

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIP.TO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Publicazione del Corso di Cultura in Ecologia

ATTI DEL 41.mo CORSO

CONOSCERE IL SISTEMA FIUME NELL'AMBIENTE ALPINO

A cura di

Vincenzo D'AGOSTINO e Vinicio CARRARO



In collaborazione con



CENTRO ITALIANO PER LA RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE

Direttore del corso in Cultura in Ecologia: Tommaso Anfodillo.

Organizzazione scientifica del 41.mo corso: Vincenzo D'Agostino e Giuseppe Baldo.

Sede del corso: Centro Studi per l'Ambiente Alpino, via F. Ossi, 41 – 32046 San Vito di Cadore (BL), tel. 04369311, fax 0436890048, e-mail: ambiente.alpino@unipd.it.

Volume a cura di Vincenzo D'Agostino e Vinicio Carraro.

La presente pubblicazione può essere richiesta presso la segreteria del Dip.to Territorio e Sistemi Agroforestali dell'Università di Padova o acquisita in formato .pdf al seguente indirizzo web:
<http://www.tesaf.unipd.it/Sanvito/atti.htm>

La riproduzione anche di parte del volume è consentita purché sia citata la fonte.

Indicazioni per le citazioni bibliografiche

Esempio di citazione di un singolo contributo:

Dalla Fontana G., 2005, I processi di formazione del reticolo idrografico. In D'Agostino V. & Carraro V. (eds.), *Conoscere il sistema fiume in ambiente alpino*, Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 41.mo corso, Università di Padova: 11-21.

Citazione del volume:

D'Agostino V. & Carraro V. (eds.), *Conoscere il sistema fiume in ambiente alpino*, Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 41.mo corso, Università di Padova.

INDICE

PRESENTAZIONE	i
<i>Gianfranco Zolin</i>	
CORSI D'ACQUA ALPINI: ECOLOGIA E PAESAGGIO	1
<i>Giancarlo Dalla Fontana</i>	
I PROCESSI DI FORMAZIONE DEL RETICOLO IDROGRAFICO	11
<i>Diego Sonda</i>	
UTILIZZO DI GIS PER L'ANALISI DEL BACINO IDROGRAFICO	22
<i>Paolo Paiero e Giovanni Paiero</i>	
LA VEGETAZIONE RIVIERASCA ALPINA	28
<i>Antonio Andrich</i>	
CONOSCERE LA VEGETAZIONE RIPARIA: L'INFLUENZA DEL REGIME IDROLOGICO E DELLA MANUTENZIONE	46
<i>Silvia Degli Esposti, Daniele Norbiato, Roberto Dinale,, Marco Borga</i>	
VALUTAZIONE DI ALCUNE COMPONENTI DEL BILANCIO IDROLOGICO IN BACINI DI TIPO ALPINO	64
<i>Gian Battista Bischetti</i>	
INTERAZIONE TRA VEGETAZIONE E DEFLUSSO E STABILITÀ DELLE SPONDE	75
<i>Paolo Billi</i>	
I TORRENTI COME CONDIZIONE DI EQUILIBRIO MORFODINAMICO E LA PORTATA FORMATIVA	91
<i>Vincenzo D'Agostino</i>	
MORFOLOGIA E DINAMICA DEI CORSI D'ACQUA DI MONTAGNA	96
<i>Alessandro Vianello</i>	
L'ANALISI GRANULOMETRICA DEI SEDIMENTI NEI CORSI D'ACQUA MONTANI	112
<i>Lorenzo Marchi</i>	
IL TRASPORTO SOLIDO DI FONDO E LE COLATE DETRITICHE: FENOMENOLOGIA ED EFFETTI SULL'ASSETTO DEI CORSI D'ACQUA A FORTE PENDENZA	125
<i>Mario Cerato</i>	
IL CONTROLLO DEI TORRENTI PER MEZZO DELLE OPERE DI SISTEMAZIONE MONTANA: LA RICERCA DI UN COMPROMESSO FRA LA TUTELA DELLA NATURALITÀ E GLI OBIETTIVI DI PROTEZIONE	140
<i>Relatori</i>	146
<i>Atti dei Corsi di Cultura in Ecologia</i>	147

PRESENTAZIONE

La principale motivazione che ha dato corpo al corso “Conoscere il sistema-fiume nell’ambiente alpino”, organizzato dal Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali dell’Università di Padova e dal Centro Italiano per la Riqualificazione Fluviale in collaborazione con la Provincia di Belluno, la Comunità Montana Val Boite e il Comune di San Vito di Cadore, è la constatazione che in molti corsi d’acqua montani si effettuano interventi di sistemazione idraulica secondo schemi e soluzioni precostituite e senza condurre le necessarie analisi preliminari circa le specificità del sistema entro il quale si opera.

È invece da tenere presente che la rete idrografica montana è forse l’unica nella quale possono ancora ritrovarsi dei lembi di integralità e che queste situazioni devono rappresentare una risorsa e, al tempo stesso, un modello al quale ispirarsi per interventi di rinaturalizzazione.

Alla specificità dei torrenti montani concorrono le caratteristiche del bacino idrografico, gli assetti vegetazionali e geomorfologici, il regime idrologico e, non ultima, la dinamica dei sedimenti. Tutte queste componenti sono sinergicamente coinvolte nella comprensione del “tipo” di torrente che stiamo analizzando e nel giudizio sulla sua condizione di equilibrio o di non equilibrio all’interno del bacino idrografico.

L’osservazione di campo, condotta secondo un approccio multidisciplinare ed integrato, e la sua successiva rielaborazione ed interpretazione critica rappresentano la prima chiave di lettura del “sistema-fiume”. E’ proprio nei fondamenti dell’osservazione che si è voluto porre il filo conduttore del corso, facendo presente che, anche quando ricorriamo a metodi e tecniche di interpretazione ed elaborazione delle informazioni acquisite, è sempre l’osservazione che ci deve guidare, porgendoci la giusta sensibilità nell’utilizzo di questi strumenti.

La naturalità dei torrenti montani deve anche coesistere con gli obiettivi di sicurezza dell’uomo e di difesa del territorio. Si è per questo voluta sottolineare la necessità di osservare e comprendere anche i provvedimenti strutturali che si sono andati affermando per la mitigazione del rischio idrogeologico. L’intensità stessa degli interventi di sistemazione presenti in un torrente riflette la storia delle alluvioni che si sono succedute nel tempo e spesso manifesta, anche all’interno di uno stesso bacino, una fragilità territoriale molto variegata. Anche le sistemazioni idrauliche fanno parte del “sistema-fiume”, non riconoscerne l’utilità equivarrebbe a tornare molto indietro nel tempo quando, come scriveva Leonardo da Vinci, “Infra le dannose cagione delli umani beni, a me pare i fiumi, cò le superchie e impetuose inondazione, tenere il principato”.

L’auspicio è invece che, grazie all’osservazione e all’esperienza, naturalità dei fiumi e sicurezza dell’uomo trovino sempre più il giusto punto di equilibrio e di integrazione.

Prof. Ing. Vincenzo D’Agostino - Dipartimento TeSAF

Ing. Giuseppe Baldo - CIRF

CORSI D'ACQUA ALPINI: ECOLOGIA E PAESAGGIO

Gianfranco ZOLIN

Architetto Ufficio Tutela paesaggistico ambiente
Servizio urbanistica e tutela del paesaggio
Provincia Autonoma di Trento

SINTESI

L'uomo e l'acqua sono i principali protagonisti della modificazione del territorio nell'ambiente montano.

La loro interrelazione ha reso necessario realizzare una serie quasi infinita di interventi di sistemazione idraulico forestale che, nella provincia di Trento, hanno prodotto importanti impatti sul paesaggio e sull'ambiente.

Primo fra tutti la presenza massiccia e diffusa, in tutto il territorio, di oggetti artificiali quali: dighe, condotte forzate, briglie, argini, soglie, cunette, drenaggi, canali di irrigazione, strade e ponti.

Negli ultimi decenni si è assistito ad un evidente mutamento della sensibilità progettuale, reso possibile da un approfondimento della cultura ambientale, dall'approccio interdisciplinare alle problematiche idrauliche e dal confronto con altre esperienze nel campo delle sistemazioni.

Ciò ha portato alla realizzazione di opere certamente meno impattanti rispetto a quelle tradizionali, anche se altrettanto efficaci sotto il profilo idraulico; sistemazioni che oggi tentano di interpretare le leggi naturali che governano i corsi d'acqua.

GLI INSEDIAMENTI E L'ACQUA

Molti sono i significati che l'acqua ha assunto nell'inconscio umano; universale il legame tra l'acqua, intesa come insostituibile fonte di vita, di creazione, purificazione e il sacro. Altri sono certamente legati al potenziale distruttivo del rischio di alluvione, comune a tutte le civiltà di ogni continente ma, in misura minore vi sono anche quelli, più inconsci e ancestrali legati ai concetti di separazione e protezione.

Tra i primi insediamenti stabili che si svilupparono nella regione alpina, a partire dalla fine del III millennio a.C., alcuni evidenziano un particolare rapporto con l'acqua che culminò negli insediamenti di tipo palafitticolo dell'età del Bronzo (1800 – 1300 a.C. insediamenti di Ledro e di Fiauvé TN). L'importanza di tali villaggi, risiede nel fatto che hanno mantenuto per lungo tempo un legame fortissimo con l'acqua, pur basando loro economia prevalentemente nella coltivazione dei cereali estesa ai terreni circostanti sottratti al bosco.

In questo caso l'acqua del lago oltre ad essere un ambiente rassicurante, perché soggetta solo a variazioni di livello, priva quindi del potenziale distruttivo che caratterizza i torrenti alpini, era anche fonte di sicuro sostentamento per la risorsa ittica disponibile e per la facilità con cui si potevano contrastare gli incendi che frequentemente colpivano le strutture realizzate completamente in legno e paglia.

