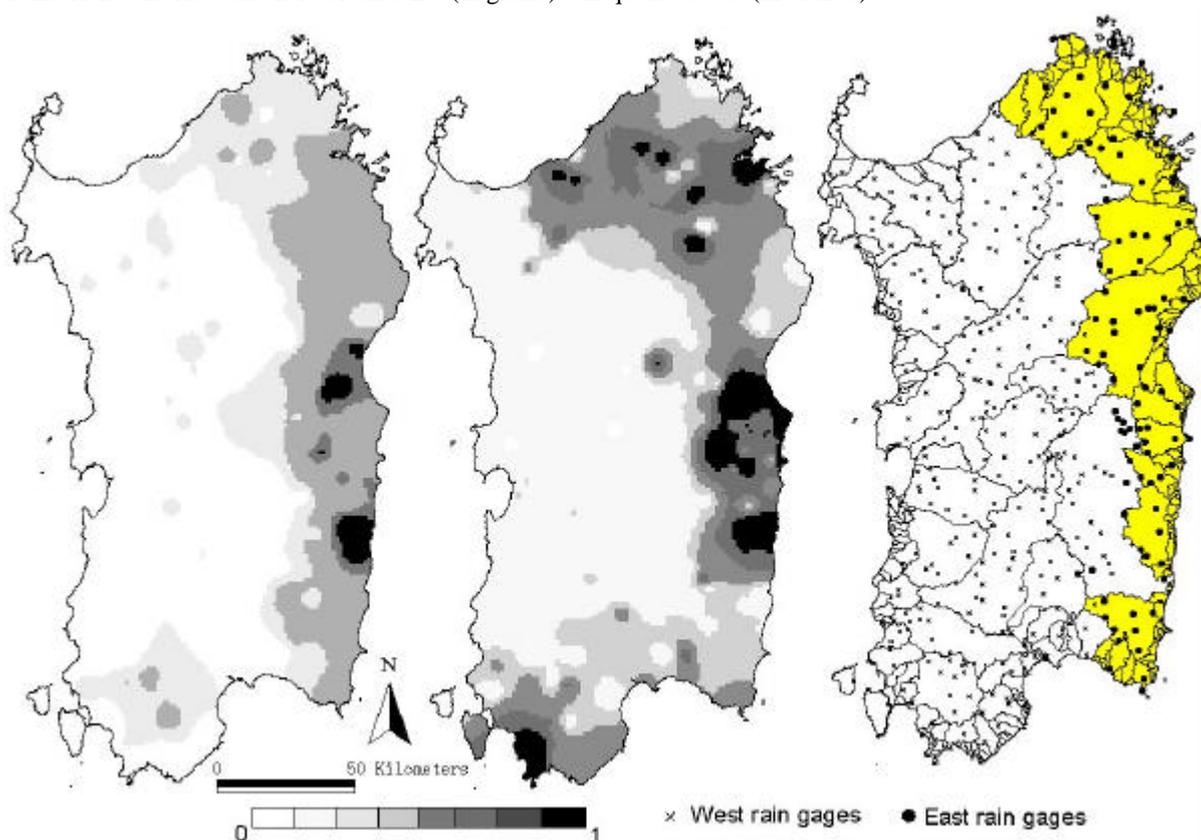
$$R = m + 2 \cdot s \cdot \left\{ \frac{\left[ \left( \left( SND - \frac{g}{6} \right) \cdot \left( \frac{g}{6} \right) + 1 \right)^3 - 1 \right]}{g} \right\} \quad (7)$$

dove  $R$  è la quantità di pioggia per un dato giorno,  $m$  è la media,  $s$  è la deviazione standard e  $g$  è la coefficiente di asimmetria della pioggia giornaliera per il mese in corso. Il parametro giornaliero  $SND$  è calcolato come segue:

$$SND = \cos(6.283 \cdot r_2) \cdot \sqrt{\ln(r_1)} \quad (8)$$

con  $r_1$  e  $r_2$  numeri casuali compresi fra 0 e 1. Diversamente dal generatore interno di SWAT, la nuova procedura proposta impone che il cumulato mensile di pioggia rispetti i valori mensili registrati nelle stazioni pluviometriche. La coerenza tra i cumulati è ottenuta moltiplicando i valori simulati di pioggia giornaliera per un fattore ottenuto dal rapporto tra il cumulato registrato e quello simulato nello stesso mese.

