

UN APPROCCIO SISTEMICO PER LA SICUREZZA DEL TERRITORIO

L'approccio sistemico si sta ormai fortunatamente imponendo a tutti i livelli della programmazione territoriale. Come Giunta regionale dell'Emilia-Romagna abbiamo calibrato tutta la nostra azione di governo nel campo della sicurezza territoriale sull'ottica integrata del bacino idrografico, ristrutturando in tal senso anche i servizi regionali di difesa del suolo.

L'ottica di bacino nella nostra regione acquisisce un'importanza particolare in riferimento alla sempre più pressante problematica dell'erosione costiera. All'interno di questo indirizzo politico-amministrativo un'importanza decisiva viene assunta dalle banche dati, dal sistema delle conoscenze che deve arricchirsi in un processo tenace e costante. Senza conoscenza adeguata ed aggiornata non si dà azione di governo del territorio equilibrata e in grado di mitigare i rischi e di trattare le criticità. Senza conoscenza adeguata, scarsa capacità revisionale e ancor più scarsa possibilità di prevenzione!

Parlando di sistema delle conoscenze è evidente l'intreccio fra Università e Pubblica amministrazione. Facoltà come quelle di agraria, ingegneria, geologia sono interlocutori necessari e privilegiati nel campo della sicurezza territoriale.

Per questo la giornata di studio dedicata al monitoraggio idrotorbidometrico assume una paradigmatica rilevanza, come momento di quella comunicazione e accumulo di conoscenza di cui abbiamo parlato.

*Assessorato Difesa del Suolo e della Costa
Protezione Civile
Regione Emilia-Romagna*

1

UN MONITORAGGIO IDROLOGICO CHE CONTINUA DAL 1997

La prima giornata di studio su "Monitoraggio fluviale ed erosione nella pianificazione e gestione dei bacini appenninici" si è tenuta il 6 luglio 2001.

In quella occasione furono presentati i primi dati sul trasporto torbido e sull'erosione rilevati in due stazioni sui torrenti Sillaro a Castel San Pietro Terme, attiva dall'aprile del 1997, e Lavino a Zola Predosa, attiva dal settembre 1998.

Pochi mesi prima, nell'ottobre del 2000, era stata attivata anche una terza stazione sul torrente Savena a Pianoro.

A distanza di tre anni viene proposto questo secondo appuntamento in quanto nel periodo trascorso l'attività è continuata arricchendosi sotto vari aspetti.

E' proseguito il rilievo sperimentale del trasporto torbido nei tre bacini "storici" dei torrenti Sillaro, Santerno e Savena, ed è entrata in funzione la stazione di Volta Scirocco nel febbraio 2003 che, collocata a 5 km dalla foce, consente di monitorare il fenomeno nell'intero bacino.

Con 6-7 anni di misure in campo è possibile ora analizzare il fenomeno erosione-trasporto torbido su un arco di tempo più lungo e quindi trarre anche qualche considerazione sull'entità e le caratteristiche del fenomeno.

E' stato avviato il monitoraggio del trasporto di fondo nel tratto terminale del fiume Reno al ponte della Bastia e sul torrente Santerno, per comprendere e quantificare la complessa dinamica del fenomeno dell'erosione e quindi del trasporto a mare di solidi in un grande e complesso bacino idrografico.

Quando la massa di informazioni raccolte in campo sarà sufficiente, potrà permettere di capire meglio l'interazione tra fiume Reno e costa per quel che concerne il rapporto erosione/trasporto a mare di sedimenti da parte del Reno.

Oltre alla quantità di solido trasportato, ora vengono sistematicamente analizzate le sue caratteristiche sia sotto il profilo granulometrico, petrografico e geochimico.

Riteniamo che le attività in corso potranno fornire elementi conoscitivi aggiornati utili alla pianificazione di bacino in numerosi settori, dalla definizione di azioni per l'assetto dei versanti e dei corsi d'acqua alla stima del contributo del trasporto solido alla evoluzione della linea di costa, temi che costituiscono riferimenti importanti per la pianificazione territoriale nelle aree interessate.

*Ferruccio Melloni
Segretario Generale
Autorità di Bacino del Reno*

La Facoltà di Agraria in questi ultimi anni è stata interessata da avvenimenti senza precedenti, destinati a segnarne profondamente l'esistenza, quali il



UNIVERSITÀ, AUTORITÀ DI BACINO, ARPA, CONSORZI DI BONIFICA, INSIEME CONTRO IL RISCHIO IDROLOGICO

riordino degli studi ed il trasferimento della sede principale.

Sulla base del nuovo quadro normativo concernente l'autonomia didattica degli Atenei, è stato completamente rivisto l'ordinamento didattico. Potendo contare su un'ampia e qualificata disponibilità di risorse che le deriva sia da una consolidata tradizione, sia dalla dotazione di moderne strutture e di adeguati servizi di supporto. La Facoltà ha riorganizzato gli studi proponendo una nuova offerta didattica, vasta ed articolata, con l'obiettivo di dare risposte concrete e puntuali alle aspettative del mercato del lavoro in ambiti diversificati di grande interesse attuale e futuro.

Il giudizio sulla bontà della nuova offerta è decisamente positivo in termini di immatricolazioni.

2

Sotto il profilo della ricerca questa Facoltà ha sempre dimostrato e tuttora dimostra la sua capacità di dare concrete risposte, anche di fronte alla crescente complessità del sistema di riferimento. Questa Aula Magna ospita numerose iniziative nel corso delle quali la Facoltà presenta e discute risultati di attività di ricerca che spesso assumono caratteri fortemente innovativi. E a proposito di iniziative interessanti desidero complimentarmi con i promotori e con gli organizzatori di questa giornata di studio.

Ricordo che la legge quadro 183 dell'89 presenta l'aspetto innovativo di avere, con la creazione delle Autorità di Bacino, collocato all'interno dei confini naturali del bacino idrogeografico gli ambiti della gestione delle acque, collegando fra loro la difesa del suolo, la difesa dalle acque e delle acque e gli usi. Tuttavia numerosi altri enti istituzionali sono coinvolti nella gestione e pianificazione delle acque: i Consorzi di bonifica, il Canale Emiliano Romagnolo, l'Arpa, i Comuni, le Province e la Regione attraverso gli assessorati competenti.

Poiché questa Facoltà, nell'ambito delle proprie finalità, svolge da tempo attività di sperimentazione e ricerca nel settore idrologico-ambientale, pare di poter affermare che sia interesse reciproco collaborare per una ottimale razionalizzazione delle risorse e per procedere al confronto dei risultati ottenuti. Obiettivi da tempo perseguiti da alcuni gruppi di ricerca della Facoltà che richiedono uno sforzo comune sia nel cercare la collaborazione che nell'orientamento della ricerca verso finalità anche applicative.

Nell'ambito di questo spirito di cooperazione il Dipartimento di Economia e Ingegneria Agrarie ha in essere diverse collaborazioni con l'Autorità di Bacino del Reno, con Arpa, con il Consorzio di Bonifica di secondo grado per il Canale Emiliano Romagnolo e con il Consorzio della Bonifica Renana, solo per citare le più recenti.

I progetti interconnessi sia relativamente alla collaborazione integrata tra i diversi Enti e l'Università, sia per gli obiettivi, ne vedono responsabile Donatella Pavanelli.

Fra di essi possiamo definire *progetto madre* quello che vede la collaborazione dell'Autorità di Bacino con il DEIAgrA, avviato nel 1996 e sviluppato nel corso degli anni, il quale trova la sua ragione nella richiesta da parte dell'ente istituzionale, preposto alla pianificazione del territorio, di dati e di ricerca applicata nel settore idrologico ambientale.

Dall'altra parte l'Università è stata in grado di accogliere tali richieste e svilupparle nell'ambito delle proprie competenze di ricerca e formazione di giovani ricercatori, con l'obiettivo comune di acquisire i dati necessari per una migliore conoscenza dei fenomeni erosivi che interessano il bacino del Reno, estrapolabili a gran parte dell'Appennino tosco emiliano.

Il rischio d'erosione è un rischio idrogeologico tipicamente evolutivo, ne segue che, conoscere i fattori locali consente di fotografare la situazione al presente, predirne l'evoluzione e adottare le pratiche atte al rallentamento del fenomeno.

L'erosione del suolo si manifesta sovente come conseguenza di cattive pratiche agricole, in aree intrinsecamente fragili. Condizioni ampiamente presenti nelle aree acclivi del nostro Appennino, caratterizzate da substrato a litologia argillosa e precipitazioni intense, accompagnate spesso da un uso del territorio inadeguato. In tempi più o meno rapidi, in funzione dell'intensità del fenomeno erosivo e della predisposizione del territorio, si possono presentare danni, talora irreversibili.

A livello locale, le principali conseguenze dell'erosione accelerata sono la riduzione delle caratteristiche di fertilità, di permeabilità e della capacità di trattenere l'acqua da parte del suolo, fino ad arrivare a fenomeni di desertificazione vera e propria.

A scala di bacino e di regione l'erosione del suolo è da mettere in relazione con:

- il peggioramento delle caratteristiche qualitative dei corpi idrici;
- l'eutrofizzazione delle acque;
- l'incremento del rischio idraulico di piene;
- l'innescamento dei processi di dissesto dei versanti sia superficiali che profondi;
- l'interrimento degli invasi e degli alvei di pianura;
- pesanti conseguenze sulla vita animale e vegetale nelle acque.

Se ne deduce l'importanza dello studio del fenomeno erosivo al fine di fornire indicazioni utili sia a prevenire tale fenomeno nelle zone a rischio, o impedirne l'aggravarsi, sia per dare indicazioni relativamente alla sistemazione dei terreni in erosione.

Il progetto in corso ha consentito di sviluppare fino ad oggi aspetti di ricerca applicata, alcuni dei quali immediatamente fruibili da parte dell'ente istituzionale:

- creare la banca dati idrogeologici del bacino montano del F.Reno: i dati sono messi a disposizione dell'Autorità di Bacino per la realizzazione dei piani di sottobacino del Fiume Reno;
- stimare la perdita di suolo a livello di bacino e sottobacino;
- fornire indicazioni utili alla programmazione a livello di bacino e relativamente all'uso delle acque superficiali, per es. minimo deflusso vitale.

Lo studio di altri aspetti è stato avviato in tempi recenti:

- stima del bacino dei solidi trasportati a mare, nell'ambito dello studio sul ripascimento delle spiagge dell'alto Adriatico;
- analisi delle relazioni tra gli agenti inquinanti ed i trasporto torbido.

Da quanto sinteticamente detto emerge la forte integrazione tra l'attività di monitoraggio ed elaborazione dati e le richieste degli enti istituzionali: il ciclo virtuoso prevede la trasmissione e l'interscambio dei dati e delle competenze dall'Università agli Enti e viceversa.

Nel caso specifico, la raccolta dati per fini ambientali e di gestione delle risorse idriche consente e prevede tempi differiti rispetto alle loro elaborazioni ed uso.

Tuttavia, per un ottimale utilizzo delle risorse e dei dati, è da ricordare che le stesse informazioni potrebbero essere sfruttate anche per la previsione del rischio idrogeologico. In tal caso un aspetto importante da affrontare sarà legato alla trasmissione in tempo reale delle informazioni, non solo quindi al laboratorio universitario, ma anche verso gli Enti, favorendo la condivisione delle misure tra enti diversi in funzione delle rispettive competenze.

L'esperienza maturata in oltre un decennio di collaborazioni consente di fare alcune considerazioni in merito, che possono essere intese anche come linee guida:

- la ricerca deve poter soddisfare sia le richieste degli Enti, sia l'attività di sperimentazione e ricerca che l'Università ha nell'ambito delle proprie finalità;
- la collaborazione deve prevedere obiettivi chiari e condivisibili da entrambi gli enti;
- la collaborazione comporta una forte integrazione anche umana;
- il radicamento dell'Università sul territorio passa necessariamente da tali rapporti.

Domenico Regazzi
Presidente Facoltà di Agraria
Alma Mater Studiorum, Bologna

MONITORAGGIO IDROTORBIDIMETRICO PER LA STIMA DELL'EROSIONE NEL BACINO MONTANO DEL RENO

INTRODUZIONE E OBIETTIVI

Il trasporto solido in sospensione dei corsi d'acqua, detto anche trasporto torbido, può essere considerato un valido indicatore dei fenomeni di erosione del suolo che avvengono ad opera delle acque dilavanti, sui versanti del bacino. L'erosione del suolo è inevitabilmente collegata all'uso agricolo di territori intrinsecamente fragili a causa, principalmente, dei fattori geolitologici e climatici: il nostro Appennino ne è un caso esemplare.

L'erosione provoca, da un lato, la degradazione del suolo, dall'altro è stata identificata come una delle maggiori cause di deterioramento della qualità delle acque superficiali e di perdita della diversità biologica.

Inoltre, tra i più noti effetti del trasporto solido in sospensione si ricordano:

- i fenomeni legati alle dinamiche costiere, in particolare il ripascimento delle coste basse o l'erosione delle stesse, a seconda che il bilancio dei solidi a mare sia positivo o meno;
- l'inquinamento e l'eutrofizzazione dei corpi d'acqua superficiali: numerosi studi sui processi di trasporto concordano nell'attribuire ai solidi sospesi il ruolo di veicolo preferenziale per la migrazione di agenti inquinanti e nutrienti;
- la perdita di efficienza delle opere di approvvigionamento idrico;
- l'interrimento dei bacini artificiali e degli alvei, con la formazione dei fiumi ad alveo pensile, in pianura.

La gravità potenziale di questi effetti ha portato alla promulgazione della legge quadro 183/89 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo" dove è stato fatto il primo tentativo di dare una sistemazione organica alla gestione delle risorse idriche sia in relazione alla difesa delle acque dall'inquinamento che al loro uso, che alla difesa del suolo, nell'ambito dell'unità del bacino idrografico considerato nel suo insieme di ecosistema naturale.

Il controllo e contenimento di tali effetti rientrano nell'ambito della gestione e della protezione dell'ambiente: poiché una corretta regolamentazione dell'uso delle acque e del suolo passa necessariamente attraverso la conoscenza dei fenomeni fisici, la necessità di dati sperimentali rende il monitoraggio fluviale un basilare tassello nella gestione di unità territoriali complesse quali i bacini idrografici.

Un programma di monitoraggio idrologico prevede necessariamente un numero consistente di anni di dati per poterne estrapolare delle considerazioni statisticamente affidabili, a causa sia della variabilità delle precipitazioni, e quindi dei deflussi liquidi e solidi, sia della specificità delle condizioni caratterizzanti ciascun bacino fluviale.

Sulla base di tali presupposti si è avviato il monitoraggio del fiume Reno e di alcuni suoi affluenti principali.

Il progetto, che vede la collaborazione dell'Autorità di Bacino del Reno con il Dipartimento di Economia e Ingegneria Agraria dell'Università di Bologna, è stato avviato nel 1996 e sviluppato nel corso degli anni, trova la sua ragione nella richiesta, da parte dell'ente istituzionale, di dati e di ricerca applicata che l'Università è stata in grado di accogliere e sviluppare, nell'obiettivo comune di acquisire una migliore conoscenza dei fenomeni erosivi ed idrologici che interessano il bacino del Reno, estrapolabili a gran parte dell'Appennino tosco-emiliano.

Tuttavia altri enti istituzionali sono stati coinvolti e hanno dato la massima collaborazione alla riuscita del presente programma, in corso d'opera, tra i principali si ricordano: il Servizio Provinciale Difesa del Suolo della Regione Emilia-Romagna, l'Arpa Agenzia Regionale Prevenzione Ambiente, il Servizio Idro Meteo (Sim) di Arpa (ex Servizio Idrografico e Mareografico Italiano), il Consorzio per il Canale Emiliano Romagnolo, i Comuni interessati alle installazioni delle capannine stazioni di

monitoraggio, ed il Consorzio della Bonifica Renana. Alcune di queste collaborazioni hanno dato luogo anche a specifici progetti di ricerca.

Obiettivo del presente lavoro è la diffusione dei dati idro-torbidimetrici rilevati nell'ambito di tale programma di ricerca, finanziato dall'Autorità di Bacino del Reno ed in prima istanza dall'Assessorato Agricoltura e Ambiente della Regione Emilia-Romagna.

Attualmente sono state realizzate e sono operative le stazioni idrometriche, con campionamento delle torbide dei seguenti corsi d'acqua:

- T. Sillaro, con un bacino di 137,6 km², avviata nell'aprile 1997,
- T. Lavino (82,6 km²), operativa dal settembre 1998,
- T. Savena (168,9 km²) dall'ottobre 2000,
- Fiume Reno (4.139 km²) dal febbraio del 2003, presso la foce in Adriatico.

In questo lavoro si presentano i dati di portata, di trasporto torbido, dall'avvio delle 4 stazioni fino al primo semestre del 2004, e delle precipitazioni (fonte: Sim-Arpa) misurati dall'avvio delle 4 stazioni al primo semestre del 2004. I dati sono riportati su base giornaliera e sono preceduti da una sintetica descrizione dell'ambito territoriale in cui si opera, della strumentazione impiegata nel monitoraggio e della metodologia di lavoro adottata.

METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE

Per le 4 stazioni di monitoraggio idrotorbidimetrico realizzate sui tre affluenti si sono mantenuti gli stessi criteri progettuali: medesima collocazione, alla chiusura del bacino montano su una briglia in buono stato, medesima strumentazione e medesima strategia di raccolta dei dati e dei campioni.

Le stazioni sono state installate nell'ambito della provincia di Bologna: la sezione del torrente Sillaro è stata realizzata presso le terme di Castel San Pietro Terme, la stazione di monitoraggio del torrente Lavino è ubicata in comune di Zola Predona, località Lavino di Sopra, e la stazione sul torrente Savena è presso Rastignano.

L'altezza idrometrica è misurata tramite un idrometro (flow meter) a ultrasuoni (*fig. 1*), alimentato con a batterie, e dotato di schermo a cristalli liquidi. Lo strumento rileva il carico idraulico ogni minuto e memorizza il dato medio su intervalli di 30 minuti. La memoria interna consente l'archiviazione di circa 20.000 dati (pari a circa 1 anno di dati). L'idrometro è munito di software che consente di calcolare la portata, sulla base di una relazione selezionata. Nel caso specifico la portata è calcolata sulla base della scala di deflusso, essendo la sezione geometricamente nota ed il carico idraulico misurato dall'idrometro.

Il campionatore (*fig. 1*) è dotato di 24 bottiglie in polietilene della capacità di un litro ciascuna, e ha un proprio software che lo rende in grado di operare anche autonomamente, su base temporale. L'apparato di prelievo è costituito da una pompa peristaltica collegata ad un tubo in silicone con filtro terminale, mentre un braccio distributore riempie in successione le bottiglie. L'intasamento del filtro o del tubo stesso è impedito dalle operazioni di spurgo che precedono e seguono ogni prelievo. Il filtro di prelievo è collocato a valle della briglia, alla profondità di circa 20 cm rispetto al fondo dell'alveo, nella zona centrale della sezione. Tale collocazione garantisce una maggiore rappresentatività dei campioni, poiché la base dell'opera è interessata da forti turbolenze che causano il rimescolamento dell'acqua.

Il campionatore riceve l'impulso che attiva il campionamento dall'idrometro, cui è collegato. L'impulso è determinato dal volume d'acqua passante dalla sezione che, in generale, per il periodo di rilevamento considerato, è stato fissato pari a 100.000 m³: questo consente di avere il numero dei campioni in proporzione al deflusso. Poiché le "torbide"

sono in relazione con gli eventi di piena.

Tale sistema di campionamento permette di seguire, nel modo migliore, l'andamento del fenomeno.

Per quanto riguarda la sezione alla foce del Reno, considerate le caratteristiche idrauliche del fiume, si è deciso per il campionamento temporizzato: producendo un campione "composito" al giorno: in 24 ore viene prelevato un campione da 1 litro, costituito da 3 campioni parziali, ciascuno da circa 330 cl prelevati ogni 8 ore. Questa prassi permette di ottenere un campione medio giornaliero adeguato agli eventi di torbida presenti a foce Reno.

I campioni di torbida sono sottoposti alle seguenti analisi:

1. determinazione dei solidi residui - analisi gravimetrica: separazione dei solidi con centrifugazione ed essiccazione a 105°C fino a peso costante;
2. analisi granulometrica - velocità di sedimentazione, con l'applicazione della legge di Stokes, metodo della pipetta;
3. determinazione dell'azoto totale;
4. analisi torbidimetrica - torbidimetro da laboratorio (Hach, model: 2.100AN) fondo scala 10.000 unità nefelometriche (NTU);
5. determinazione dei solidi sedimentabili in cono Imhoff.

Le analisi 1, 2, 3 sono effettuate presso i laboratori dell'Agenzia Regionale Prevenzione Ambiente (Arpa) della Regione Emilia-Romagna nell'ambito di una convenzione di ricerca, le analisi 4 e 5 sono effettuate in sede, presso il laboratorio di Idraulica del Dipartimento. I dati immagazzinati dall'idrometro sono trasferiti in tempo reale sul PC via modem.

I dati di pioggia riferiti ad intervalli di 30 minuti, sono forniti dall'ex Servizio Idrografico e Mareografico Italiano sede di Bologna, attualmente Sim - Arpa.

Le stazioni pluviometriche che interessano i bacini studiati sono:

T. Sillaro - S. Benedetto del Quercetto, Prugnolo, S. Clemente, Castel del Rio e Borgo Tossignano;

T. Lavino - Monte S. Pietro, Monte Ombraro e Cà Bortolani;

T. Savena - Pianoro, Monzuno e Monghidoro.

L'afflusso medio sui bacini è stato ponderato secondo la metodologia dei poligoni di Thiessen.

TARATURA STRUMENTALE

Gli strumenti sono stati sottoposti a verifica di laboratorio e taratura, si

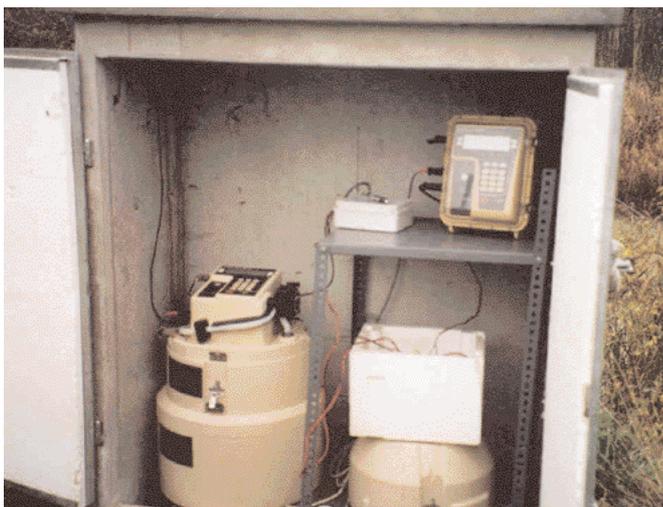


Fig. 1 - Stazione di monitoraggio con l'idrometro ad ultrasuoni, a destra, il campionatore automatico di liquidi, a sinistra, ed il PC portatile per scaricare i dati; sul muretto è posto il sistema di sostegno della sonda ad ultrasuoni, di cui si vede la protezione.

è inoltre effettuata una campagna di misure della portata con mulinello idraulico, in collaborazione con il Servizio Provinciale Difesa del Suolo Risorse Idriche e Forestali dell'Assessorato al Territorio Programmazione e Ambiente della Regione Emilia-Romagna, al fine di verificare la scala di deflusso strumentale.

La tabella di relazione carico-portata è stata ricavata sulla base della formula degli stramazzi, tenendo conto della sezione doppio trapezia del manufatto.

$$Q = \mu L h \sqrt{2gh} \quad (1)$$

dove:

- Q = portata;
- μ = coefficiente teorico di efflusso;
- L = larghezza delle sezioni di misura (L_1, L_2);
- h = carico idraulico;
- g = accelerazione gravitazionale;

La relazione carico portata è stata inserita nel programma dell'idrometro: in *tabella 1* si riporta la scala con la scansione di 10 cm.

CARATTERIZZAZIONE DEI BACINI MONTANI:

SILLARO, LAVINO E SAVENA

Il bacino idrografico del Reno ha una superficie di 4.139 km², corrispondente al 18% dell'intera superficie fisica dell'Emilia-Romagna e al 6% di quella del bacino del Po.

La superficie del bacino di pianura è pari a 1.542 km², mentre la porzione montana-collinare si estende nell'Appennino tosco-emiliano romagnolo su una superficie di 2.597 km². La superficie dei bacini dei tre affluenti del Reno attualmente monitorati copre complessivamente un'area di 389 km². L'afflusso meteorico sul bacino è, in media, circa di 1.000 mm annui.

I tre bacini sono rappresentativi dei caratteri tipici dell'Appennino emiliano-romagnolo: i corsi d'acqua principali sono allineati secondo l'asse sud-ovest nord-est. I bacini presentano forma stretta ed allungata, fattore che accentua il carattere tipicamente torrentizio, con piene repentine e a volte rovinose: la litologia dei bacini è costituita prevalentemente da rocce di origine sedimentaria. Tutti e tre i bacini sono scarsamente abitati nella parte montana.

I versanti presentano, nella porzione più valliva, pendenze contenute e sono spesso interessati da fenomeni di dissesto di varia gravità: dai fenomeni erosivi, alle frane per colata e smottamento, ai calanchi. Il Lavino è il più antropizzato dei tre, sia per quanto riguarda l'uso agricolo del suolo, sia per gli insediamenti abitativi recenti ed in rapido sviluppo.

Il torrente Sillaro, affluente di destra del Reno, ha origine nell'Appennino presso Piancaldoli (FI), si addentra in Emilia in corrispondenza di Giugnola e prosegue il suo corso in direzione N-NE segnando il confine geografico tra l'Emilia e la Romagna. In Comune di Castel San Pietro (prov. Bologna) si chiude il bacino montano. L'idrografia del bacino presenta un'elevata densità di drenaggio con il tipico pattern dendritico caratteristico delle aree impermeabili a causa della litologia argillosa. Il reticolo idrografico consta di 16 affluenti principali, di cui 13 in sinistra idraulica e 3 in destra le cui caratteristiche sono riportate in *tab 1*. Dal punto di vista geologico il bacino insiste verso Sud, al confine con la Toscana, su lembi della formazione Marnoso Arenacea costituita da alternanza di arenarie e marne, per il resto si estende in gran parte sul Caotico eterogeneo, costituito prevalentemente da argille grigiastre che, in seguito a complessi fenomeni tettonici, hanno assunto un alto grado di caoticità inglobando al loro interno, come alloctoni, formazioni di età e litologia diversa.

