

Strumenti di modellistica idrologica applicata al bacino del torrente Entella

Simona Bonatti¹, Valerio Milano¹, Ivana Delbono², Pietro Marri³ e Paolo Barsanti³

¹Università degli Studi di Pisa, Facoltà di Ingegneria, Istituto di Idraulica, via Diotisalvi n. 2, 56126 Pisa

²ENEA S. Teresa, Centro Ricerche Ambiente Marino, C.P.224, La Spezia

³ENEA, Pisa.

Riassunto

Nello studio dell'equilibrio dei litorali riveste un ruolo di fondamentale importanza la valutazione dell'apporto solido fornito dai corsi d'acqua.

L'applicazione di modelli matematici volti alla valutazione e quantificazione dell'apporto solido fornito dal corso d'acqua, costituisce un valido strumento di supporto alla pianificazione territoriale, in quanto permette di configurare scenari futuri alternativi da mettere in atto nel bacino e di testarne gli effetti prodotti a breve e lungo termine.

Il presente studio ha come obiettivo quello di presentare strumenti di indagine finalizzati all'ampliamento delle conoscenze riguardanti l'equilibrio dei litorali e, in particolare, alla valutazione dell'influenza esercitata sull'unità fisiografica del Golfo del Tigullio dal trasporto solido del Torrente Entella, attraverso l'applicazione di modelli idrologici implementati su base GIS.

L'applicazione è stata messa in atto prestando particolare attenzione alla metodologia di approccio, evidenziandone vantaggi e problematiche che possono sorgere durante il percorso, al fine di verificare l'interazione tra modelli finalizzati alla gestione dei dati e modelli volti alla generazione dei dati idrologici.

Introduzione

Nello studio dell'equilibrio dei litorali riveste un ruolo di fondamentale importanza la valutazione dell'apporto solido fornito dai corsi d'acqua.

La fonte di alimentazione della costa per quanto concerne il materiale solido è costituita, infatti, dal bacino imbrifero, da cui viene sottratto il materiale di supero nel processo di degradazione del suolo e dislocamento delle rocce sciolte. Tale materiale viene, quindi, vettoriato lungo il reticolo idrografico, sotto forma di trasporto in sospensione o trasporto di fondo, secondo le caratteristiche del materiale trasportato e della corrente idrica.

L'applicazione di modelli matematici volti alla valutazione e quantificazione dell'apporto solido fornito dal corso d'acqua al litorale, costituisce un valido strumento di supporto in sede pianificatoria, in quanto permette di configurare scenari futuri alternativi da mettere in atto nel bacino e di testarne gli effetti, per poter poi effettuare un confronto rispetto agli obiettivi previsti.

Obiettivi, ambito d'indagine e strumenti utilizzati

Il presente studio rappresenta un contributo alle ricerche svolte dall'ENEA sulla gestione marino-costiera, in cui l'area del Golfo del Tigullio rappresenta, per peculiarità di aspetti e problematiche, la zona scelta come area campione.

L'obiettivo del presente studio è quello di fornire un esempio di applicazione di modellistica idrologica, finalizzata all'ampliamento delle conoscenze sul bacino idrografico. In particolare l'attenzione è focalizzata sullo studio del trasporto solido, problematica di grande interesse in ambito idraulico per lo studio ed il controllo dell'erosione dei bacini imbriferi, per lo studio del

modellamento del fondo dei corsi d'acqua, per gli effetti che produce sulle opere idrauliche ed infine per lo studio dell'equilibrio dei litorali (Milano, 1990). Contestualmente è stata verificata, durante l'applicazione, l'interazione tra modelli di gestione dei dati territoriali e modelli di simulazione idrologica. L'applicazione viene qui descritta prestando particolare attenzione alla metodologia di approccio agli strumenti, evidenziandone vantaggi e problematiche, piuttosto che ai singoli risultati ottenuti.

Vengono così presentate, a supporto della pianificazione territoriale, metodologie di indagine, che, permettendo una valutazione e quantificazione dell'influenza che generano gli interventi sul bacino e sulla fascia costiera, forniscono elementi per una progettazione più razionale degli interventi stessi, sia sulla costa sia sul bacino.

L'ambito di indagine è quello del bacino del torrente Entella, sito nella Liguria Orientale, con foce nel Golfo del Tigullio, tra Chiavari e Lavagna. Lo studio ha focalizzato l'attenzione su tale bacino, in quanto costituisce il principale fornitore di sedimenti dell'unità fisiografica locale, che si estende geograficamente tra il promontorio di Portofino e la Punta di Sestri Levante. In tale tratto costiero si ha la presenza contemporanea di una costa pregiata e di rilevanti fenomeni erosivi, da cui l'interesse per lo studio del trasporto solido.

Gli strumenti utilizzati si distinguono in:

- Strumenti di gestione di banche dati georeferenziate (Sistemi Informativi Territoriali o GIS) ed in particolare strumenti finalizzati alla semplificazione e miglioramento della gestione dei dati in ingresso ed in uscita dai modelli matematici, costituiti da:
 - *WMS (Watershed Modeling System)*;
 - *AVSWAT (Soil and Water Assessment Tool)*.
- Strumenti di simulazione idrologica, quali i modelli matematici, costituiti in tal caso dai programmi:
 - *HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)*;
 - *SWAT (Soil and Water Assessment Tool)*.