Le popolazioni retiche insediate nell'arco alpino, nella seconda età del Ferro (500 – I secolo a.C.), hanno evidenziato una profonda consapevolezza dei rischi idrogeologici presenti sul territorio, gli insediamenti sorsero quindi sempre in posizione elevata, in sedi di terrazzo e mai in prossimità dei torrenti.

Fu solo in epoca romana che si aprì la stagione dello sfruttamento ambientale estensivo caratterizzata da un nuovo atteggiamento dell'uomo: egli diventa l'artefice principale della modifica del territorio che colonizza. Numerose ed importanti opere quali: strade, ponti, bonifiche, irrigazioni e naturalmente città, caratterizzano quest'epoca, tuttavia la natura boscosa e montuosa della regione, solcata continuamente da valli, vallecole e corsi d'acqua, impedì che qui fosse attuata l'opera di divisione agraria, ampiamente adottata nella vicina pianura padana.

L'apertura di strade imperiali fece sì che gradatamente venissero occupati e sfruttati i fondovalle grazie anche alle prime opere di bonifica e arginatura realizzate appunto in epoca romana, fenomeno che dovette comportare il progressivo abbandono degli insediamenti collinari di tradizione protostorica. Nei punti di attraversamento dei principali fiumi, sorsero spesso gli abitati maggiori (in Trentino: Riva del Garda, Arco, Trento, Borgo Valsugana, Cles, ecc.).

Nelle valli alpine la tradizione metallurgica nata nella seconda età del Ferro, potenziata dalla colonizzazione romana, trova nei secoli successivi nuovo impulso grazie allo sfruttamento della forza idraulica resa disponibile dalla presenza di numerosissimi corsi d'acqua. Mulini, fucine, segherie, concerie e successivamente anche folli, filatoi e cartiere con le loro rogge in pietra e "canalette" in larice sono una formidabile spinta all'urbanizzazione di aree da sempre considerate vulnerabili per la loro vicinanza ai corsi d'acqua.

La colonizzazione medievale riguarda quasi esclusivamente il fondovalle e le pendici pedemontane, gli insediamenti stabili privilegiano i conoidi dove più facile risulta il connubio tra vari fattori: facili collegamenti stradali, disponibilità di terreni agricoli, favorevole esposizione solare, disponibilità di forza idraulica dai torrenti minori e riparo dalle alluvioni provocate dai corsi d'acqua principali.

Le opere di captazione e di l'adduzione dell'acqua comprese le arginature dei torrenti rientrano a pieno titolo tra le prime sistemazioni idrauliche realizzate in regione.

Queste hanno permesso l'urbanizzazione delle rive principalmente per scopi produttivi e in seguito anche per fini residenziali.

Nelle derivazioni idriche (rogge) e nei corsi d'acqua minori, utilizzati un tempo a scopo produttivo, si può ancora oggi leggere un'importante matrice del paesaggio urbano. Nell'ambito alpino sono molte le valli minori che riportano il toponimo "Valle dei Molini".

I più rilevanti interventi, gravi di conseguenze urbanistiche, realizzati in Trentino avvengono però solo nel corso del XIX secolo e riguardano la massiccia rettifica dei corsi d'acqua principali.

La rettifica dell'Adige realizzata nel territorio trentino nella seconda metà dell'800 fu determinata non solo da ragioni di sicurezza idraulica ma anche per esigenze militari. Il governo imperiale di Vienna aveva infatti individuato il treno come il mezzo più rapido per spostare le proprie truppe e la realizzazione delle ferrovie, in misura minore anche delle strade, non poteva coesistere con l'andamento meandriforme dei corsi d'acqua principali.

Lo sfruttamento del patrimonio forestale, fin dai tempi più remoti è stata una delle poche fonti di sostentamento delle comunità alpine e fin dal '400 in alcune valli si diffuse la fluitazione del legname per scopi commerciali verso la pianura padana.

I forti interessi connessi al commercio del legname finirono con il prevalere sull'economia di sussistenza delle valli arrivando ben presto a causare artificialmente le piene dei fiumi (Sarca e Chiese) oltre che dei torrenti con la realizzazione di veri e propri bacini di deposito e sbarramenti trasversali in tronchi. Quando l'acqua e i tronchi raggiungevano il livello voluto lo sbarramento veniva fatto cadere improvvisamente generando così un'ondata di piena artificiale in grado di movimentare grandi quantità di legname ma capace anche di provocare ingenti danni.

Questi effimeri sbarramenti artificiali, realizzati con tronchi sono le vere prime dighe sorte sul territorio alpino fin dal medioevo.

Le opere idroelettriche, costituite da dighe e condotte forzate, sorte in Trentino nella prima metà del novecento, sembrano assecondare una sorta di *genius loci*, andando a ridisegnare in modo grandioso nonché artificioso le pieghe di una natura che già consente alle acque di raccogliersi.

Nel dopoguerra l'urbanizzazione disordinata, spesso motivata da scopi turistici, ha provocato un notevole consumo di suolo per nuove espansioni residenziali esponendo aree un tempo agricole a situazioni di rischio idrogeologico.

Solo recentemente grazie ad una più attenta cultura ambientale e una maggior consapevolezza della fragilità del territorio, l'elaborazione delle cartografie idrogeologiche e l'adozione quindi di piani regolatori più rigorosi ha permesso di rallentare ed in alcuni casi invertire il processo di espansione garantendo così anche ai corsi d'acqua i necessari spazi vitali.

La storia delle interrelazioni tra uomo e acqua è la storia di una faticosa ricerca di equilibrio dinamico tra l'uomo, le sue attività e i corsi d'acqua che incessantemente solcano le valli alpine.

CONSIDERAZIONI PAESAGGISTICO AMBIENTALI NELLE SISTEMAZIONI IDRAULICHE

Lo scopo principale di chi tutela il paesaggio è quello di migliorare o perlomeno conservare la qualità visuale dell'ambiente che ci circonda. Nel caso di un corso d'acqua, tale obiettivo si può conseguire mantenendo, per quanto possibile, i caratteri di naturalità dell'ambiente complessivo, acquatico e terrestre, con la consapevolezza degli effetti che le modificazioni indotte dalle sistemazioni possono provocare sulle varie componenti ambientali.

Ma, se il modello ideale del corso d'acqua, dal punto di vista paesaggistico, è quello naturale, con tutte le caratteristiche chimiche, fisiche, biologiche, fisiche che gli sono proprie, occorre allora precisare che ogni considerazione d'ordine estetico riguardante l'inserimento delle sistemazioni idrauliche, rientra solo come uno dei molteplici aspetti dell'impatto ambientale.

Infatti ogni intervento di attenuazione o mitigazione degli impatti ambientali, intesi come generalità delle ripercussioni sull'ecosistema, provocati da una sistemazione idraulica, determina generalmente un immediato beneficio nei riguardi anche degli aspetti paesaggistici. Il paesaggio infatti è ciò che noi percepiamo dell'ambiente.

Risulta pertanto opportuno tentare una valutazione complessiva del problema, consapevoli del fatto che i vantaggi che derivano da tale approccio non saranno solo d'ordine estetico.

Il torrente come organismo vivente

Un corso d'acqua, dal punto di vista biologico, può essere considerato un essere vivente, un organismo che può essere sano o ammalato, che assimila e produce biomassa, che trasforma e trasferisce energia, che si adatta e modifica l'ambiente in cui vive, un organismo che per vivere ha bisogno di spazio.

Un modello di grande complessità quindi nel quale le opere di sistemazione idraulica non devono essere considerate oggetti isolati, ma elementi estranei in grado di interagire positivamente e negativamente con l'ambiente fluviale o torrentizio in un complesso sistema di rapporti e di equilibri legati alla dinamica del tempo.

Ogni intervento su di esso genera sempre una serie di impatti a breve e lungo termine sulle comunità biotiche, sulla stabilità ecologica e sugli aspetti estetico paesaggistici.

E' pertanto opportuno operare una prima distinzione tra gli impatti a breve termine (legati alla fase realizzativa) e impatti nel lungo periodo o permanenti (legati alla presenza dell'opere), tuttavia è necessario sottolineare come una corretta valutazione debba riconoscere un maggior peso agli effetti permanenti prodotti dalla sistemazione dato che la fase costruttiva generalmente presuppone una consistente alterazione ambientale; a cui fa seguito un processo di evoluzione naturale che tenterà di ristabilire gli equilibri compromessi e che, in ogni caso, porterà ad certo grado di rinaturalizzazione.

La tipologia delle opere di sistemazione

1.0) Le soglie

Sono costruzioni immerse sul fondo dell'alveo e pertanto risultano nascoste, in presenza d'acqua. Si percepiscono per i piccoli salti presenti nel flusso della corrente.

In un ambiente "naturale" questa presenza pur non generando impatti consistenti, determina comunque un certo disturbo che può essere facilmente eliminato ricorrendo ad alcuni semplici accorgimenti:

- realizzazione dell'opera in massi;
- realizzazione dell'opera in tronchi di legno ancorati al fondo con puntoni d'acciaio;
- disegno asimmetrico e/o andamento spezzato o traslato.

2.0) Le briglie di consolidamento

La sistemazione idraulica più diffusa nell'arco alpino è senza dubbio la briglia di consolidamento, ha lo scopo di stabilizzare l'alveo riducendone le pendenze, modificandone il profilo e di conseguenza anche gli effetti erosivi e quelli legati al trasporto solido.

Gli effetti negativi provocati dalla presenza di briglie sono:

- la riduzione della diversità ambientale;
- l'alterazione spesso sostanziale della copertura vegetale ripariale;
- la discontinuità nel corso d'acqua che impedisce la risalita della fauna acquatica.
- la modifica delle condizioni del trasporto solido.