Progressivamente verso nord si incontrano rocce sedimentarie di ambiente lacustre: dai livelli evaporitici (Gessoso solifera) del Miocene superiore si passa ai conglomerati e sabbie del Pliocene infe-

riore, alle argille e argille marnose del Pliocene medio superiore, fino alle argille sabbiose del Calabriano.

Dal punto di vista pedologico il bacino è interessato prevalentemente da: regosuoli, suoli bruni e pseudogley, tipici suoli che evolvono su associazioni argillose; i suoli più evoluti si incontrano su pendici boscate. I più diffusi sono i regosuoli, poco profondi e con abbondante scheletro. Il bacino montano ha un'estensione di 137,6 km², con quote comprese tra i 68 ed i 993 m. s.l.m.

La morfologia generale è abbastanza dolce, solo il 7,6% del bacino presenta pendenze superiori al 35%, tranne quando si incontra il paesaggio calanchivo tipica e frequente forma morfologica appenninica prodotta dall'azione erosiva delle acque su versanti ad elevata acclività e carente copertura vegetale e/o su substrato argilloso ad elevata erodibilità.

Per quanto riguarda la copertura vegetale, il bacino è interessato da: bosco ceduo spesso degradato (14%), zone sterili per affioramento roccioso e/o copertura vegetale carente (49%), pascolo (6%) e, dove la pendenza lo consente, da seminativi (17%), la parte restante è interessata da vigneti, frutteti, corpi idrici, insediamenti, ecc... Come si può dedurre dall'uso del suolo l'area è scarsamente abitata, solo a nord, dove si trovano le colline ed il fondovalle più fertili, è interessata dall'agricoltura.

Il torrente Lavino, affluente di destra del fiume Samoggia, trae origine in località Croce delle Pradole, nei pressi di Montepastore, sull'Appennino emiliano. Il suo corso si sviluppa secondo la direttrice sud ovest-nord est, presenta quattro affluenti principali, due di sinistra e due di destra, alimentati da numerosi subaffluenti di lunghezza modesta a regime tipicamente torrentizio. Il bacino montano del Lavino ha una estensione di 82,6 km², a fronte di un reticolo idrografico di 175,7 km, presenta una pendenza media del 2,9 %, una altitudine media di 370 m con quote comprese tra 75 m e 776 m. Le caratteristiche geolitologiche del Lavino non si discostano molto da quelle proprie del T. Sillaro: a nord predomina il Pliocene, nella facies prevalentemente argillosa, mentre andando verso sud si incontrano le Argille Scagliose o Caotico Eterogeneo, su cui poggiano lembi della formazione marnosa denominata Schiler.

La morfologia del bacino è piuttosto semplice: nel tratto mediano presenta una valle lunga e sinuosa ove il Lavino scorre fra pendici di scarsa inclinazione ma piuttosto dissestate, infatti solo il 25% dei terreni ubicati nel bacino montano hanno una pendenza superiore al 35%. I suoli siti nel bacino montano del torrente Lavino sono generalmente di modesto valore agronomico.

Individuiamo due fasce di impiego: a nord troviamo in prevalenza colture erbacee, mentre a sud queste tendono a cedere il passo a zone adibite a pascolo o a bosco; osserviamo come i seminativi siano ubicati soprattutto nei terreni più fertili dei fondovalle (terrazzi fluviali), tra cui compaiono saltuariamente colture arboree specializzate come vigneti e frutteti, mentre lasciano il posto a cespuglieti, spesso adibiti a pascolo, sulle pendici e al bosco di latifoglie e al castagneto alle quote maggiori. L'insediamento antropico presenta una intensità decrescente risalendo l'asta del torrente.

Il bacino montano del Savena è ampio 168 km² e presenta quote comprese tra 200 e 1.275 m s.l.m.. Trae origine da tre rii detti le tre

Torrente	Sillaro	Savena	Lavino
Precipitazione media (mm)	942	955	1015
Precipitazione massima media (mm) (Nov.)	113	100	100
Precipitazione minima media (mm) (Lug.)	44,7	48	52
Temperatura media (C°)	10,7	10,7	10,7
Temperatura massima media (C°) (Lug.)	-7,6	-7,6	-7,6
Temperatura minima media (C°) (Gen.)	29,2	29,2	29,2

Tab. 1 - Caratteristiche climatiche di ciascun bacino

Savenelle, in territorio toscano, che scendono da un anfiteatro in cui la vetta più alta arriva a m 1.302. La densità del reticolo idrografico è elevata: i numerosi affluenti presentano un andamento pressoché perpendicolare al Savena, e uno sviluppo, in lunghezza, contenuto a causa della caratteristica forma del bacino stretta e lunga, come peraltro tutti i bacini di questa porzione dell'Appennino. Tale idrografia, assieme al regime delle precipitazioni, contraddistingue il carattere torrentizio del Savena. Peraltro, la presenza di numerose sorgenti favorisce la continuità di portata anche durante i periodi estivi. Le formazioni litologiche su cui insiste il bacino del Savena, nella porzione montana, sono rocce stratificate prevalentemente arenacee che consentono la presenza di pendenze elevate, e nelle quali è profondamente inciso l'alveo del Savena nella porzione montana. I versanti sono, specie in sinistra idrografica, ad elevata acclività e sono interessati per lo più da boschi di latifoglie. Nella fascia tra i 300 ed i 1.000 metri sono presenti i castagneti. Nella porzione valliva sono predominanti formazioni a litologia argillosa, quali le argille scagliose, con pendenze minori, interessate da seminativi e pascoli e da frequenti fenomeni di erosione e dissesto. Il progressivo abbandono dell'agricoltura fa sì che oltre il 20% della superficie agraria sia a pascolo o incolto.

CARATTERISTICHE CLIMATICHE

Il regime termometrico (basato sui dati registrati dalla stazione termometrica di Monteombraro, (7.727 m s.l.m., 1969 - 1989): la temperatura media annua è di 11,8°C, le minime si riscontrano nel trimestre dicembre-febbraio con 3°C medi, la massima temperatura si verifica in luglio con 21,9°C medi. (Tab. 1).

Per lo studio delle precipitazioni si sono prese in considerazione le stazioni che interessano il bacino del Sillaro: San Benedetto del Querceto, S. Clemente, Castel del Rio e Prugnolo (Annali del S.I.I.), per il ventennio comune 1966-83. Lo studio ha evidenziato la presenza di un tipico regime pluviometrico appenninico: un primo massimo in primavera, un secondo massimo, più pronunciato, in autunno e un minimo assoluto in estate.

In fig. 2 si riporta l'andamento medio delle precipitazioni e gli ietogrammi relativi ai 7 anni di rilevamento: questi ultimi rientrano nella fascia di oscillazione delle precipitazioni medie (al 95% di probabilità di errore) ventennali, con una tendenza a mantenersi sul limite inferiore, a causa della mancanza di stazioni pluviometriche a quote alte, essendo quella di Piancaldoli attualmente inattiva.

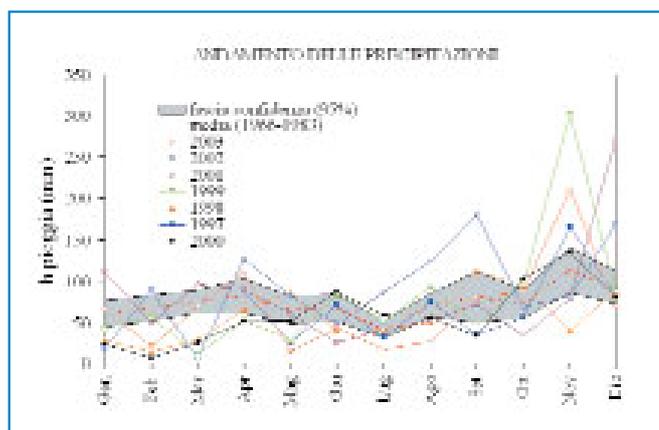


Fig. 2 - Confronto tra l'andamento medio ventennale (1962-1983) delle precipitazioni sul bacino del T. Sillaro, relative alle stazioni di San Benedetto del Querceto, S. Clemente, Castel del Rio e Prugnolo (Annali del S.I.I.), con fascia di confidenza al 95%, e le precipitazioni annue, ponderate con Thiessen, durante il periodo di monitoraggio dal 1997 al 2003

DEFLUSSO TORBIDO E PERDITA DI SUOLO

TERMINOLOGIA

I solidi sospesi fluviali, detti anche trasporto torbido, sono costituiti da materiale fine, dalle sabbie alle argille, in rapporto variabile in funzione della portata liquida, dei parametri idraulici della sezione di misura e delle caratteristiche geopedologiche, climatiche, geomorfologiche e di copertura vegetale del bacino idrografico.

Si riportano le definizioni in uso nella presentazione dei dati:

Torbidità specifica in una sezione ed in un dato istante: quoziente fra il valore della portata torbida e quello della portata liquida relativa a quella sezione ed in quell'istante (kg/m³).

Deflusso torbido in una sezione per un dato intervallo di tempo: peso del materiale solido in sospensione che ha attraversato la sezione nell'intervallo, espresso in tonnellate (t).

Deflusso torbido unitario in una sezione e per un dato intervallo di tempo: quoziente fra il valore del deflusso torbido relativo a quell'intervallo e l'area del bacino imbrifero sotteso dalla sezione (t/km²).

6

TRASPORTO TORBIDO: ANALISI DEI DATI

Il metodo di campionamento delle torbide che si è adottato, rapportato al volume di acqua defluita dalla sezione considerata, ha consentito di prelevare un numero di campioni, per ciascun evento, in relazione alla portata e quindi alla magnitudine dell'evento stesso. I campioni, di conseguenza, sono concentrati nelle fasi idrologiche più interessanti per lo studio del trasporto torbido. Circa il 90% dei campionamenti sono imputabili agli eventi di piena significativi.

Per la stima della portata torbida è stata impiegata la procedura di interpolazione di Walling and Webb (1982)

$$Q_s = k \sum_{m=1}^{12} (C_m Q_m) \quad (2)$$

dove: Q_s è la portata annua dei solidi sospesi, k è un fattore di conversione per le unità di misura, C_m è la concentrazione media mensile dei solidi sospesi, Q_m è la portata media mensile.

Sul fiume Sillaro, dal 1997 ad oggi sono stati raccolti 1.352 campioni di acqua fluviale: il trasporto torbido medio è di 3,7 g/l e la deviazione standard di 5,7 g/l. L'alta deviazione standard è dovuta probabilmente alla stretta relazione del trasporto torbido con gli eventi piovosi intensi e per questo presenta un'alta variabilità.

I campioni prelevati sul Savena da 2000 ad oggi sono complessivamente 1.258; il trasporto torbido medio è di 1,37 g/l, con deviazione standard di 2,17 g/l.

Per quanto riguarda il Lavino dal 1998 sono stati prelevati 1.051 campioni, con un trasporto medio di 1,10 g/l e deviazione standard di 1,87 g/l.

Per quanto riguarda il Lavino ed il Savena oltre l'80% dei campioni ha presentato una concentrazione inferiore a 2 g/l.

In fig. 4 si riportano gli istogrammi di frequenza della concentrazione dei solidi sospesi nei campioni: per il torrente Sillaro; il 70% dei valori è minore di 4 g/l e circa il 47% dei campioni ha una concentrazione di solidi sospesi inferiore a 2 g/l.

Si è constatato che per valori di portata inferiori a circa 3 m³/s i solidi sospesi non superano mediamente i 2 g/l, all'aumentare della portata si accompagna un irregolare incremento della concentrazione dei solidi.

La perdita di suolo unitaria per il torrente Sillaro è equivalente a 10,1 t/ha, corrispondente a un'asportazione media di suolo, o indice di logoramento, dello spessore di circa 0,67 mm, distribuita mediamente sul bacino idrografico, considerando una massa volumica di 1.500 kg/m³.

Nel corso del 2002, sulla base dei 325 campionamenti, è stato calcolato un deflusso torbido totale di 281.011 t, pari a una perdita di suolo unitaria 20,4 t ha⁻¹ anno⁻¹, corrispondente a ca. 1,36 mm di suolo erosi mediamente sul bacino: i maggiori valori di deflusso torbido si sono registrati nei mesi di febbraio con (168.645 t), dicembre, 48.226 t, e settembre (25.681 t).

Il Savena presenta un deflusso torbido unitario medio di 6,5 t/ha, corrispondente a un'asportazione media di suolo dello spessore di circa 0,43 mm, con punte massime di 8,2 t/ha nel 2003, pari a 0,55 mm di suolo eroso

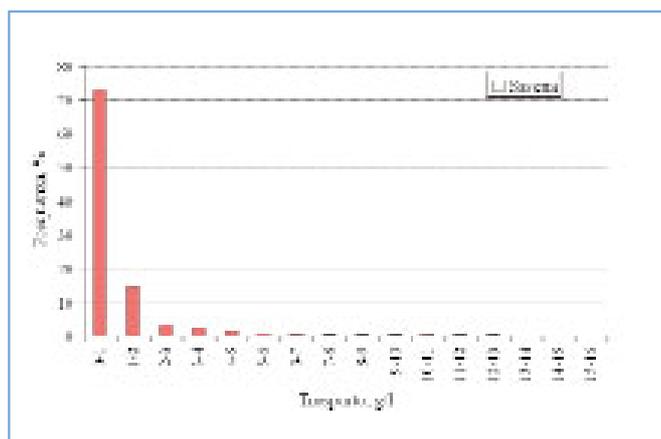
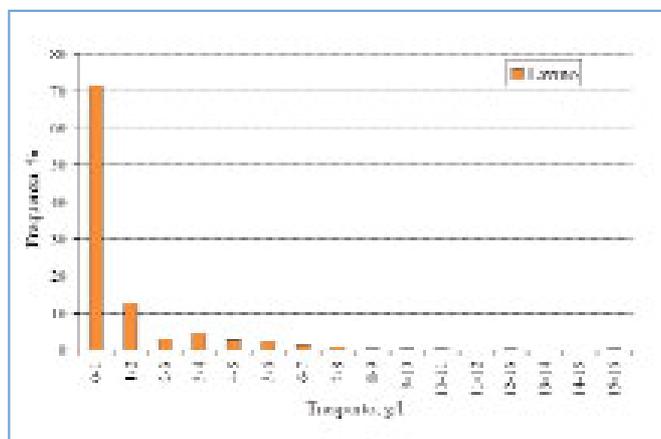
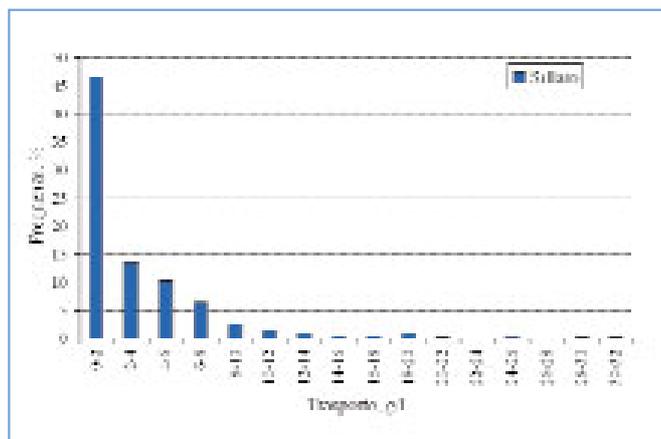


Fig. 4 - Classi di frequenza della torbidità specifica per tutti i campioni dei 3 corsi d'acqua

mediamente dal bacino.

Il T. Lavino presenta il valore decisamente più contenuto di 1,2 t/ha medie, equivalenti a 0,13 mm di suolo eroso all'anno sul bacino.

In fig. 5 è rappresentata la stima del deflusso torbido unitario mensile per ogni torrente: si osserva che, solitamente, i mesi con la massima asportazione di suolo sono quelli invernali, periodo in cui si riscontrano anche i massimi valori di afflusso e deflusso liquido. Risulta evidente l'elevato trasporto torbido del Sillaro rispetto agli altri 2 corsi d'acqua.

Confrontando i valori stimati del deflusso torbido unitario (tab. 2) durante

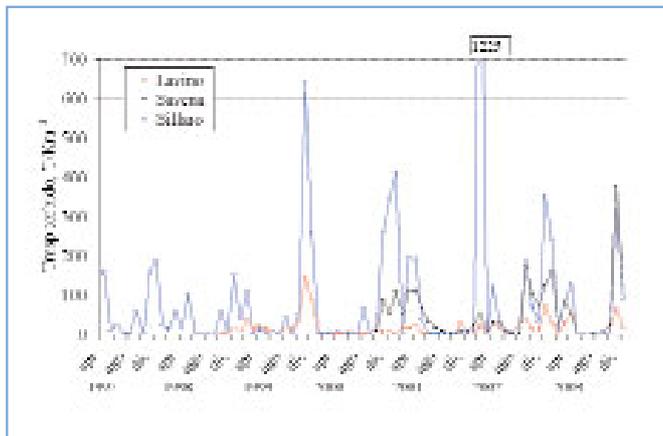


Fig. 5 - Sintesi della stima del deflusso torbido unitario mensile per ogni bacino

il periodo di rilevamento con la classificazione di Fournier, si può ottenere una stima della gravità dell'erosione: si registra una perdita di suolo media "elevata" per il bacino del T. Sillaro, che arriva a rientrare nella classe definita a erosione "forte" nel 2002.

Un'altra classificazione, adottata dal Soil Conservation Service - U.S.D.A., conferma che la perdita media annua per il torrente Sillaro (10 t ha^{-1}) risulterebbe superiore a quella tollerabile per profondità utile minori di $0,60 \text{ m}$. Si nota come i valori tollerati sarebbero molto inferiori nel caso di suoli non rinnovabili.

Per ovvi motivi di spazio i dati idrologici rilevati a cura di Donatella Pavanelli nell'ambito del presente progetto sono pubblicati integralmente on-line nei siti riportati in terza di copertina.

Donatella Pavanelli, Andrea Pagliarani, Alessandro Bigi
DEIAgra, Dipartimento di Economia e Ingegneria Agrarie
Alma Mater Studiorum, Bologna

ANNO SILLARO	DEFUSSO TORBIDO UNITARIO (T/Km ²)	EROSIONE SUOLO mm
1997 (apr-dic)	593	0,40
1998	429	0,29
1999	1161	0,77
2000	707	0,47
2001	845	0,56
2002	2042	1,36
2003	879	0,59
Media (1998-03)	1010	0,67

ANNO LAVINO	DEFUSSO TORBIDO UNITARIO (T/Km ²)	EROSIONE SUOLO mm
1998 (ott-dic)	20	0,01
1999	388	0,26
2000	44	0,03
2001	89	0,06
2002	227	0,15
2003	199	0,13
Media (1999-03)	189	0,13

ANNO SAVENA	DEFUSSO TORBIDO UNITARIO (T/Km ²)	EROSIONE SUOLO mm
2000 (ott-dic)	141	0,09
2001	521	0,35
2002	614	0,41
2003	818	0,55
Media (2001-03)	651	0,43

Tab. 2 - Stima del deflusso torbido unitario e della perdita di suolo annui

BIBLIOGRAFIA

- A.A.V.V., *I suoli dell'Emilia Romagna*, Servizio Cartografico Ufficio Pedologico Regione Emilia Romagna (1994)
- Annali Idrologici Parte 1° Parte 2° - Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale
- Basso F. - *Difesa del suolo e tutela dell'ambiente* - Pitagora ed. Bologna 1995
- Bassi G., Bernardini F., Puppini G. e Sacerdoti G. - *Coordinamento tra le opere idrauliche di pianura e la bonifica montana*, Associazione Naz. Bon., Irrig. e Miglior. fond., Supplemento al Bollettino "La Bonifica Integrale" fasc.IV, ed. Arti Grafiche Tamari Bologna (1959) 36-90
- Becchi L., Billi P. e Tacconi P. - *Trasporto solido e parametri fisici in un bacino idrografico ricerche sperimentali nei bacini dei T. Virginio e Pesciola*, Mem. Soc. Geol. It., 19 (1978) 10, 275-279.
- Caloiero D., Militi L., Rosso, R., Tazioli G.S., Versace P. e Zuffa G.G. - *Problemi di misura del trasporto solido in un piccolo bacino (T. Ilice, Calabria)*, Geologia applicata e idrogeologia, XIV, parte II, (1979) 33-56.
- Cavazza L. - *Agricoltura e Ambiente* - Accademia dell'Agricoltura, ed. Edagricole
- Chisci G., Panicucci M. - *Indagini sperimentali sugli aspetti della conservazione del suolo in piccoli bacini. II. Primi risultati idrologici relativi alle argille plioceniche marine*. Ann.Ist.Sper.Dif.Suolo, Firenze, IV, (1973), 21-37
- Ciccacci S., Fredi P., Lupia Palmieri E. e Pugliese F. - *Contributo all'analisi geomorfica quantitativa alla valutazione dell'entità dell'erosione nei bacini fluviali*, Boll. Soc. Geol. It. n.99 (1980) 455-516
- Gazzolo T. e Bassi G. - *Contributo allo studio del grado di erodibilità dei terreni costituenti i bacini montani dei corsi d'acqua italiani*, XII Assemblea Generale dell'unione geodetica e geofisica Internazionale, Helsinki (1960), 9-19
- Giandotti M. - *Contributo allo studio del trascinarsi dei materiali nell'arco dei torrenti*, Annali LL.PP.(1929)
- Indelicato M., Mazzola G., Rizzo N.A. e Zimbone S.M. - *Indagini a scala di bacino su deflussi superficiali ed erosione*, VI Convegno Nazionale Ingegneria Agraria A.I.I.A., Vol.1, Ancona 11-12/9/1997, 157-16
- Lal R. - *Soil Erosion by wind and water: problems and prospects*, AA.VV. *Soil erosion Research methods*, R. Lal Editor, Soil and Water Conservation Society, (1993) 1-10
- Matarrese N. - *Idraulica agraria*, Edizioni Fratelli Laterza, (1978), Bari
- McCormack, D.E., Young K.K. e Kimberlin. L.W. - *Current criteria for determining soil loss*

- tolerance, determinants of soil loss tolerance*, American Society of Agronomy, Madison (Wisconsin), ASA Special Publication n.45 (1982).
- Pavanelli D., G.Taglioli, A. Pagliarani - *Rilevamento delle portate e del trasporto torbido nelle stazioni sperimentali del torrente Sillaro e torrente Lavino. Analisi dei dati 1997-2000. Monografia a cura dell'Autorità di Bacino del Reno, Regione Emilia Romagna e Toscana, presentata al seminario: "Monitoraggio fluviale ed erosione nella pianificazione e gestione dei bacini appenninici"*, 6 luglio 2001, Palazzina della Viola, Via F. Re, 4, Bologna, (1-62).
- Pavanelli D., A. Pagliarani - *Studio delle relazioni tra il trasporto torbido ed i parametri idrologici per gli eventi significativi rilevati alla stazione di monitoraggio del T. Sillaro dal 1997 al 2001. Atti convegno Nazionale Ingegneria Agraria, Eur.Ag.Eng.: "Ingegneria agraria per lo sviluppo dei paesi mediterranei"*, Vieste, 11-14 settembre 2001, 1-11.
- Pavanelli D., A. Pagliarani - *Monitoring water flow, turbidity and suspended sediment load, from an Apennine catchment basin, Italy*, Biosystems Engineering (gia Journal of Agricultural Engineering Research), *Silsoe Research Institute*. Published by Elsevier Science Ltd., vol 83/4 pp 463-468 DEC/2002
- Pavanelli D. - *Relationship between sediment yield and water flow: results coming from the monitoring of Sillaro Apennines Torrent (near Bologna)* - Atti (CD) Conferenza "Agricultural Engineering into the third millennium, AgEng Warwick 2000" University of Warwick, UK, 2-7 July 2000, (1-6).
- Pavanelli D. e Taglioli G. - *Monitoraggio dei solidi sospesi e della portata in un torrente appenninico (Sillaro): realizzazione della stazione e primi risultati*. Riv.Ing.Agr., ed. Edagricole Bologna, n.3 (2000), 129-139
- Pavanelli D., A. Bigi - *Suspended sediment concentration for three Apennine monitored basins: particle size distribution and physical parameters*. AgroEnviron 2004, Udine 20-24 Ottobre 2004.
- Tamburino V., Barbagallo S. e Vella P. - *Indagine sull'interrimento dei serbatoi artificiali siciliani*, Riv. Ing. Agr. (1989), 3, 156-164
- Visentini M. - *Depositi alluvionali nei serbatoi italiani e trasporto solido fluviale*, *L'Energia Elettrica Fasc. X Vol XVI MI*, ott. (1939), 743-749.
- Walling, D.E. e Webb, B.W. (1982) - *The reliability of suspended sediment load data*. In *Erosion and sediment transport measurements (Proc. Florence Symp., June 1981)*, 177-194, IAHS Publ. 133.

MISURA DEL TRASPORTO SOLIDO DEL FIUME RENO

RIASSUNTO

La conoscenza del trasporto dei sedimenti di un corso d'acqua è di rilevante importanza per l'interpretazione della sua dinamica e per la gestione e programmazione degli interventi di sistemazione idraulica dell'asta principale e le coste prospicienti la sua foce. In questo studio si riportano misure di trasporto di fondo ed in sospensione del fiume Reno che, a parte il Po, è il maggiore fiume dell'Emilia-Romagna, sia per lunghezza (210 km), sia per ampiezza di bacino (4.953 km²). In rapporto alla dinamica di trasporto dei sedimenti, sono state effettuate quattro campagne di misurazioni, in concomitanza di altrettanti eventi di piena. Tali misurazioni sono state effettuate al ponte della Bastia, con apposita strumentazione. Allo stesso tempo, sono state effettuate delle stime sul trasporto solido annuale, tramite formula di Engelund e Hansen (1967), modificata Montefusco (1984), la più adatta per alvei con condizioni e caratteristiche morfologiche e sedimentologiche simili a quelle del Reno. I risultati ottenuti sono in tendenza con quanto osservato in molti fiumi italiani dal dopoguerra: l'antropizzazione degli alvei, l'escavazione del materiale dal letto e la conversione dei terreni montani da seminativi a boschivi e prati, ha causato una drastica riduzione nella produzione di sedimenti e quindi una diminuzione del trasporto di sabbia al mare di circa 3-4 volte. Malgrado questo tipo di studio necessiti di un periodo molto più lungo di monitoraggio, il primo anno di misurazioni ha confermato la scarsissima quantità di materiale trasportato al fondo dal F. Reno ed una marcata tendenza alla diminuzione della portata solida di fondo annuale negli ultimi decenni.