Al fine di correlare spazialmente le stazioni pluviometriche in modo tale che siano interessate dagli stessi eventi di pioggia, queste sono state raggruppate in due gruppi (stazioni che ricadono sul versante Est - *East rain gages* e stazioni che ricadono sul versante Ovest - *West rain gages* dell'isola). I parametri utilizzati per la regionalizzazione sono i valori della deviazione standard e della coefficiente di asimmetria giornalieri per ogni mese valutati per tutte le stazioni pluviometriche per le quali si disponeva di almeno l'80% dei dati nel ventennio 1972-1991. In Figura 2 si riporta la distribuzione spaziale dei valori dei parametri statistici deviazione standard (sinistra) e coefficiente di asimmetria (centro) per il mese di Febbraio nel ventennio. A destra della stessa figura si evidenziano invece le stazioni pluviometriche che ricadono nel versante Est (in giallo) e in quello Ovest (in bianco).



**Figura 2.** Clusterizzazione dei bacini idrografici della Sardegna nei due gruppi: stazioni del versante Ovest - *West rain gages* e del versante Est - *East rain gages* (destra) sulla base dei parametri statistici normalizzati della precipitazione giornaliera nel mese di Febbraio: deviazione standard (sinistra) e coefficiente di asimmetria (centro).

#### 4.2 Parametrizzazione del tipo e uso del suolo

Le caratteristiche dei suoli (geometria, tipo e uso del suolo) influenzano la fase terrestre del ciclo idrologico con un impatto diretto sui fenomeni di ruscellamento superficiale, evapotraspirazione, infiltrazione e percolazione dell'acqua negli strati acquiferi profondi. I dati del suolo usati da SWAT sono suddivisi in due classi: caratteristiche fisiche e chimiche. Queste ultime, di tipo opzionale, vengono usate per definire lo stato qualitativo iniziale della risorsa ossia livelli iniziali di concentrazione dei nutrienti nel suolo e non sono state utilizzate nel presente studio quantitativo. I parametri fisici dei suoli di interesse per il calcolo del bilancio idrico sono la caratterizzazione del gruppo idrologico del suolo (A, B, C e D), la profondità massima delle radici nel profilo del suolo, il numero di orizzonti del profilo e per ciascuno di essi la tessitura, la profondità dalla superficie topografica alla base, la densità apparente, la capacità di campo, la conducibilità idraulica a saturazione, il contenuto di argilla, sabbia, limo, e scheletro roccioso e l'albedo.

Il censimento, la catalogazione e l'analisi delle informazioni e dati provenienti da studi geopedologici precedenti [Arangino, et al., 1986; Aru et al., 1991; Costantini et al., 1999; Montanarella, 1999; Righini et al., 2001] ha dato origine ad una base di dati (DB) geo-pedologica [Cadeddu e Lecca, 2003] finalizzata ad essere interfacciata direttamente al modello SWAT. I parametri fisici dei suoli della Sardegna sono stati derivati principalmente da 40 profili caratteristici, descritti secondo gli standard FAO e US Soil Taxonomy, che ricadono all'interno del territorio sardo [Arangino et al., 1986]. I dati che si riferiscono alle schede dei profili caratteristici contengono informazioni riguardanti il sito (località, comune, provincia, quota), la morfologia, il substrato, e le caratteristiche di pietrosità,

rocciosità, drenaggio e uso del suolo. Per ciascun orizzonte del profilo vengono inoltre fornite le determinazioni analitiche della profondità dal piano di campagna, tessitura (percentuale di sabbia, limo e argilla), percentuali di calcare totale ( $\text{CaCO}_3$ ), di carbonio organico, di sostanza organica e di azoto, il pH e la capacità di scambio cationico (CSC). Questi dati sono stati integrati mediante l'utilizzo di funzioni classiche di pedo-trasferimento [Saxton et al., 1986] tramite le quali sono stati ricavati parametri mancanti, quali ad esempio la capacità di campo e la conducibilità idraulica a saturazione, a partire dalle caratteristiche tessiturali dei terreni (contenuto di sabbia, argilla). I parametri così determinati sono stati, infine, confrontati, al fine di evidenziare eventuali anomalie, con quelli di suoli aventi la stessa classificazione pedologica (sottogruppo USDA) presenti nel data base americano State Soil Geographic (STATSGO) [1994] facente parte della distribuzione standard degli strumenti associati a SWAT. Per la mappatura cartografica è stata utilizzata una carta geo-pedologica vettoriale a bassa risoluzione spaziale (1:250000) in cui ognuno degli elementi cartografici, rappresentanti paesaggi omogenei, risulta associato alla combinazione di uno o più profili caratteristici, con la corrispondente parametrizzazione. Si è realizzato così un geo-database relazionale, direttamente interfacciabile al modello idrologico SWAT, ma utilizzabile anche per altre applicazioni modellistiche ed analisi di dati ambientali, in quanto pensato come un sistema informativo geografico indipendente dal modello idrologico.