Allo scopo di fornire indicazioni sui procedimenti di calibrazione dei modelli, verrà brevemente descritta l'applicazione del programma HYSEP (*HYdrograph SEParation and analysis*) per la separazione delle componenti superficiale e profonda dell'idrogramma di piena.

Contenuto dello studio

La prima parte dello studio ha riguardato la delineazione di un quadro conoscitivo del bacino idrografico e della costa prospiciente, allo scopo di individuarne problematiche e peculiarità e, nello stesso tempo, costituire un complesso organico di conoscenze da utilizzare nella parte applicativa del lavoro.

La caratterizzazione del bacino ha riguardato la definizione delle caratteristiche geografiche e geomorfologiche, l'acclività dei versanti, la caratterizzazione del reticolo idrografico, l'utilizzo del territorio nel bacino, la caratterizzazione degli aspetti climatici ed idrologici.

Il bacino presenta una superficie di 376 km² ed un reticolo idrografico costituito da corsi d'acqua brevi, con profili ripidi e numerose variazioni di acclività lungo lo sviluppo. Per quanto concerne l'idrologia del bacino, si ha un clima temperato con una temperatura media che oscilla tra i 12-14 °C; un regime delle precipitazioni con un'ampia variabilità dei valori medi di altezza di pioggia annuale, compresi tra i 1500 ed i 2000mm; in conseguenza a ciò troviamo un regime spiccatamente torrentizio delle portate.

I valori caratteristici della portata liquida e del coefficiente di deflusso, che si ottengono dalle misure di portata, relative al periodo 1951-1974 1991-1996, nella stazione del Servizio Idrografico di Panesi, che può considerarsi come stazione di chiusura dell'intero bacino essendo ubicata a 4 km dalla foce ed a valle di tutte le confluenze, sono i seguenti:

$Q_{\max} = 454 \text{ m}^3/\text{s};$ (portata massima giornaliera del periodo di osservazione)
 $Q_{\min} = 0.01 \text{ m}^3/\text{s};$ (portata minima giornaliera del periodo di osservazione)
 $Q_{\text{med}} = 14.50 \text{ m}^3/\text{s};$ (portata media del periodo di osservazione)
 Coefficiente di deflusso medio annuo = 0.73;

Il valore del deflusso torbido unitario medio annuo ricavato dalle misure effettuate nella stazione di Panesi, funzionante come stazione torbiometrica nel periodo tra il 1966 ed il 1970, è di 280 tonni/km². La seconda parte dello studio ha riguardato la gestione dei dati e, in particolare, la verifica dell'interazione tra modelli finalizzati alla gestione dei dati e modelli di simulazione. L'uso di modelli idrologici a parametri spazialmente distribuiti permette di migliorare l'accuratezza del bilancio idrico, ma necessita, nello stesso tempo, di strumenti volti alla parametrizzazione del bacino e alla rappresentazione della variabilità spaziale e temporale delle grandezze utilizzate nella modellazione. Numerosi modelli idrologici sono stati modificati per essere collegati a sistemi di gestione dati georeferenziati (GIS), al fine di semplificare e migliorare la gestione dei dati di input ed output.

Nel presente lavoro si è fatto uso di due interfacce geografiche: l'interfaccia WMS (fig.1) e l'interfaccia AVSWAT (fig. 2), che sono state utilizzate per la gestione dati dei due programmi di calcolo HEC e SWAT. Le interfacce, operando in ambiente GIS, sono in grado di elaborare dati ed estrarre le informazioni memorizzate, creando files di dati di input compatibili con i modelli idrologici.

Le due interfacce hanno permesso di gestire i dati riguardanti l'orografia, costituiti in tal caso da un modello digitale del terreno (DEM da *Digital Elevation Model*) e dati riguardanti le coperture del bacino quali uso del suolo e tipo di suolo, ottenuti mediante digitalizzazione in ambiente GIS della cartografia tradizionale su supporto cartaceo.