INTRODUZIONE

La quantificazione del trasporto solido fluviale (sia al fondo che in sospensione), attraverso misurazioni dirette e trattazioni teorico-sperimentali, è un dato fondamentale per lo studio della dinamica di un alveo e delle spiagge alimentate dal suo delta. Da un punto di vista pratico le misure dirette non sono di facile realizzazione per i seguenti motivi:

- Tempestività d'intervento in seguito ad un evento di piena.
- Reperibilità di una buona stazione di misura, considerando sia fattori scientifici che prettamente logistici: a) la sezione deve essere non troppo lontana dal mare, per essere rappresentativa di tutto, o quasi, il bacino idrografico, o troppo vicina, da risentire

degli effetti della marea; b) le misure vengono effettuate da ponte, e nella maggior parte dei casi, i nostri ponti non si prestano a tale scopo per il traffico automobilistico o per la presenza di parapetti troppo alti, che impediscono la calata degli strumenti.

- La scarsità di misure di trasporto solido in fiumi italiani (Sacconi & Billi, 1987; Lenzi, D'Agostino, Billi & Paris, 2004), e la quasi completa assenza di dati riguardanti il fiume Reno.

Questo lavoro presenta i primi risultati sul trasporto solido del fiume Reno, dopo il primo anno d'attività, nell'ambito della convenzione stipulata tra il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara e l'Autorità di Bacino del fiume Reno.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Dopo il Po, il Reno, per lunghezza del corso (210 km) e per ampiezza del bacino (4953 km²), rappresenta il maggior fiume della regione emiliano-romagnola. Nasce in Toscana in località Piastre a circa 740 m sul livello del mare e va a sfociare nel mar Adriatico, all'altezza delle valli di Comacchio, dopo aver attraversato le province di Bologna, Ferrara e Ravenna (fig. 1).

Il bacino montano ha una superficie di circa 1.050 Km². L'asta principale ha una lunghezza di circa 80 km, dalla sorgente fino alla chiusa di Casalecchio, che è anche il limite del comprensorio montano. Il regime delle portate è legato alle precipitazioni, con piene che si verificano prevalentemente in primavera e in autunno (fig. 2).

Qui in basso sono riportate le stime dei tempi di ritorno delle piene, calcolate con una interpolazione log-normale e con la formula di Gumbel. Grazie a questi dati è possibile stimare anche la portata al "bankfull", o portata formativa, il cui tempo di ritorno è compreso tra 1.58 e 2.33 anni. I due metodi danno per queste portate valori compresi tra i 300 e i 350 m³/s (fig. 3).

Il ponte di Bastia sottende un bacino di circa 3.410 km² e il fiume ha scorre canalizzato nel suo tratto di pianura. Gli affluenti di questo tratto sono rappresentati oltre che da corsi d'acqua naturali anche da importanti corsi d'acqua artificiali, canali e scoli, che rivestono un ruolo di primaria importanza sia per l'economia agricola che come recettori di scarichi. Confluiscono nel Reno i torrenti Samoggia, Idice, Sillaro, Santerno e Senio e i canali Navile e Savena abbandonato.

L'area oggetto di studio presenta numerose peculiarità meteo-climatiche, direttamente dipendenti da numerose variabili geografiche



Fig. 1 - Bacino idrografico del fiume Reno

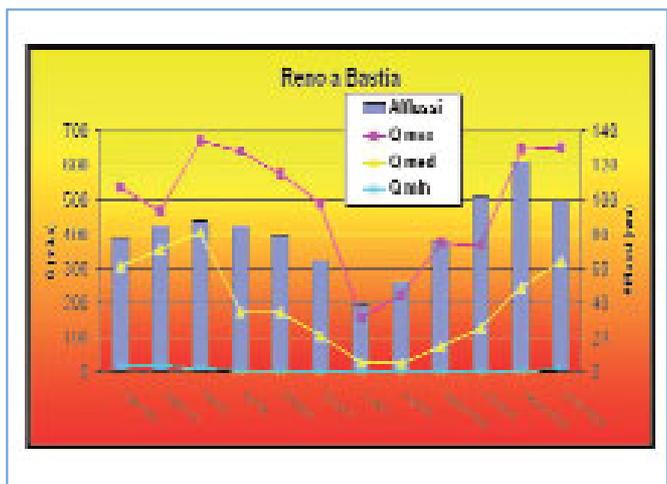


Fig. 2 - Precipitazioni e portate medie annuali

che e morfologiche che determinano altrettanto numerose differenziazioni sia a meso che a microscala.

Durante l'inverno si assiste ad un generale dominio dell'anticiclone continentale generalmente centrato sulla Germania, che determina tempo stabile ma frequentemente nebbioso in pianura con diffuse e intense inversioni termiche nell'area padana e clima sostanzialmente asciutto in collina ed in gran parte dell'area montana, eccetto le aree di spartiacque del Reno e del Santerno. Questa ristretta fascia di spartiacque, identificabile a sud della linea Porretta Terme - Firenzuola, è spesso interessata dalle correnti occidentali miti ed umide che investono il più temperato versante tirrenico, così che il tempo è spesso perturbato con frequenti fenomeni di moderata intensità, a prevalente carattere nevoso. La primavera è stagione d'elevata variabilità meteorologica che determina precipitazioni via via più abbondanti procedendo dalla pianura verso il crinale spartiacque, in maggio possono occasionalmente verificarsi i primi temporali oro-convettivi nell'area alto collinare. L'estate tende ad essere, in termini di totali meteorici percentuali, proporzionalmente più secca proprio nell'area spartiacque che risente in maniera spiccata dell'influenza tirrenica e manifesta pertanto caratteri mediterranei, pur presentando una frequenza temporalesca notevole. L'autunno è ovunque la stagione più piovosa, a causa del diretto interessamento del territorio da parte del flusso di correnti occidentali o meridionali che spesso investe la penisola italiana.

SCELTA ED UBICAZIONE DELLA SEZIONE DI MISURA

La sezione di misura è stata individuata presso il ponte della Bastia (fig. 4, 5 e 6), in quanto rappresenta il compromesso migliore tra esigenze logistiche, tecnico-scientifiche e la posizione più a valle possibile. La sezione si trova a monte della confluenza con il Senio ed il Santerno e poco a valle della confluenza con il fiume Idice. In questa prima fase dello studio è stato quindi necessario effettuare delle misure idrauliche e di trasporto solido anche sul Santerno, in modo tale da non escludere il suo apporto.

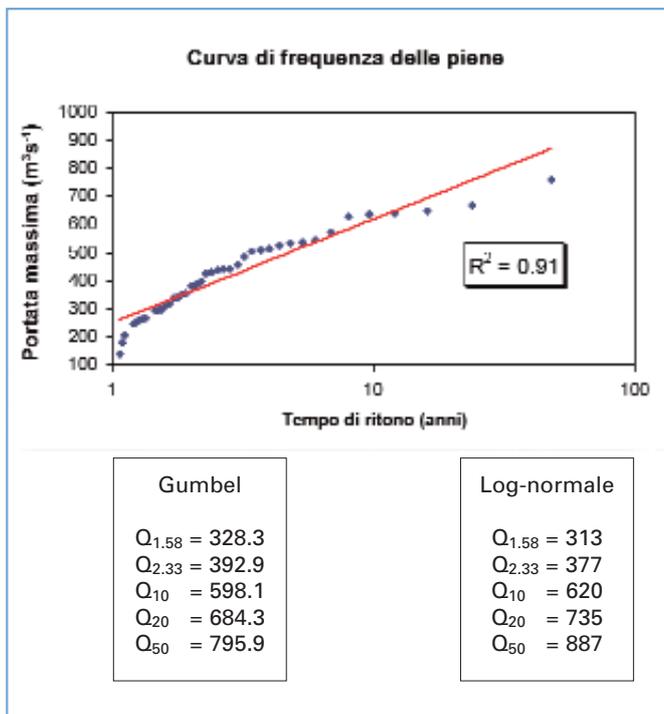


Fig. 3 - Tempi di ritorno e portate caratteristiche fiume Reno

STRUMENTAZIONE

Per ragioni di omogeneità e confronto con le comunque scarse misure effettuate in altri paesi nel mondo, la strumentazione impiegata è la stessa utilizzata dal Servizio Geologico Americano (USGS) e da altre importanti agenzie sia americane che europee.



Fig. 4 - Località ponte della Bastia

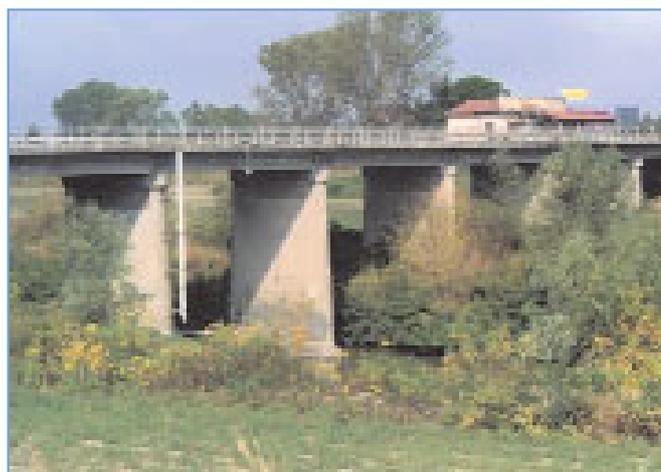


Fig. 5 - Ponte della Bastia

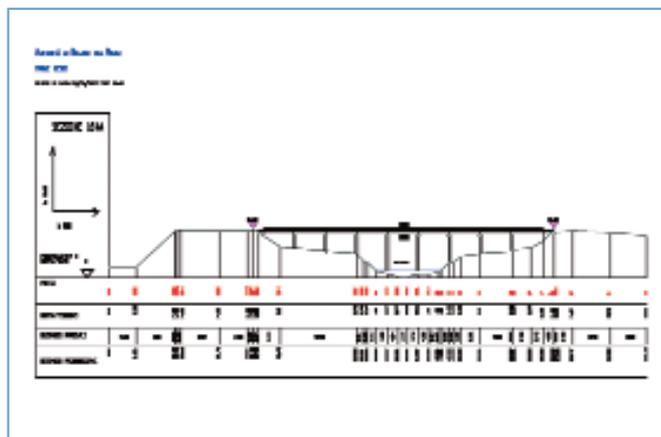


Fig. 6 - Sezione in CAD, ponte della Bastia

MISURATORI DI VELOCITÀ DI FLUSSO

Lo strumento utilizzato per misurare la velocità del flusso è il modello 6200, Tipo AA (fig. 7). Esso viene calato in acqua dall'alto, grazie all'utilizzo di un carrello mobile apposito, dotato di braccio e argano. Il raggio d'azione del correntometro varia da 0.03 a 7.6 m/s, in accordo con le velocità previste per il fiume Reno.

Al correntometro vengono collegati appositi pesi (fig. 8), dalla forma idrodinamica, per minimizzare la resistenza al flusso dell'acqua. Essendo solitamente più lunghi del correntometro, lo proteggono da eventuali urti con le pile dei ponti e/o i detriti trasportati dal corso d'acqua.

CAMPIONATORI PER IL TRASPORTO SOLIDO

La misura del trasporto solido di un corso d'acqua è cosa ben più complessa che la valutazione delle portate liquide in quanto oltre a difficoltà operative si ha una certa variazione della concentrazione dei sedimenti sul fondo e nella sezione trasversale.

Modello US DH-76 per la misura del trasporto solido in sospensione

Questo è un campionatore integratore isocinetico di medio peso (fig. 9) in quanto pesa 11 kg ed è lungo circa 43 cm. Durante le operazioni di campionamento, lo strumento viene immerso in acqua in posizione orizzontale e calato a velocità costante. La sua forma idrodinamica orienta lo strumento mantenendo l'ugello, che cattura la miscela acqua-sedimento, posizionato contro corrente. Mentre il campione viene catturato, l'aria all'interno del contenitore esercita una pressione tale da bilanciare quella idrostatica, in maniera tale che la velocità d'ingresso sia paragonabile a quella della corrente del corso d'acqua.

Modello Helley-Smith per la misura del trasporto al fondo



Fig. 7 - Correntometro



Fig. 8 - Pesi idrodinamici

Questo campionatore, del peso di 29.5 kg (fig. 10) è dotato di una coda a pinna di pesce, che gli permette di orientarsi nella la direzione del flusso. E' dotato di una bocca quadrata di 7,1 cm di lato mentre il rapporto tra la dimensione della bocca e l'espansione retrostante è di 3,22.

Alla parte posteriore della bocca viene fissato un apposito sacchetto di nylon con maglia di 0.1 mm, il quale permette il passaggio del materiale fine trasportato in sospensione e la cattura del sedimento più grossolano trasportato al fondo.

MISURE DELLA PORTATA LIQUIDA SUI FIUMI RENO E SANTERNO

In data 3 novembre 2003, è stata effettuata sul Reno (località Ponte della Bastia) la prima campagna di misurazione della portata liquida e di campionamento del materiale trasportato al fondo ed in sospensione, in concomitanza con la prima piena significativa della stagione.

Queste misure sono state ripetute durante i giorni 27, 28, 29 novembre 2003, in corrispondenza di livelli di piena, rispettivamente sempre più importanti.



Fig. 9 - Campionatore modello US DH-76



Fig. 10 - Campionatore modello Helley-Smith

MISURE DELLA PORTATA LIQUIDA DEL FIUME RENO A BASTIA

Per effettuare tali misure è stato suddiviso il ponte in tre settori, per la presenza delle pile del ponte, rispettivamente di 7,6, 12,8 e 13 metri di larghezza. Sono state individuate in totale 10 verticali e per ciascuna verticale è stata misurata la profondità dell'alveo rispetto al pelo libero (h) e sono state effettuate due misure di velocità della corrente a profondità 0,2 h e 0,8 h, tramite l'apposito correntometro (fig. 11).

Come si può osservare dai grafici, la sezione appare molto uniforme nella sua morfologia. Le profondità maggiori si osservano in corrispondenza delle verticali V3 bis, V4, e V5 con un massimo di 4,55 metri. Per quanto riguarda le velocità del flusso e le rispettive portate, oltre alle verticali già citate, si osservano valori molto considerevoli in corrispondenza di V8 e V9. Questo può essere causato, oltre che dalla presenza delle pile, anche dalla posizione del ponte, appena a valle della confluenza con l'Idice, che si immette nel Reno in destra idrografica e di un'ansa con leggera curva a sinistra. In assoluto i valori più bassi di portata sono stati registrati lungo le verticali V2, V6 e V7, dove la corrente è quasi nulla. Con una profondità media di circa 3,89 metri si è ottenuto un valore per la portata liquida pari a 127,82 m³/s. Tale valore è perfettamente coincidente con quello ottenuto dai dati forniti dal servizio idrografico. Nei giorni 27, 28 e 29 novembre 2003, i valori di portata liquida sono risultati i seguenti: 27-11 = 211 m³/s (h= 5,50 m); 28-11 = 272 m³/s (h= 6,60 m); 29-11 = 293 m³/s (h= 7,05 m).

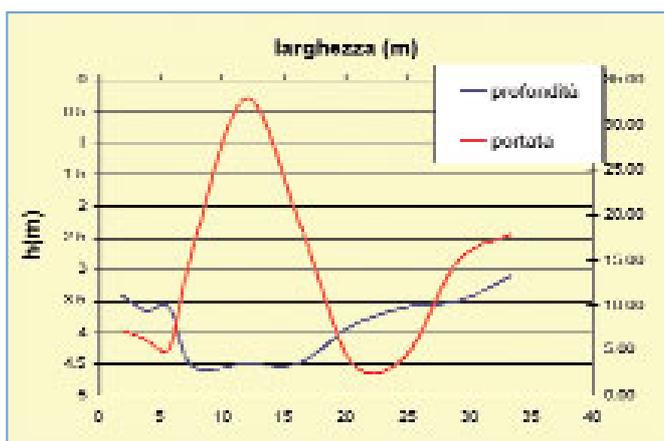


Fig. 11 - Andamento della portata liquida e andamento delle velocità a 0,2 e 0,8 di profondità rispetto al pelo libero



Fig. 12 - Fiume Santerno

MISURE DELLA PORTATA LIQUIDA DEL FIUME SANTERNO

La sezione presso il ponte sul fiume Santerno (località La Giovecca) è stata suddivisa, causa la presenza delle pile, in due settori di larghezza 1,8 metri e 17,5 metri (fig. 12 e 13). Il primo settore comprende la verticale V1, mentre il secondo settore le verticali dalla V2 alla V6. La distanza tra una verticale e l'altra è di 3,5 metri.

Qui di seguito sono riportate le tabelle riguardanti le tre campagne di misurazioni, effettuate nei giorni 27, 28, 29 novembre 2003. Naturalmente, grazie a questi dati è stato possibile ricostruire, per Ciascun giorno, la sezione trasversale del Fiume lungo il ponte e visualizzare in maniera grafica la distribuzione delle portate liquide per ciascuna verticale, lungo la stessa sezione. Qui di seguito sono riportati i relativi grafici (fig. 14, 15 e 16).

La sezione, nei tre grafici, appare molto uniforme, dalla tipica forma trapezoidale. Le velocità sono distribuite in maniera tale che le velocità più alte coincidano con la parte centrale e più superficiale della sezione.

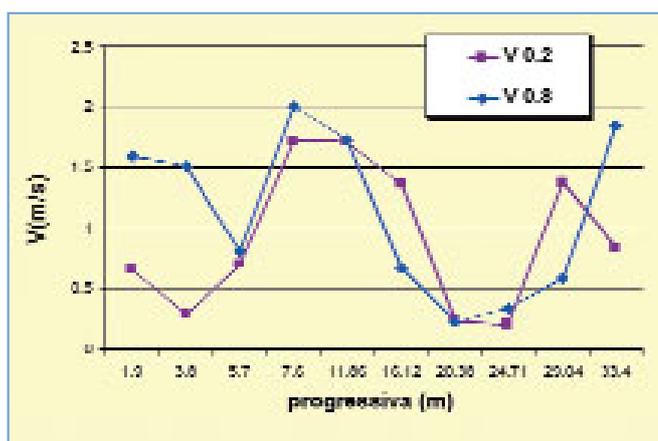


Fig. 13 - Ponte sul fiume Santerno (località la Giovecca)

CAMPIONAMENTI DEL TRASPORTO SOLIDO DEI FIUMI RENO E SANTERNO

PREMESSA

Il movimento dei materiali in un corso d'acqua, o trasporto solido, si verifica in modalità differenti:

- *Trasporto in sospensione*, che interessa i materiali fini e finissimi, diffusi in tutta la massa d'acqua in cui determina la "torbidità".
- *Trasporto per trascinamento sul fondo*, che consiste in un rotolamento dei ciottoli, talora uno slittamento, spesso in un procedere a balzi successivi ("saltazione").

- *Trasporto in soluzione*, che deriva dalla dissoluzione chimica nel bacino e nel letto, a spese dei materiali rocciosi con cui l'acqua è venuta in contatto.
- *Trasporto per fluitazione*, di materiali che galleggiano (ad esempio trasporto di grossi blocchi inglobati in lastre di ghiaccio).

Complessivamente la portata solida rappresenta la quantità di materiale trasportato che attraversa una sezione di un corso d'acqua nell'unità di tempo. In questo studio sono stati presi in considerazione soltanto il trasporto torbido e quello al fondo, le modalità attraverso le quali si esplica quasi tutto il trasporto solido di

12

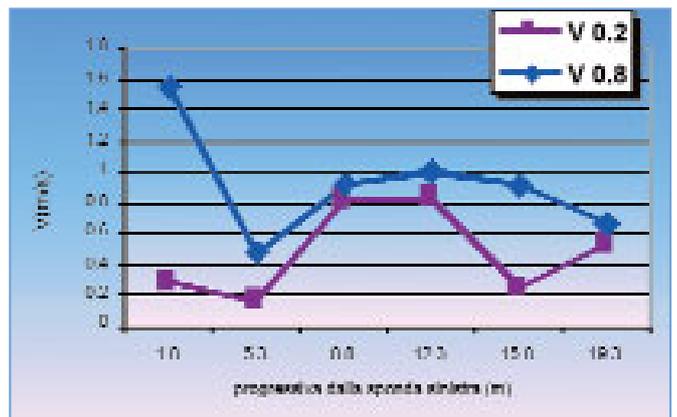
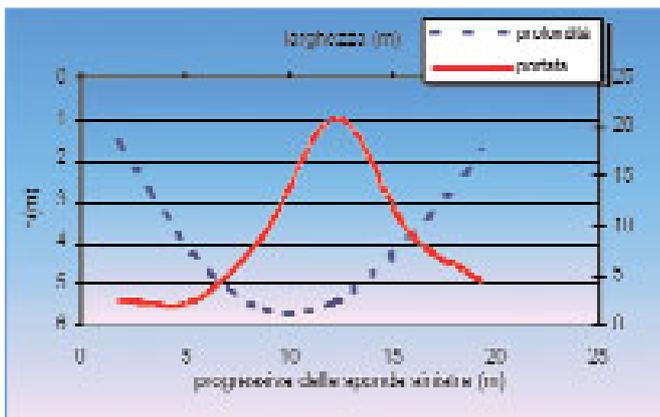


Fig. 14 - Profilo trasversale, andamento della portata liquida e andamento delle velocità a 0.2 e 0.8 di profondità rispetto al pelo libero. 27-11-2003

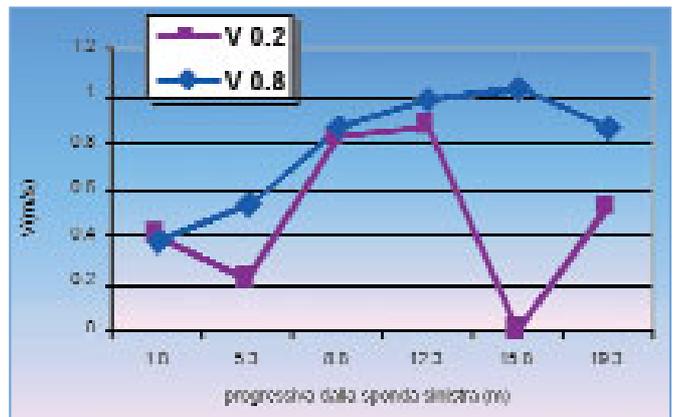
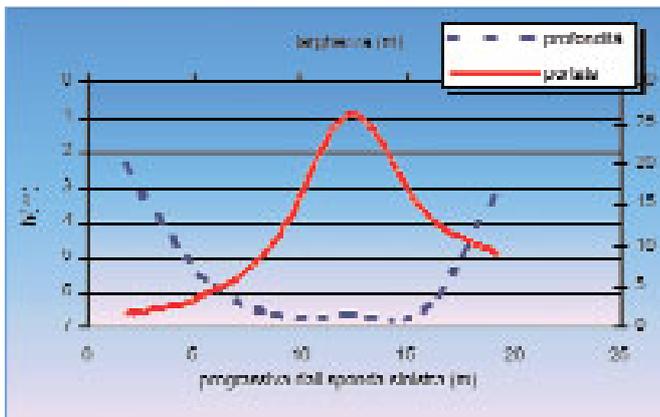


Fig. 15 - Profilo trasversale, andamento della portata liquida e andamento delle velocità a 0.2 e 0.8 di profondità rispetto al pelo libero. 28-11-2003

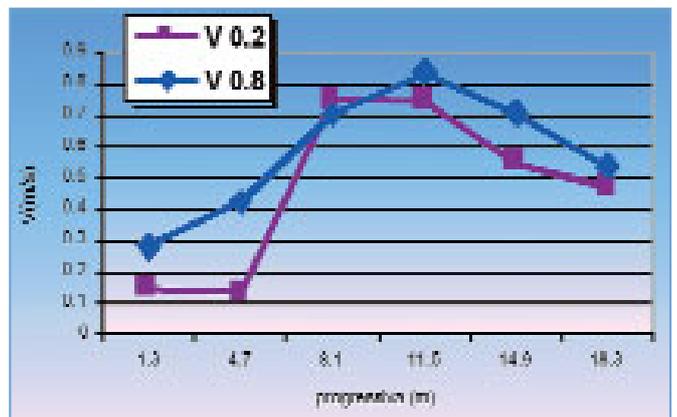
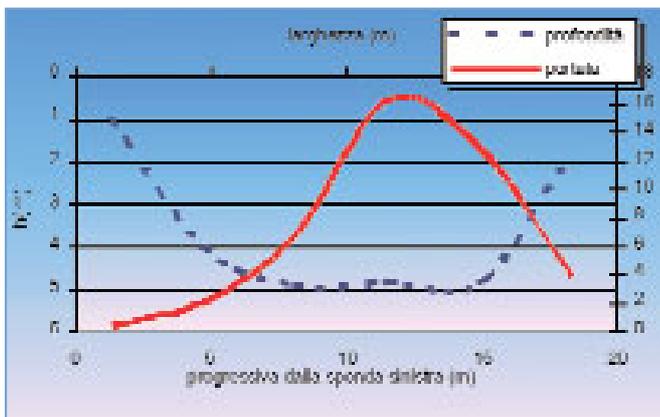


Fig. 16 - Profilo trasversale, andamento della portata liquida e andamento delle velocità a 0.2 e 0.8 di profondità rispetto al pelo libero. 29-11-2003

fiumi come il Reno ed il Santerno.

In una sezione di un fiume di pianura prossima alla foce, la portata solida è rappresentata generalmente dal 90-95% da trasporto in sospensione, mentre il trasporto al fondo solo nei fiumi di montagna arriva a valori del 50-60% del totale, restando solitamente su valori al di sotto del 5-10% nei tratti terminali di pianura.