Anche la copertura del suolo riveste un'influenza fondamentale sul ciclo dell'acqua in quanto la pioggia viene intercettata dalla vegetazione prima di arrivare al suolo. L'effetto di protezione è funzione principalmente del tipo di vegetazione. La mappatura cartografica dell'uso del suolo è stata realizzata con la carta CORINE (1:100000) [Cumer, 1999]. La parametrizzazione associata alle varie classi di copertura del suolo è quella del database interno a SWAT [Kiniry et al., 1991, Kiniry et al., 1995, Neitcsh et al., 2000] ed è stata ipotizzata assegnata e pertanto non soggetta alla fase di calibrazione. In quest'ipotesi, l'incertezza insita nella parametrizzazione adottata è legata solo alla risoluzione della scala della mappa CORINE avente una superficie minima cartografabile corrispondente a 25 ettari (quadrato di 5 mm di lato). Inoltre, non avendo dati sulle variazioni dell'uso del suolo avvenute nel settantennio preso in esame (1922-1992), si è ipotizzato che la distribuzione spaziale della copertura del suolo sia rimasta inalterata durante tale intervallo di tempo. Tale assunzione introduce nel sistema un certo grado di approssimazione se si considera che in Sardegna migliaia di ettari di vegetazione vengono persi ogni anno solo a causa degli incendi.

## **5. Risultati**

Nel seguito si mostrano i principali risultati dello studio descrivendo l'analisi dell'incertezza introdotta dall'uso di serie sintetiche, la calibrazione del modello e la stima delle componenti del bilancio idrologico.

### **5.1 Incertezze introdotte dall'uso delle serie sintetiche**

Le serie sintetiche di precipitazione sono state generate utilizzando i parametri statistici mensili ottenuti dai dati giornalieri registrati relativi al periodo 1972-1991. Al fine di verificare la validità dell'implementazione e la potenziale estensione della procedura ad anni in cui non si dispone di dati di precipitazione giornaliera, la fase di valutazione delle prestazioni del modello è stata eseguita anche in riferimento a periodi diversi. In particolare è stato simulato, per tutto il periodo 1922-1992, il ciclo dell'acqua in riferimento a 14 bacini idrografici della Sardegna (Figura 1) per i quali si disponeva delle serie storiche relative alle stazioni di misurazione delle portate. Per validare la procedura di disaggregazione temporale e l'ipotesi di regionalizzazione della distribuzione degli eventi di pioggia sono stati confrontati i risultati ottenuti a partire dalle piogge giornaliere registrate (serie 1) e da quelle sintetiche (serie 2). Si è scelto di verificare l'algoritmo di disaggregazione sul bacino del Coghinas, poiché è l'unico con più di una stazione pluviometrica al suo interno avente serie storiche giornaliere complete. L'incertezza introdotta dall'utilizzo della serie sintetica è stata valutata considerando come variabili di controllo i deflussi mensili e annuali simulati del decennio 1960-1970. In Figura 3 si riportano i deflussi medi annui del bacino del Coghinas simulati a partire dalle serie registrate di pioggia giornaliera (linea tratteggiata e pallini vuoti) e dalle corrispondenti serie sintetiche (linea continua con triangoli pieni). In termini quantitativi l'incertezza nella stima dei deflussi varia tra 0.6 e 11% che denota una buona concordanza tra i due risultati.



**Figura 3.** Bacino del Coghinas: confronto tra deflussi annuali simulati a partire dalle serie registrate di pioggia giornaliera (linea tratteggiata e pallini vuoti) e dalle corrispondenti serie sintetiche (linea continua con triangoli pieni). Si mostra anche la serie storica degli afflussi annuali ragguagliati (linea continua con quadrati pieni).

Al fine di quantificare anche su base mensile tali incertezze, per ogni mese dell'anno del periodo in studio, è stato valutato il coefficiente di Nash-Sutcliffe:

$$K_{Nash-Sutcliffe} = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^{anni} (X_{1,i} - X_{2,i})^2}{\sum_{i=1}^{anni} (X_{1,i} - \bar{X}_1)^2} \right) \quad (9)$$

dove  $X_{1,i}$  è il valore del deflusso simulato con le piogge registrate e  $X_{2,i}$  è il valore del deflusso simulato con le piogge sintetiche dell' $i$ -esimo anno e  $\bar{X}_1$  è il valore medio del deflusso simulato.

**Tabella 1.** Valutazione del parametro di Nash-Sutcliffe mensile (1961-1972).

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Nash-Sutcliffe	0.75	0.64	0.42	0.61	0.66	0.45	0.21	0.48	0.37	0.23	0.65	0.69

I risultati in Tabella 1 mostrano per i mesi umidi un sufficiente accordo tra i due metodi di stima con valori dell'indice di Nash-Sutcliffe intorno a 0.7 o superiori. Un'analisi più dettagliata dei risultati ha evidenziato che nei mesi invernali le differenze maggiori nei deflussi derivano non tanto dall'algorithmo di disaggregazione temporale bensì dal fatto che i cumulati di pioggia delle serie storiche utilizzate sono talvolta sensibilmente differenti rispetto ai dati misurati. Ciò è dovuto al fatto che le serie storiche sono state corrette per eliminare errori sistematici di misura sostituendo i dati di annate con dati inaccettabili [Cao et al., 1998]. Per queste annate il cumulato mensile viene considerato non esistente e sostituito con uno sintetico. Ad esempio, nel Marzo 1967 nella stazione di Ittireddu è stato registrato un valore di pioggia cumulato pari a 118 mm di pioggia, valore in accordo con l'andamento delle medie delle precipitazioni per quel mese, ma poiché l'anno in esame è stato valutato anomalo, si è proceduto a sostituire tale valore con un dato sintetico, che nel caso specifico è pari a 31 mm.