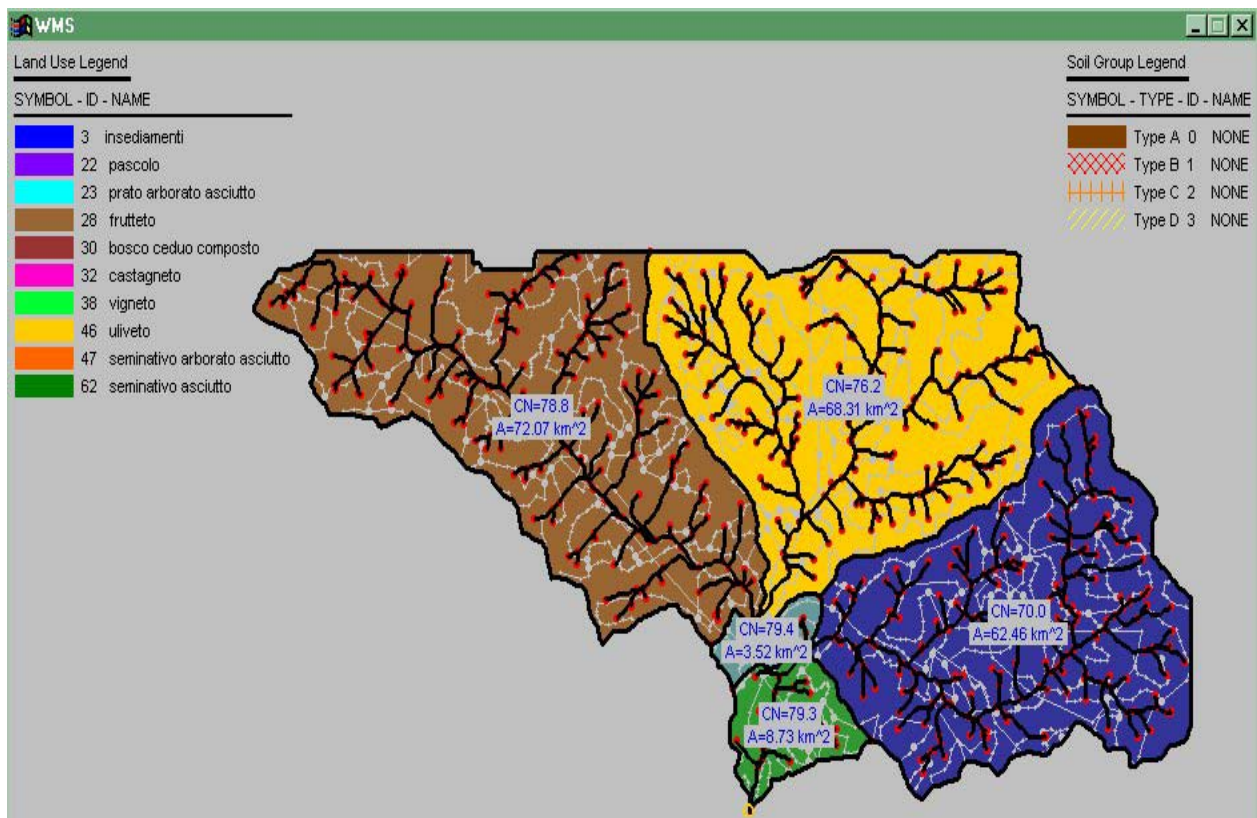


Fig. 1. Gestione dati del bacino del torrente Entella mediante WMS

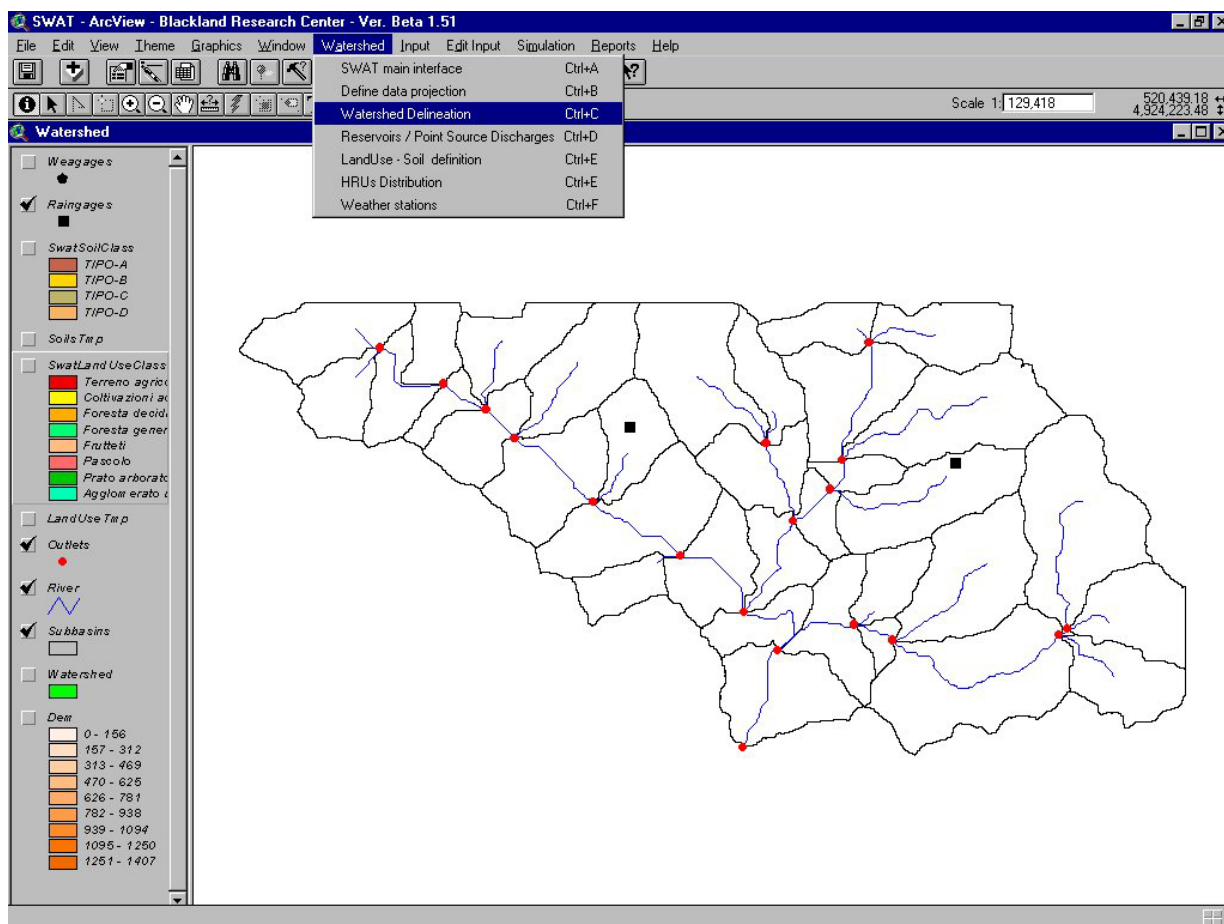


Fig. 2. Gestione dati del bacino del torrente Entella mediante AVSWAT

La terza fase è quella relativa all'applicazione dei modelli idrologici, che ha riguardato:

1. Studio degli eventi di piena: applicazione HEC in ambiente GIS
2. Studio del trasporto solido

1. Studio degli eventi di piena: applicazione HEC in ambiente GIS

Tale studio riveste un'importanza fondamentale nella valutazione del trasporto solido, in quanto tra i fattori che maggiormente condizionano l'erosione idrica c'è la climatologia ed idrologia degli eventi estremi. In corrispondenza di tali eventi, infatti, si verifica un brusco incremento del trasporto solido ed una variazione delle sue caratteristiche qualitative.

La particolarità dell'applicazione del programma HEC in tal caso è costituita dall'aver utilizzato per la gestione dei dati l'interfaccia WMS, estensione del software GIS ArcView. L'interfaccia permette di gestire l'orografia del bacino ed a partire da essa è in grado di creare il reticolo idrografico del bacino e di calcolare parametri geometrici e geomorfologici del bacino, quali area dei sottobacini, pendenza media, lunghezza, tempo di transito; permette di gestire le coperture del suolo, quali uso e tipo di suolo. I dati pluviometrici, inoltre, vengono immessi direttamente, note le posizioni delle stazioni di misura sul bacino ed i valori della precipitazione, siano essi relativi ad un evento storico o sintetico. Una volta che il programma ha compiuto l'elaborazione (che viene gestita totalmente all'interno dell'interfaccia) è possibile gestire anche l'output del programma, costituito dagli idrogrammi di piena nei vari punti nodali della rete idrografica (USACE, 2000). I vantaggi dell'applicazione del programma mediante interfaccia, vanno rintracciati nella semplicità di gestione dei dati in ingresso ed in uscita dal modello. L'interfaccia è in grado, inoltre, di gestire altri programmi, quali ad esempio programmi per lo studio della

dispersione di sostanze inquinanti in un corso d'acqua. L'uso di tali strumenti diventa molto interessante, quindi, anche quando si vogliono prendere in considerazione non solo aspetti specificatamente idraulici, ma anche ambientali nella scelta degli interventi da porre in atto.

2. Studio del trasporto solido

La seconda applicazione modellistica ha riguardato lo studio del trasporto solido, mediante il programma SWAT.

Alla base della maggior parte dei modelli di stima del trasporto solido ci sono i principi della geomorfologia, che evidenziano un legame funzionale tra erosione dei versanti, trasporto solido dei corsi d'acqua ed evoluzione morfologica degli alvei (Cavazza, 1998). Per quanto concerne la teoria alla base del programma in esame, si gestisce l'idrologia del bacino tramite metodologie tradizionali di approccio, analoghe ad altri programmi, basate sullo studio del bilancio idrologico e delle sue componenti. Appare interessante, invece, focalizzare l'attenzione sulle metodologie di stima del trasporto solido.

A tale scopo il programma distingue (Neitsch *et al.*, 2001):

Una fase di trasporto lungo i versanti: questa viene esaminata attraverso l'equazione universale dell'erosione modificata (MUSLE da *Modified Universal Soil Loss Equation*), che si differenzia dalla tradizionale USLE per il fatto che l'indicatore dell'erosività della pioggia viene calcolato in funzione dell'entità del deflusso superficiale e non semplicemente dell'energia della precipitazione. Ciò permette di migliorare la stima del trasporto solido, in quanto il deflusso superficiale è più direttamente correlato al fenomeno erosivo da esso generato, e, inoltre, di valutarne l'entità anche per singoli eventi piovosi.

L'equazione adoperata è la seguente:

$$\text{sed} = 11.8 * (Q_{\text{surf}} * q_{\text{peak}} * \text{area}_{\text{hru}})^{0.56} * K_{\text{USLE}} * C_{\text{USLE}} * P_{\text{USLE}} * LS_{\text{USLE}} * \text{CFRG}$$

dove:

sed (t) è il carico di sedimenti in un dato giorno;

Q_{surf} (mmH₂O/ha) è il volume di deflusso superficiale;

q_{peak} (m³/s) è il tasso di picco dello scorrimento superficiale;

area_{hru} (ha) è l'area dell'H.R.U. (*Hydrological Response Unit*), costituente l'unità base di indagine del programma; essa rappresenta la più piccola area, omogenea per quanto riguarda l'uso del suolo e le altre grandezze caratterizzanti il bacino, in cui il modello suddivide il sottobacino ed effettua le computazioni.

K_{USLE} è il fattore di erodibilità del suolo;

C_{USLE} è il fattore che tiene conto delle pratiche agricole e del tipo di copertura del terreno;

P_{USLE} è il fattore che considera eventuali pratiche antierosione in atto nel bacino;

LS_{USLE} è il fattore topografico del bacino;

CFRG è il fattore di trasporto grossolano.