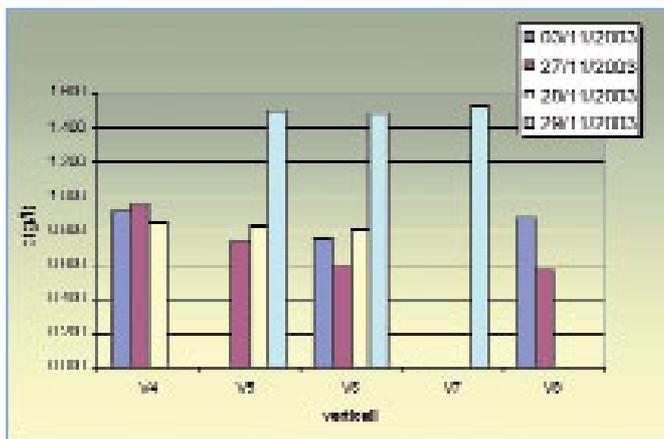


Fig. 17 - Trasporto torbido Reno (C = concentrazione del materiale trasportato in sospensione)

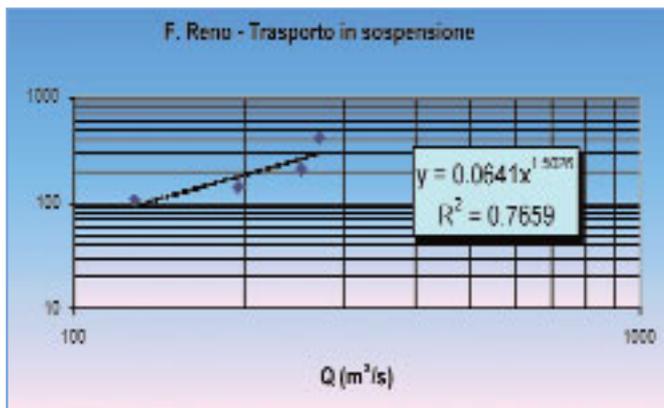


Fig. 18 - Trasporto in sospensione in relazione alla portata liquida, fiume Reno

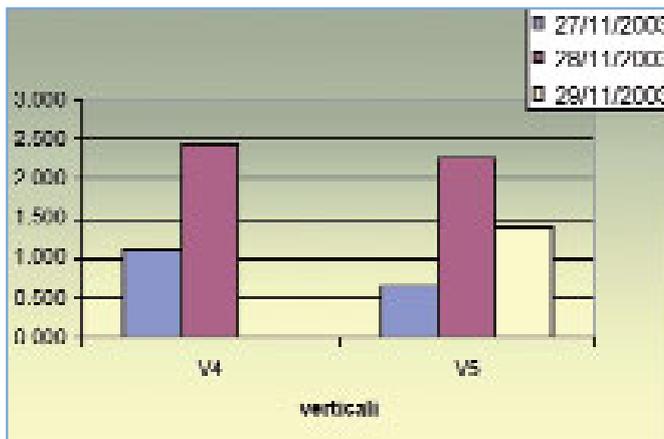


Fig. 19 - Trasporto torbido Santerno (C = concentrazione del materiale trasportato in sospensione)

CAMPIONAMENTO DEL TRASPORTO TORBIDO DEL FIUME RENO

Per ogni evento di piena si è scelto di effettuare campionamenti lungo un numero di verticali minore rispetto a quelle usate per la misura della portata liquida, in quanto l'esperienza ha mostrato una scarsa variazione laterale nei per fiumi con morfologia regolare dell'alveo come quella del Reno. I risultati ottenuti sono stati raccolti nella figura 17:

Come si può osservare le concentrazioni maggiori, nei giorni 3 e 27 novembre, si registrano in corrispondenza della verticale V4. Nei giorni 28 e 29 novembre, aumentando l'intensità dell'evento di piena, si può osservare un livellamento dei valori lungo le verticali considerate, a testimoniare una distribuzione omogenea del sedimento lungo la sezione esaminata, oltre un certa portata liquida. Il campione con torbidità maggiore, pari a 1,523 g/l, è stato raccolto in corrispondenza della verticale V7, il 27 novembre, mentre quello minore, 0,564 g/l, lungo la verticale V8, il 27 novembre (fig. 18).

CAMPIONAMENTO DEL TRASPORTO TORBIDO DEL FIUME SANTERNO

Nel Santerno tali campionamenti sono stati effettuati esclusivamente per le verticali V4 e V5. Qui sotto viene riportato il grafico corrispondente (fig. 19).

Anche in questo caso, si nota la tendenza al livellamento dei valori, con la crescita della portata liquida. Il valore più alto è 2,457 g/l, mentre quello più basso è 0,649 g/l.

Avendo effettuato i campionamenti durante gli stessi giorni, in condizioni di afflussi meteorici confrontabili, è possibile affermare che il Santerno ha una maggiore concentrazione di materiale in sospensione rispetto al Reno.

CAMPIONAMENTI DEL MATERIALE TRASPORTATO AL FONDO

RENO

Il trasporto di sedimento al fondo può avvenire secondo tre modalità differenti, rotolamento, scivolamento e saltazione. Il trasporto è dovuto alla spinta esercitata dal fluido in movimento sulla superficie del fondo, in grado di vincere il peso della particella e l'attrito con lo stesso (fig. 20). Nel movimento per saltazione le particelle si spostano nella direzione del flusso saltando e rimbalzando, e ciò implica brevi momenti in cui le particelle si trovano in sospensione nel fluido.

Per ogni evento di piena monitorato, è stato raccolto materiale trasportato al fondo. I campionamenti sono stati effettuati su tutte le verticali, ma solo in corrispondenza delle verticali centrali, si è misurato un trasporto apprezzabile. La quantità di materiale raccolto, a dispetto

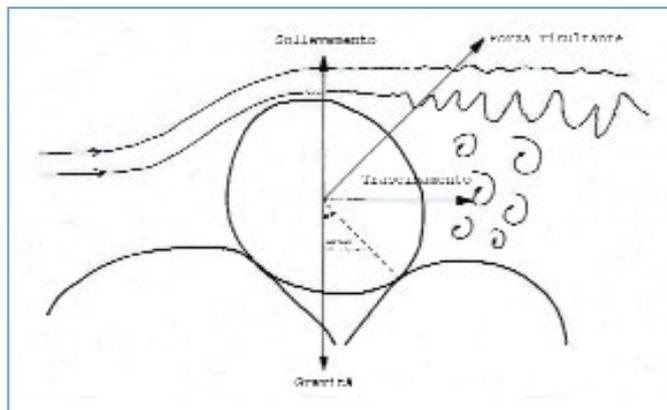


Fig. 20 - Forze agenti su una particella sferica adagiata sul letto di un fiume, sotto l'azione del flusso d'acqua

della portata del Reno, è stata molto scarsa, tranne rarissime eccezioni. Nella figura 21 sono riportate le quantità di materiale raccolto, espresse in grammi al secondo per metro lineare, per ciascuna verticale. Come si può notare dal grafico, a dispetto degli alti valori di portata, la quantità di materiale catturato al fondo è molto scarsa, fatta eccezione per la verticale V5.

I campioni sono quasi interamente formati da sabbia media e sabbia grossolana con, talora, presenza di fango associata soprattutto a processi di infiltrazione e di amalgama con i sedimenti di fondo, ma non significativa ai fini del trasporto al fondo.

SANTERNO

I campionamenti del materiale trasportato al fondo, sono stati effettuati con le stesse modalità adottate per il Reno. Anche per il Santerno è da notare come il trasporto al fondo non avvenga lungo tutta la sezione, ma si concentri in corrispondenza di determinate verticali. Nel grafico (fig. 22), è evidente tale fenomeno, che si ripete per ogni campagna di misure.

È molto interessante notare come la maggior parte del materiale venga quasi esclusivamente trasportato lungo la verticale V4. A differenza del Reno le quantità specifiche di materiale catturato, in rapporto alle portate, sono decisamente maggiori e come si vede anche il D₅₀ del materiale trasportato risulta differente da quello del Reno.

I campioni sono quasi interamente formati da sabbia media e grossolana, con una buona percentuale (circa 12%) di sabbia molto grossolana (del tutto assente nel Reno). Il D₅₀ è di 0.557 mm. Qui di seguito sono riportate due tabelle, nelle quali sono messi a con-

fronto i valori di trasporto solido al fondo del Reno e del Santerno (tab. 1 e tab. 2).

Non si riscontra una correlazione tra portata liquida e trasporto di sedimento mentre è evidente come entrambi i fiumi trasportino scarse quantità di sedimento. Gli unici valori confrontabili sembrano quelli di giorno 27, in cui il trasporto unitario del Santerno è notevolmente più alto di quello Reno. Qui di seguito (tab. 3) sono riportati i rapporti tra sedimento trasportato al fondo ed in sospensione. A conferma della scarsa capacità di trasporto del Reno, i valori sono tutti inferiori allo 0.1%, a dispetto dei dati di letteratura che vorrebbero, per fiumi di pianura con le caratteristiche del Reno, valori compresi tra il 5 ed il 10%

STIMA DEL TRASPORTO SOLIDO SECONDO LA FORMULA DI ENGELUND ED HANSEN

Fra tutte le formule proposte dalla letteratura del settore, quella che sembra fornire stime più attendibili, sulla base del maggior numero di verifiche effettuate con buono successo per alvei con caratteristiche morfologiche e sedimentologiche simili a quelle del Reno è quella di Engelund e Hansen, proposta per la prima volta nel 1967.

Secondo questo modello il trasporto solido medio annuo dei sedimenti dell'alveo di un corso d'acqua di pianura è calcolabile con la: (Montefusco, 1984).

Con T_s trasporto solido medio del materiale di fondo in milioni di tonnellate/anno, D il diametro medio dei sedimenti del fondo, B la larghezza della sezione utile ai fini del trasporto, i il gradiente d'energia (normalmente assimilato alla pendenza del letto), Q_0 , a e b dei parametri che esprimono la distribuzione di frequenze di portate caratteristiche annuali (Montefusco, 1984).

È stato, quindi, possibile ottenere una stima del trasporto del materiale di fondo del fiume Reno per il periodo 1929-1943, per il

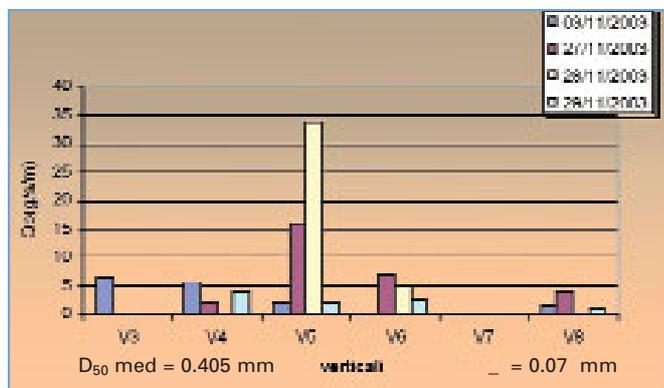


Fig. 21 - Trasporto al fondo, Reno

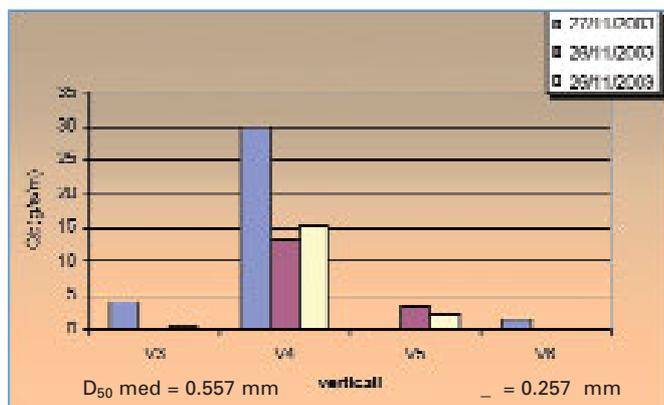


Fig. 22 - Trasporto solido, Santerno

DATA	RENO		SANTERNO	
	Q (m³/s)	Qb (T/g)	Q (m³/s)	Qb (T/g)
03/11/2003	127	5.6	-	-
27/11/2003	195	108.8	49.6	106.5
28/11/2003	252	145.1	65.6	5
29/11/2003	271	35	42.4	5.3

Tab. 1 - Trasporto solido al fondo(Qb) in relazione alla portata liquida (Q), fiumi Reno e Santerno

DATA	RENO		SANTERNO	
	Q (m³/s)	Qb (T g ⁻¹ m ⁻¹)	Q (m³/s)	Qb (T g ⁻¹ m ⁻¹)
03/11/2003	128	0.17	-	-
27/11/2003	195	3.26	49.6	5.52
28/11/2003	252	4.35	65.6	0.26
29/11/2003	271	1.05	42.4	0.27

Tab. 2 - Trasporto solido al fondo unitario (Qb) in relazione alla portata liquida (Q), fiumi Reno e Santerno

Data	Q (m³/s)	Qb (T/g)	Qs (T/g)	Qb/Qs
03/11/2003	128	5.6	9239	0.0006
27/11/2003	195	108.8	12029	0.009
28/11/2003	252	145.1	17984	0.008
29/11/2003	271	35	35145	0.001

Tab. 3 - Rapporto tra trasporto al fondo (Qb) e trasporto in sospensione (Qs) dei fiumi Reno e Santerno

periodo 1929-1978 e stime annuali per i periodi 1955-1978 e 1997-2001 (fig. 23).

Come si può osservare nel grafico di figura 23, mentre nei periodi 29-43 e 55-78, si hanno rispettivamente 83.96 e 79.41 t/km², nel periodo che va dal 1997 al 2001 il trasporto solido del materiale di fondo si riduce più del 40%, registrando un valore medio di appena 32,59 t/km². Tali stime sembrano essere confrontabili con i dati riguardanti il trasporto solido torbido (Y_s), presenti negli Annali Idrologici del Servizio Idrografico (fig. 22). Ancora una volta è evidenziato lo scarso trasporto del materiale di fondo del fiume Reno, in relazione al trasporto torbido, espresso in tonni/km² per anno (fig. 23).

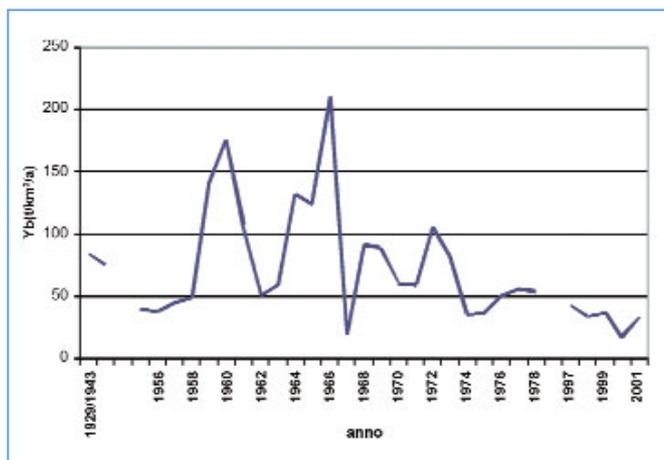


Fig. 23 - Stima del trasporto di materiale di fondo del fiume Reno (Engelund e Hansen, modificata Montefusco)

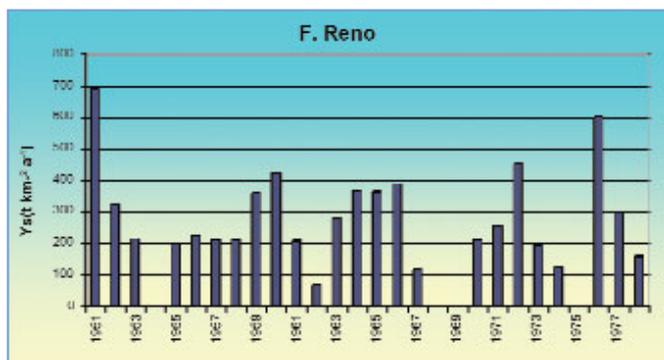


Fig. 24 - Trasporto torbido Fiume Reno

CONCLUSIONI

Nella valutazione delle conclusioni trattate in questo lavoro è molto importante tenere in considerazione, sia la brevità del periodo di monitoraggio, che la quasi completa assenza di dati sul trasporto solido, sia in letteratura che, in particolare, sul F. Reno. Con il sistema di misure impiegato è stato possibile ottenere dati significativi sulla granulometria del materiale del letto e di quello trasportato al fondo, quantificare il trasporto solido per ogni singolo livello di piena e metterlo in relazione alla portata liquida; stimare il trasporto al fondo annuale in riferimento alle caratteristiche geometriche della sezione presa in considerazione (Ponte della Bastia), alla dimensione dei granuli trasportati, alle portate caratteristiche annuali e al gradiente d'energia del fiume. Le misure effettuate hanno consentito di mettere in evidenza la scarsa quantità di trasporto al fondo del Reno, soprattutto negli ultimi anni (circa 33 t km⁻² a⁻¹), in rapporto al periodo 1929-1978, in cui i valori di trasporto al fondo medi sono stati stimati in circa 70 t km⁻² a⁻¹. Una ulteriore conferma di ciò è si avuta mettendo in relazione la quantità di materiale trasportato in sospensione e al fondo, per lo stesso evento di piena. I valori ottenuti (< 0.1%) sono molti più bassi di quelli espressi in letteratura per fiumi di pianura, con caratteristiche idrauliche e sedimentologiche simili al Reno, in cui il trasporto al fondo dovrebbe essere tra il 5 ed il 10% del trasporto totale.

15

RINGRAZIAMENTI

La realizzazione del seguente lavoro non sarebbe stata possibile senza il contributo offerto da alcune persone tra cui Emanuele Preciso, Francesco Droghetti, Christian Boettger, Michele Bettarello per avere partecipato alle campagne di campionamento e Massimiliano Fazzini per avere fornito elementi utili per la realizzazione dell'inquadramento climatico dell'area di studio.

Paolo Billi, Enzo Salemi

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara

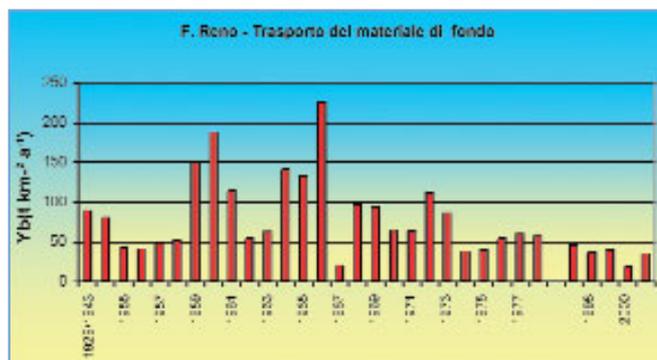


Fig. 25 - Stime del trasporto al fondo Fiume Reno (Engelund e Hansen)

BIBLIOGRAFIA

- Billi, P. & Paris, E. (2004). "Bed load transport and channel dynamics of the Ombrone River (Tuscany, Central Italy)", 32° IGC, Firenze, Agosto 20-28, Abstract volume.
- D'Agostino, V. & Lenzi, M. (1996) "La valutazione del trasporto solido di fondo nel bacino attrezzato del Rio Cordon." L'acqua, 4, 1996, 23-40.
- Engelund, F., Hansen, E., (1967). "A monograph on sediment transport in alluvial streams". Teknisk Forlag, Technical Press, Copenhagen, 62 pp.
- Montefusco L. (1984). "Un criterio semplificato per il calcolo del trasporto solido medio di un fiume". Atti di: Seminario su Idraulica del Territorio Montano, Istituto di Idraulica G. Poleni, Università degli Studi di Padova, Bressanone, pp. 431.
- Tacconi, P & Billi, P. (1987). "Bed load transport measurements by the vortex-tube trap on Virginio Creek, Italy", in Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, Thorne, C. R., Bathurst, J. C. & Hey, R. D.

EVOLUZIONE MORFOSEDIMENTARIA DELL'AREA COSTIERA DI FOCE RENO

16

I litorali italiani hanno subito durante l'ultimo secolo una trasformazione radicale. Un grosso impulso all'incremento demografico sui litorali è stato dato, oltre che dalle infrastrutture costiere, soprattutto dallo sviluppo della rete autostradale e ferroviaria, che hanno creato collegamenti rapidi fra le grandi città del nord con il sud e fra i territori interni e la costa. La maggior occupazione del territorio costiero coincise con la nascita dell'industria turistica che presentò uno sviluppo urbanistico caotico favorito da inadeguati controlli e dall'assenza di attenti piani urbanistici.

Nell'Adriatico il turismo balneare cominciò ad essere organizzato, per le classi più agiate, fin dalla metà del secolo scorso a Rimini, Lido di Venezia e Grado; una forte accelerazione si verificò tra le due guerre mondiali soprattutto nel Riminese. L'urbanizzazione iniziò come pro-tendimento verso mare di numerosi centri situati nell'immediato entroterra e con la costruzione di nuovi insediamenti anche su cordoni dunari o cuspidi di foce, formando una vera e propria massificazione edilizia della costa, come in Emilia-Romagna.

A tal riguardo giova ricordare come nel 1881 nei comuni costieri risiedeva il 18% della popolazione italiana, nel 1951 il 26%, nel 1984 il 30%; tra il 1951-61 c'è stato un incremento demografico nei comuni costieri del 14,2%, fra il 61 e il 71 del 12,4%. Nel 1996 lungo le coste del nostro Paese furono censite 2.200 km di costa non urbanizzati su circa 7.500 km indagati.

Oggi si può stimare che vi sia circa il 29% del litorale italiano integralmente libero ed il 13% parzialmente occupato; ad esempio nell'Adriatico settentrionale l'unica grande area costiera naturale rimasta è costituita dall'area del delta del Po.

Un'ulteriore preoccupazione per la conservazione e salvaguardia dell'area costiera è rappresentata dalle recenti tendenze normative che favoriscono la vendita ai privati di parte delle proprietà demaniali. Ciò determina una situazione opposta a quella di altri paesi che, invece, acquistano tratti costieri dai privati per garantirne la tutela: in Francia il "Conservatoire de l'Espace Littoral et de Rivages Lacustres" nel 1999 aveva già acquistato da privati circa 808 km di costa; nel Regno Unito il "National Trust" attualmente protegge circa 565 miglia di coste britanniche; nel 1979 Il governo federale degli Stati Uniti possedeva già 1.300.000 acri classificati come National Lake Shores, National Rivers e National Seashores.

L'intervento dell'uomo nell'ultimo secolo con le modifiche indotte dalle coltivazioni, dalla costruzione di strade e di ferrovie, dalle opere di sistemazione dei bacini imbriferi, dalle estrazioni di inerti dagli alvei, dalla costruzione di opere di sbarramento per molteplici usi (energetico, irriguo, difesa delle piene, ecc.) e dalla costruzione di opere a mare ha, dunque, violentemente mutato le condizioni naturali della dinamica idrosedimentaria lungo riva e del trasporto solido a mare dei fiumi.

In merito a quest'ultimo punto è stato stimato (Idroser, 1983) che nel 1972 i fiumi emiliano-romagnoli avessero un apporto solido complessivo di materiali utili al ripascimento delle spiagge di circa 0,68 milioni di m³ anno e che vi sia stata una riduzione fra il 1945 ed il 1972 prossima ad un fattore 2, cioè un calo annuo del 2%. La stessa indagine suggerisce, sulla base di ipotesi plausibili ma con elevata estrapolazione, che dopo gli anni '80 si rileva una tendenza al recupero degli apporti solidi dei fiumi, anche se, pur con tempi lunghi, non si potrà mai ritornare ai livelli della prima metà del secolo.

Inoltre lo sfruttamento a volte incontrollato della costa ha modificato pesantemente i caratteri naturali dell'ambiente litorale e determinato un aumento della sua vulnerabilità per la riduzione delle protezioni naturali e non all'aggravamento delle condizioni d'attacco del mare. A fronte di ciò, tuttavia, ancor oggi sono rare le azioni rivolte al loro ripristino e conservazione favorendo maggiormente l'attuazione d'interventi che sottraggono la costa all'azione del mare.

CARATTERIZZAZIONE EVOLUTIVA DELLA COSTA

Lo studio condotto da Bondesan *et al.* (1978) lungo la costa delle province di Ferrara e Ravenna presenta l'evoluzione di circa un secolo della linea di riva e dei fondali. Gli autori identificano tre paraggi: da P.to Garibaldi alla foce del fiume Reno; dal Reno a Casal Borsetti; da Casal Borsetti a P.to Corsini.

I primi due tratti sono situati su di un territorio deltizio la cui formazione è da imputare al Po, con il suo ramo Spinetico (Eridano), proveniente da NW, fino circa al VI secolo d.C., e successivamente al Po di Primaro, particolarmente attivo fra l'VIII ed il XII secolo. Tra il 1767 ed il 1795 a questo ramo, che aveva progressivamente perso officiosità, viene definitivamente allacciato il Reno, con una foce orientata verso est. Successivamente, a causa di alcune opere adottate nel secolo XIX lungo il corso terminale del fiume, si dà inizio ad un nuovo sviluppo dell'apparato di foce che progressivamente ruota verso nord. L'area posta immediatamente a settentrione viene così interessata direttamente dagli apporti solidi del fiume i quali, tra il 1920 ed il 1935, danno origine ad un cordone litoraneo che separa una laguna la cosiddetta Sacca di Bellocchio. In concomitanza, le spiagge poste a sud dell'antica foce entrano in crisi erosiva per il mancato apporto dei sedimenti fluviali.

La progredazione della foce verso settentrione (fig. 1), inoltre, porta allo sviluppo di una penisola confinata tra la sponda destra del fiume ed il mare, che, pur mantenendo una tendenza all'allungamento, denota, a partire dal 1920, una tendenza all'erosione marina. Nel 1932 sono già evidenti i segni di un accorciamento di detta penisola, associati ad un assottigliamento. Tale tendenza ha portato nel 1981 alla comparsa di una nuova foce del Reno, arretrata più a sud della precedente di circa 2 km (Idroser, 1996).

Nei pressi di Porto Garibaldi è evidente, già dalle testimonianze risalenti al secolo scorso, la tendenza all'accumulo sedimentario sul lato meridionale dei moli. Nel corso dell'ultimo secolo tale tendenza è stata fortemente accentuata dalla rotazione verso nord della foce del Reno.