Un'unica opera genera impatti limitati e localizzati ma gli effetti negativi sono spesso amplificati dalla necessità di realizzarne molte in rapida successione.

Numerosi sono state le misure di mitigazione adottate negli anni più recenti, le più efficienti sotto il profilo ambientale sono:

- sezioni di deflusso della gaveta ampie al fine di ampliare la superficie di corrivazione dell'alveo per favorire i fenomeni di autodepurazione;
- gavete con un profilo idoneo a mantenere una sufficiente lama d'acqua nell'alveo di magra per favorire la migrazione della fauna ittica.

In ambito fluviale si sono inoltre realizzati alcuni interventi di ripristino della continuità del corso d'acqua per consentire la migrazione della fauna acquatica (scale di rimonta) e/o per le pratiche sportive di discesa fluviale (riduzione del salto).

Ma ancora molto deve essere fatto nella sagomatura e nella rifinitura dell'alveo fra le briglie al fine di mantenere la naturale sinuosità del corso d'acqua, l'alternanza di "buche" e "raschi", soprattutto immediatamente a valle della briglia, la presenza di grossi massi in alveo, il ripristino di una flora ripariale compatibile.

In sostanza tutti gli accorgimenti, realizzabili a lavori ultimati, che tendono a contrastare la semplificazione e l'uniformità delle condizioni ambientali.

In realtà nelle sistemazioni dei torrenti montani, realizzate con sensibilità e attenzione, gli impatti che derivano dalla costruzione delle briglie di consolidamento sono soprattutto estetici (permanenti) oltre a quelli legati alla fase realizzativa (temporanei). Tralasciando in questa trattazione gli ultimi, che rivestono comunque una notevole importanza soprattutto per la fauna acquatica e anfibia, si può affermare, dal punto di vista paesaggistico, dopo alcuni anni di verifiche in ambiente alpino, che esiste una sola valida alternativa alle normali briglie di calcestruzzo: le briglie in massi.

3.0) Le briglie in massi

Si tratta di costruzioni realizzate sovrapponendo alcuni ordini di massi ciclopici, opportunamente forati, nei quali vengono fatte passare funi d'acciaio, immerse a loro volta nel getto di calcestruzzo versato nello scavo a monte.

L'utilizzo massiccio di materiale naturale, le dimensioni dei massi utilizzati, la loro irregolarità e l'inclinazione verso monte data alla struttura danno alla costruzione un aspetto compatibile con i caratteri naturali del contesto.

A questa tecnologia si è recentemente affiancato lo studio della morfologia torrentizia che ha indicato la necessità di leggere i fenomeni naturali per reinterpretarli nelle opere idrauliche. Questi studi si sono concretizzati nella realizzazione di sistemazioni a "step and pool" nelle quali le briglie in massi sono l'elemento costruttivo principale.

Per contro occorre accennare al problema della reperibilità dei massi in quanto è sempre necessario evitare il depauperamento dei torrenti, al fine di garantire stabilità e mantenere un buon grado di differenziazione morfologica nell'alveo e sulle sponde. Anche il costo delle briglie in massi è uno dei fattori che ne limita l'uso.

4.0) Le briglie filtranti

Una briglia filtrante può determinare impatti consistenti, ma questi si possono considerare puntuali. Tuttavia l'opera non può essere considerata elemento autonomo ma come uno degli elementi di un sistema costituito da:

- briglia;
- avanbriglia (eventuale);
- bacino di accumulo;
- strada di accesso al bacino.

Ognuno di questi elementi concorre a determinare impatti ambientali diversi e caratteristici è necessario quindi analizzare l'intero sistema.

L'intervento progettuale deve mirare alla massima integrazione con il delicato ambiente circostante, utilizzando tutte le tecniche e gli artifici disponibili per la mitigazione e l'attenuazione degli impatti permanenti e cioè:

- evitare esasperate geometrizzazioni dell'alveo;
- disegnare opere asimmetriche;
- prevedere il massimo interrimento possibile dell'opera;
- realizzare opere arginali accessorie in scogliera;
- utilizzare per le parti in vista, rivestimenti irregolari costituiti da elementi di grandi dimensioni con finitura molto grossolana;
- contenere l'altezza ove e per quanto possibile, valutando anche la possibilità di costruire più opere di dimensioni ridotte, ma globalmente con un impatto minore;
- mantenere, la continuità dell'alveo fra la parte dell'opera a monte (bacino di accumulo) e a valle dell'opera (eventuale avanbriglia);
- garantire la concentrazione della portata di magra e la creazione di piani di scorrimento dell'acqua scabrosi (questi accorgimenti diminuiscono od annullano l'impatto sulla fauna acquatica);
- prevedere sempre il ripristino della vegetazione ripariale di mascheramento a monte, a valle e sull'opera stessa.

4.1) Il sistema di accessibilità al cantiere e all'opera

La realizzazione di una briglia selettiva presuppone la presenza di una strada o di una pista di accesso percorribile da mezzi pesanti (betoniere, pale meccaniche, ecc.) sia durante la fase realizzativa, sia soprattutto durante le fasi successive, quando cioè si rende necessario sgomberare periodicamente il bacino a monte dell'opera.

Ogni intervento di attenuazione degli impatti non potrà pertanto avvalersi di tecniche costruttive alternative (impianto di teleferiche o trasferimento del calcestruzzo mediante pompe) alla costruzione di una nuova strada, anzi spesso è proprio la costruzione di un nuovo tracciato viario a determinare gli impatti più elevati.

E' per questo che, nella ricerca del luogo di costruzione dell'opera, la scelta di un sito già servito da viabilità è spesso da privilegiare.

4.2) Localizzazione dell'opera

Nel territorio alpino le briglie selettive vengono generalmente posizionate a monte delle zone urbanizzate in gole rocciose o forre, altrove in prossimità di allargamenti dell'alveo. Il primo caso è generalmente considerato come una situazione ideale in quanto consente:

- di ridurre i volumi della costruzione, infatti questa può risultare ammorsata nella roccia;
- di ridurre i danni alla copertura vegetale del suolo (generalmente scarsa o inesistente nelle forre rocciose);
- di contenere le alterazioni alla morfologia del suolo;
- di attenuare la visibilità dell'opera in quanto i coni visuali sono assai ristretti e difficilmente accessibili.

Per contro questa scelta localizzativa si scontra spesso con la necessità di garantire a monte dell'opera un bacino piuttosto ampio dove trattenere il trasporto solido e la necessità di rendere agibile il deposito a monte ai mezzi meccanici.

Nel caso di localizzazioni in valli più aperte le problematiche appaiono generalmente superabili con maggiore facilità ma per contro aumentano le problematiche paesaggistiche dato che

la manomissione del suolo e della copertura vegetale è sempre più consistente inoltre l'interramento delle spalle laterali, dei contrafforti di sostegno a monte e a valle richiede notevoli movimenti terra e consistenti impianti arborei e arbustivi di mascheramento; in questo caso la riduzione della visibilità dell'opera non potrà mai essere paragonabile a quella ottenibile nel caso precedente.

Queste considerazioni debbono far riflettere sull'importanza che riveste il riconoscimento della vocazione dei luoghi nell'accogliere una struttura intimamente legata ai fenomeni dinamici naturali.

5.0) Le riqualificazioni ambientali

Alla cultura della salvaguardia idrogeologica, che considerava i corsi d'acqua in termini esclusivamente quantitativi e geometrici (ampiezza del bacino, sezione di deflusso, portata, ecc.), dalla fine degli anni ottanta, si è affiancata una sensibilità ambientale che ha portato ad una revisione critica di alcuni metodi di sistemazione, e si è rapidamente sviluppata fino a diventare ben presto parte integrante di una cultura interdisciplinare più vasta che vede nell'assetto del corso d'acqua naturale, il modello di alcune delle più recenti sistemazioni idrauliche.

Allo stato dell'arte, i migliori esempi di cultura ambientale, applicata alle moderne tecniche di sistemazione idraulica dei bacini montani, si possono trovare solo in Europa e più precisamente nell'arco alpino dove esistono molti interventi considerati come punti di riferimento per le sistemazioni idrauliche:

- applicazioni derivate dallo studio della morfologia torrentizia
- impiego di briglie in massi,
- studio complessivo dei bacini minori (piani di bacino),
- modelli di simulazione del trasporto solido.

Gli interventi di riqualificazione ambientale hanno spesso in comune alcuni criteri di progettazione:

- la diversificazione degli ambienti presenti lungo e in prossimità del corso d'acqua;
- l'eliminazione o l'attenuazione delle fratture e delle discontinuità (longitudinali e trasversali) esistenti tra il territorio e i rii, i torrenti, le rogge e i fiumi che lo attraversano;
- l'aumento della capacità autodepurativa degli alvei favorendo l'insediamento di macroinvertebrati bentonici;
- il mantenimento e la valorizzazione delle fasce di rispetto delle acque superficiali, per la conservazione delle fasce ripariali;
- il recupero delle situazioni di degrado provocate da precedenti sistemazioni;
- l'integrazione tra le varie attività umane, le esigenze di protezione e la funzionalità dei corsi d'acqua.

5.1) Morfologia, uso e copertura del suolo

Nella realizzazione di una qualsiasi sistemazione idraulica la prima operazione consiste nel taglio delle piante esistenti. Questo intervento non deve essere considerato come un impatto temporaneo, infatti la ricostruzione della copertura arborea originaria richiede tempi stimabili intorno ai 50 anni e pertanto può essere considerato impatto a lungo termine.