## 5.2 Calibrazione del sistema

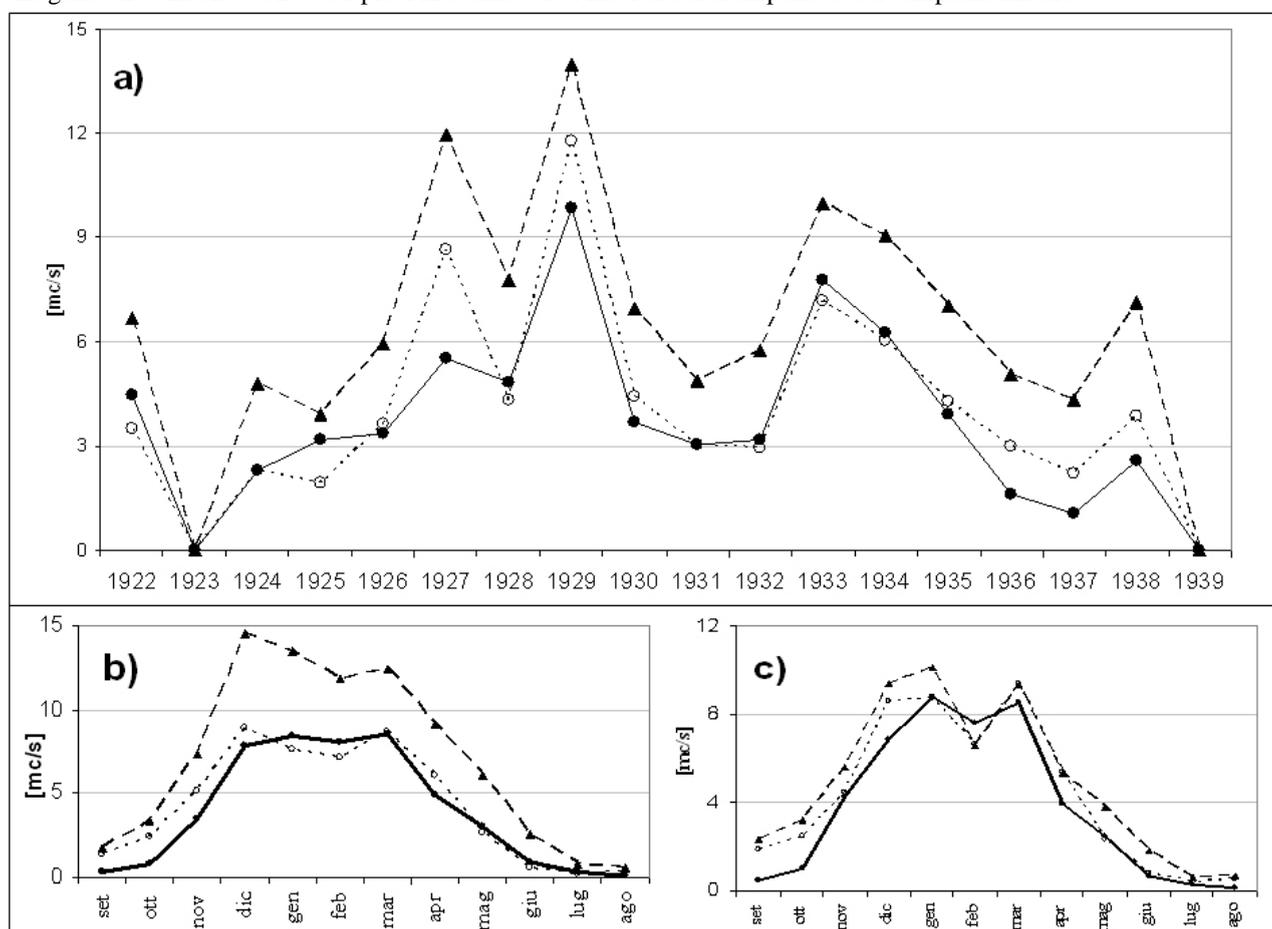
La calibrazione e validazione del modello è condizionata dalla precisione dei dati di input e di controllo, dalla corretta descrizione del sistema fisico e dall'introduzione di condizioni al contorno, di campo e di gestione equivalenti a quelle che hanno generato le portate in uscita. Al fine di verificare l'attendibilità del modello e della parametrizzazione si renderebbe necessario scegliere quei bacini idrografici nei quali non ci fossero invasi, fonti puntuali/diffuse di immissione e/o estrazione d'acqua, che quindi rispondessero in modo soddisfacente ai requisiti di naturalità, così come ipotizzato nel modello concettuale, e che, nel contempo, avessero al proprio interno almeno una sezione di controllo delle portate. Tuttavia, essendo le condizioni di naturalità praticamente inesistenti, si è deciso di applicare il modello a tutti i bacini di cui si disponeva di una serie storica almeno decennale di portate misurate. I parametri che sono stati considerati modificabili nella calibrazione sono quelli che descrivono le caratteristiche idrologiche del suolo e quelli che controllano la partizione tra la componente lenta e veloce del deflusso.