In sostanza l'evoluzione, nel corso dell'ultimo secolo, dei due paraggi risulta fortemente influenzata dagli spostamenti della foce e dalla diminuzione delle portate del fiume Reno. Nel tratto compreso tra P.to Garibaldi e la foce fluviale l'andamento della variazione della linea di riva può essere così sintetizzato (Bondesan *et al.*, 1978): -5,6 m/anno nel periodo 1835-1892; condizioni di inversione nel periodo 1892-1917; +8,9 m/anno dal 1917 al 1935; +5,0 m/anno dal 1935 al 1971.



Fig. 1 - Evoluzione planimetrica della foce del Reno tra il 1830 ed il 1968 (da Bondesan *et al.*, 1978)

Per il tratto successivo (da foce Reno a Casal Borsetti) l'evoluzione mostra il passaggio da condizioni di avanzamento a condizioni di arretramento delle spiagge: +16,0 m/anno tra il 1835 ed il 1892; condizioni di inversione tra il 1892 ed il 1917; -9,5 m/anno tra il 1917 ed il 1935; -7,8 m/anno dal 1935 al 1971. L'evoluzione simmetrica dei due tratti è conseguenza diretta del mutamento di direzione e di migrazione della foce del Reno.

Per quanto concerne l'evoluzione dei fondali Bondesan *et al.* (1978) hanno approntato confronti estesi in tre periodi: tra il 1869-70 ed il 1901, tra il 1901 ed il 1953-54 e tra il 1953-54 ed il 1968.

Nel tratto tra P.to Garibaldi e la foce del Reno i fondali nel primo periodo manifestano notevoli incrementi davanti alla nuova foce fluviale, così come al largo, verso NE, mentre subiscono abbassamenti nel tratto verso P.to Garibaldi, sino a 2 km al largo. Nel secondo periodo prevalgono in tutta l'area i fenomeni di innalzamento, mentre nel terzo periodo i fondali tornano in condizioni di abbassamento (con l'eccezione dei fondali più vicini a riva).

Tra la foce del Reno e Casal Borsetti l'evoluzione è correlata alla migrazione dell'apparato di foce, ponendo in evidenza marcati fenomeni erosivi estesi a tutto il periodo considerato (1869/70-1968), in concordanza con quanto osservato per la spiaggia emersa.

Il litorale, anche per quanto concerne il suo assetto attuale, può essere suddiviso nelle tre subunità fisiografiche precedentemente identificate. Nella prima, situata interamente nel Comune di Comacchio, il litorale risulta in forte erosione (Idroser, 1996; Arpa, 2000): alla rottura, avvenuta nel 1981, della sottile lingua di terra che delimitava sul lato mare gli ultimi 3 km del percorso del fiume Reno e alla conseguente formazione di una foce spostata verso sud rispetto alla precedente di 2 km, hanno fatto seguito forti modificazioni della morfologia costiera, evidenti, in particolar modo, nel tratto compreso tra la nuova foce del Reno e quella del canale Gobbino, canale collettore delle Valli di Comacchio.

Elemento dominante, così come nei decenni precedenti, è risultato il mare, che ha continuato ad erodere ciò che era rimasto della vecchia riva destra del fiume, a trasportare verso nord ingenti quantità di sabbia, tanto da realizzare in pochi anni, un'ampia spiaggia laddove vi erano le vecchie foci del Reno e ad allagare la nuova foce portandola ad un'ampiezza di 700 m.

In questo tratto gli arretramenti, riscontrati soprattutto nel periodo 1978-83, hanno raggiunto i 120 metri. A protezione del paraggio, nel 1990, sono state realizzate delle difese in Tubi Longard ed un ripascimento artificiale di circa 40.000 m³ di sabbia. Malgrado ciò la tendenza erosiva in prossimità della foce fluviale è continuata compromettendo seriamente anche la funzionalità delle opere difensive (figura 2).



Fig. 2 - Tubi Longard posti a difesa del litorale in prossimità del Lido di Spina

Il materiale eroso viene trasportato verso nord, determinando così un forte tasso d'accumulo in prossimità del molo di Porto Garibaldi, la cui spiaggia sopraflutto si è protratta verso mare di circa 400 metri. Si calcolano (Idroser, 1996) avanzamenti medi di 50-70 metri (con valori massimi di 120 m) per il periodo 1978-93, estesi per circa 4 km a sud del molo.

Il paraggio compreso tra la foce del fiume Reno e Casal Borsetti, di pertinenza del Comune di Ravenna, risulta fortemente influenzato dall'evoluzione della foce Reno, la cui crisi erosiva è ormai evidente da oltre 60 anni. Tale paraggio è oggi quasi completamente irrigidito da opere difensive radenti, costruite negli anni '80. Le opere, estese per una lunghezza di circa 4 km, lasciano indifeso solo il tratto compreso tra la foce del Canale Gobbino e la foce del fiume Reno, i cui tassi erosivi, negli ultimi 15 anni, hanno determinato arretramenti della linea di riva di circa 80 metri (Idroser, 1996). Appare evidente come l'evoluzione di questo tratto di costa sia fortemente correlabile con l'evoluzione della foce del Reno e, quindi, con la possibilità di trasporto dei sedimenti del fiume stesso. Malgrado sia evidente una ripresa nel trasporto solido, attualmente il volume di materiale trasportato, utile al ripascimento, non risulta ancora sufficiente a contrastare la tendenza erosiva dei litorali limitrofi.

Come nella maggior parte delle coste italiane anche in questo tratto di costa lo stato di conservazione degli apparati dunari non è buono. Oltre a qualche lembo residuo di dune, resistito all'intensa antropizzazione nella parte ravennate e nella parte ferrarese più settentrionale, vi è la riserva di Bellocchio, dove le dune conservano ancora una continuità rilevante. La cartografia di seguito riportata sintetizza i principali aspetti morfo-evolutivi dell'area in esame (fig. 3).

CARATTERIZZAZIONE SEDIMENTOLOGICA

Nell'ambito di una ricerca condotta dal Parco del Delta del Po emiliano-romagnolo (Simeoni *et al.*, 2000) è stata svolta una indagine sedimentologica su 213 campioni raccolti sulle spiagge e sui fondali compresi tra P.to Garibaldi e P.to Corsini. Dallo studio emerge che, in questo paraggio, le percentuali di sabbia e di conseguenza dei fanghi, dato che nell'area indagata non sono presenti altre popolazioni granulometriche, variavano tra il 99,7% ed il 4,5%, ma il 91,6% presentava percentuali superiori al 70%. I campioni con percentuali di fango superiori al 30% sono ubicati a profondità maggiori di -5 m. In base alla suddivisione proposta da Shepard (1954) lo 0,9% dei campioni



Fig. 3 - Principali aspetti morfo-evolutivi tra P.to Garibaldi e P.to Corsini (da: Atlante delle Spiagge, 1997 - mod.)

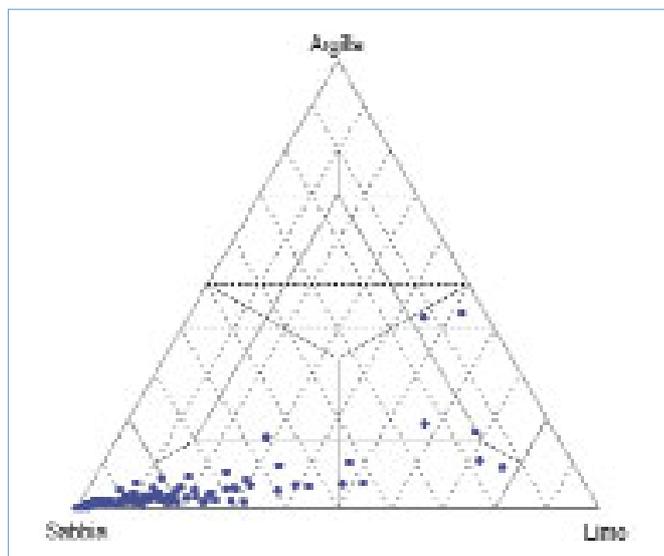


Fig. 4 - Diagramma di Shepard (1954) relativo alla classificazione dei sedimenti prelevati nel 1999 (da Simeoni et al., 2002)

ricade (fig. 4) nell'area del silt argilloso, 1,9% in quella del silt sabbioso, 8,9% nella sabbia siltsosa, 87,4% nella sabbia e lo 0,9% nella parte centrale del triangolo (argille silt sabbia).

La percentuale del fango generalmente aumenta con l'approfondimento dei fondali, tuttavia tale relazione non è ne graduale ne costante per una quasi assenza di questa frazione (<5%) sui fondali fino a -2 m di profondità, per la presenza di massimi relativi tra i -2 ed i -6 m e per le elevate, ma disperse, percentuali di fango sui fondali più profondi.

La distribuzione areale della sabbia (Fig. 5 a) evidenzia nel litorale più settentrionale un notevole sviluppo della banda 95-70% della sabbia che presenta la massima estensione in corrispondenza di P.to Garibaldi caratterizzando i fondali compresi tra 3 e 6-7 m di profondità. Essa si restringe progressivamente, raggiungendo i valori minimi di tutta l'area indagata, in corrispondenza dei fondali antistanti il tratto meridionale del Lido di Spina e si sviluppa su fondali compresi tra 7 e 5-6 m di profondità. I materiali con più del 95% di sabbia caratterizzano i fondali più prossimi a riva e l'estensione di questa banda tessiturale risulta assai uniforme, anche se per le differenti pendenze dei fondali (0,58% a nord e 1,02% a sud del tratto) si spinge a profondità maggiori in corrispondenza del lago di Spina.

Il tratto tra il lago di Spina e Casal Borsetti è caratterizzato da fondali con pendenze via via minori procedendo da settentrione verso la foce Reno: si passa da pendenze di circa 1,2% a 0,84%. In quest'area la massima estensione della fascia di sedimenti con una percentuale di sabbia maggiore del 95% si riscontra in corrispondenza del litorale settentrionale della foce Reno, mentre la minima è ubicata alle due estremità ed in corrispondenza dei fondali a meridione della foce Reno (area del poligono di tiro militare).

Assai interessante risulta l'andamento delle fasce tessiturali in corrispondenza di un breve tratto (circa 1 km) ubicato subito a nord di Casal Borsetti dove i sedimenti con quantità inferiori al 30% di sabbia si avvicinano molto a riva.

Le pendenze dei fondali del tratto più meridionale diminuiscono progressivamente procedendo verso meridione: si passa da valori di circa 1,02% in corrispondenza del litorale di Casal Borsetti, a 0,81% in prossimità dello sbocco del Lamone, per raggiungere 0,77% nell'area di P.to Corsini. La presenza dei moli portuali condiziona l'andamento

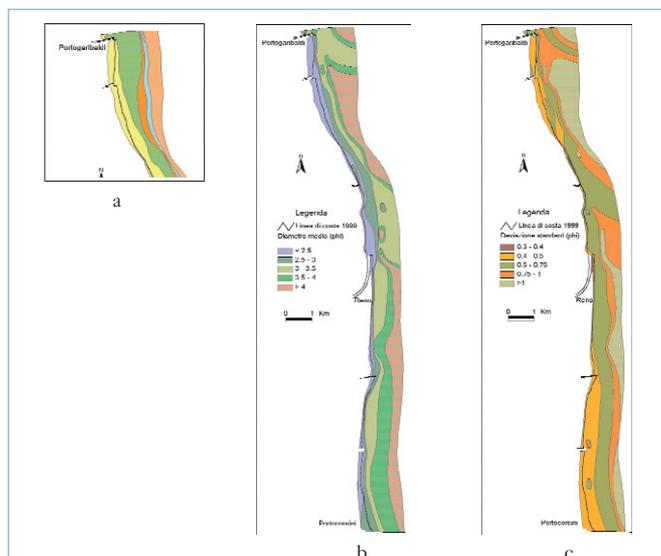


Fig. 5 - Distribuzione della percentuale di sabbia (a), del diametro medio (b) e della deviazione standard (c) (modificato da Simeoni et al., 2002)

delle frazioni sabbiose determinando, nei fondali a loro vicini, un richiamo verso il largo dei sedimenti più sabbiosi (>95% e tra 95 e 70%). Assai uniforme ed estesa risulta la fascia più fangosa (<30% di sabbia) che si estende generalmente oltre i -6 m di profondità.

Nell'area in esame il diametro medio (fig. 6 b) varia da un minimo di 1,6 ϕ ad un massimo di 7,58 ϕ . Secondo la scala di Wentworth (1922) i campioni analizzati ricadono in un ampio spettro tessiturale che si estende dalla sabbia fine al silt molto fine, ma solo il 6,5% ricade nell'ambito dei sedimenti siltsosi. Come prevedibile questo parametro presenta una buona correlazione sia lineare ($R_2=0,84$) sia polinomiale ($R_2=0,86$) con la percentuale di sabbia. La distribuzione areale del diametro medio appare meno lineare e più articolata di quella della percentuale della sabbia. La spiaggia emersa e i fondali prossimi a riva sono caratterizzati dalla fascia dimensionale $2,5$ ϕ e presenta il maggior sviluppo a mare sui fondali prospicienti il Lido di Spina e Casal Borsetti e delle foci del Reno e Lamone. Non è praticamente presente nel tratto compreso tra foce Reno e l'estremità settentrionale di Casal Borsetti ed a ridosso del molo nord di P.to Corsini, dove viene sostituita da sedimenti con Mz compresi tra 2,5 e 3 ϕ . Quest'ultima banda assume importanza soprattutto sui fondali a nord del Reno fino al Lido di Spina, in corrispondenza delle opere di difesa di Casal Borsetti e nel tratto a sud del Lamone.

I sedimenti con diametro medio di 3-3,5 ϕ sono quelli che coprono il più ampio spettro di profondità, dai -2 m ai -6/7 m. La loro distribuzione è assai articolata ed in corrispondenza del Lido degli Estensi e del litorale settentrionale della foce Reno raggiungono le massime profondità indagate. I sedimenti più fini Mz >3,5 ϕ generalmente caratterizzano le profondità maggiori, ma in prossimità del lobo meridionale del Reno ed a settentrione di Casal Borsetti raggiungono profondità prossime a -2 m.

Infine le variazioni della deviazione standard σ (da 0,39 a 2,53 ϕ) evidenziano come i sedimenti dell'area indagata coprano il campo compreso tra quelli ben selezionati a molto poco selezionati (2,3% del totale), ma la maggior parte (85,1%) risulta ben o moderatamente ben selezionati (fig. 5 c). Questo parametro tende a crescere al diminuire delle dimensioni medie dei granuli, della percentuale della sabbia e, quindi, con l'aumentare della profondità.

In generale la distribuzione areale della deviazione standard rispecchia l'andamento del diametro medio. Rispetto alla distribuzione della sabbia mostra significative differenze sui fondali antistanti P.to Garibaldi

e quelli ubicati a settentrione della foce Reno dove a percentuali relativamente alte di sabbie corrispondono alti valori della deviazione standard. I valori più bassi di ϕ caratterizzano la spiaggia emersa e i fondali prossimi a riva antistanti i Lidi di Spina e degli Estensi e il tratto compreso tra Casal Borsetti e P.to Corsini.

CONSIDERAZIONI

Le variazioni delle caratteristiche tessiturali dei sedimenti dei fondali e della spiaggia emersa rappresentano l'adattamento dei materiali a mutate condizioni morfo e idro-sedimentarie del litorale (Simeoni *et al.*, 2000 e 2002). Non tener conto di ciò comporterebbe errori significativi nell'interpretazione dei dati sedimentologici.

Confrontando l'evoluzione della linea di riva tra il 1968 ed il 1975 (Bondesan *et al.*, 1978) appare evidente come essa, a nord del Lido di Spina, fosse in sostanziale avanzamento. Ciò veniva confermato anche dalla tendenza all'innalzamento dei fondali antistanti, registrata tra il 1968 ed 1971 come riportato nello studio di Bondesan *et al.* (1978). Questo lavoro evidenzia inoltre come i sedimenti di quest'area fossero prevalentemente sabbiosi anche alle massime profondità di campionatura (percentuali di fango sempre inferiori al 10%), dove era stata individuata un'ampia area di massimo relativo. I valori di diametro medio e deviazione standard consentirono di stabilire che, mediamente, questi sedimenti erano delle sabbie molto fini, da ben a moderatamente ben selezionate.

Gli autori, in base ai dati raccolti, ipotizzarono che questi fondali fossero caratterizzati da una relativa bassa energia. Ciò era determinato, in primo luogo, dalla forma concava del litorale che determinava una diminuzione dell'energia specifica media delle onde per il fenomeno di rifrazione. In merito all'assenza d'importanti depositi della frazione fangosa suggerirono che questi fondali non fossero alimentati né dai fanghi provenienti dal Po, che si depositavano sul litorale posto a nord di P.to Garibaldi, né da quelli del Reno. Inoltre, il forte accrescimento della linea di riva riscontrato a ridosso del molo sud di Porto Garibaldi confermava per quest'area un prevalente trasporto sottrattivo verso settentrione delle sabbie, provenienti sia dal fiume Reno sia dall'erosione della sua foce.

Il tratto compreso tra Lido di Spina e Casal Borsetti era caratterizzato da importanti arretramenti della linea di riva (confronto fra i rilievi del 1968 e del 1975), specialmente in corrispondenza dell'area di foce Reno, e da consistenti abbassamenti dei fondali antistanti (Bondesan *et al.*, 1978). Rispetto al tratto precedente i sedimenti superficiali presentavano valori massimi della percentuale di fango assai maggiori anche se confinati oltre i -5 m di profondità. La distribuzione areale di questo parametro consentì di evidenziare, a sud del Lido di Spina, la zona d'accumulo dei fanghi trasportati in mare dal Reno (circa 85% del suo trasporto solido totale). Altri massimi relativi di fango vennero evidenziati dallo studio prossimi a riva (2/3 m di profondità) in corrispondenza del litorale meridionale della foce Reno: essi furono attribuiti alla presenza di depositi residuati portati in luce dall'erosione dei fondali. L'area d'influenza di questo fiume era abbastanza limitata e caratterizzata da bassi valori di diametro medio (in ϕ), di deviazione standard e della percentuale di fango. Ciò veniva interpretato come un'area ad alta energia, dovuta principalmente alla forma convessa del litorale, alla presenza di correnti fluviali e di marea che trasportano i sedimenti portati in mare dal fiume.

Sui parametri tessiturali evidenziati in questo tratto centrale una grossa influenza era dovuta all'apporto di una quantità non trascurabile di materiale grossolano ad opera del Reno che nel 1970, secondo stime Idroser (1996), scaricava in mare circa 190.000 m³/a di materiale sabbioso. A queste quantità vanno aggiunte le sabbie messe in gioco dall'attiva erosione delle spiagge e dei bassi fondali che, vagliate dal moto ondoso, venivano successivamente trasferite verso settentrione lungo riva o, per le frazioni più sottili, disperse verso il largo.

Infine, nel tratto più meridionale (Casal Borsetti - P.to Corsini) i feno-

meni d'arretramento della linea di riva si esauriscono progressivamente procedendo da Casal Borsetti verso la foce armata del Lamone, mentre i fondali presentano una sia pur lieve tendenza all'abbassamento. Da questo punto in poi la spiaggia è in evidente avanzamento specie in prossimità del molo portuale di P.to Corsini ed i fondali sono caratterizzati da evidenti fenomeni d'innalzamento del fondale. Ciò è da collegare in parte agli apporti sabbiosi del Lamone (55.000 m³/a) stimati da Idroser (1996) per il 1970 che vengono trasferiti verso sud dalla deriva litoranea.

I materiali sottili trasportati da questo fiume (79% del trasporto solido totale) venivano invece dispersi verso il largo e verso meridione, andando a depositarsi in corrispondenza di Marina Romea oltre i 3-4 m di profondità. I bassi valori della percentuale di fango rinvenuti sui fondali a ridosso del molo, secondo gli autori, dipendevano sia dalle sabbie trasportate dalla corrente lungo riva sia dalla presenza di correnti locali, innescate dalla presenza dei moli portuali.

Tra il 1984 ed il 1993 lo studio condotto da Idroser (1996) mise in rilievo come a fronte di una relativa ripresa del trasporto solido di fondo dei fiumi Reno e Lamone e della riduzione della subsidenza, il tratto litorale in esame non modificò il suo trend evolutivo. L'indagine stimò che la variazione di volume, tra le quote +1 e -6 m, potesse essere valutata attorno a +1,3 milioni di m³ (media annua +138 *10³ m³) per il tratto compreso tra P.to Garibaldi e foce Reno, -2,4 Mm³ (media annua -264*10³ m³) tra foce Reno e Casal Borsetti, e di +2,3 Mm³ (media annua +260*10³ m³) tra Casal Borsetti e P.to Corsini. Questi valori suggerivano quindi un sostanziale bilancio positivo (+1,2 Mm³) dell'unità fisiografica oggetto dello studio, anche se non omogeneo.

Più in dettaglio Idroser (1996) ed Arpa (2000) stabiliva che nel tratto P.to Garibaldi-Casal Borsetti vi fosse stato un apporto di materiale di fondo >0,13 mm dai corsi d'acqua di +125 *10³ m³ ogni anno e di +40 *10³ m³ nel tratto Casal Borsetti - P.to Corsini.

Questo bilancio volumetrico positivo dava origine ad un accrescimento della spiaggia nell'area subito a nord dei moli foranei di P.to Corsini, tra i Lidi degli Estensi e di Spina ed in prossimità di P.to Garibaldi. Al contrario il tratto di foce Reno, che tra il 1981 ed il 1993 si è spostata più a sud di 1500 m, presentava importanti fenomeni erosivi, così come il litorale tra il Lido delle Nazioni e le Bocche del Bianco. In sintesi lo studio valutò che nel 1993 tra P.to Corsini e P.to Garibaldi (21 km di lunghezza) vi fossero 7 km di litorale in avanzamento, 10 stabili e 4 km in arretramento.

Per contrastare i preoccupanti fenomeni erosivi in atto sul litorale tra Casal Borsetti e foce Lamone tra il 1989 ed il 1993 fu effettuato un ripascimento protetto, da barriere soffolte, della spiaggia a ridosso della scogliera radente preesistente. In totale, a più riprese, furono versati 340.000 m³ di sabbia (150 m³/m) che già nel maggio del 1994 si erano ridotti a 250.000 m³ con una perdita netta del 27% (Noli *et al.*, 1995).

A queste tendenze evolutive corrisposero, sui fondali, modificazioni nella distribuzione dei sedimenti. Pur con le dovute cautele, per i differenti metodi di campionamento e d'analisi, dal confronto con i dati di Bondesan *et al.* (1978) i dati tessiturali inerenti ai campionamenti effettuati nel 1993 evidenziarono una relativa diminuzione della percentuale dei fanghi). Ciò si ripercosse sulla distribuzione della dimensione media dei sedimenti, che risultavano relativamente grossolani, anche procedendo verso il largo.

Lo spostamento più a sud (circa di 1,5 km) registrato tra il 1981 ed il 1993 della foce Reno determinò uno spostamento verso meridione dell'area di deposito di materiali sottili portati in mare dal fiume (massimo assoluto della percentuale di fango). Inoltre la distribuzione areale della percentuale di sabbia mise in evidenza, tra -3 e -6 m di profondità a meridione del Lido di Spina, importanti incrementi delle percentuali dei materiali sottili. Essi corrispondevano alle aree di deposito dagli apporti dei fiumi Reno e Lamone, e alla zona ove la protezione offerta dai moli del porto di Ravenna era più intensa.

L'influenza degli apporti solidi dei due fiumi e dei moli portuali viene

inoltre messa in luce dalla progressiva diminuzione del diametro medio (M_z in mm) procedendo da foce Reno verso P.to Corsini. Aree con elevata deviazione standard, ubicate a profondità a 4,6 m di profondità sui fondali antistante la foce Reno ed in prossimità dei moli di P.to Corsini, avvaloravano quanto sopra esposto.

Le indagini condotte da Borgato (1995) ed Idroser (1996) confermarono sui fondali antistanti P.to Garibaldi - Lido di Spina una percentuale relativamente più bassa di fango rispetto al litorale emiliano-romagnolo più settentrionale. Ciò avvalorava l'ipotesi che il limite meridionale dell'influenza, sui depositi, dei materiali sottili trasportati dal Po sia da porre in corrispondenza dei moli di P.to Garibaldi.

In definitiva nell'area in esame, nell'arco di circa un ventennio, si evidenziò una lieve diminuzione delle dimensioni medie dei granuli sui fondali prossimi a riva che veniva attribuita non a modificazioni dell'energia dell'onda, ma alla presenza di opere di difesa: tubi tipo Longard a sud del Lido di Spina, scogliere e ripascimenti protetti nel tratto a meridione della foce Reno. A profondità maggiori questa tendenza s'invertiva per la presenza di sedimenti relativamente più grossolani (minori percentuali di fango) di quelli rilevati nel 1972. Ciò fu attribuito ad una ripresa dei contributi sabbiosi portati al mare dai fiumi (15% del totale stimato per il Reno e 79% per il Lamone), per la progressiva chiusura delle cave in alveo.

Le indagini morfo-batimetriche condotte nel 1999 (Simeoni *et al.*, 2000 e 2002) confermano, a grandi linee, le tendenze evolutive emerse dai precedenti rilievi. I tratti di litorale posti alle estremità dell'area (Lido di Spina - P.to Garibaldi e Casal Borsetti - P.to Corsini) sono caratterizzati da evidenti avanzamenti della linea di riva, mentre nel tratto intermedio continuano gli arretramenti della costa, con maggiore intensità nell'area di foce del Reno.

Rispetto al 1972 ed al 1993 i sedimenti raccolti presentano maggiori percentuali di fango sia alle basse che alle maggiori profondità di prelievo, con massime variazioni tra -2 e -4 m di profondità.

La distribuzione areale della percentuale di sabbia evidenzia l'influenza dei moli portuali di P.to Garibaldi e di P.to Corsini nell'intercettare i materiali grossolani che transitano lungo riva (Simeoni *et al.*, 2002). L'influenza degli apporti sabbiosi del Reno e del Lamone risulta evidente solo in corrispondenza della sola zona di foce, mentre risultano ben delineate le aree al largo in cui si depositano i materiali fangosi di

questi fiumi ed in minor misura di quelli provenienti dal canale di bonifica di Casal Borsetti.