Analizziamo ciascun termine dell'equazione:

- *il volume di deflusso superficiale Q_{surf}*: viene calcolato nella parte idrologica dell'elaborazione, utilizzando il metodo CN del *Soil Conservation Service*;
- *il tasso di picco dello scorrimento superficiale q_{peak}*: rappresenta il massimo flusso superficiale per un dato evento e costituisce un indice del potere erosivo della precipitazione. Viene calcolato mediante la seguente espressione:

$$q_{\text{peak}} = (C * i * A) / 3.6 \quad (\text{in m}^3/\text{s})$$

dove C è il coefficiente di scorrimento superficiale, rappresentato dal rapporto tra la portata di picco e l'afflusso netto al bacino, variabile da evento ad evento, che per semplicità viene assunto pari al valore medio giornaliero, per cui può calcolarsi come rapporto tra il valore

dello scorrimento superficiale (mm) e la pioggia caduta in quel giorno (mm); i è l'intensità della pioggia (mm / ora), A è l'area del sottobacino (Km²) e 3.6 è un fattore di conversione.

- *il fattore di erodibilità del suolo K_{USLE}* : rappresenta l'attitudine del suolo all'erosione. Tale parametro può stimarsi con misure dirette, che vengono però condotte assai di rado, in quanto molto costose in termini di tempo e di denaro. Per cui si ricorre in genere a formule di carattere empirico. L'espressione usata dal programma SWAT è la seguente:

$$K_{USLE} = 0.00021 * M^{1.14} * (12 - OM)/100 + 0.0325 * (C_{sstr} - 2) + 0.025 * (C_{perm} - 3)$$

dove:

M è un fattore che tiene conto della granulometria del terreno, calcolato mediante l'espressione:

$$M = (m_{silt} + m_{sand}) * (100 - m_{clay})$$

in cui m_{silt} è la percentuale di limo, m_{sand} è la percentuale di sabbia fine e m_{clay} è la percentuale di argilla;

OM è la percentuale di materiale organico del suolo, che si calcola a partire dalla percentuale di carbonio organico $orgC$, mediante l'espressione:

$$OM = 1.72 * orgC$$

C_{sstr} rappresenta un indice della struttura del suolo e può essere definito in base al tipo di suolo e alla struttura presente nello strato. Esso assume i seguenti valori:

- 1 per terreno a granulometria molto fine;
- 2 per terreno a granulometria fine;
- 3 per terreno a granulometria fine e grossolana;
- 4 per terreno molto strutturato, con blocchi e massi.

C_{perm} rappresenta la capacità del terreno di essere attraversato dall'acqua e di trasferirla da un punto all'altro. Il valore di C_{perm} si deve assegnare valutando la conduttività idraulica del terreno, tenendo conto dello stato di saturazione, in base a tabelle disponibili nella letteratura tecnica.

- *il fattore di pratica agricola e di tipo di copertura C_{USLE}* : rappresenta la percentuale di perdita di suolo da un terreno sottoposto a determinate pratiche agricole, rispetto ad un terreno completamente spoglio. Tale fattore dipende dalla presenza di copertura vegetale e dal tipo di copertura. Infatti, la copertura vegetale o la presenza di residui delle coltivazioni ostacola il deflusso superficiale e ne riduce l'energia erosiva. L'espressione utilizzata dal programma è la seguente:

$$C_{USLE} = \exp[(\ln(0.8) - \ln(C_{USLEmin})) * \exp(-0.00115 * rsd) + \ln(C_{USLEmin})]$$

dove $C_{USLEmin}$ rappresenta il fattore minimo di copertura e pratica agricola del terreno per quel tipo di bacino e rsd è l'ammontare dei residui delle coltivazioni sul terreno, in kg per ettaro.

- *il fattore di pratiche antierosione P_{USLE}* : rappresenta la perdita di suolo con una specifica pratica di supporto antierosivo del terreno, in rapporto al terreno senza interventi. Gli interventi che possono essere messi in atto al fine di contrastare l'erosione sono diversi e generano effetti stimabili attraverso tabelle, dedotte da indagini sperimentali. Il programma SWAT consente di tenere conto degli effetti delle canalizzazioni del flusso lungo i versanti, allo scopo di ridurre la lunghezza, e del terrazzamento. La letteratura tecnica fornisce tabelle indicative, mentre valori più precisi possono ricavarsi da indagini condotte ad hoc nel sito in esame.
- *il fattore topografico del bacino LS_{USLE}* : rappresenta l'influenza sulla perdita di suolo delle grandezze topografiche, quali la lunghezza e la pendenza dei versanti. Il fattore topografico viene così calcolato:

$$LS_{USLE} = (L_{hill} / 22.1)^m * (65.41 * \sin^2(\alpha_{hill}) + 4.56 * \sin \alpha_{hill} + 0.065)$$

dove:

L_{hill} è la lunghezza del versante, in m;