### 5.2.1 Parametri relative al tipo di suolo

Per la calibrazione delle caratteristiche del suolo è stato scelto di avere come variabile statistica di controllo il coefficiente di correlazione tra il campione delle portate misurate e simulate. La calibrazione ha seguito un ciclo virtuoso a scala regionale per il quale le variazioni, entro l'intervallo di variabilità fisica, introdotte nei parametri dei suoli di un dato bacino sono state accettate solo se apportavano un beneficio anche a scala globale. Ossia una variazione che implicava un miglioramento delle prestazioni del modello in una certa sezione di controllo delle portate prima di diventare definitiva è stata validata su tutti i bacini aventi gli stessi suoli e che disponevano di storici idrometrici. La procedura iterativa si è conclusa quando tutti i coefficienti di correlazione sono risultati maggiori di 0.8.

### 5.2.2 Altri parametri

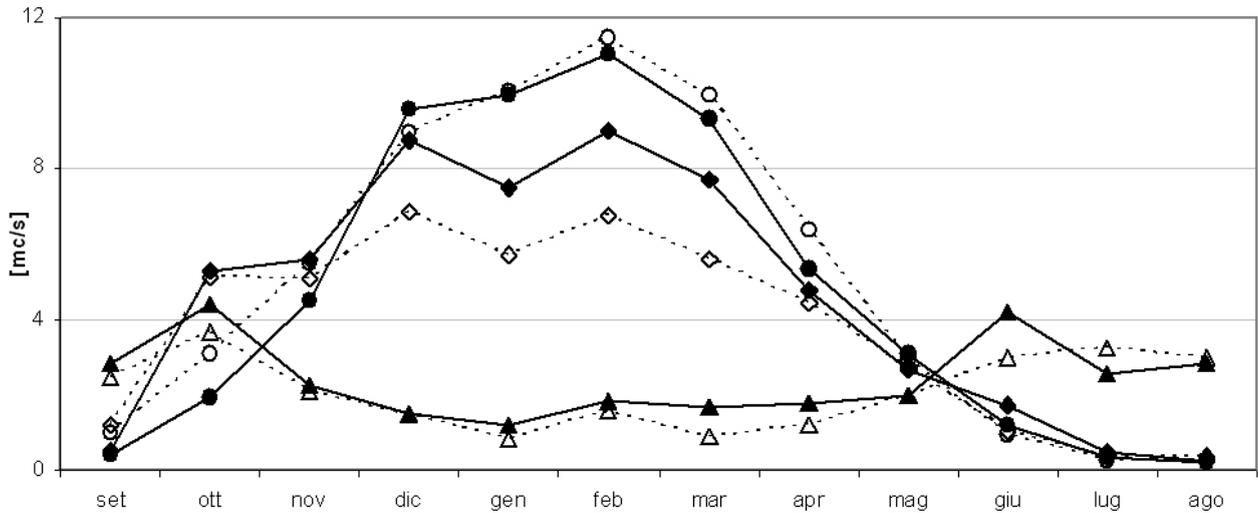
Alcuni altri parametri del modello sono stati calibrati a scala di sottobacino seguendo un processo a cascata da monte verso valle. Questi sono: la quantità di acqua che può essere persa dal suolo per evapotraspirazione (parametro ESCO), la componente lenta che ritorna al fiume dall'acquifero superficiale (parametro GWQMN che rappresenta la soglia del livello idrico nell'acquifero al di sopra della quale l'acquifero ricarica il fiume) e la porzione d'acqua che viene captata dalle radici e che può potenzialmente muoversi dalla zona di saturazione verso la zona insatura (parametro GW\_REVAP). Quest'ultimo processo è molto significativo quando la superficie freatica non è molto distante dal piano di campagna e quindi le radici possono giungervi facilmente. Si è agito su questi parametri per affinare la ripartizione dell'acqua tra le componenti del bilancio, scegliendo come variabili di controllo della calibrazione, per ogni sezione di chiusura dei bacini esaminati, la media, lo scarto e il coefficiente di asimmetria delle portate mensili. Al fine di rendere omogeneo il confronto sono stati presi in esame solo i mesi di cui si disponeva del campione misurato.