La distribuzione areale del diametro medio riferita ai campioni raccolti nel 1999 mette in rilievo il transito lungo riva divergente dei sedimenti grossolani: dalla foce Reno, area di divergenza, le sabbie si spostano verso P.to Garibaldi e verso P.to Corsini dove vengono trattenute dai moli portuali. Nel tratto tra foce Reno e Casal Borsetti la deriva litoranea non è ben definita, ma dati gli accumuli di sabbia con diametro $>2,5 \phi$ sembra che la componente di maggior intensità sia rivolta verso sud.

La distribuzione dei depositi di sedimento con bassi valori di diametro medio ($M_z >4 \phi$) mette in rilievo come i sedimenti sottili del Po si arrestino in prossimità di P.to Garibaldi. Gli accumuli dei materiali fangosi suggeriscono come i sedimenti sottili portati dal Reno si distribuiscano verso il largo, con una componente principale rivolta a nord ed una secondaria a sud, mentre quelli del Lamone si disperdano principalmente verso il largo e verso meridione (Simeoni *et al.*, 2000 e 2002).

La scarsa estensione della fascia con $M_z <2,5 \phi$ di fronte alla foce Reno sottolinea la limitata area di competenza delle sabbie portate da questo corso d'acqua, anche perché è ipotizzabile che in essa confluiscono anche quelle erose nello smantellamento dall'apparato di foce.

L'area di pertinenza dei contributi sottili del Reno è evidenziata anche dai materiali con una deviazione standard compresa tra 0,5-0,75 ϕ , la cui estensione conferma la prevalenza di contributi sottili di questo fiume.

Come era implicito supporre, dato l'andamento della sabbia, i valori della variazione di questo parametro pongono in rilievo come in sette anni la classazione dei sedimenti sia peggiorata sui fondali a nord della foce Reno e migliorata in quelli più meridionali.

In sintesi, negli anni 90 nel tratto a nord del Reno si è registrato un generale aumento della percentuale del fango (Simeoni *et al.*, 2002) che ha determinato un aumento della taglia media dei granuli e una peggiore classazione dei sedimenti. Ciò è da ricondurre a una ripresa del trasporto solido del Reno, legata soprattutto alla chiusura delle cave in alveo avvenuta nei primi anni

Umberto Simeoni

Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Ferrara



STIMA DELL'EROSIONE E BILANCIO DEI SOLIDI DEL SILLARO: APPLICAZIONE DEL MODELLO RUSLE E CONFRONTO CON IL MONITORAGGIO DEL TRASPORTO IN SOSPENSIONE

INTRODUZIONE

L'erosione è un fenomeno complesso influenzato da fattori rilevanti quali il clima, il suolo, la morfologia, l'idrologia, la vegetazione e l'eccessiva antropizzazione del territorio da parte dell'uomo.

Si stima che, allo stato attuale nella regione Mediterranea, l'erosione idrica possa provocare la perdita di 20-40 tonnellate/ettaro di suolo in un singolo nubifragio e oltre 100 tonnellate/ettaro in casi estremi (Morgan, 1992).

Il seguente studio è volto a stimare la perdita di suolo del bacino montano del torrente Sillaro, nell'Appennino bolognese, attraverso due procedimenti:

- l'applicazione dell'equazione di perdita universale di suolo (modello RUSLE) al bacino,
- il trasporto torbido rilevato nel periodo 1997-2004 alla chiusura del bacino montano.

Come noto, il trasporto solido in sospensione dei corsi d'acqua, detto anche trasporto torbido, può essere considerato un valido indicatore dei fenomeni d'erosione che avvengono, a opera delle acque dilavanti, sui versanti del bacino, quali i movimenti di massa, i calanchi e l'erosione diffusa.

La stima dell'erosione del suolo è stata ottenuta applicando la RUSLE implementata in un idoneo Sistema Informativo Geografico (GIS), che consente una gestione efficace della notevole mole di dati richiesti dal modello: piovosità, uso del suolo, caratteristiche pedologiche, e morfologia dei versanti.

I risultati di stima della perdita di suolo a scala di bacino ottenuti attraverso le due procedure, modellistica e sperimentale, sono stati messi a confronto e hanno permesso di stimare il bilancio dei solidi a livello di bacino (sediment delivery).

CARATTERIZZAZIONE DEL BACINO

La morfologia del bacino del Sillaro, affluente di destra del fiume Reno, è abbastanza dolce, risentendo della litologia prevalentemente argillosa delle formazioni presenti: il Pliocene e le Argille Scagliose, dove sono numerosi ed estesi i calanchi, mentre verso sud si trovano lembi della Marnosa Arenacea.

TAB.1 - PRINCIPALI CARATTERI GEOMORFICI CARATTERIZZANTI IL BACINO MONTANO DEL T. SILLARO

Superficie bacino	km ²	137,6
Perimetro	km	67,5
Quota massima	m s.l.m.	993,0
Quota media	m s.l.m.	256,0
Quota minima	m s.l.m.	75,0
Pendenza media	%	11,2
Lunghezza asta Sillaro	km	34,0
Lunghezza rete idrica	km	494,8
Densità di drenaggio		3,6

Tab. 1 - Caratteristiche geomorfiche del bacino montano del Torrente Sillaro.

Per quanto riguarda la copertura vegetale, il bacino è per lo più interessato principalmente da zone scarsamente vegetate, frequentemente calanchive, da bosco ceduo, pascolo e, dove la pendenza lo consente, da seminativo; per la restante quota da arboreti, vigneti, aree di cava ed ex cava nei pressi dell'alveo, ecc.. (fig.1). In tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche geomorfologiche del bacino.

Lo studio delle precipitazioni trentennali, relativamente alle stazioni del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (S.I.M.N.), ha evidenziato la presenza di due massimi in primavera ed in autunno con il massimo principale in autunno, e da un minimo assoluto in estate, caratteristici del regime pluviometrico appenninico: questo andamento si ripercuote sul regime tipicamente torrentizio del Sillaro.

STIMA DELLA PERDITA DI SUOLO CON L'APPLICAZIONE DEL MODELLO RUSLE

Tra i diversi modelli atti alla stima dell'erosione del suolo tra i più noti vi è certamente l'equazione elaborata da Wischmeier e Smith nel 1978 deno-

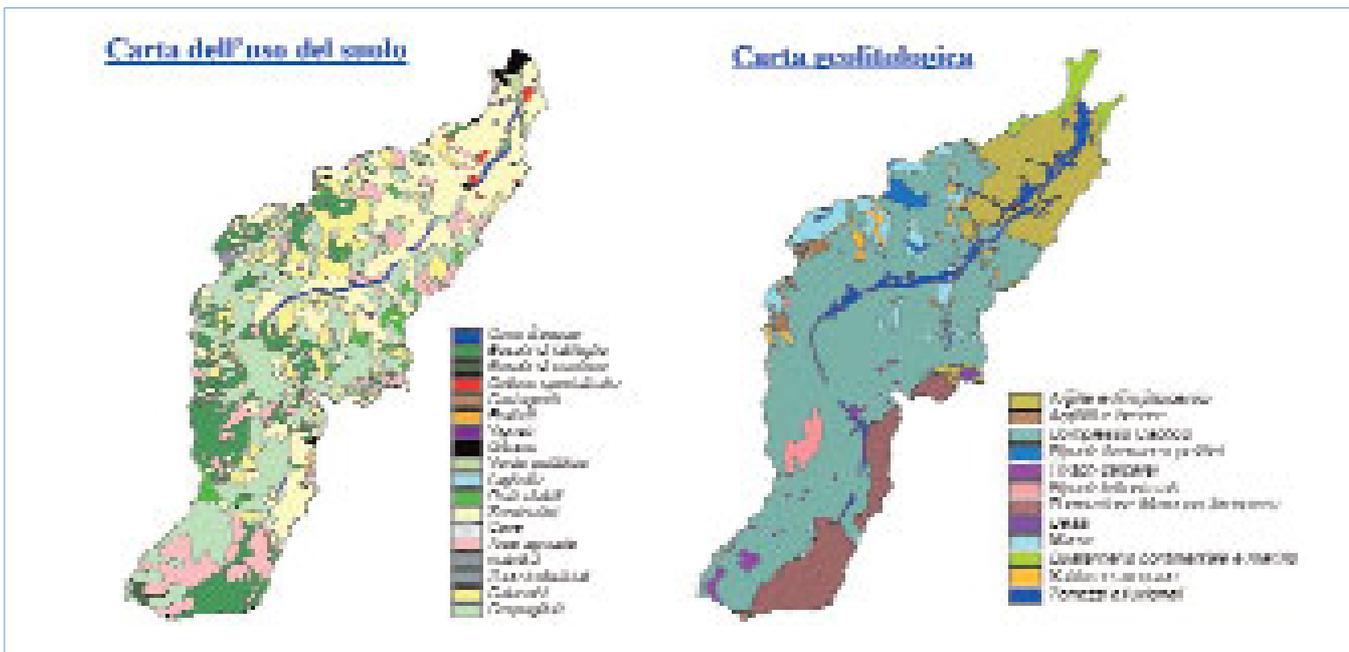


Fig. 1 - Rappresentazione cartografica dell'uso del suolo e della conformazione geologica del bacino montano del Torrente Sillaro

minata USLE (Universal Soil Loss Equation), e adottata dal U.S. Department of Agriculture [Wischmeier W.H et al.,1978]: si tratta di un modello parametrico su base empirica che fornisce una stima della perdita annua di suolo, causata dall'erosione idrica superficiale, in parcelle omogenee per dimensione, caratterizzate in base al tipo e all'uso del suolo, ai fattori topografici, alle tecniche di gestione e alla aggressività delle precipitazioni (calcolata su periodi poliennali). Tale modello è stato negli anni modificato dando origine alla cosiddetta equazione RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) che si basa sugli stessi principi empirici della USLE, ma introduce alcuni nuovi parametri che permettono un miglior adattamento del modello anche su terreni morfologicamente complessi.

In generale i modelli USLE e RUSLE possono essere definiti come un set di equazioni matematiche che, opportunamente combinate, forniscono un valore medio del tasso di perdita di suolo, dovuto ad erosione laminare e rill erosion, fenomeni determinati dall'impatto della pioggia al suolo e dal deflusso superficiale.

La formula generale, alla base del modello USLE-RUSLE è, com'è noto, la seguente:

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

Dove:

A = stima della perdita media annua di suolo [$t\ ha^{-1}\ y^{-1}$]

R = fattore erosività della pioggia [$MJ\ mm\ h^{-1}\ ha^{-1}\ y^{-1}$]

K = fattore erodibilità del suolo [$t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$]

LS = fattore topografico o slope length factor (coefficiente adimensionale calcolato)

C = copertura del suolo (coefficiente adimensionale stimato, variabile tra 0 e 1)

P = pratiche di controllo dell'erosione (coefficiente adimensionale stimato, variabile tra 0 e 1).

Il prodotto tra i fattori elencati escluso R (erosività della pioggia) fornisce una misura della resistenza dell'ambiente all'erosione. Ovviamente, trattandosi di una relazione moltiplicativa, è sufficiente che uno dei valori inseriti tenda a zero per annullare il risultato finale.

Il fattore R è influenzato da intensità e durata delle precipitazioni, ovvero dall'energia cinetica della pioggia che può trasformarsi in energia meccanica all'impatto con la superficie: esso dipende quindi dalla collocazione geografico-climatica della stazione. Per il presente studio i dati pluviometrici usati sono stati quelli delle stazioni di Prugnolo, Castel del Rio, San Benedetto del Querceto, San Clemente e Borgo Tossignano ricavati dalla banca dati del S.I.M.N. e corrispondenti ad una serie storica di circa almeno 20 anni.

Il fattore R è stato calcolato utilizzando il metodo proposto da Arnoldous (1980) che riprende i concetti dell'Indice di Fournier. Secondo Fournier e Arnoldous la diversa erosione non dipende tanto dalla quantità assoluta delle precipitazioni quanto dalla frequenza e dall'intensità delle stesse.

Il fattore K è una misura della suscettibilità del suolo all'erosione e pertanto dipende da specifiche proprietà fisiche del suolo influenzanti la capacità di infiltrazione delle precipitazioni e il movimento dell'acqua all'interno del suolo, nonché da proprietà che intervengono sulla dispersione, l'abrasione, la mobilità degli aggregati e delle particelle costituenti il suolo da parte delle precipitazioni e del ruscellamento superficiale (Wang et al., 2001). Il calcolo del fattore K è stato effettuato utilizzando il nomogramma proposto da Wischmeier e Smith, prendendo in considerazione parametri tessiturali, strutturali del suolo e il contenuto di sostanza organica degli orizzonti superficiali.

Il fattore C, che quantifica l'effetto della copertura del suolo viene influenzato sia dall'uso del suolo (bosco, pascolo, prato ecc.), sia dalla densità del popolamento vegetale. Valori di C uguali o prossimi a zero hanno come effetto un contenimento del tasso potenziale di erosione del suolo e vengono quindi attribuiti ad aree non erodibili, impermeabilizzate o coperte da affioramenti rocciosi coerenti, oppure ad aree con fitta vegetazione arborea. Tuttavia, il fattore C descritto da Wischmeier & Smith (1978) non tiene in considerazione l'eventuale presenza di rocciosità affiorante, molto comune in aree non agricole, né l'effetto protettivo esercitato dalla frazione di scheletro che non subisce l'azione disgregante della pioggia e ciò può portare a una sovrastima dell'erosione. Al contrario valori prossimi a 1 vengono assegnati a colture scarsamente protettive per copertura vegetale o

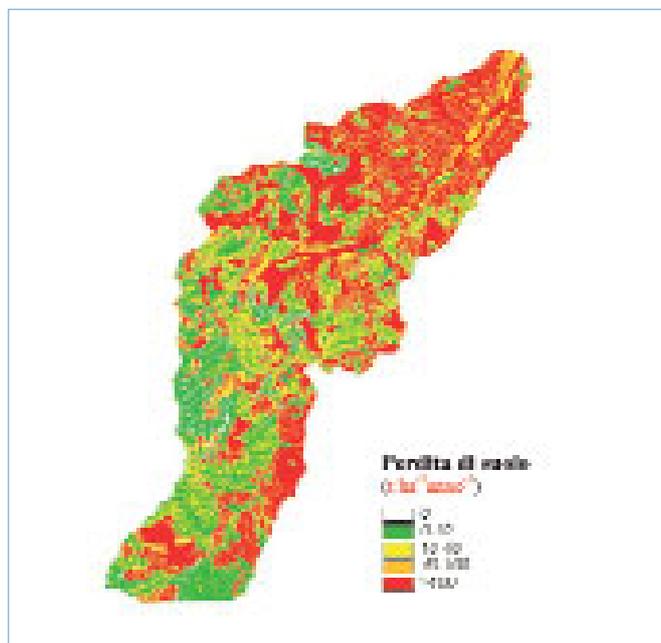


Fig. 2 - Stima della distribuzione spaziale della perdita di suolo ottenuta tramite l'applicazione della RUSLE.

perché subiscono lavorazioni agricole meccaniche che possono favorire il fenomeno erosivo. Il valore 1 viene inoltre assegnato alle aree "impermeabili" del tessuto urbano e alla rocciosità affiorante. Il fattore P fa riferimento ad eventuali pratiche di contenimento dell'erosione, volte essenzialmente ad arginare il deflusso superficiale (es. terrazzamenti, ciglionamenti, lavorazioni del terreno).

Il fattore LS prende in considerazione la lunghezza (L) e la pendenza (S) del versante in quanto l'entità dei processi erosivi è influenzata dalla concomitanza dei due fattori.

Nella stesura originale di Wischmeier & Smith, la lunghezza del pendio (L) viene calcolata come distanza orizzontale media dal punto di origine del deflusso al punto in cui la pendenza (S) decresce e inizia l'attività deposizionale. Questa approssimazione può risultare valida in un ambiente agricolo di pianura, ma non è applicabile in zone montuose e collinari. In tali ambienti, la micromorfologia del terreno è resa complessa dalla presenza di concavità e convessità localizzate, che determinano rapide variazioni di direzione e intensità del deflusso.

Molti metodi sono stati proposti per migliorare il calcolo del fattore topografico (LS), ma solo nell'ultimo decennio si è raggiunta una accuratezza apprezzabile grazie all'introduzione dei GIS e dei modelli digitali (DEM) per il calcolo RUSLE. Per poter tenere in considerazione la convergenza o divergenza del deflusso superficiale, il fattore L è stato sostituito dal concetto di "unit contributing area" (Moore and Burch, 1986; Mitasova et al., 1995, 1996; Desmet and Govers, 1996).

In questo modo è possibile valutare quali-quantitativamente le aree territoriali che contribuiscono al run-off e della direzione del deflusso superficiale in corrispondenza delle variazioni del terreno cella per cella (flow accumulation grid), condizione necessaria per poter applicare l'equazione a differenze finite introdotta per il calcolo di LS in ambiente raster bidimensionale da Desmet and Govers (1996).

Il risultato che si ottiene applicando il modello RUSLE in ambiente GIS è una stima della perdita di suolo media annua del bacino montano del torrente Sillaro espressa in tonnellate per ettaro all'anno ($t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$). Come si può osservare in figura 2 i fenomeni erosivi all'interno del bacino sono piuttosto consistenti.

Le aree maggiormente soggette al fenomeno erosivo risultano i terreni coltivati a seminativo e/o colture orticole, a stretto contatto con le aree calanchive, nell'insieme occupanti circa il 50% del bacino. Di queste il 26% ricade nella classe considerata ad elevata perdita di suolo (40-100 t ha

Anno	Tons/Km ²	mm erosi
1997 (apr-dic)	593	0,40
1998	429	0,29
1999	1161	0,77
2000	707	0,47
2001	845	0,56
2002	2042	1,36
2003	879	0,59

Tab. 3 - Valori di perdita di suolo del bacino montano del Torrente Sillaro, stimati sulla base del monitoraggio del trasporto torbido e della portata alla chiusura

l'anno⁻¹) e ben il 65% di questi terreni coltivati è soggetto ad un rischio molto elevato di erosione superiore a 100 t ha⁻¹anno⁻¹ (fig. 2).

L'erosione è notevolmente più contenuta nella parte a monte del bacino, caratterizzata da boschi, prati stabili e cespuglieti. La causa principale della elevata erodibilità di questi terreni risiede nella natura della litologia del bacino, caratterizzata da argille abbondantemente soggette a fenomeni calanchivi.

STIMA DELLA PERDITA DI SUOLO ATTRAVERSO IL MONITORAGGIO DELLE TORBIDE FLUVIALI

In tabella 3 sono rappresentati i valori di perdita di suolo annui stimati con l'analisi dei dati torbidimetrici. Nel periodo 1998-2003 l'erosione del suolo media è di 0,67 mm, corrispondente ad una perdita di suolo media di circa 1.005 t km² anno⁻¹. I valori annui, se rapportati alla classificazione di Fournier, rientrano nella classe di media gravità, mentre la perdita di suolo è elevata nel 1999 e nel 2001, essendo compresa nella classe tra le 1.000 e le 2.000 t km² anno⁻¹.

Relativamente ad approfondimenti sulla metodologia di monitoraggio e analisi ed elaborazione dei dati del trasporto in sospensione (trasporto torbido) si rimanda alle altre relazioni presentate nell'ambito della manifestazione (Rubbi, et. al.; Pavanelli et al.).

STIMA DEL BILANCIO DEI SOLIDI A LIVELLO DI BACINO E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il monitoraggio delle torbide fluviali del torrente Sillaro dal 1997 ad oggi consente di stimare quella che può essere definita la perdita effettiva di suolo del bacino. Infatti, poichè la stazione di monitoraggio è collocata alla chiusura del bacino montano, campionando quindi si può affermare che i solidi che passano da tale sezione corrispondono al materiale che, una volta eroso dalla superficie, esce dal bacino e percorre l'intero tragitto fino alla chiusura del bacino, rappresentando quindi la produzione di sedimenti. Questi sedimenti sono originati dal bacino stesso, sedimenti prodotti dalle diverse forme di erosione presenti nel bacino, tra cui erosione superficiale, profonda, calanchiva, in alveo, ecc..

La stima ottenuta con l'applicazione del modello RUSLE fornisce indicazioni sul quantitativo di materiale che viene complessivamente movimentato su tutta la superficie del bacino: una particella di suolo, una volta erosa da un sito, può sottostare a cicli di sedimentazione-movimentazione durante tutto il tragitto verso valle, sino a una definitiva sedimentazione o alla fuoriuscita dal bacino.

Confrontando i valori sperimentali con quelli ottenuti con l'applicazione della RUSLE si può affermare che il rapporto tra i due fornisce un'interessante indicazione del coefficiente di resa solida o SDR (Sediment Delivery Ratio) del bacino, con il limite dovuto al fatto che il modello non è in grado di simulare adeguatamente l'erosione calanchiva, per movimento di massa e l'erosione in alveo.

$$SDR = S_p/S_t * 100 \quad (2)$$

Dove:

S_p = perdita di suolo effettiva media del bacino

S_t = perdita di suolo totale del bacino

Considerando la perdita di suolo media di 1.005 t km² anno⁻¹, ottenuta dalla campagna di monitoraggio, e il valore stimato con la RUSLE pari a 13.000 t km² anno⁻¹, dal loro rapporto risulta un coefficiente di resa solida (SDR) di circa dell'8%: tale valore stima la percentuale di suolo eroso che abbandona effettivamente il bacino, rispetto a quello complessivamente "movimentato". Questa stima indica come, potenzialmente, gran parte del materiale eroso sui versanti non arrivi alla chiusura di bacino, ma sedimenti lungo il percorso, in seguito a variazioni di acclività, di scabrosità superficiale, alla presenza di vegetazione o a variazioni di permeabilità del suolo, ecc. Questo risultato tuttavia è influenzato dall'incapacità del modello di simulare adeguatamente l'erosione calanchiva, l'erosione per movimenti di massa e l'erosione in alveo. Questi difetti appartengono tuttavia a numerosi modelli di erosione di bacino, e per simulare questi fenomeni sono necessari modelli di simulazione specifici per ciascun fenomeno. Per poter migliorare il risultato ottenuto è consigliabile/auspicabile, una campagna di monitoraggio delle torbide degli affluenti del torrente Sillaro potrebbe aiutare a verificare ulteriormente il modello con maggior dettaglio, oltre ad un miglioramento dell'efficienza di simulazione del bacino attraverso una stima più precisa dei parametri utilizzati, per esempio una valutazione dell'uso del suolo di maggior dettaglio.

Gilmo Vianello, Samanta Lorito

DiSTA - C.S.S.A.S. (Centro Sperimentale per lo Studio e l'Analisi del Suolo)

Donatella Pavanelli, Alessandro Bigi

DEI Agra, Dipartimento di Economia e Ingegneria Agrarie

Alma Mater Studiorum, Bologna

BIBLIOGRAFIA

- Arnoldous H.M.J. - 1978. *An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In: Assessment of erosion*, De Boedt M., Gabriels D. Wiley, Chichester 127-132.
- Bazzoffi P.- 1984. *Erosione sui versanti e conseguente sedimentazione in piccoli serbatoi artificiali. Nota III: validazione di alcuni modelli di previsione dell'erosione (U.S.L.E., Gavrilovich, P.S.I.A.C.) per mezzo del confronto fra i valori stimati e quelli effettivamente misurati attraverso la sedimentazione negli invasi. Annali dell'Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo*, 15: 149-188.
- Biancotti A., Bellardone G., Bovo S., Cagnazzi B., Giacomelli L., Marchisio L. - 1998. *Distribuzione regionale di piogge e temperature. Collana Studi Climatologici in Piemonte 1*, Regione Piemonte.
- Desmet P.J.J., Govers G. - 1996. *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of soil and water conservation*, 51: 427-433.
- Milward A.A., Mersey J.E. - 1999. *Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. Catena*, 38: 109-129.
- Mitasova H., Brown W.M. *Using Soil Erosion Modeling for Improved Conservation Planning: A GIS-based Tutorial Geographic Modeling Systems Lab*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Moore I., Burch G. - 1986. *Physical basis of length-slope factor in the universal soil loss equation. Soil Science Society of America Journal*, 50: 1294-1298.
- Morgan, R. C.P. - 1992. *Soil Erosion in the Warthern Countries of the European Community. EIW workshop*, Brussels, 21-22 May.
- Wang G., Gertner G., Liu X., Anderson A. - 2001. *Uncertainty assessment of soil erodibility factor for revised universal soil loss equation. Catena*, 46: 1-14.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. - 1978. *Predicting rainfall erosion losses- A guide for conservation planning. In: Agriculture Handbook 537*, U.S.D.A.

L'AZOTO TOTALE NELLE TORBIDE E RELAZIONI CON I PARAMETRI IDROLOGICI: PRIMI DATI

24

INTRODUZIONE

Il trasporto torbido dei corsi d'acqua può essere considerato un indicatore dei fenomeni d'erosione del suolo che si manifestano sui versanti, nell'ambito del bacino. Il trasporto torbido è costituito da solidi in sospensione di granulometria variabile, dalle argille alle sabbie, in funzione dei parametri idraulici, litopedologici, vegetazionali del bacino. Numerose sono le indagini sui processi di trasporto che concordano nell'attribuire ai solidi sospesi il ruolo di veicolo per la migrazione degli agenti inquinanti e dei nutrienti (Bueselinck *et al.*, 2000; Horowitz, 1991). La concentrazione di tali sostanze, nei solidi in sospensione, può arrivare a diversi ordini di grandezza maggiori rispetto alla loro concentrazione nella frazione liquida, in fase disciolta. In particolare è stato provato il ruolo di vettore preferenziale degli aggregati di particelle fini come argilla e limo (Droppo *et al.*, 1997; Ongley *et al.*, 1992). Inoltre numerosi studi hanno provato come il tasso di azoto sia tendenzialmente in crescita negli acquiferi e nelle acque superficiali (Böhlke and Denver, 1995) e come il ciclo naturale dell'azoto sia ormai modificato, a causa dei fertilizzanti e degli scarichi zootecnici e fognari (Vitousek *et al.*, 1997).

La necessità di dati sperimentali rende il monitoraggio fluviale un basilare tassello nell'ambito della gestione e della protezione dell'ambiente e, nel caso specifico, per il controllo dell'erosione del suolo, dell'inquinamento e dell'eutrofizzazione delle acque di superficie.

Nel presente lavoro si riportano i primi risultati conseguiti, nell'ambito di un più ampio progetto, relativamente alle relazioni, in campioni di torbida fluviale, tra la concentrazione dell'azoto totale rilevato nei solidi sospesi e la concentrazione e la granulometria dei solidi sospesi. Si propone inoltre un primo tentativo di stima dell'azoto perso a livello di bacino, attraverso il vettore dei solidi sospesi fluviali.