α_{hill} è l'angolo di pendenza del versante;

m è un termine esponenziale, funzione della pendenza media slp dell'H.R.U. secondo l'espressione seguente:

$$m = 0.6 * (1 - \exp(-35.835 * slp)), \text{ con } slp = \tan \alpha_{hill}$$

- *il fattore di trasporto grossolano CFRG*: rappresenta il tenore grossolano presente nel terreno, per cui costituisce un fattore di stima dello scheletro del terreno. Viene calcolato con l'espressione seguente:

$$CFRG = \exp(-0.053 * rock), \text{ con } rock = \% \text{ di roccia nel primo strato di terreno.}$$

Fase di trasporto lungo i canali: si valuta mediante un processo di discretizzazione della rete idrografica in tratti, corrispondenti ai sottobacini. Per ogni tratto si valuta la concentrazione di sedimenti massima, funzione della velocità secondo l'espressione:

$$conc_{sedmax} = c_{sp} * (v_{cp})^{spext}$$

dove:

$conc_{sedmax}$ è concentrazione massima di sedimenti, in kg/m^3

c_{sp} e $spext$ sono due parametri definiti dall'utente, che permettono la taratura della formula, mediante l'utilizzo di dati storici;

v_{cp} è la velocità di picco, valutata come il rapporto tra q_{peak} , il tasso di picco dello scorrimento superficiale in m^3/s (già illustrato per il calcolo del fattore di erodibilità K nell'equazione MUSLE precedente) e l'area della sezione liquida A .

Quest'ultima può valutarsi a sua volta con l'espressione:

$$A = V_{ol} / L$$

dove V_{ol} è il volume liquido presente nel tratto di canale e L è la lunghezza del tratto.

Tali valori si ottengono dalla parte dell'analisi idrologica dedicata al flusso nei canali, mediante l'uso del modello di Muskingum.

Nota la concentrazione massima di sedimenti che può essere vettoriata in un tratto della rete, si effettua un bilancio in massa in ciascun tratto della rete.

Supponendo di considerare il tratto i -esimo, caratterizzato da una concentrazione di sedimenti in ingresso pari a sed_i , se la concentrazione di sedimenti è maggiore del valore massimo, allora il processo dominante nel tratto sarà il deposito e l'ammontare di tale deposito sarà dato da:

$$sed_{dep} = (conc_i - conc_{sedmax}) * V_{ol}$$

Di contro, se la concentrazione di sedimenti è minore del valore massimo, allora il processo dominante nel tratto sarà la degradazione e l'ammontare di tale degradazione sarà dato da:

$$sed_{deg} = (conc_{sedmax} - conc_i) * K_c * C_c * V_{ol}$$

dove K_c è il fattore di erodibilità del canale e C_c è il fattore di copertura del canale, funzione della presenza della vegetazione sul letto, che in analogia a quanto avviene sui versanti, riducendo la velocità dell'acqua ne diminuisce il potere erosivo. Tali valori si possono determinare con prove sperimentali sul canale.

A riguardo dell'erodibilità del canale si può osservare che, nel caso in cui la capacità di trasporto della corrente risulti maggiore della concentrazione presente, si evidenzierà solo una tendenza all'erosione, che si esplicherà però con delle erosioni effettive dell'alveo se lo consentono le condizioni d'aggregazione e le dimensioni dei sedimenti costituenti l'alveo stesso. Se il fondo è roccioso o costituito da materiale di dimensioni medie superiori rispetto a quelle che la corrente è in grado di mettere in movimento, non possono manifestarsi erosioni (Milano, 1999).

Il bilancio totale di sedimenti nel tratto- i risulta pari a:

$$sed_{tot} = sed_i + sed_{deg} - sed_{dep}$$

La concentrazione di materiale solido in uscita dal tratto in un dato intervallo di tempo risulta data da:

$$sed_{out} = sed_i * V_{out} / V_{ol}$$

dove il termine V_{out} indica il volume in uscita da tratto nell'intervallo di tempo considerato e il termine V_{ol} indica il volume liquido nel tratto del canale.

Mediante l'applicazione successiva del bilancio ai vari tratti della rete, si ottiene la portata solida alla sezione di chiusura del bacino.

La gestione dei dati di input è stata fatta mediante l'uso dell'interfaccia di cui il modello è provvisto, in maniera analoga a quanto illustrato per l'altra applicazione.

E' interessante, invece, fare alcune brevi considerazioni sul procedimento di calibrazione usato.

La calibrazione ha riguardato:

- calibrazione del bilancio idrico e delle portate;
- calibrazione del trasporto solido;

Per la prima parte della calibrazione è necessario valutare le componenti superficiale e di base del deflusso, relativamente all'idrogramma delle portate liquide. In tal caso, mancando misure dirette di tali componenti, sono stati utilizzati, come valori di confronto a quelli forniti dal modello SWAT, quelli ottenuti dal programma HYSEP (Sloto e Crouse, 1996). Tale programma si basa su un criterio di separazione puramente operativo, che ricalca le metodologie di separazione tradizionali, essenzialmente di tipo geometrico, senza attribuire significati fisici alla separazione.

I risultati forniti dal programma sono stati confrontati con quelli ottenuti con un'altra metodologia, basata sull'uso di un filtro digitale, ottenendo un sostanziale accordo dei valori ottenuti (Nathan e McMahon, 1990).