**Figura 4.** Esempio di calibrazione delle portate sulla sezione di controllo 29 corrispondente alla parte valliva del Flumendosa. Sono riportati i valori registrati (tratto continuo con punto pieno) e i valori simulati prima della calibrazione (tratto spezzato con triangoli pieni) e dopo la calibrazione (linea punteggiata con punto vuoto). In particolare, nel riquadro in alto (a) si mostra l'andamento annuale (1922-1939), nel riquadro in basso a sinistra (b) lo scarto quadratico medio e nel riquadro in basso a destra (c) la media mensile delle portate. La calibrazione dei parametri che controllano le componenti del bilancio ha avuto un effetto migliorativo su tutti i termini considerati.

In Figura 4 si evidenziano i risultati della calibrazione per la sezione di controllo 29 che corrisponde alla parte valliva del bacino del Flumendosa. La calibrazione delle portate ha avuto un effetto migliorativo su tutti i termini considerati: andamento annuale (a), momento primo (c) e momento secondo (b) della distribuzione. In Figura 5 viene riportato il

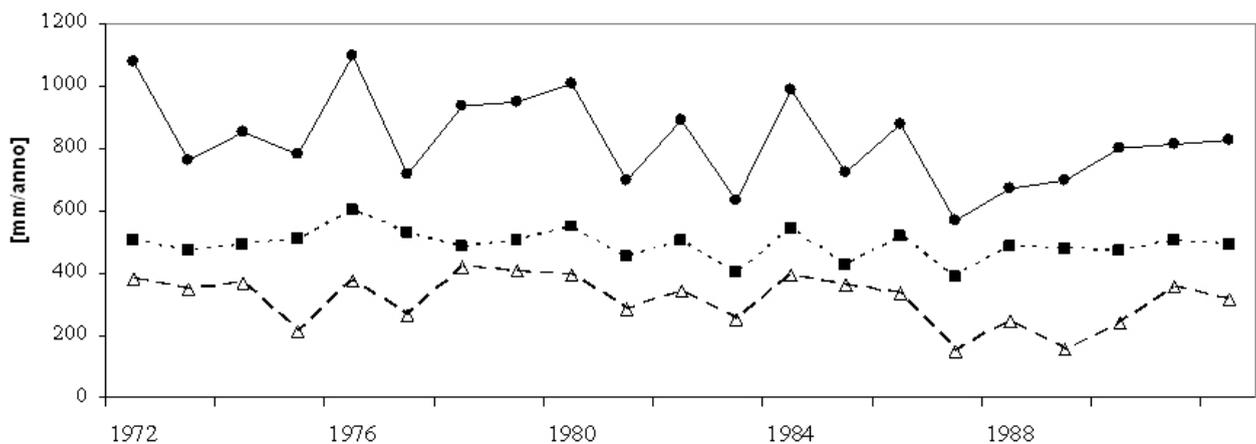
valore dei parametri statistici di calibrazione integrato su tutte le sezioni di controllo. Dal confronto tra la Figura 5 e la Figura 4.c si rileva che le differenze tra portata simulata e misurata diminuiscono nel passare dalla scala locale (bacino) alla scala globale per un effetto di compensazione.



**Figura 5.** Confronto tra dati aggregati (14 bacini idrografici delle portate medie mensili simulate (linea a tratti) e misurate (linea continua) per il valore medio (punto), lo scarto quadratico medio STD (rombo) ed il coefficiente di asimmetria (triangolo).

### 5.3 Il bilancio idrologico

Obiettivo specifico del presente studio è la stima della quantità d'acqua potenzialmente accumulabile negli invasi esistenti in Sardegna. Pertanto il calcolo ha riguardato solo quei bacini che contenevano invasi significativi, artificiali e naturali, con capacità massima d'invaso superiore ai  $14 \cdot 10^6 m^3$ , assumendo lo sbarramento dell'invaso come sezione di chiusura del sottobacino. Gli invasi presi in esame sono i laghi Omodeo, del Coghinas, del Medio Flumendosa, Mulargia, del Temo, del Cedrino, del Liscia, di Posada, di Cuga, di Genna is Abis e di Monte Prano. L'area totale drenante, somma dei contributi di tutti i bacini considerati, è di circa  $7400 km^2$  che rappresenta il 30% del territorio sardo. In Figura 6 è mostrato l'andamento temporale del periodo 1972-1992 della media dell'afflusso meteorico, dell'evapotraspirazione reale e del deflusso, ragguagliati ai bacini studiati. Su tale area drenante l'afflusso meteorico ragguagliato è stimato in  $826 mm/anno$ , le perdite per evapotraspirazione in  $490 mm/anno$  (60% dell'afflusso) e il deflusso in circa  $314 mm/anno$  (38% dell'afflusso). Da questi dati, si calcola che la potenzialità naturale annua delle risorse superficiali dell'isola ammonta complessivamente a circa 2325 milioni di metri cubi con riferimento alla somma dei deflussi medi annui dei bacini parziali sottesi dalle sezioni di chiusura coincidenti con gli invasi principali.