L'approntamento del cantiere, la realizzazione di una pista di accesso per i mezzi meccanici e la movimentazione del terreno per gli interri provocano una totale alterazione della morfologia e della copertura dell'area interessata dalle opere sistematorie.

Gli interventi di mitigazione degli impatti dovranno provvedere, al massimo interrimento possibile della struttura, al raccordo dei nuovi movimenti terra con la morfologia arginale originaria evitando la realizzazione di forme eccessivamente artificiali.

Si dovrà prevedere inoltre il massimo rinverdimento possibile dell'area utilizzando specie arboree e arbustive autoctone tipiche degli ambienti ripariali locali.

6.0) Qualità dei materiali

In un recente passato, il rivestimento lapideo delle parti in vista delle briglie e degli argini sembrava sufficiente a garantire un corretto inserimento paesaggistico dell'opera tuttavia le dimensioni delle briglie, l'aspetto formale molto articolato, la difficoltà nel reperire i materiali idonei, i problemi legati alla salute delle maestranze addette alla lavorazione, i tempi di realizzazione e i costi, sono tali da far ritenere proibitivo il loro uso indiscriminato. In aree prossime a insediamenti storici e nei pressi delle strade principali, i paramenti lapidei vanno ancora impiegati, mentre in altre situazioni risulta più diffuso l'uso del cemento armato faccia a vista, d'altro canto la necessità di ridurre gli impatti ambientali richiede che si provveda a contenere al massimo le parti strutturali in vista privilegiando l'integrazione e la dissimulazione dell'opera nell'ambiente naturale attraverso l'impiego sistematico di massi, terrapieni, "coperture diffuse" e rinverdimenti di ripristino.

In riferimento agli impatti temporanei si deve sottolineare la necessità di evitare o quantomeno ridurre l'uso di prodotti inquinanti usati comunemente per fluidificare, accelerare o ritardare i tempi di presa, disarmare o colorare il calcestruzzo.

7) Misure di attenuazione degli impatti sulla fauna

Ai fini della riduzione degli impatti temporanei sulla fauna acquatica generalmente si raccomanda l'esecuzione dei lavori che determinano un consistente intorbidamento del corso d'acqua durante il periodo di minor disturbo per i cicli biologici delle specie presenti. In ogni caso è sempre opportuno deviare temporaneamente l'acqua dal cantiere a mezzo di canalette in vetroresina o acciaio per evitare di intorbidare l'intera asta fluviale.

In aree particolarmente pregiate sotto il profilo faunistico si dovrebbe procedere alla cattura, mediante storditori, dei pesci presenti in un rapporto di collaborazione tra sistematori, associazioni di pescatori e addetti alla protezione della fauna.

Per quanto attiene alla riduzione degli impatti permanenti occorre rilevare la necessità di mantenere nella parte inferiore dei filtri o delle gavete un alveo di magra sufficiente a consentire il transito, nei due sensi, della fauna ittica presente nell'alveo.

Dato che nella regione alpina la fauna ittica dei corsi d'acqua è costituita in prevalenza da salmonidi che risalgono la corrente si raccomanda sempre di ridurre l'altezza dei salti nel flusso d'acqua principale o quantomeno prevedere delle pozze a valle degli stessi.

La costruzione di piazze di deposito a monte della briglia può determinare la creazione volontaria o casuale di piccoli invasi.

La mancanza di un'idonea copertura vegetale, di tipo arbustivo, che permetta un sufficiente ombreggiamento e il rallentamento della corrente all'interno del bacino, possono determinare un eccessivo riscaldamento dell'acqua con la conseguente scomparsa delle specie ittiche più esigenti.

8.0) Piazze di deposito.

Le piazze di deposito sono sistemazioni idrauliche realizzate modificando la morfologia arginale e il profilo longitudinale del corso d'acqua al fine di ridurre la velocità della corrente e consentire quindi un rapido deposito del trasporto solido.

La localizzazione dell'opera è generalmente determinata da naturali preesistenze (cambi di pendenza e slarghi presenti nell'alveo), in altri casi vengono create artificialmente mediante uno sbarramento del corso d'acqua (briglie di trattenuta o filtranti).

Anche quando non sono previste sistemazioni arginali accessorie o complementari, ma solo movimenti terra, l'artificialità dell'opera è evidenziata:

- dalla presenza di strade di accesso per lo sgombero dei depositi;
- dalla scomparsa della flora ripariale su tutta la superficie di deposito.

In estrema sintesi l'aspetto tipico di quest'opera è quello di una vasta superficie coperta da ghiaia, massi e detriti, dove l'acqua scorre liberamente, un paesaggio di rovina quindi piuttosto triste e deprimente.

Il continuo deposito detritico, più consistente a seguito degli eventi di piena, e l'attività estrattiva praticata per lo sgombero dei depositi, determinano un continuo azzeramento dell'evoluzione naturale dell'area, la quale può restare a livello "0" per tempi indefiniti.

Diverso è l'aspetto delle "piazze di deposito" naturali, anch'esse presenti nel ricco repertorio

ambientale alpino ma generalmente più ridotte nelle dimensioni, rispetto a quelle artificiali, e comunque ricoperte almeno parzialmente da vegetazione a vari stadi evolutivi.

Casi singolari ma non per questo rari sono quelli dove l'area di deposito è stata realizzata in prossimità di aree urbane diventando in breve meta dell'attività ricreativa e sportiva degli abitanti e dei turisti. In questi casi l'ambito fluviale è diventato spontaneamente un'importante estensione delle aree a parco pubblico.

In alcuni casi dove per lunghi periodi, non si sono verificati grossi eventi di piena o laddove il trasporto solido è caratterizzato da inerti fini (limi, argille, sabbie e ghiaie) l'evoluzione naturale ha preso il sopravvento trasformando le piazze di deposito in ambienti, caratterizzati da specchi lacustri, ricchi di specie vegetali e animali, quindi veri e propri biotopi.

8.1) Gli interventi di mitigazione degli impatti.

Le piazze di deposito e le casse di espansione naturali dovrebbero essere sempre considerate parti funzionali all'equilibrio e alla stabilità del corso d'acqua, non devono pertanto essere alienate o "sistemate" con canalizzazioni artificiali.

Quando si rende necessaria una nuova realizzazione questa dovrebbe essere localizzata laddove emergono con evidenza le attitudini vocazionali dell'area.

E' necessario concentrare l'attività estrattiva in periodi sufficientemente brevi al fine di consentire il ripristino o l'evoluzione naturale dell'area.

E' necessario programmare interventi di manutenzione dell'area per evitare la colonizzazione di specie arboree d'alto fusto non compatibili, favorendo nel contempo la ricrescita delle specie erbacee e arbustive ripariali (salici e ontani).

Per le superfici eccessivamente estese l'impatto paesaggistico può essere contenuto attraverso l'impianto di schermi vegetali a latifoglia lungo il perimetro della piazza e su appositi rilevati ricavati all'interno dell'area, con andamento parallelo alla corrente.

La soluzione più economica è spesso anche la più efficace: movimentare i depositi per realizzare ampi invasi lacustri che coprano, almeno parzialmente la piazza.

Quando la sistemazione riguarda aree prossime ai centri urbani è spesso conveniente prevedere e favorire un utilizzo ricreativo della superficie di deposito mediante una sistemazione a prato di parte dell'area. Ognuna di queste soluzioni però non dovrà essere considerata definitiva a causa del precario assetto che caratterizza la piazza soggetta spesso alla dinamica dei fenomeni alluvionali.

9) Le arginature

Troppo spesso i corsi d'acqua che attraversano le zone urbanizzate e spesso anche le aree agricole hanno subito brutali regimazioni costituite in prevalenza da arginature.

Muri più o meno o verticali che hanno segregato fiumi e i torrenti in ambiti angusti rendendoli più pericolosi, perché privi del loro spazio vitale e tristi perché ridotti a canali artificiali privi della necessaria naturalità.

Correre ai ripari in queste situazioni è impresa difficile ma non impossibile.

Spesso è ancora possibile meandrire il corso d'acqua, svasarlo per interrare parzialmente i muri d'argine, ricostituire una copertura vegetale lungo le sponde.

Nelle ricostruzioni di canali esistenti invece si può ricorrere all'eliminazione del fondo per consentire l'insediamento della fauna bentonica.

Nelle nuove sistemazioni il discorso è assai diverso e le canalizzazioni sono ormai utilizzate in ambiti urbani già compromessi. Ogni progettista oggi possiede un ampio repertorio di soluzioni che gli consentono di ridurre al minimo gli impatti ambientali garantendo comunque la sicurezza idraulica. In ambiente alpino caratterizzato quindi da forti correnti spesso associate a fenomeni di trasporto solido questo repertorio si assottiglia molto e le sistemazioni arginali più diffuse sono oggi le "scogliere" e le "coperture diffuse". In entrambi i casi la sistemazione prevede l'impiego di materiali naturali come massi e talee di salice e profili arginali dolci con scarpate che non superano mai i 45°.

BIBLIOGRAFIA

- Dellagiacomina F., Florineth F., G.F. Zolin (1991): Opere di sistemazione dei corsi d'acqua, quaderni della V.I.A. Provincia Autonoma di Trento.
- Zolin G.F. (1995) Impatto ambientale delle Briglie filtranti. In *L'Italia Forestale e Montana* n.3 /1995 Accademia di scienze forestali Editore.
- A.A.V.V. "Sulle sponde del Chiese" Consorzio dei Comuni del Bim del Chiese editore - Condino1990.

I PROCESSI DI FORMAZIONE DEL RETICOLO IDROGRAFICO

Giancarlo DALLA FONTANA

Università di Padova – Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali

INTRODUZIONE

Il reticolo idrografico è costituito dall'insieme dei corsi d'acqua che solcano in superficie il bacino idrografico convergendo alla sezione di chiusura dello stesso. Esso manifesta invariabilmente una struttura ad albero la cui ramificazione riflette la natura dei processi dominanti di natura climatica, idrologica, geologica, morfologica, edafica che controllano l'evoluzione del territorio.