Per la calibrazione relativa al trasporto solido devono prendersi in considerazione le due sorgenti del trasporto solido nel bacino, costituite dall'erosione delle unità HRU e dal processo di erosione/deposizione nei canali della rete idrografica. Il carico di sedimenti in arrivo dalla rete di drenaggio per erosione dei versanti è condizionato principalmente dallo scorrimento superficiale. Una volta effettuata la calibrazione relativa al deflusso superficiale, se i valori trovati di trasporto solido non sono sufficientemente vicini ai valori reali, si può agire sui parametri illustrati e, in particolare il fattore C_{USLE} , funzione delle pratiche agricole e del tipo di copertura del suolo, il fattore P_{USLE} , che tiene conto di eventuali pratiche antierosione in atto lungo i versanti ed il fattore LS_{USLE} , che rappresenta la topografia del bacino. Per quanto concerne la calibrazione dei valori provenienti dalla degradazione/deposizione lungo i canali della rete idrografica, i parametri da modificare per migliorare la stima sono il parametro SPEXT, che compare come esponente nell'espressione per la valutazione della concentrazione di sedimenti massima, il fattore di copertura del canale C_c e quello di erodibilità del canale K_c .

Allo scopo di fornire esempi dei risultati ottenibili mediante tali strumenti, una volta che, come si è detto, si è proceduto alla taratura del modello in base ai dati completi (pluviometrici e torbiometrici) disponibili, è stata generata la serie temporale dei dati mancanti del trasporto solido, operazione di fondamentale importanza nella pratica idrologica, in quanto spesso si trovano stazioni che non hanno funzionato per un certo intervallo di tempo o, come nel nostro caso, sono state del tutto eliminate. La generazione dei dati annuali è rappresentata in figura 3 mentre le figure 4 e 5 rappresentano i valori di precipitazione e portata solida mensile, calcolata dal modello.

L'impiego in sede di pianificazione è costituito dalla possibilità di delineare scenari futuri del bacino, compatibili e alternativi tra loro, in base ai quali configurare gli assetti che il sistema viene ad assumere al variare delle componenti strutturali della pianificazione, che si producono in variazione dei parametri in ingresso (ad esempio modifiche all'uso del suolo). E' possibile in tal modo verificare gli effetti prodotti sul trasporto solido a lungo e medio termine dei vari scenari di progetto e scegliere, tra gli scenari, quello che ottimizza nel complesso gli obiettivi della pianificazione stessa.

Fig. 3. Valori annuali di precipitazione e portata solida per il periodo 1976-1984