**Figura 6.** Andamento temporale (1972-1992) della media ragguagliata ai bacini in studio degli afflussi (tratto continuo), deflussi (linea tratteggiata) ed evapotraspirazione reale (linea punteggiata).

## 6. Conclusioni

L'utilizzo di tecnologie informatiche avanzate, quali i modelli idrologici distribuiti, comporta un importante investimento iniziale in termini sia di acquisizione dei dati ambientali alle appropriate scale che di sviluppo di un approccio interdisciplinare allo studio, ma si dimostra efficace ed efficiente nella descrizione e comprensione del ciclo delle acque e dei fenomeni ad esso connessi. La conoscenza delle caratteristiche di distribuzione spazio-temporale delle piogge e della dinamica di trasformazione della risorsa idrica superficiale e sotterranea riveste un'importanza ambientale e socio-economica strategica per promuovere un utilizzo sostenibile della risorsa. Ciò anche in considerazione della sua esiguità particolarmente accentuata in una regione come la Sardegna, caratterizzata da un clima semi-arido e da una continua crescita della domanda nei mesi estivi, caratterizzati da significativi flussi turistici. Scopo di tale studio è lo sviluppo ed applicazione di una procedura informatica automatizzata, basata su un modello fisico, in grado di riprodurre il ciclo delle acque a scala spaziale di bacino e a scala temporale mensile.

La calibrazione dei parametri fisici del modello e un'attenta valutazione delle scelte progettuali con la successiva validazione dei modelli concettuali a scala di bacino sono state effettuate mediante riproduzione dei deflussi misurati ai bacini disponibili nel database SISS. I dati disponibili ci hanno consentito di validare i dati simulati esclusivamente a scala temporale mensile (o più lunga) in quanto non si disponeva di valori di pioggia e di portata a passo temporale giornaliero. Tuttavia tale scala temporale risulta idonea alla gestione razionale della risorsa idrica a scala regionale. In particolare, la possibilità di suddividere il territorio in unità idrologiche di riferimento fornisce uno strumento in grado di caratterizzare anche spazialmente le anomalie climatiche.

Il sistema informatico creato fornisce una descrizione dettagliata delle interazioni atmosfera-superficie terrestre-sottosuolo, con la scomposizione della precipitazione in infiltrazione, ruscellamento, ed evapotraspirazione e la ripartizione dell'acqua tra superficie, suolo, acquifero sottostante e fiumi. Il quadro conoscitivo emerso dall'applicazione del modello idrologico a scala di bacino rappresenta lo stato quantitativo della risorsa in condizioni di perfetta naturalità, termine di paragone rispetto al quale analizzare gli effetti e gli impatti di usi alternativi del territorio. L'analisi critica dei risultati ha evidenziato che la procedura di disaggregazione temporale dei dati di pioggia cumulati mensili in serie sintetiche giornaliere è una strada percorribile per colmare la lacuna dovuta alla mancanza di serie storiche giornaliere. Il processo di calibrazione del *geo-database* dei suoli ha prodotto un sistema informativo territoriale multiscala delle caratteristiche fisiche del suolo e ha fatto emergere la necessità di seguire un approccio a scala regionale nella strategia di calibrazione di tali parametri. Ulteriori verifiche si rendono necessarie per valutare la consistenza della distribuzione spaziale delle reti pluvio-termometriche a scala di sottobacino. Inoltre, l'utilizzo del modello digitale del terreno con risoluzione spaziale di 400 m si rivela deficitario soprattutto nelle zone costiere, generalmente piatte dove per la scarsa densità di punti quotati il modello SWAT non riesce talvolta ad individuare linee di impluvio consistenti con le verifiche di campo. Infine l'esperienza acquisita ha messo in evidenza più volte l'inadeguatezza dei sistemi di archiviazione delle informazioni territoriali e la totale assenza di metadati, informazioni collegate al dato e necessarie per conoscere il suo campo di validità.

Pur con i limiti evidenziati, lo strumento sviluppato costituisce indubbiamente un utile supporto alle decisioni per la gestione razionale delle risorse idriche disponibili in Sardegna. Tra i tanti sviluppi futuri che un lavoro come questo può avere, si può citare: lo sviluppo di una procedura di calibrazione automatica, l'introduzione dei parametri vento ed umidità al suolo nel calcolo dell'evapotraspirazione, la produzione di carte di stress idrico e la stima di scenari futuri di bilancio idrologico basata sulla regionalizzazione degli scenari prodotti dai modelli climatologici.