In assenza di condizionamenti passivi da parte delle strutture geologiche (Bartolini, 2004) il reticolo tende ad organizzarsi topologicamente secondo criteri di minima dissipazione energetica (Rinaldo et. al 1993) dando luogo alle classiche forme dendritiche. Il condizionamento geologico-strutturale non è un elemento trascurabile, basti pensare al caso, affatto raro, di corsi d'acqua impostati lungo linee di faglia che frequentemente mettono a contatto litotipi di diversa erodibilità. Il "pattern" di tipo detritico è tuttavia riconoscibile nella maggior parte dei casi.

L'intensità della ramificazione del reticolo è misurata dalla densità del drenaggio che esprime la lunghezza del reticolo per unità di area del bacino. Si tratta di un classico parametro della geomorfologia quantitativa (Horton, 1945) di grande potere diagnostico, ma che sfortunatamente soffre della dipendenza dalla scala di dettaglio del supporto cartografico o fotografico utilizzato per l'analisi. La densità di drenaggio dipende dalla permeabilità dei litotipi, dallo stato di disaggregazione del regolite, dalla morfologia ed in primis dalla pendenza dei versanti, dal regime delle piogge, dalla presenza della vegetazione e dall'associato sviluppo in potenza dei suoli. La densità di drenaggio condiziona la risposta idrologica dei bacini idrografici: reticoli densamente ramificati favoriscono il trasferimento del deflusso per via superficiale e canalizzata e quindi con tempi di risposta inferiori a quelli che caratterizzano bacini nei quali prevale la circolazione sotterranea.

Gli schemi interpretativi della generazione dei deflussi di piena riconoscono nel reticolo idrografico un'entità dinamica in grado di espandersi e di contrarsi lungo le linee di impluvio anche nell'arco temporale dell'evento di piena. Il reticolo idrografico costituisce quindi la delicata interconnessione tra le diverse parti del sistema bacino; attraverso di esso si propagano oltre ai deflussi liquidi anche quelli solidi e gli inquinanti.

I motivi di interesse per approfondire la conoscenza del reticolo idrografico sono quindi molteplici e sono alla base del costante sforzo dei ricercatori in questo settore sia in campo teorico che in campo sperimentale. Un particolare impulso alla ricerca è derivato dall'opportunità di indagare le caratteristiche del reticolo idrografico attraverso la sua rappresentazione basata sull'elaborazione dei modelli digitali del terreno. Questi ultimi sono disponibili in qualità e dettaglio crescenti al passo con l'evolversi della tecnologia del rilievo e degli strumenti di calcolo.

I PROCESSI DI INIZIO DEL DEFLUSSO CANALIZZATO

La definizione di corso d'acqua con riferimento alla percezione comune di torrente e fiume non pone particolari problemi; gli elementi caratteristici sono la presenza di acqua fluente con velocità proporzionale al gradiente energetico in direzione del moto e una geometria trasversale confinata che definisce una sezione liquida. Il concetto di corso d'acqua, sempre con riferimento alla percezione comune, vacilla quando, pur in presenza degli elementi geometrici e morfologici caratteristici, manca l'acqua ovvero questa è presente solo in determinati momenti del ciclo idrologico. Questa eventualità è generalmente più frequente alla testata dei bacini idrografici in corrispondenza delle ramificazioni più periferiche del reticolo. Questa porzione della rete idrografica viene generalmente indicata con il termine di "rete effimera" ad indicare appunto la presenza intermittente di deflussi liquidi. È da notare come l'estensione planimetrica della rete effimera raggiunga e in qualche caso superi l'estensione della "rete permanente". Nel bacino dolomitico dell'Ansiei (200 km²) alla sezione di chiusura di Ponte Malon la rete effimera rappresentata da linea azzurra discontinua sulle tavolette IGM 1:25000 presenta uno sviluppo di 376 km mentre quella della rete permanente ammonta a 381 km (Cazorzi et al. 1987).

L'identificazione dell'estensione del reticolo idrografico su base cartografica, a prescindere

dalle ovvie considerazioni legate alla scala di dettaglio, presenta quindi maggiori elementi di incertezza nelle zone di testata e ciò riflette la complessità dei processi che controllano l'inizio del deflusso canalizzato. Un esempio della complessità dei processi in gioco trova riscontro nella figura 1 che mostra al centro un collettore piuttosto evidente, percorso nella parte iniziale da un'apprezzabile portata liquida, la falda detritica posta più in basso infiltra totalmente la portata e anche l'impluvio risulta solo debolmente accennato, più in basso in concomitanza con qualche affioramento roccioso il corso d'acqua tende a ricomparire per poi sparire definitivamente. Il riconoscimento di un inizio di collettore in tale situazione è perlomeno controverso. L'esempio di riferimento si riferisce al versante destro del torrente Cordon nell'omonimo bacino sperimentale oggetto da anni di indagini idrologiche e geomorfologiche. (Fattorelli et al., 1987). In tale bacino è stato anche condotto un rilievo sui punti di inizio dei collettori identificati su ortofoto e verificati poi in campo. La collocazione dei "channel heads" evidenzia alcune significative discrepanze tra realtà e le "blue lines" della base cartografica. L'indagine ha consentito di evidenziare l'ampia variabilità delle situazioni e il ruolo tutto specifico che assumono i canali in roccia, spesso impostati su linee di frattura e dove l'inizio del canale non è interpretabile alla luce delle considerazioni sviluppate con riferimento ai versanti coperti di suolo o di materiale disgregato.



Figura 1 – Esempio di "inizio di canale" e successiva scomparsa in corrispondenza della falda detritica

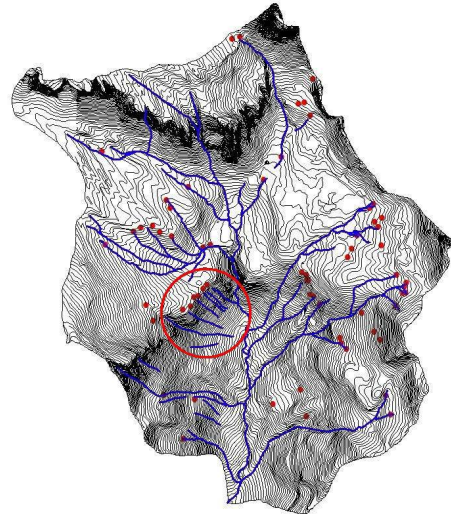


Figura 2 – Blue lines del bacino del Cordon e punti identificati come "channel heads". L'immagine in figura 1 si riferisce al versante evidenziato nel cerchio.

Lo studio dei processi che presiedono alla formazione dei "channel heads", il loro riconoscimento in campo, la loro riproducibilità su modelli digitali del terreno, hanno ricevuto l'attenzione di numerosi studiosi dato il significato che la transizione versante-canale assume nel modellamento geomorfologico dei bacini montani (Montgomery e Dietrich, 1994, Toker e Bras, 1998). La transizione versante, rete colluviale, rete alluvionale è stata indagata da D'Agostino e Vianello (2005) in un piccolo bacino dolomitico con riferimento alla variabilità della portata formativa (*bankfull*) e delle caratteristiche geometriche e morfologiche lungo la rete idrografica.

L'inizio di un collettore è generalmente interpretato come un fenomeno di "soglia" che vede il verificarsi di una concentrazione di deflusso tale da dare origine ad una forma di incisione nella quale siano trasportati tra due sponde riconoscibili deflussi solidi e liquidi. (Dietrich e Dunne 1993)

La concentrazione dei deflussi può avvenire per aggregazione dei rigagnoli superficiali fino a quando la forza erosiva della corrente non è in grado di incidere stabilmente il canale oppure per via sottosuperficiale provocando per saturazione il collasso di una porzione di versante,

l'emersione del deflusso sottosuperficiale e quindi l'inizio del canale. Non mancano ovviamente varianti e forme intermedie.

Uno specifico interesse nell'identificazione dei "channel heads" è riconducibile alle esigenze legate all'estrazione della rete idrografica sintetica a partire dal modello digitale delle quote. (Montgomery and Dietrich, 1988, 1989; Tarboton et al., 1991; Montgomery and Fofoula-Georgiou, 1993; Prosser and Abernethy, 1996; Gandolfi e Bischetti, 1997, Borga e Da Ros, 1997).

Tale operazione ha assunto specifica rilevanza in relazione ad applicazioni modellistiche di varia natura basate sulla descrizione topografica del bacino; essa è facilmente accessibile attraverso prodotti software GIS di natura commerciale, ma al di là dell'aspetto meccanicistico con il quale può essere eseguita, si tratta di un'operazione con implicazioni concettualmente rilevanti e che mantiene elementi di incertezza legati in particolare alla difficoltà di individuare criteri oggettivi e generalizzabili per identificare i punti di inizio del reticolo idrografico.

IDENTIFICAZIONE DEL RETICOLO SUL DEM

Il primo passo per poter conseguire l'estrazione del reticolo idrografico dal modello digitale delle quote (DEM) prevede l'individuazione delle direzioni del deflusso secondo percorsi indirizzati dal gradiente topografico. Lungo le direzioni di deflusso viene aggregata l'area drenata in valore crescente tra due estremi: un valore minimo, pari all'area dell'elemento discreto del raster, per le celle appartenenti allo spartiacque e un valore massimo pari all'area del bacino per la cella posta alla sezione di chiusura. L'identificazione di un'area di soglia consente di filtrare il grid dell'area drenata discriminando le celle con valori inferiori alla soglia (celle versante) da quelle con valori superiori (celle reticolo). Rimane così individuato un reticolo idrografico cosiddetto sintetico che riproduce in forma più o meno consistente l'andamento delle linee di impluvio naturali.