Lo studio si avvale di una rete di monitoraggio fluviale avviata nell'aprile del 1997 dal DEIAgra della Facoltà di Agraria col supporto dell'Autorità di Bacino del Reno, che vede operative le seguenti stazioni di rilevamento idrologico-torbidimetrico in continuo:

- T. Sillaro, con un bacino di 137,6 km², avviata nell'aprile 1997,
- T. Lavino (82,6 km²), operativa dal settembre 1998,
- T. Savena (168,9 km²) dall'ottobre 2000.

I campioni studiati in questa prima fase del lavoro sono prelevati durante il 2003, dalle tre stazioni di monitoraggio, che presentano un'adeguata concentrazione di solidi in sospensione.

Sulla base della disponibilità dei dati analitici fisici e chimici, dei dati idrologici di portata e delle precipitazioni sarà possibile, in prospettiva, approfondire i seguenti aspetti del fenomeno:

- lo studio del ruolo dell'erosione idrica e del trasporto dei solidi sospesi nel trasferimento dell'azoto in ambito fluviale;
- la stima a livello di bacino della perdita di azoto;
- la perdita di azoto, sia in funzione delle caratteristiche intrinseche (litologia, pedologia, geomorfologia ecc) di ciascun bacino, sia in funzione della diversa antropizzazione e uso del suolo dei bacini.

METODOLOGIA DI LAVORO E ANALISI

I torrenti sono stati attrezzati, alla chiusura del bacino montano, con idrometro a ultrasuoni e campionatore automatico per le torbide. L'idrometro è interconnesso al campionatore automatico per liquidi, dotato di 24 bottiglie, al quale invia l'impulso per il campionamento con frequenza programmata in funzione del volume d'acqua defluito dalla sezione [Pavanelli, Pagliarani, Bigi, *supplemento al n.6 2004*]. Tale metodo di campionamento delle torbide consente di prelevare un numero di campioni, per ciascun evento,

in relazione alla portata e quindi alla magnitudine dell'evento stesso; di conseguenza i campionamenti sono concentrati nelle fasi idrologiche più interessanti per lo studio del trasporto torbido, le piene.

Nel caso specifico, per poter effettuare analisi geo-chimiche sui campioni di sedimento, nella scelta della strumentazione e della campagna di rilevamento si è tenuto conto anche della necessità di una quantità significativa di materiale solido (> 10g), il che può risultare un problema se la strategia di campionamento non è adeguata alla natura altamente episodica delle piene e delle torbide fluviali (Russell *et al.*, 2000).

In figura 1 si riporta, come esempio, l'andamento della portata, della concentrazione dei solidi e dell'azoto totale nei campioni durante alcuni eventi significativi occorsi nel 2003. Si osserva la distribuzione dei campionamenti rispetto all'idrogramma che consente di ricostruire al meglio anche l'andamento della torbida e della concentrazione dell'azoto. I campioni di torbida sono sottoposti alle seguenti analisi:

- analisi torbidimetrica - torbidimetro da laboratorio (Hach model 2100AN, fondo scala 10000 unità nefelometriche (NTU);
- determinazione dei solidi sedimentabili in cono Imhoff;
- determinazione dei solidi residui mediante analisi gravimetrica separazione dei solidi con centrifugazione ed essiccazione a 105°C fino a peso costante;
- analisi granulometrica - velocità di sedimentazione con l'applicazione della legge di Stokes, (metodo della pipetta);
- determinazione dell'azoto totale.

Le analisi 3, 4, 5 sono effettuate presso i laboratori della sez. Provinciale di Ravenna dell'Agenzia Regionale Prevenzione Ambiente (Arpa) dell'Emilia-Romagna, le analisi 1 e 2 sono effettuate presso il laboratorio di Idraulica del Dipartimento (Pavanelli, Bigi, *supplemento al n.6 2004*).

Presso il laboratorio Arpa, il campione viene sottoposto alla separazione della frazione liquida dai solidi sospesi, mediante filtrazione su filtri 0,45 µm, dopo preventiva sedimentazione e, se necessario centrifugazione.

I solidi sospesi così risultanti vengono seccati, pesati (determinazione dei solidi sospesi), macinati e setacciati a 2 mm e costituiscono la frazione solida su cui vengono effettuate le successive prove:

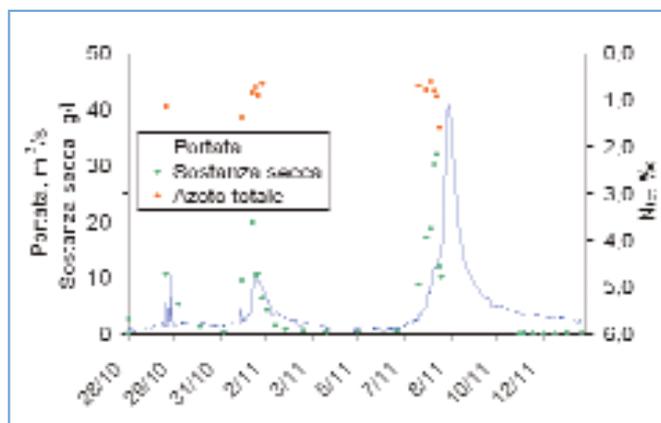


Fig. 1. Andamento della portata, della concentrazione dei solidi sospesi (sostanza secca) e dell'azoto totale (Ntot) nei solidi sospesi durante alcuni eventi occorsi nell'autunno del 2003 nel torrente Savena

a) Per la determinazione delle frazioni granulometriche:

- sabbia $2000 \div 50 \mu\text{m}$;
- limo grosso $50 \div 20 \mu\text{m}$;
- limo fine $20 \div 2 \mu\text{m}$;
- argilla $< 2 \mu\text{m}$.

E' adottato il "metodo della pipetta" che si basa su criteri idrodinamici fondati sulla differenza di velocità relativa di caduta delle particelle nel fluido in cui sono immerse secondo la legge di Stokes.

b) Sulle aliquote di sedimento rimaste, dopo aver determinato la granulometria, si determina l'Azoto totale mediante analisi elementare dei campioni. La tecnica consiste nella combustione istantanea (flash combustion) del campione con formazione di ossidi gassosi trasportati in corrente di He e ridotti ad Azoto elementare (N_2) su uno strato di rame. Il metodo non differenzia le diverse forme di azoto (organico e minerale nitrico, nitroso e ammoniacale) ma procede ad una determinazione complessiva dell'elemento nel campione sottoposto a prova. Il valore di Azoto totale determinato si riferisce esclusivamente alla frazione solida del campione di torbida, dal momento che il primo passo della preparazione del campione consiste nella separazione dalla frazione liquida, che non viene conservata, quindi, in questo contesto, si intenderà per Azoto Totale, l'azoto totale nei solidi sospesi (Ntot SS).

ELABORAZIONE DEI DATI

In *tab.1* si riportano i valori medi, massimi e la deviazione standard dei campioni oggetto dello studio, relativamente alla portata, misurata durante il campionamento, alla concentrazione dell'azoto totale, alla distribuzione granulometrica dei solidi sospesi e alla concentrazione di questi ultimi nei campioni. Si osserva una notevole differenza tra i valori di portata dei tre torrenti, legate alle rispettive caratteristiche intrinseche, quali la dimensione dei bacini, la geolitologia, la copertura vegetale ecc.. L'azoto risulta mediamente inferiore nei campioni del Lavino, mentre è su valori simili, negli altri 2 torrenti anche in riferimento ai valori massimi e di deviazione standard. Per quanto riguarda la granulometria si osservano significative similitudini tra i campioni del Sillaro ed il Lavino, per i quali vi è una netta predominanza della granulometria fine, argille e limo fine, mentre i campioni del Savena presentano valori rilevanti della frazione grossolana (*fig.2*), risultati che rispecchiano le caratteristiche geolitologiche specifiche dei tre bacini.

Lo studio, già in questa prima fase, fornisce interessanti elementi per una valutazione del comportamento della concentrazione dell'azoto totale rispetto alla granulometria dei campioni. In particolare si osserva che esiste una relazione diretta con la granulometria più fine: le argille e il limo fine ($50\text{-}20 \mu\text{m}$). Viceversa all'incrementare della concentrazione della frazione sabbiosa, nel campione, diminuisce la concentrazione di azoto (*fig. 3*).

Relativamente alla frazione limosa (*fig. 4*) si osserva una relazione diretta con il limo fine, in analogia con l'andamento riscontrato con l'argilla, mentre è assente il legame con il limo grosso.

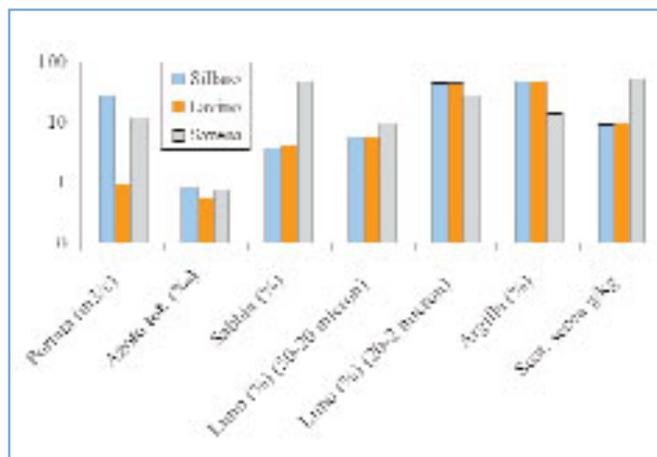


Fig. 2 - Istogramma dei dati della tabella 1

L'azoto totale è stato messo in relazione anche con la concentrazione dei solidi sospesi nei campioni (*fig. 5 sin.*), si osserva che all'aumentare di questa l'azoto diminuisce. Tale comportamento può essere spiegato con l'incremento della frazione più grossolana che si rileva all'aumentare della concentrazione delle torbide.

Come noto la concentrazione delle torbide è direttamente correlata con la portata: l'incremento della portata implica una maggiore energia cinetica dell'acqua con il conseguente aumento della capacità erosiva e di trasporto durante gli eventi di piena, ne segue che tale stato idraulico è caratterizzato dall'aumentare della quota di particelle grossolane in sospensione.

Si sono ricercate anche le relazioni tra l'azoto totale e la portata, valore medio su 30 min., misurata durante il campionamento (*fig. 5 des.*): si osserva una relazione, di tipo inverso, relativamente ai soli dati del Savena. Questo fatto si spiega con la variabilità della granulometria dei solidi sospesi del Savena che copre tutto il range, dalle argille alle sabbie: all'aumentare della portata, incrementando la frazione grossolana, l'azoto diminuisce essendo legato alla frazione fine. Viceversa gli altri due corsi d'acqua monitorati sono caratterizzati da solidi in sospensione costituiti prevalentemente da materiali fini: al variare della portata non si riscontra una variazione di composizione granulometrica significativa, e conseguentemente neanche della concentrazione di azoto.

In *tab. 2* si riportano i valori di stima della perdita di azoto totale annua dei tre bacini monitorati, il valore indica l'azoto effettivamente perduto in quanto uscito dal bacino dalla sezione di chiusura monitorata, attraverso il trasporto torbido. Il calcolo è stato effettuato utilizzando i dati di perdita di suolo ottenuti da tutti i campioni di trasporto torbido raccolti durante la campagna di monitoraggio. Utilizzando una formula di interpolazione (Walling, 1992), si è calcolato il trasporto medio annuo che ha permesso di

		Portata (m³/s)	Azoto tot. (%)	Sabbia (%)	Limo (%) (50-20 μm)	Limo (%) (20-2 μm)	Argilla (%)	Sost. secca g/kg
LAVINO	media	1,0	0,6	4,1	5,8	44,2	46,0	9,8
	max	1,1	0,9	8,0	11,0	52,0	60,0	20,8
	dev standard	0,1	0,2	2,4	3,4	5,7	10,0	5,7
SAVENA	media	11,4	0,8	47,5	10,0	28,6	13,8	53,7
	max	22,9	1,6	94,0	26,0	62,0	36,0	164,9
	dev standard	6,5	0,4	30,7	7,2	19,5	9,7	45,7
SILLARO	media	26,8	0,8	3,8	5,6	43,7	46,9	9,2
	max	46,0	1,4	13,0	15,0	60,0	69,0	34,9
	dev standard	16,0	0,3	2,3	2,8	6,1	7,6	5,3

Tab. 1 - Statistiche dei valori misurati nei campioni del 2003 dei 3 corsi d'acqua: portata del momento di campionamento, concentrazione dell'azoto totale, granulometria e concentrazione dei solidi sospesi nei campioni

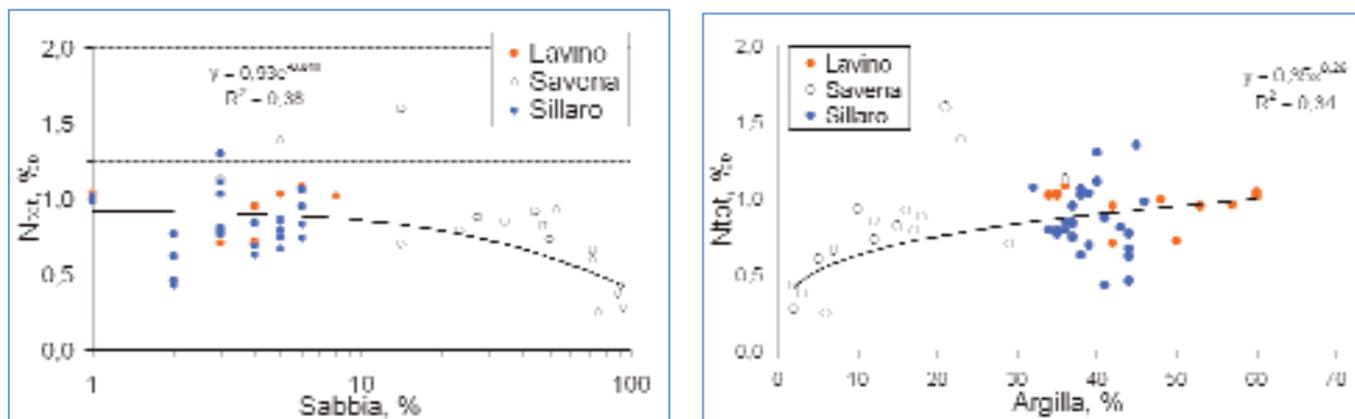


Fig. 3. Andamento della concentrazione di azoto totale in relazione alla granulometria della frazione argillosa (%) e sabbiosa nei campioni dei tre torrenti

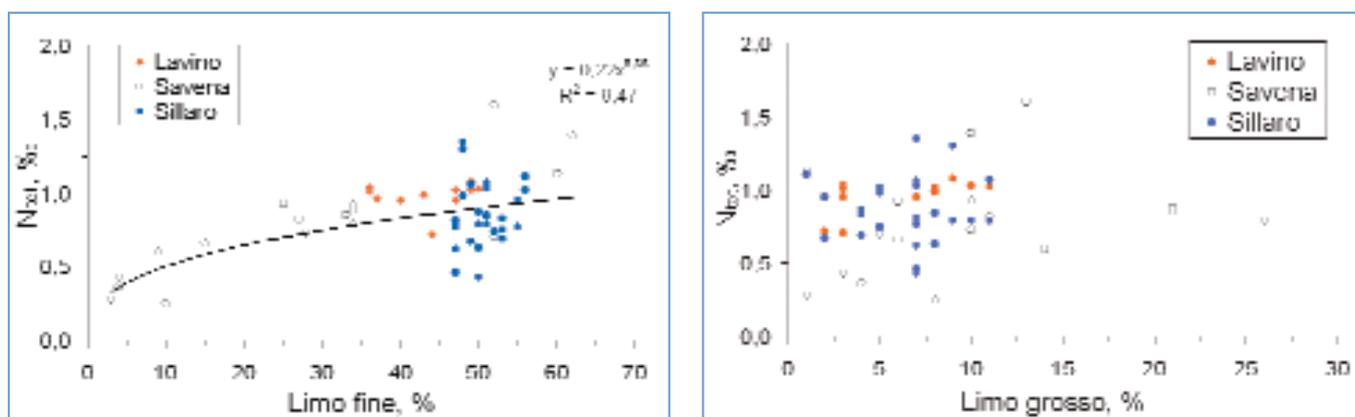


Fig. 4 Andamento della concentrazione dell'azoto totale in relazione alla granulometria della frazione limo fine (20-2 micron) e grosso (50-20 micron)

stimare la perdita di azoto utilizzando la concentrazione di azoto totale media rilevata per ciascun bacino. Relativamente al metodo di stima del deflusso torbido si rimanda agli altri interventi riportati (Rilevamento idrologico e dei solidi sospesi nelle stazioni sperimentali sui torrenti Sillaro, Lavino, Savena e foce Reno, D. Pavanelli, A. Pagliarini, A. Bigi).

I valori massimi di perdita di azoto sono riscontrati nel Sillaro con 13 di Ntot, relative al primo semestre del 2004 e una media di 90 t sul periodo monitorato, segue il Savena con 108 t di Ntot SS nel 2003, e una media di 66 t annue, infine il Lavino presenta valori di un ordine di grandezza inferiori: 9 t medie con il massimo di 18 t nel 1999. In tab. 3 si riportano i valori relativi al deflusso torbido unitario e alla perdita di suolo stimati per i tre corsi d'acqua e rispettivi bacini: si osserva che il Sillaro e il Savena presen-

tano valori elevati, risultando essere bacini in forte erosione, mentre il Lavino ha un modesto trasporto torbido.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I dati fin qui studiati ci permettono di fare alcune considerazioni, che comunque richiederanno l'ampliamento della campagna di misure ed elaborazioni per avere conferma.

L'azoto totale risulta essere in diretta relazione con la presenza di argille e limo a granulometria fine, confermando quanto presente in bibliografia.

La relazione tra l'azoto totale e la concentrazione della sostanza secca è inversa, a causa dei rapporti idraulici che esistono tra la portata e la competenza della corrente: infatti incrementando la portata aumenta la quantità di materiale trasportabile e anche la sua granulometria. Tale relazione è

		Stima Ntot				Stima Ntot							
		Ton/km ²	Tonn			Ton/ km ²	Tonn				Stima Ntot	Stima Ntot	
SILLARO	1997	0,5	67,7	LAVINO									
	1998	0,4	49,0										
	1999	0,9	124,7										
	2000	0,5	75,0										
	2001	0,7	94,5										
	2002	0,6	76,8										
	2003	0,7	100,4										
	2004	1,0	132,8										
	media	0,7	90,1		media	0,1	9,1	SAVENA					
											Stima Ntot	Stima Ntot	
											Ton/km ²	Tonn	
											2000	0,1	19,6
											2001	0,4	68,6
											2002	0,5	80,9
											2003	0,6	107,8
											2004	0,3	52,4
								media	0,4	65,8			

Tab. 2 - Stima della perdita di Azoto totale unitaria ed annua dai tre bacini considerati

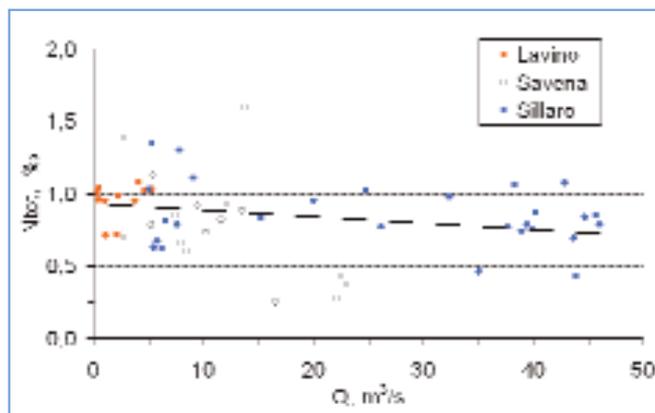
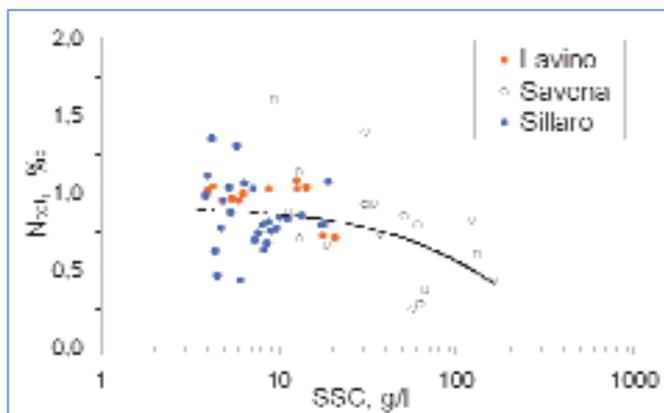


Fig. 5 - Sinistra: relazione tra l'azoto totale e la concentrazione dei solidi sospesi in g/l per i tre corsi d'acqua. Destra: relazione tra l'azoto totale e la portata media di 30 min relativa al campionamento, la regressione si riferisce ai campioni del Savena

27

confermata dall'andamento della concentrazione d'azoto rispetto alla portata misurata durante il campionamento.

La stima della perdita di azoto attraverso fenomeni erosivi dalle sezioni monitorate si può imputare come perdita effettiva di azoto totale dal bacino, in quanto misurato alla sezione di chiusura del bacino montano. I valori massimi, sul periodo di rilevamento, per il Sillaro e il Savena risultano dell'ordine del centinaio di tonnellate annue, con media di 90 t e di 66 t annue rispettivamente, mentre il Lavino presenta valori di un ordine di grandezza inferiori, 9 t medie. Queste stime, se confermate, dovranno essere spiegate, in quanto, sebbene il Lavino presenti minore trasporto solido rispetto agli altri 2 torrenti, risulta essere il bacino maggiormente interessato dall'agricoltura e dall'antropizzazione. Tuttavia per un affinamento della stima della perdita di azoto sarà necessario calcolarla in relazione alla concentrazione della frazione fine presente nelle torbide, e quindi differenziando il valore di stima della perdita di suolo in relazione alle frazioni granulometriche. Ne risulterebbe certamente ridimensionata la perdita di azoto calcolata per il Savena per il quale è rilevante la presenza della frazione grossolana nelle torbide.

Non sono state definite le diverse forme di azoto, in quanto l'Azoto totale è stato determinato mediante la tecnica dell'analisi elementare. È però presumibile, visto che il dato si riferisce alla frazione solida nella torbida, che si tratti delle forme meno solubili legate alla matrice suolo (infatti le maggiori concentrazioni sono state riscontrate nei campioni a rilevante componente granulometrica fine). Il dato è quindi interpretabile anche come una quantificazione della perdita dell'azoto a minor impatto ambientale e a maggior utilità agronomica.

Si deduce che in tale forma l'azoto non costituisce un diretto pericolo in relazione ai fenomeni di inquinamento organico e dell'eutrofizzazione, ma piuttosto, indirettamente, tale perdita comporta un reintegro di azoto in forma probabilmente più impattante, attraverso l'uso di fertilizzanti.

Licia Rubbi, Laura Billi

Arpa, Emilia-Romagna Sezione provinciale di Ravenna

Donatella Pavanelli, Alessandro Bigi

DEIAgra, Dipartimento di Economia e Ingegneria Agrarie
Alma Mater Studiorum, Bologna

	Deflusso torbido unitario (T/Km²)	Erosione suolo mm
Savena media (2001-03)	651	0,43
Sillaro media (1998-03)	1010	0,67
Lavino media (1999-03)	189	0,13

Tab. 3 - Stima del deflusso torbido e della perdita di suolo

BIBLIOGRAFIA

- Böhlke, J.K., and J.M. Denver, Combined use of groundwater dating, chemical, and isotopic analyses to resolve the history and fate of nitrate contamination in two agricultural watersheds, Atlantic coastal plain, Maryland, *Water Resources Research*, 31 (9), 2319-2339, 1995.
- Bueselinck, L., G. Govers, A. Steegen, and J. Poesen, Impact of soil aggregates on the size selectivity of the sediment deposition process, in *The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer*, pp. 99-107, IAHS, Waterloo, Canada, 2000.
- Droppo, I.G., G.G. Leppard, D.T. Flannigan, and S.N. Liss, The Freshwater Floc: A Functional Relationship of Water and Organic and Inorganic Floc Constituents Affecting Suspended Sediment Properties, *Water, Air, and Soil Pollution*, 99 (1-4), 43-54, 1997.
- Horowitz, A.J.: *A primer on sediment trace-element chemistry*, Lewis, Michigan, USA, 1991.
- Ongley, E.D., B.G. Krishnappan, I.G. Droppo, S.S. Rao, and R.J. Maguire, Cohesive sediment transport: emerging issues for toxic chemical management, *Hydrobiologia*, 235/236, 177-187, 1992.
- D. Pavanelli, A. Bigi, Indirect analysis methods to estimate suspended sediment concentration: reliability and relationship of turbidity and settleable solids, *Biosystems Engineering*, accettato maggio '04. I006343 - (AM).
- Donatella Pavanelli, Andrea Pagliarani, Alessandro Bigi, Rilevamento idrologico e dei solidi sospesi nelle stazioni sperimentali dei torrenti Sillaro, Lavino, Savena, e foce Reno, 2ª Giornata di studio "Monitoraggio fluviale ed erosione nella pianificazione e gestione dei bacini appenninici" 8 ottobre 2004, Aula Magna della Facoltà di Agraria, Bologna, Via G. Fanin, 50, Atti pubblicati su *Rivista dell'Arpa*, n.6, 2004.
- D. Pavanelli, A. Pagliarani, Monitoring water flow, turbidity and suspended sediment load, from an Apennine catchment basin, Italy *Biosystems Engineering*, vol 83/4 pp 463-468, 2002.
- Vitousek, P.M., J.D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger, and D.G. Tilman, Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences, *Ecological Applications*, 7, 737-750, 1997.
- Russell, M.A., Walling, D.E., and R.A. Hodgkinson, Appraisal of the Simple sampling device for collecting time-integrated fluvial suspended sediment sample in, *The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer*; pp.119-127, IAHS, Waterloo, Canada, 2000.
- Walling, D.E., Webb B.W., Woodward, J.C., Some sampling considerations in the design of effective strategies for monitoring sediment-associated transport, in *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins*, edited by J. Bogen, Walling D.E., Day, T.J., pp. 279-288, IAHS, Oslo, 1992.