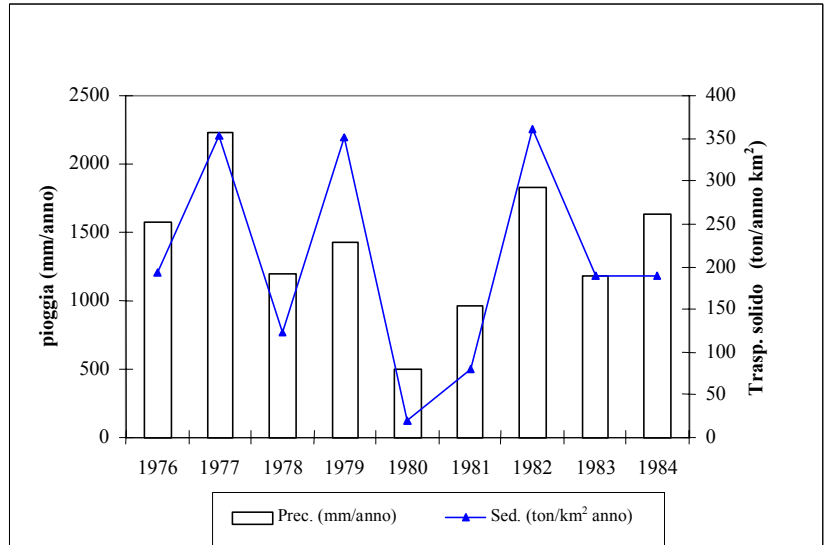


Fig. 4. Valori di portata solida mensile per il periodo 1976-1984

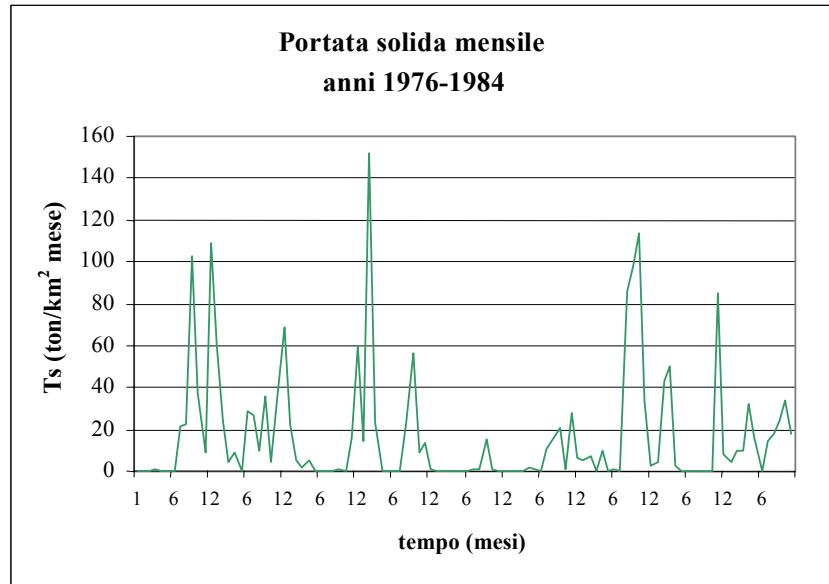
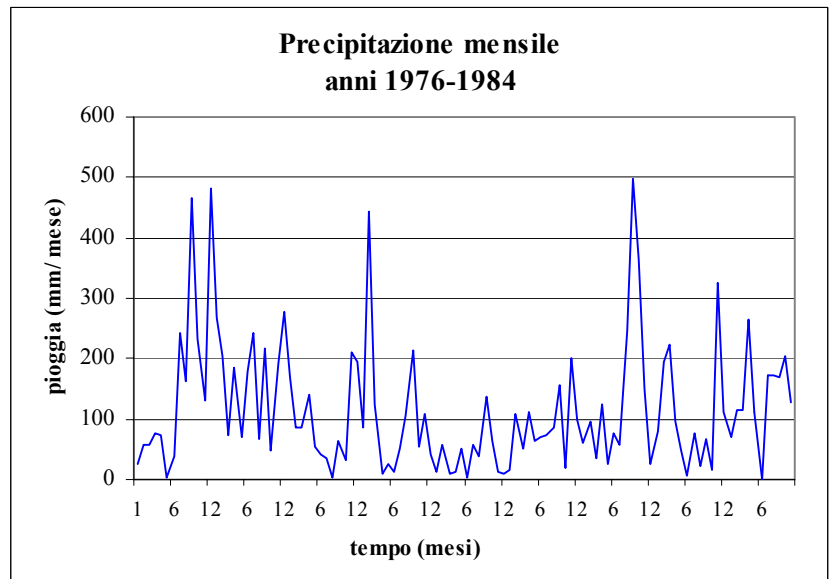


Fig. 5. Valori di precipitazione mensile per il periodo 1976-1984



Conclusioni

Nel corso dello studio è stata verificata l'interazione tra sistemi di gestione e simulazione di dati variabili spazialmente e temporalmente. Tale interazione si rende necessaria per una più agile rappresentazione dei parametri in ingresso e dei risultati delle simulazioni, con la loro variabilità. Sono stati presentati strumenti di indagine, costituiti da modelli matematici, attraverso l'utilizzo dei quali è possibile valutare il trasporto di un corso d'acqua, il che costituisce un elemento di fondamentale importanza per una corretta gestione del bacino idrografico e della zona costiera da questo rifornita.

In conclusione a tutto ciò, è possibile affermare che l'impiego integrato di tecnologie di gestione dati e di modelli idrologici diventa uno strumento in grado, in sede di pianificazione, di fornire indicazioni sulle scelte da compiersi, in modo da ottimizzare il complesso degli obiettivi previsti.

Bibliografia

- Aminti P., Pranzini E., 1993 - La difesa dei litorali in Italia. *Ed. delle Autonomie, Roma.*
- Cavazza S., 1978 - Organizzazione ed attuazione delle misure ideologiche. *Ottobre*
- Cavazza S., 1978 - Programmi operativi per l'elaborazione dei dati. *C.N.R. Nov.*
- Cavazza S., 1980 - L'acquisizione di dati idrologici. *Estratto dalla pubblicazione N° 61, Ciclo di seminari per l'avviamento alla ricerca e perfezionamento in "Modelli idrologici e Idrogeologici", Perugia*
- Cavazza S., 1998 - Regionalizzazione parametrica della erosione e del trasporto solido nel fiume del bacino Tevere. *Rivista trimestrale dell'autorità di bacino del Tevere, Gemini Editore*
- Cortemiglia G.C., 1978 - Le modificazioni dell'assetto strutturale del litorale di Lavagna quale fattore erosivo della spiaggia. *Mem.Soc.Geol. It. Vol.19, 369-380.*
- Hydrologic Modelling System HEC-HMS, 2000 - Technical Reference Manual. *US Army Corps of Engineers.*
- Milano V., 1990 - Costruzioni idrauliche, vol. I. *Elementi di idrografia e idrologia. Serv. Edit. Univ. di Pisa.*
- Milano V., 1999 - Costruzioni idrauliche, vol. II. *Sistemazioni dei corsi d'acqua. Serv. Edit. Univ. di Pisa,*
- Moisello U., 1998 - Idrologia tecnica. *La Goliardica Pavese.*
- Nathan R., T.A.McMahon, 1990 - Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis. *Water Resources Research 27 (7) 1465-1478.*
- Neitsch S.L., Arnold J. G., Williams J. R., 2001 - Soil and Water Assessment Tool Theoretical. *Documentation.*
- Neitsch S.L., Arnold J. G., Williams J. R., 2001 - Soil and Water Assessment Tool User's Manual.
- Provincia di Genova, 2001 - Piano Stralcio di Bacino per il rischio idrogeologico. *Relazione generale Ambito 16 Sturla-Entella, Aprile 2001.*
- Regione Liguria, 1999 - Difesa costiera e ripascimento delle spiagge. Storia e ricognizione delle condizioni attuali, problemi aperti, indirizzi di intervento. *Piano Territoriale di Coordinamento della Costa, Regione Liguria.*
- Sloto R.S., 1996 - Crouse M., Hysep: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. *U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Lemoyne Pennsylvania*