Per l'individuazione della direzione da assegnare al deflusso in base al gradiente topografico sono stati proposti numerosi algoritmi, alcuni dei quali fanno riferimento ad una rappresentazione del terreno basata su elementi discreti diversi dalla consueta forma di grid a maglie quadrate, anche rimanendo nell'ambito degli algoritmi sviluppati per il trattamento delle matrici altimetriche, le alternative proposte possono condurre a risultati molto diversi. Le procedure più note fanno riferimento al classico metodo "single flow" (D8), al metodo Dinfinito (D_{∞}) (Tarboton, 1997) e al metodo noto come "multiple flow" (MF) (Quinn et al., 1991). I tre algoritmi, i cui dettagli sono reperibili facilmente anche nella manualistica tecnica dei prodotti software (Cazorzi, 2002), si caratterizzano per rappresentare in modo diverso la dispersione delle direzioni di deflusso. L'impatto dell'uso dei differenti algoritmi sul calcolo dell'area drenata è significativo e diviene rilevante ai fini pratici quando l'attenzione si concentra sui processi di versante. Nelle figure 3a e 3b sono proposti per il bacino del Rio Cordon i diagrammi di dispersione tra l'area drenata D8 e l'area drenata D_{∞} (figura 3a) e tra D8 e MF (figura 3b).

La dispersione dei valori è più accentuata per il confronto D8-MF, nel confronto D8- D_{∞} si nota un maggiore addensamento dei punti lungo la bisettrice nella regione del grafico che rappresenta le aree drenate superiori a 5 ha. La dispersione è ovviamente massima per aree drenate modeste e diminuisce rapidamente in corrispondenza di aree drenate pari a 0.5 ha. Va considerato nell'analizzare i grafici che la sovrapposizione dei punti caratterizzati dalla stessa area drenata non è evidenziata, pertanto l'effetto grafico porge una dispersione amplificata.

La scelta di un'area di soglia identifica univocamente sulla *grid* dell'area drenata un reticolo idrografico, l'operazione viene in genere condotta con riferimento all'area drenata calcolata con il metodo "single flow", ma l'alternativa di utilizzare un'area drenata aggregata in modo diverso è frequentemente utilizzata. In tal caso si può ricorrere alle direzioni di deflusso D8 per identificare il reticolo a partire dai punti di inizio della rete individuati sulla base del superamento di una soglia di area drenata calcolata con un algoritmo dispersivo (McGlynn e Seibert, 2003). La scelta dell'area di soglia rimane comunque una scelta critica per la quale non possono essere forniti indirizzi univoci, il criterio, per molti versi soggettivo, di cercare di adeguare la rete sintetica al *pattern* delle *blue lines* riportate nella cartografia può comunque costituire un valido punto di partenza. Tarboton (1991) fornisce criteri più oggettivi di scelta basati sul tentativo di riprodurre un

reticolo sintetico che rispetti le proprietà topologiche di quello naturale, tuttavia anche queste indicazioni non sempre conducono a risultati risolutivi.

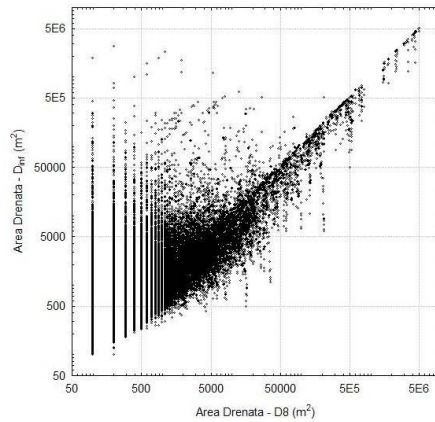


Fig. 3a – Bacino del Cordon, raster 10x10m. Comparazione area drenata D8 con area drenata D_∞

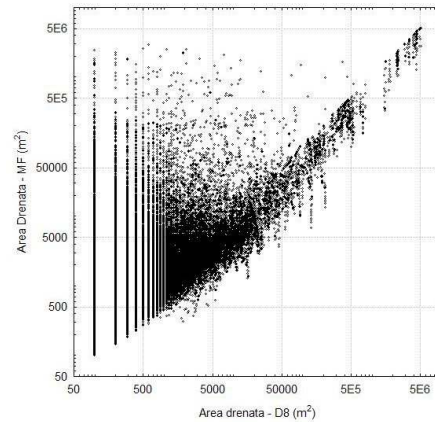


Fig. 3b – Bacino del Cordon, raster 10x10m. Comparazione area drenata D8 con area drenata MF

Valori di area di soglia compresi tra 1 e 4 ha sono comunemente utilizzati per l'estrazione del reticolo, ma anche valori inferiori trovano riscontro in letteratura. Nella già citata indagine sui punti di inizio di alcuni collettori del Rio Cordon è stata riscontrata un'ampia variabilità con valori medi di area drenata D8 di poco inferiori ai 2 ha. La rete idrografica estratta dal DEM 10x10 m del bacino del Rio Cordon con area di soglia pari a 1 ha è riportata in figura 4. Nella figura 5 è riportato l'andamento delle *blue lines* della CTR 1:10000 della Regione Veneto. Sono evidenziate alcune incongruenze che, almeno in parte, sono risolvibili modificando le direzioni di deflusso sulla base della presenza delle *blue lines*. Ciò è conseguibile abbassando di un certo valore la quota delle celle contenenti un tronco di rete (*blue line*), in tal modo si aumenta la probabilità che la direzione di deflusso si orienti verso la cella con quota modificata, la modifica ha ovviamente effetti anche sul raster dell'area drenata (Cazorzi, 2002). Il risultato dell'applicazione del metodo D8 condizionato dalle *blue lines* è mostrato in figura 6 che mostra alcune delle incongruenze con il reticolo *blue lines* siano state risolte. Gli esiti in termini di alterazione della grid di area drenata non sono facilmente interpretabili. La figura 7 propone il confronto tra l'area drenata D8 e quella, sempre ricavata con l'algoritmo D8, ma derivata da una grid dei percorsi condizionata dalle *blue lines*. Le differenze riguardano il 12% dei pixel del raster.

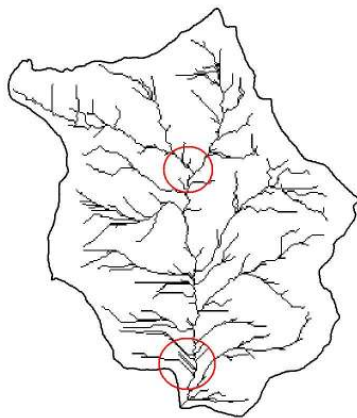


Figura 4 – Reticolo sintetico estratto con area di soglia pari a 1ha

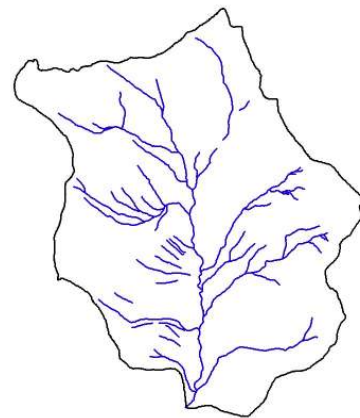


Figura 5 – Blue lines bacino del Rio Cordon. (CTR Regione Veneto)

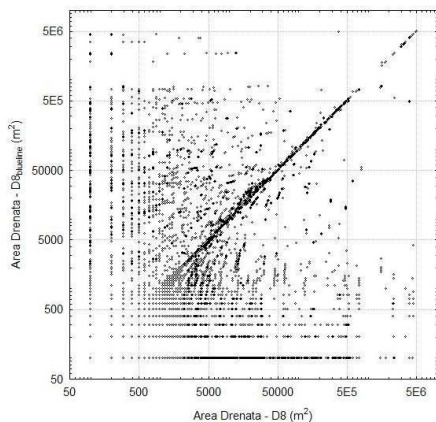


Figura 6 – Reticolo sintetico estratto con percorsi condizionati dalla presenza delle blue lines

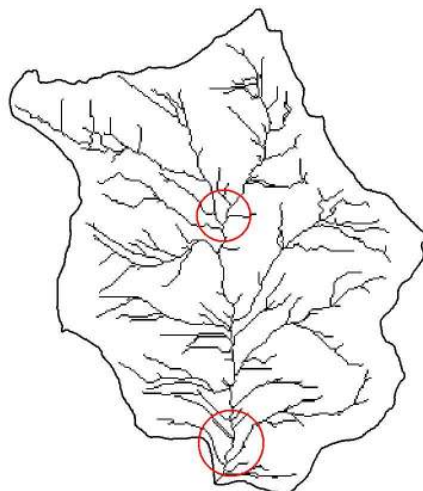


Figura 7 – Confronto tra i due grid di area drenata da cui sono stati estratti i reticoli in figura 4 e 6. Le modifiche indotte riguardano circa il 12 % delle celle.

Un criterio alternativo di identificazione dei punti di inizio della rete idrografica è quello che fa riferimento ad una soglia basata non sulla sola area drenata ma sulla combinazione tra area drenata e pendenza locale (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993; Ijjasz-Vasquez e Bras, 1995; Desmet et al., 1999).

L'aggregazione dell'area contributiva lungo le direzioni di drenaggio fornisce un'indicazione della potenziale concentrazione dei deflussi e può quindi essere utilizzata come un surrogato della portata, mentre la pendenza locale, che rappresenta il gradiente energetico, influenza la potenzialità erosiva del flusso. (Moglen e Bras, 1995, Prosser e Abernethy, 1996). Montgomery Dietrich (1994) hanno proposto di discriminare l'appartenenza al reticolo in base al superamento di un valore soglia C in base al seguente criterio : $AS^\alpha \geq C$ con A area contributiva, S pendenza locale, per α è proposto un valore pari a 2.