STUDIO DELLE PORTATE ALLA FOCE DEL RENO DAL 1995 E VALIDAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO CON MISURE DI CAMPO

INTRODUZIONE

Il presente studio si inserisce nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca che ha come oggetto lo studio idrologico e dei processi erosivi di alcuni degli affluenti principali del fiume Reno attraverso il monitoraggio in continuo degli afflussi, deflussi e trasporto torbido.

A partire dal febbraio del 2003 si è aggiunto il monitoraggio del Reno a breve distanza dalla foce in Adriatico, nei pressi di Mandriole di Sant'Alberto (RA).

Obiettivo specificatamente per la stazione alla foce del fiume Reno, è lo studio del bilancio dei solidi trasportati a mare, in sospensione e sul fondo, in funzione del ripascimento delle coste. A tale fine si è posta l'esigenza di arrivare ad una stima quanto più affidabile della portata del Reno nella sezione monitorata, stima necessaria per arrivare al calcolo del deflusso torbido, vale a dire delle quantità di sedimenti che arrivano mediamente ogni anno al mare.

La stazione di misura è stata collocata sopra uno sbarramento costituito da cinque grandi luci regolate da paratoie, azionate in funzione della portata del fiume in modo da assicurare una quota idrometrica pressoché costante a monte della chiusa. Il calcolo della portata è complesso e mai affrontato organicamente, anche in conseguenza della geometria degli organi di regolazione, atta a consentire tanto il deflusso a battente, quanto quello a stramazzo. Nel presente lavoro, si propone la metodologia di calcolo che, attraverso un programma realizzato appositamente, consente l'elaborazione automatica dei dati per la stima della portata.

AREA DI STUDIO

La chiusa di Volta Scirocco si trova nel basso corso del Reno tra l'abitato di Sant'Alberto (RA) e l'attraversamento della strada statale 309 "Romea", a una distanza originaria di circa 9 km dalla foce.

Lo sbarramento è mobile e rende possibile la derivazione per gravità a beneficio di una pluralità di utenze ricadenti sia nell'ambito agricolo (Consorti di bonifica della Romagna occidentale e della Romagna centrale), sia in quello industriale (Polimeri Europa, ex Anic; Cereol; Eridania) e idropotabile (Nuovo Impianto di Potabilizzazione di Ravenna, oggi acquisito da Romagna Acque nella sua nuova veste di società delle fonti).

La sezione può essere considerata la chiusura del bacino del Reno; non vi sono, infatti, altre immissioni o derivazioni nel breve tronco ubicato a valle, che risente fortemente della vicinanza del mare in termini sia di salinità delle acque, sia di maree, e può presentare quote anche inferiori allo zero idrometrico, fino a circa 0,50 m sotto il livello marino.

Il bacino idrografico del Reno ha una superficie di 4.139 km², corrispondente al 18% dell'intera superficie fisica dell'Emilia-Romagna e al 6% di quella del bacino del Po.

La superficie del bacino di pianura è pari a 1.542 km², mentre la porzione montana-collinare si estende nell'Appennino tosco emiliano romagnolo su una superficie di 2.597 km².

L'afflusso meteorico sul bacino è, in media, intorno ai 1.000 mm annui.

DESCRIZIONE DELLA TRAVERSA DI VOLTA SCIROCCO

La traversa fluviale di Volta Scirocco, realizzata dal Consorzio per il Canale emiliano-romagnolo nella seconda metà degli anni 50, è costituita essenzialmente da quattro grandi pile in alveo, che unitamente a due spalle laterali individuano cinque luci di ampiezza 18 metri ciascuna, nelle quali sono alloggiati gli organi di scarico e di

regolazione.

Ubicato in un drizzagno artificiale lungo 800 metri e largo 100, nel quale il fiume è stato inalveato a costruzione ultimata, lo sbarramento sorge sul limite meridionale delle valli di Comacchio.

Un complesso di 1.400 pali trivellati, spinti alla profondità di 24 metri sotto il livello del mare, sorregge la platea generale di base, articolata in elementi giuntati secondo la direzione del fiume con unioni assimilabili a cerniere: questo estradosso, a quota -3,00 m s.l.m. ha consentito all'opera di adattarsi alla subsidenza. Le pile e le spalle sono alte 10 m, e sostengono gli organi di regolazione e scarico (5 grandi paratoie a settore sormontate da altrettante paratoie a ventola, incernierate sulla generatrice superiore) con i relativi elementi di tenuta e di guida, ed i gargami di panconatura (presenti in 3 ordini).

Dalla sommità delle pile e delle spalle, spiccano ulteriormente verso l'alto, i portali di sostegno del carro trasportatore dei panconi (ossia degli elementi metallici per il sezionamento delle cinque luci), che costituiscono il tratto distintivo dell'opera sotto il profilo estetico. Del resto il progetto della traversa di Volta Scirocco porta anche le firme di Giuseppe Evangelisti, Bruno Poggi e Piero Pozzati, tra i più illustri rappresentanti della scuola idraulica e strutturale dell'Università di Bologna.

Le quote idrometriche a monte dello sbarramento vengono mantenute all'interno di un intervallo compreso tra 1,70 e 2,00 m s.l.m., che rappresenta il miglior compromesso fra le esigenze derivatorie delle varie utenze e i rischi di permeazioni arginali nel tratto fluviale interessato dal rigurgito.

Gli organi preposti alla regolazione dell'invaso creato dallo sbarramento, realizzati in carpenteria metallica, sono costituiti da:

- una paratoia a settore, che in posizione di chiusura totale determina un battente di 4,50 m sul fondo, mentre in posizione di completo sollevamento lascia completamente libero il deflusso sino alla quota 5,50 m s.l.m.;
- una paratoia a ventola, incernierata in corrispondenza della generatrice superiore della paratoia a settore, in grado di aumentare l'altezza di ritenuta in ragione di ulteriori 1,50 metri.

Il deflusso dell'acqua può avvenire a battente, quando è sollevata la paratoia inferiore (a settore), oppure per stramazzo, quando è abbassata la paratoia superiore (a ventola). Sopra le paratoie corre una passerella di manovra sulla quale, nei pressi della pila sinistra della seconda luce, è stata collocata la stazione di monitoraggio per il campionamento delle torbide.



Immagine della stazione di Volta Scirocco

STIMA DELLA PORTATA TRANSITANTE A VOLTA SCIROCCO

Dalle stime di progetto, la traversa è in grado di smaltire per deflusso a battente sotto le paratoie a settore (nel seguito denominate anche, per brevità, "paratoie", in contrapposizione a "ventole"), con una quota idrometrica a monte di 3 m, una portata di 500 m³/s, corrispondente a 100 m³/s per ogni luce. In occasione di grandi piene le paratoie possono essere sollevate interamente fino a stabilire il libero deflusso.

Trattandosi di una sezione influenzata dalla presenza dello sbarramento, non vi è luogo alla formazione di una scala naturale delle portate, in quanto agli stessi livelli possono corrispondere diversi valori di portata, in dipendenza del grado d'apertura delle paratoie e della posizione delle ventole (fig. 1) che regolano rispettivamente il deflusso a battente (sotto) e a stramazzo (sopra).

Quotidianamente alle ore 8, anche nei giorni festivi, il personale tecnico addetto alla traversa rileva i seguenti dati di funzionamento:

- quote idrometriche a monte e valle (cm s.l.m.);
- apertura delle paratoie (5 valori in cm);
- posizione delle ventole (5 valori in cm).

Le manovre per ottimizzare il livello di monte sono a loro volta oggetto di puntuale registrazione, anche più volte al giorno, in dipendenza delle condizioni idrometriche del fiume (fig. 2).

I dati idrometrici e di funzionamento consentono la stima della portata transitante tramite l'utilizzo delle formule per la portata delle luci a battente rigurgitate e a stramazzo, di seguito riportate:

$$\text{efflusso a battente: } Q_i = \mu \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (1)$$

dove: μ = coefficiente di efflusso 0,613; A = area della sezione della bocca; g = accelerazione di gravità (9,81 m/s²); Δh = dislivello tra i livelli idrometrici di monte e di valle.

$$\text{efflusso a stramazzo: } Q_i = \mu' \cdot b \cdot h \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2)$$

dove: μ' = coefficiente di efflusso 0,385; b = larghezza della lama stramazante; h = altezza della lama stramazante; g = accelerazione di gravità (9,81 m/s²).

Entrambe le formule sono in parte viziate dall'incertezza sui valori dei coefficienti di efflusso, che costituiscono l'anello debole della catena soprattutto per le bocche a battente rigurgitate (per le quali sono tollerati valori anche intorno a 0,70, vale a dire oltre il 16% maggiori del valore canonico). Tale incertezza assume maggiore rilevanza in regime di morbida e piena, quando la portata transitante per le paratoie è prevalente su quella sfiorante a stramazzo.

In fig. 3 sono riportati i grafici delle curve di deflusso della sezione, ottenuti con le relazioni sopra riportate, con riferimento ai due casi di deflusso considerati come alternativi fra loro: nella realtà è frequente il deflusso contemporaneo sia a battente sia a stramazzo.

Sulla base dei dati di gestione forniti dall'impianto si è stimata, attraverso un programma di calcolo, la portata. Il programma segue il diagramma di flusso riportato in fig. 4.

I dati di gestione, per il periodo 2000-2004, sono stati inseriti nel programma ed elaborati. In tab. 1 si riporta un esempio di tabella di calcolo, dalla quale si ricava, per ogni giorno, il valore di portata parziale, relativo al deflusso a stramazzo e a battente, per ogni paratoia e per ciascuna ventola, e il valore di portata totale. In fig. 5 si riporta, come esempio, l'idrogramma costruito con i dati elaborati, con distinzione tra deflusso a stramazzo e a battente, e il valore di portata complessiva, ottenuto dalla somma dei deflussi parziali.

COMMENTO AI RISULTATI

Per un controllo dell'attendibilità dei risultati forniti dal programma di calcolo, si è proceduto ad uno studio alternativo per determinare le portate del Reno e degli affluenti in varie sezioni del bacino. In mancanza di valori sperimentali diretti, la letteratura tecnica offre soltanto i dati degli Annali idrologici dell'Ufficio idrografico di Bologna, benché incompleti e lacunosi. In tale ambito, l'unica serie di dati sufficientemente omogenea e significativa è quella del periodo 1951-1979. Ai valori di portata misurati e pubblicati sono stati aggiunti altri valori "ricostruiti" utilizzando i dati di afflusso meteorico e i coefficienti di deflusso ricavati per similitudine da valori coevi di bacini adiacenti ed affini.

La portata media annuale stimata tramite il programma di calcolo per gli anni 2000-2003 risulta pari a 35,1 m³/s. Il valore non differisce significativamente da quello corrispondente desunto dalla letteratura per il periodo 1951-1979, pari a 39,5 m³/s.

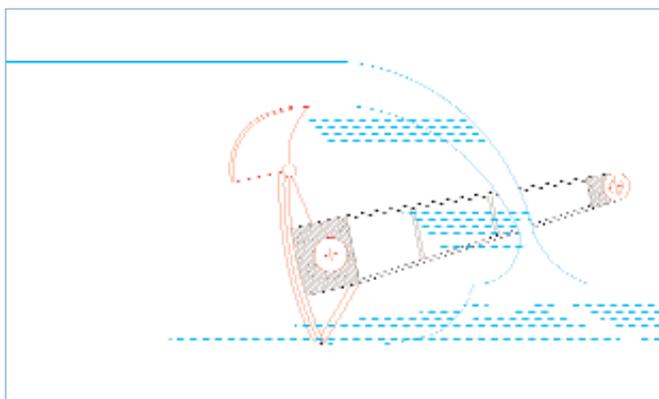


Fig. 1 - Schema del funzionamento della traversa di Volta Scirocco, con rappresentazione schematica delle paratoie a settore e a ventola

GIORNO	ORA	QUOTA ACQUA		POSIZIONE PARATOIE					POSIZIONE VENTOLE					ALLARME QUOTA RENO (MIN - MAX)	DERIVAZIONE INDUSTRIALE	POMPA CANALETTA IRRIGUA (CONTATORE)	PRECIPITAZ. (IN MM.)	
		Monte	Valle	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
Gio	01-gen-04	01.30	132	+0,41	2	3	2	2	2	0	0	0	0	0		SI		
		08.00	158	+0,62														
		12.00	134	+0,23	2	2	2	2	1									
		18.00	155	+0,26	3	2	2	2	1									
		23.00	136	+0,29	2	2	2	2	1									
Ven	02-gen-04	08.00	167	+0,68	3	3	2	2	1									

Fig. 2 - Esempio di registrazione dei dati alla sezione di Volta Scirocco

GIORNO	QUOTE IDROMETRICHE (CM S.L.M.)		APERTURA DELLE PARATOIE (CM)					APERTURA DELLE VENTOLE (CM)					QUOTA SFIORO (CM S.L.M.)					PORTATA DA APERTURA DELLE PARATOIE (M ³ /S)					PORTATA DA SFIORO DALLE VENTOLE (M ³ /S)				
	monte	valle	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5
01/01/04	158	62	64	108	64	64	64	0	0	0	0	0	187	239	187	187	187	30,0	50,6	30,0	30,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
02/01/04	167	68	108	108	64	64	20	0	0	0	0	0	239	239	187	187	187	51,4	51,4	30,5	30,5	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8
03/01/04	151	52	64	20	64	64	20	0	0	0	0	0	187	135	187	187	135	30,5	9,5	30,5	30,5	9,5	0,0	2,0	0,0	0,0	2,0
04/01/04	154	56	20	20	64	20	20	0	0	0	0	0	135	135	187	135	135	9,5	9,5	30,3	9,5	9,5	2,6	2,6	0,0	2,6	2,6

Tab. 1 - Tabella di calcolo della portata secondo il programma

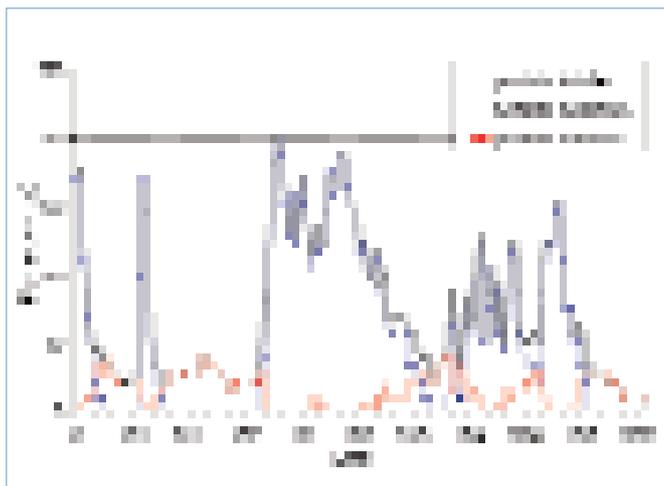


Fig. 5 - Esempio di idrogramma relativo al 1° semestre 2004 con i differenti contributi di portata dovuti alle paratoie e alle ventole e con il deflusso totale

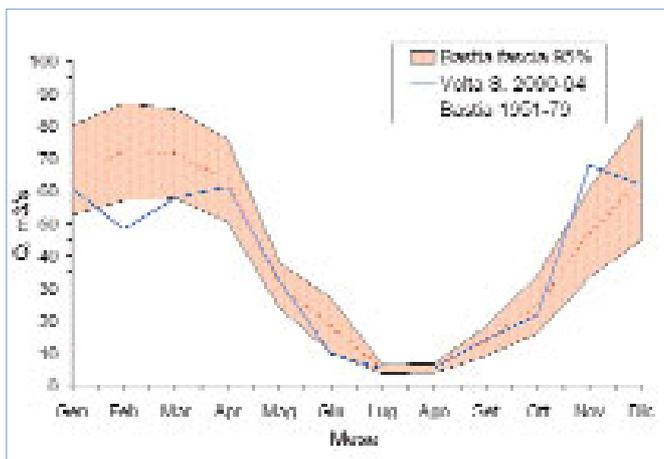


Fig. 6 - Andamento medio delle portate a Bastia (stimate/misurate) per gli anni 1951-1979 con relativa fascia di confidenza al 95% e andamento medio delle portate a Volta Scirocco (calcolate) per gli anni 2000-2004

PROSPETTIVE

Una seconda causa di incertezza nella stima della portata, oltre al valore dei coefficienti nelle formule classiche della fononomia, risiede nella lunga periodicità delle rilevazioni idrometriche (1 sola misura giornaliera garantita) in rapporto alla variabilità del fenomeno e alla frequenza delle operazioni di regolazione.

In future elaborazioni, si potranno anche utilizzare i dati di altezza idrometrica trasmessi via radio alla sede del Consorzio ogni 30 minuti. La disponibilità di tali dati consente di avere 48 misurazioni giornaliere per la stima della portata del fiume.

Sul versante dell'accuratezza assoluta, la disponibilità di misure di portata

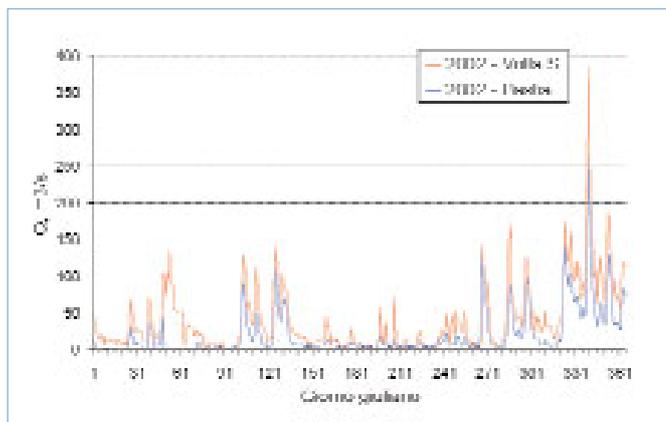
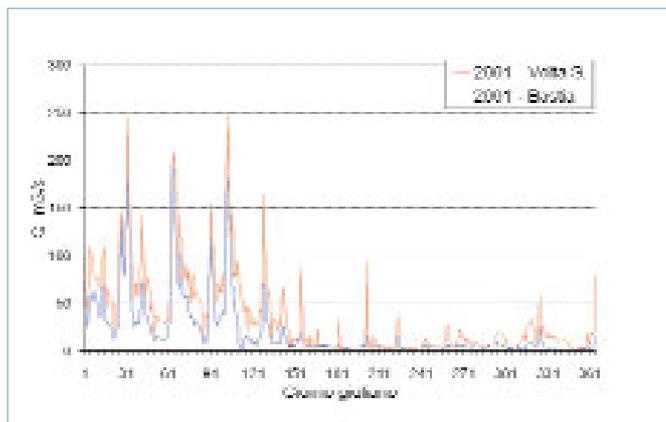
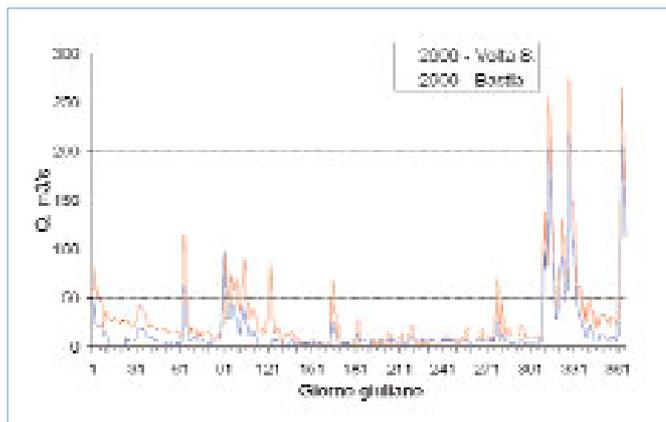


Fig. 7 - Confronto tra gli andamenti giornalieri del deflusso alla sezione di Bastia (dati misurati dal Sim - Arpa) e di Volta Scirocco (dati calcolati col programma) per gli anni 2000-2002

dirette, preferibilmente provenienti da sezioni prossime e meno affette da perturbazioni del moto, come ad esempio uno dei ponti ubicati a monte dello sbarramento, potrebbe permettere la taratura del programma attraverso una migliore definizione dei coefficienti delle formule idrauliche adottate.

Piero Mattarelli, Daniele Bottau
 Consorzio Canale Emiliano Romagnolo, Bologna

Donatella Pavanelli, Andrea Pagliarani, Alessandro Bigi
 DEIAgra, Dipartimento di Economia e Ingegneria Agrarie,
 Alma Mater Studiorum, Bologna

BIBLIOGRAFIA

- Nash L.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models - Part 1: A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.

32

VALORI MEDI														
Origine dati	Anno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
Programma di calcolo	2000	32,70	21,20	22,00	63,60	12,90	8,3	3,7	5,5	7,1	17,30	102,0	55,80	29,30
	2001	81,10	64,30	79,30	82,50	39,30	11,30	6,2	4,0	8,8	9,8	17,2	11,30	34,60
	2002	19,00	50,10	18,00	37,40	39,80	13,00	9,9	10,50	35,10	50,10	67,0	118,0	39,00
	2003	116,1	39,50	50,10	59,70	15,50	5,6	1,1	1,5	5,4	9,9	84,5	61,50	37,50
	2004	54,30	65,50	119,8	63,60	53,50								
Annali e dati ricostruiti	1951	129,4	200,2	154,7	71,60	47,90	12,90	2,4	12,80	14,70	53,80	95,9	36,70	69,40
	1952	43,10	91,80	42,10	10,90	19,50	2,5	2,1	3,3	10,80	50,80	60,00	124,1	38,40
	1953	68,40	64,10	36,40	45,90	26,50	42,10	13,70	2,1	5,9	42,40	31,4	16,30	32,90
	1954	39,00	61,60	86,50	36,90	69,90	26,00	4,8	2,5	4,2	1,9	3,9	22,30	30,00
	1955	29,90	68,20	123,4	20,60	1,2	0,9	2,8	14,60	13,40	18,20	61,7	58,00	34,40
	1956	51,50	24,50	83,00	62,40	59,20	20,40	4,37	1,70	8,10	5,44	2,22	2,52	27,10
	1957	38,70	85,00	35,40	89,80	69,00	39,90	2,50	0,85	8,33	5,62	6,34	19,20	33,40
	1958	29,20	21,40	32,50	115,0	18,30	3,86	1,14	0,30	2,80	3,51	29,40	97,80	29,60
	1959	29,50	32,20	51,90	72,00	40,00	15,90	1,47	4,37	23,40	18,70	92,10	232,0	51,10
	1960	92,40	161,0	122,0	123,0	65,20	12,90	15,40	4,43	9,37	65,60	62,80	105,0	69,90
	1961	137,0	33,60	11,20	51,80	16,60	7,46	0,03	3,68	2,77	9,23	66,60	56,60	33,00
	1962	62,50	20,20	84,50	82,70	11,90	4,13	0,62	0,51	2,81	5,06	45,30	32,00	29,40
	1963	81,30	79,60	52,60	55,40	32,20	40,70	6,90	3,89	27,70	18,40	49,90	38,00	40,50
	1964	31,70	51,40	153,0	95,70	9,310	6,50	8,90	5,38	4,62	103,0	41,60	80,10	49,30
	1965	99,60	42,20	84,30	116,0	33,90	105,0	10,80	5,43	21,90	18,80	59,60	57,50	54,60
	1966	39,90	60,10	37,20	29,50	14,80	7,68	2,49	8,81	13,70	33,30	180,00	186,0	51,10
	1967	40,90	38,00	34,00	17,80	9,72	15,60	2,17	4,35	7,02	6,67	27,50	41,00	20,40
	1968	42,00	112,0	32,80	13,50	37,20	75,30	10,70	8,74	8,16	8,71	57,10	84,50	40,90
	1969	80,20	111,0	134,0	107,0	25,40	6,96	4,35	5,25	8,05	7,02	18,00	18,00	43,80
	1970	94,70	45,70	82,40	35,50	24,10	17,80	3,57	3,34	6,73	5,26	6,63	20,20	28,80
	1971	84,50	52,20	65,70	56,00	11,00	7,49	3,24	1,59	3,79	4,76	12,60	25,20	27,30
1972	51,90	126,0	95,50	112,0	53,40	8,52	3,97	6,70	51,60	25,80	38,70	87,30	55,10	
1973	138,0	71,50	66,00	52,40	15,40	8,85	3,97	4,75	47,40	68,90	33,80	33,20	45,30	
1974	46,60	65,40	58,40	23,90	48,80	7,56	4,82	5,15	11,00	22,70	26,50	9,93	27,60	
1975	8,96	36,50	31,20	51,10	17,00	8,68	5,11	8,13	11,40	27,70	45,70	71,80	26,90	
1976	15,80	86,90	68,30	24,10	18,10	4,86	5,08	9,93	33,60	38,90	87,30	99,10	41,00	
1977	110,0	85,40	49,00	61,40	22,00	6,50	6,35	12,30	14,20	12,20	21,20	64,30	38,70	
1978	71,24	69,17	78,80	112,14	47,28	17,15	10,37	4,64	3,98	12,44	11,75	75,79	42,90	
1979	134,0	89,70	81,60	81,60	31,00	2,6	1,8	3,2	10,90	26,70	89,50	41,60	49,50	
BASTIA - dati S.I.M.	1997	98,50	18,80	14,80	13,90	10,30	10,50	5,0	4,8	3,0	3,7	14,40		18,00
	1998	27,60	7,4	8,8	34,10	13,60	4,2	5,3	4,1	6,6	20,10	14,80	9,8	13,00
	1999	23,60	27,30	24,90	30,60	9,0	6,3	5,5	5,5	4,8	16,20	84,00	70,70	25,70
	2000	14,40	7,3	16,10	26,90	4,5	6,1	5,4	5,8	5,3	5,8	81,30	34,00	17,70
	2001	54,50	34,70	56,50	54,20	16,40	6,6	5,3	5,4	5,0	4,6	5,5	2,7	21,00
	2002	4,8	13,20	4,7	20,20	24,50	6,4	6,0	7,0	20,50	29,90	42,10	73,30	21,10

Tab. 2 - Valori di portata medi mensili relativi alla sezione di Bastia dell' Sim Arpa (anni 1997-2002) e del S.I.M.N. (anni 1951-1979; in corsivo i dati ricostruiti). Valori di portata medi mensili relativi alla sezione di Volta Scirocco stimati tramite il programma di calcolo (anni 2000-2004).