**Ringraziamenti:** Lo studio è stato finanziato dalla Regione Autonoma della Sardegna e dai progetti MURST-IDRO n. 30 Cluster 11e EC INCO SWIMED n. ICA3-2001-20004.

### Riferimenti bibliografici

1. Arangino F., A. Aru, P. Baldaccini, e S. Vacca. "I suoli delle aree irrigabili della Sardegna". *Piano Generale delle Acque*, Regione Autonoma della Sardegna, Cagliari, 1986.
2. Aru A., P. Baldaccini, e A. Vacca. *Nota illustrativa alla carta dei suoli della Sardegna, con carta illustrata 1:250.000*. Regione Autonoma della Sardegna, 1991.
3. Bindlish, R., e Barros, A.P., "Disaggregation of Rainfall for one-way Coupling of Atmospheric and Hydrological Models in Regions of Complex Terrain", *Global & Planetary Change*, Vol. 25, 2000, pag. 111-132.
4. Cadeddu A., e G. Lecca, "Sistema Informativo dei Suoli della Sardegna da interfacciare al modello idrologico SWAT". *Technical Report 09/03*. CRS4, Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia. Cagliari, Italy, 2003.
5. Cao C., A. Petruso, R. Silvano, A. Fadda, F. Buffa, N. Orrù, e M. Pes. *Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna (SISS)*, EAF (Ente Autonomo del Flumendosa), Cagliari, Italy, 1998.
6. Cau P., A. Cadeddu, C. Gallo, G. Lecca e M. Marrocu, "Estimating available water resource of the Sardinian island using the SWAT model". *Atti della conferenza 2nd International SWAT Conference*, IRSA-CNR Bari, Italy, 2003, pag. 64-70.
7. Costantini, E. A., *Database Georeferenziato dei suoli europei. Manuale delle procedure (versione 1.1) s.l., Editore dal Comitato Scientifico dell'European Soil Bureau, Istituto Sperimentale per lo studio e la difesa del suolo di Firenze*, 1999.
8. Cumer, A., "Le evoluzioni del Land Cover CORINE in Italia". *MondoGIS*, numero 16, 1999.
9. De Groen M. e H.G. Savenije, "Markov chains at daily timesteps, key to transpiration at monthly timesteps", *1st WARFSA/WaterNet Symposium: Sustainable Use of Water Resources*; Maputo, 1-2 November 2000.
10. Fiering, M. B. "Streamflow synthesis". *Harverd University Press*, Cambridge, 1967.

11. Kiniry, J.R., D. J. Major, R. C. Izaurralde, J. R. Williams, P. W. Gassman, M. Morrison, R. Bergentine, e R. P. Zentner. "EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the northern Great Plains region". *Can. J. Plant Sci.* 75, 1995, pag. 679-688.
12. Kiniry, J.R., W.D. Rosenthal, B.S. Jackson, e G. Hoogenboom. "Chapter 5. Predicting leaf development of crop plants" in Hodges (ed.) *Predicted crop phenology*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1991, pag. 30-42.
13. Koutsoyiannis, D. e Th. Xanthopoulos, "A dynamic model for short-scale rainfall disaggregation", *Hydrological Sciences Journal*, 35(3), 1990, pag. 303-322.
14. Mehrotra R. e R. D. Singh, "Spatial disaggregation of rainfall data", *Journal des Sciences Hydrologiques*, 43(1) 1998, pp. 91-102.
15. Montanarella L. e R. J. A. Jones. "The European soil bureau". *Research Report No. 6*, 1999.
16. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry e J. R. Williams. *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) – Theoretical Documentation (version 2000)*. (<http://www.brc.tamus.edu/swat/>), s.l., USDA Agricultural Research Service, Temple, Texas, 2001a.
17. Nicks, A. D.. "Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall". *Proceedings of Symposium of Statistical Hydrology*, pag. 154-171, Aug-Spt. 1971, Tucson, A.Z. Department of Agriculture, *Misc. Publ. No. 1275*, 1974.
18. Righini, G., A. C. Costantini e L. Sulli. "La banca dati delle regioni pedologiche italiane". ([www.issds.it/cncp](http://www.issds.it/cncp)), s.l., Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze, 2001.
19. Saxton K. E., W.J. Rawls, J.S. Romberger, e R. I. Papendick. "Estimating generalized soil-water characteristics from texture". *Soil Science Society of America Journal* 50(4) , 1986, pag. 1031-1036.
20. Steven A. Margulis e Dara Entekhabi, "Temporal disaggregation of satellite-derived monthly precipitation estimates and the resulting propagation of error in partitioning of water at the land surface", *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 2001, pag. 27-38.
21. USDA Soil Conservation Service. "Section 4 Hydrology, Chapters 4-10" in *National Engineering Handbook* , 1972.