Per il bacino del Cordon è stata estratta la rete idrografica per valori del prodotto della radice quadrata dell'area drenata per la pendenza locale pari a 65 m (Dalla Fontana e Marchi, 2003). Il risultato è mostrato in figura 8.

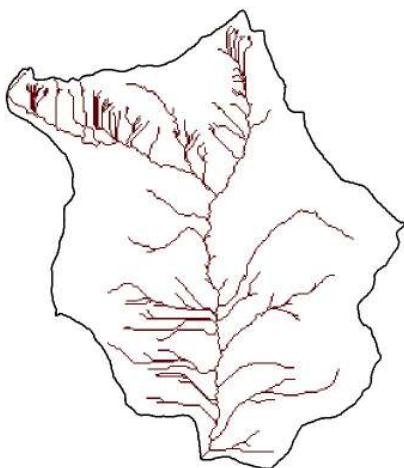


Figura 8 – Rete idrografica estratta con valori di soglia $A^{0.5}S$ pari a 65 m

due criteri viene proposto nelle figure 9 e 10 il diagramma dei valori di pendenza locale e area drenata $D8$ per le 50773 celle del bacino del Cordon.

Il reticolo che si ottiene in base a questo criterio è ovviamente discontinuo poiché non tutti i punti collocati sul reticolo a valle dei punti sorgente soddisfano necessariamente al superamento del valore soglia, la rete può comunque essere facilmente connessa lungo le direzioni di deflusso individuate in base al criterio $D8$. La rete che risulta è significativamente diversa da quella ottenuta con il criterio di soglia basata sulla sola area drenata. In particolare si nota una rarefazione del reticolo in corrispondenza dei pianori della parte mediana del bacino e un suo infittimento con il caratteristico aspetto piumato in corrispondenza delle aree ad elevata pendenza poste nella porzione superiore del bacino.

Per comprendere meglio l'esito alquanto diverso dell'identificazione della rete in base ai

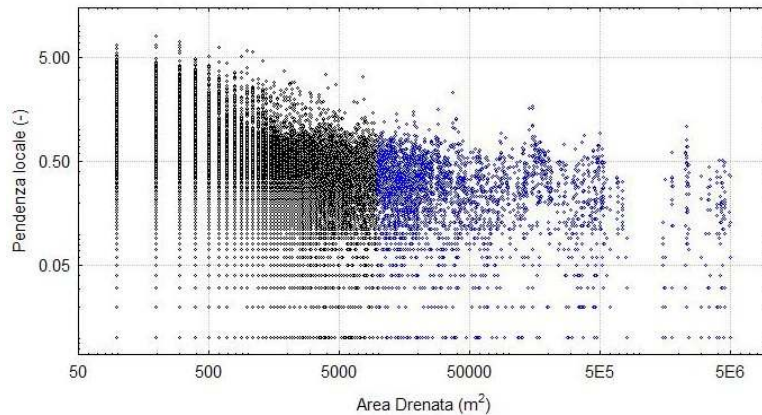


Figura 9 - Diagramma pendenza locale – area drenata. In nero i punti versante, in blu quelli appartenenti alla rete in base alla soglia di 1 ha.

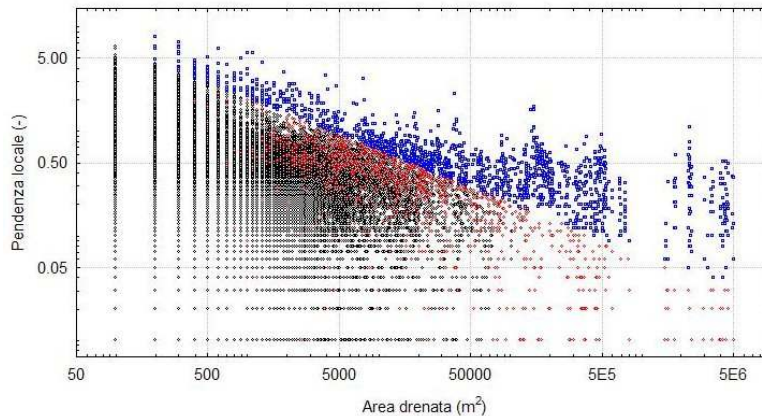


Figura 10 - Diagramma pendenza locale- area drenata. In nero i punti versante, in blu i punti della rete con valore $A0.5S$ superiore a 65m In rosso i punti appartenenti alla rete deficitari rispetto al valore di soglia

In figura 9 sono evidenziati sulla destra del grafico i punti appartenenti al reticolo in base al criterio di superamento della soglia di area drenata fissata in questo caso a 10000 m^2 , la pendenza media dei punti versante è pari a 0.46, quella dei punti del reticolo è pari a 0.29.

In figura 10 la suddivisione tra punti appartenenti al reticolo e punti appartenenti al versante è più complessa: sulla parte superiore del grafico sono evidenziati i punti per i quali è verificato il superamento della soglia di inizio del canale, l'involuppo inferiore si dispone con pendenza e intercetta tali da soddisfare la relazione $A^{0.5}S=65$. Al di sotto di tale linea di demarcazione sono collocati i punti ubicati su versante e quelli lungo la rete idrografica che non soddisfano al superamento della soglia. La pendenza media dei punti versante è in questo caso pari a 0.46, quella media dei punti eccedenti la soglia è pari a 0.80 mentre i punti deficitari rispetto alla soglia presentano pendenza media pari a 0.36. I punti lungo la rete idrografica che non soddisfano al valore soglia possono essere interpretati come indicatori di situazioni a bassa potenzialità erosiva e quindi con una propensione al deposito del materiale solido. Il reticolo sintetico può utilmente essere analizzato in base a tale caratteristica.

CARATTERIZZAZIONE DEL RETICOLO SINTETICO MEDIANTE INDICATORI DI STREAM POWER

La combinazione area drenata (A) e pendenza locale (S), già discussa nella precedente sezione a proposito dell'identificazione dei punti di inizio del reticolo è utilmente interpretabile con riferimento al concetto di potenza della corrente, meglio nota con il termine di “*stream*

power”, simbolo Ω , unità di misura $W m^{-1}$ (Yang, 1987)

La *stream power* definisce la dissipazione di energia potenziale per unità di lunghezza del canale ed è correntemente utilizzata nello studio dei processi di modellamento delle forme morfologiche (D’Agostino, 2003). Usualmente è espressa dalla classica formulazione

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S$$

dove ρg rappresenta l’unità di peso dell’acqua, Q la portata e S la pendenza locale del tratto di canale. Se si assume l’area drenata come surrogato della portata è possibile formulare un indice di *stream power* (SPI) su base topografica che può assumere la forma della già nota combinazione area drenata-pendenza locale.

$$SPI = A^{0.5} S$$

Come già anticipato nella precedente sezione l’andamento di SPI assume particolare interesse lungo la rete idrografica. Per analizzare tale andamento è stato proposto l’indicatore DENET (Dalla Fontana e Marchi 2003) che identifica i tratti della rete idrografica a basso valore di SPI e li classifica secondo la loro lunghezza. Infatti, celle a basso SPI hanno una modesta influenza sulla dinamica del sedimento se ubicate singolarmente in tratti di rete idrografica provvisti, nella loro generalità, di una buona capacità di trasporto (SPI elevato). Diverso è il caso in cui si abbiano lunghe sequenze di celle, fra loro successive, caratterizzate da basso valore di SPI. Questa situazione appare indicativa di una ridotta efficienza dei processi di convogliamento del sedimento. Il programma di calcolo per la determinazione di DENET opera una scansione della rete idrografica sintetica identificando le celle con SPI inferiore al valore soglia prescelto. Quando si incontra una cella a basso valore di SPI, il valore dell’indicatore viene posto pari a 1; se ulteriori celle a basso valore di SPI sono presenti immediatamente a valle, ad esse vengono assegnati valori progressivamente crescenti di un’unità. Quando due o più tratti di rete idrografica costituiti da celle a basso SPI confluiscono in una stessa cella, a sua volta caratterizzata da un basso valore di SPI, a quest’ultima viene assegnato un valore corrispondente alla somma di quelli delle celle contribuenti, incrementato di 1. La procedura di calcolo è esemplificata nella figura 11.

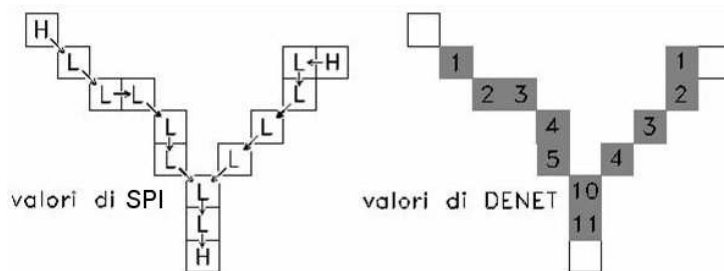


Fig. 11 – Procedura di calcolo dell’indicatore DENET. “L” e “H” indicano rispettivamente valori di SPI inferiori e superiori alla soglia per l’estrazione della rete idrografica

L’indicatore DENET è stato utilizzato per identificare i tratti della rete idrografica del bacino del Boite (163 km² regione dolomitica a monte dell’abitato di Cortina d’Ampezzo) che, sulla base dei valori del parametro SPI, presentano una ridotta propensione all’erosione ed al trasporto solido (Dalla Fontana e Marchi, 2000). La mappa raster dell’indicatore DENET è presentata in figura 12.

La relazione fra la lunghezza dei tratti d’alveo costituiti interamente da celle a basso valore di SPI e l’area drenata della cella terminale di ogni tratto è presentata in figura 13. I tratti d’alveo che delineano il limite superiore del diagramma di figura 13 appaiono meritevoli di particolare attenzione in quanto indicano la massima lunghezza dei tratti d’alveo a basso SPI per un dato valore dell’area contribuyente; l’ubicazione geografica delle celle terminali di questi tratti è mostrata in figura 12.

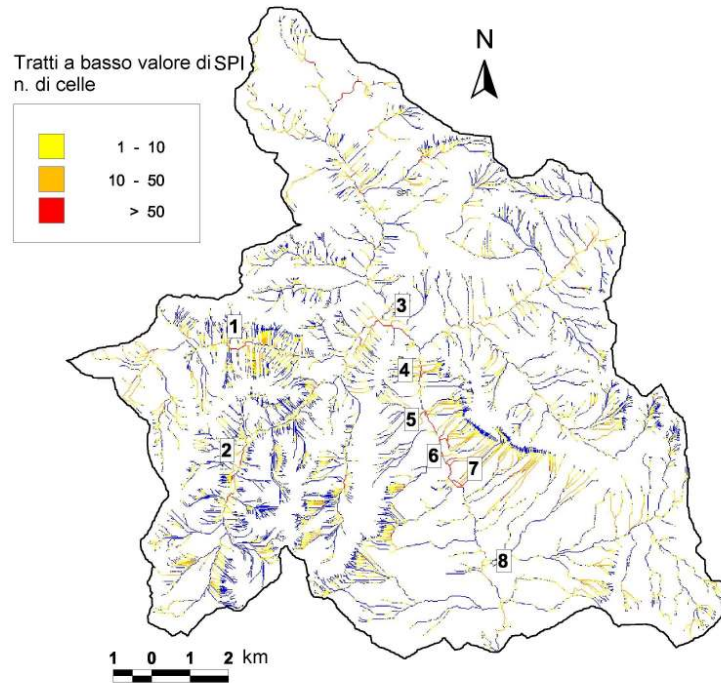


Figura 12 – Rete idrografica sintetica del bacino del Boite. Valori dell'indicatore DENET

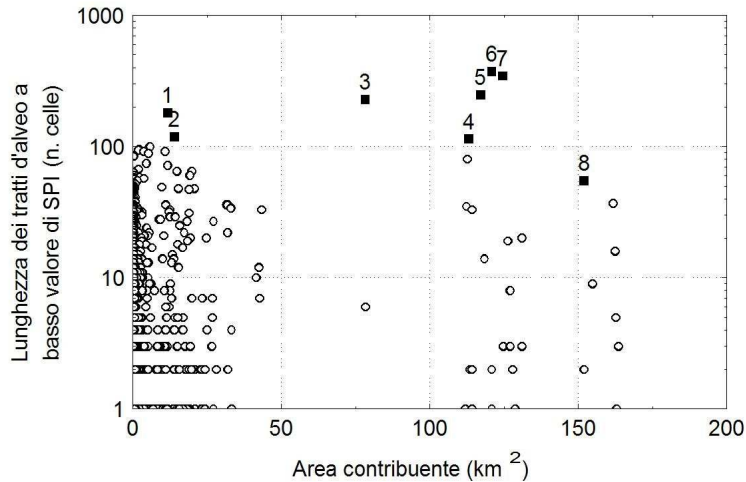


Figura 13 – Relazione tra area contribuyente e lunghezza dei tratti d'alveo a basso valore di SPI.

Osservazioni di campagna condotte su questi tratti selezionati confermano che essi sono effettivamente interessati prevalentemente da processi di deposizione. A titolo di esempio si riportano nella figura 14 due immagini rappresentative, rispettivamente, di situazioni ricorrenti nei tratti iniziali della rete idrografica e nella parte inferiore del bacino. Nel primo caso (Fig. 14 a) si osservano processi di sovralluvionamento fortemente influenzati dagli apporti di sedimento che pervengono dai tributari in forma colate detritiche; nel secondo (Fig. 14b) si ha un ampio alveo alluvionale a bassa pendenza.

I risultati conseguiti per il bacino del Boite confermano che semplici indicatori morfometrici, derivati da un modello digitale del rilievo di media risoluzione, possono contribuire all'interpretazione della dinamica dei fenomeni di erosione e trasporto sia a scala locale sia a scala di bacino. In particolare l'indicatore DENET consente di identificare e classificare in modo oggettivo i tratti d'alveo con ridotta capacità di trasporto. Il ruolo di questi tratti d'alveo come aree di deposito per il sedimento eroso può essere valutato analizzando l'estensione e l'ubicazione delle

aree sorgenti di sedimento presenti a monte.



Figura 14 - Esempio di tratti di alveo caratterizzati da bassi valori di Stream Power Index . a) sito n.2; b) sito n. 5 in fig. 12

BIBLIOGRAFIA

- Bartolini C., 2004. Reticoli Dendritici. Tavola 47 in Italia Atlante dei Tipi Geografici. Istituto Geografico Militare. pp. 262-265.
- Cazorzi F., Dalla Fontana G., Fattorelli S., 1987. *Identificazione Idrologica del bacino dell'Ansiei*. Quaderno di ricerca n. 11. Regione Veneto. Dipartimento Foreste, pp. 178.
- Cazorzi F.: HydroGrid2002 (hg2k2). *Manuale di Riferimento*. Università di Udine, Dipartimento di Scienze Agrarie ed Ambientali, 2002, pp. 38
- D'Agostino V. 2003. *Dinamica dei corsi d'acqua e progettazione di interventi di ricostruzione morfologica*, Quaderni, Università degli Studi di Bergamo – Centro Studi sul Territorio: “Corsi d'acqua e aree di sponda: per un progetto di valorizzazione – Tecniche d'intervento sui corsi d'acqua e aree spondali”, Bergamo – University Press, Ed Sestante, 21-34.
- D'Agostino V., Vianello A. 2005. Identificazione morfodinamica del reticolo idrografico: integrazione fra rilievi di campo e tecniche GIS. Quaderni di Idronomia Montana, Editoriale BIOS, 24, 271-290.
- Da Ros D, Borga M. 1997. On the use of digital elevation model data for the derivation of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Hydrological Processes* **11**: 13-33.
- Dalla Fontana G., Marchi L., 2000. *Sediment sources in the Boite River basin : mapping and GIS analysis*. Special issue Dynamics of water and sediments in mountain basins. Quaderni di Idronomia Montana, Editoriale BIOS, n 20, 115-130.
- Dalla Fontana G., Marchi L. 2003. *Slope area relationships and sediment dynamics in two alpine streams*. *Hydrological Processes*, 17, 73-87.
- Desmet PJJ, Poesen J, Govers G, Vandaele K. 1999. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies. *Catena*, **37**: 377-392.
- Dietrich WE, Dunne T. 1993. *The channel head*. In Channel Network Hydrology, Beven K, Kirkby MJ (eds). John Wiley & Sons: New York; 175-219.
- Fattorelli S, Keller HM, Lenzi M, Marchi L. 1988. *An experimental station for the automatic recording of water and sediment discharge in a small alpine watershed*. *Hydrological Sciences Journal* **33**: 607-617.
- Horton, RE. (1945) *Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrological approach to quantitative geomorphology*. *Bull. Geolo.Soc.Am.*, 56, 275-370.
- Ijjasz-Vasquez EJ, Bras RL, 1995. *Scaling regimes of local slope versus contributing area in digital elevation models*. *Geomorphology*, 12, 299-311.

- Gandolfi C, Bischetti GB, 1997. Influence of the drainage network identification method on geomorphological properties and hydrological response. *Hydrological Processes*, 11, 353-375.
- McGlynn BL, Seibert J, 2003. Distributed assessment of contributing area and riparian buffering along stream network. *Water Resources Research*, 36,4, doi:1029/2002WR001521.
- Moglen GE, Bras RL 1995. The importance of spatially heterogeneous erosivity and the cumulative area distribution within a basin evolution model. *Geomorphology* **12**: 173-185.
- Montgomery DR, Dietrich WE. 1988. Where do channels begin? *Nature* **336**: 232-234.
- Montgomery DR, Dietrich WE. 1989. Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research* **25**: 1907-1918.
- Montgomery DR, Dietrich WE. 1994. *Landscape dissection and drainage area-slope thresholds*. In *Processes, Model and Theoretical Geomorphology*, Kirkby MJ (ed). Wiley: New York; 221-246.
- Montgomery DR, Foufoula-Georgiou E. 1993. Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research* **29**: 3925-3934.
- Prosser IP, Abernethy B 1996. Predicting the topographic limits of a gully network using a digital terrain model and process thresholds. *Water Resources Research* **32**: 2289-2298.
- Quinn PF, Beven KJ, Chevallier P, Planchon O. 1991. *The prediction of hillslope flowpath for distributed modelling using digital terrain models*. *Hydrological Processes*, 5, 59-80.
- Rinaldo A., Rodriguez Iturbe I, Rigon R., Ijjasz-Vasquez E. Bras RL, 1993. *Self-Organized Fractal River Network*. *Physical Review Letters*, vol 70, 6, 822-825.
- Tarboton DG, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I. 1991. *On the extraction of channel network from digital elevation data*. *Hydrological Processes* **5**: 81-100.
- Tarboton DG. 1997. *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. *Water Resources Research* **33**: 309-319.
- Tucker GE, Bras RL, 1998. *Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology*. *Water Resources Research*, 34, 2751-2764.
- Yang CT. 1987. Energy dissipation rate approach in river mechanics. In *Sediment transport in gravel-bed rivers*. Thorne CR, Bathurst JC, Rey RD (eds). John Wiley & Sons: New York; 735-766.

UTILIZZO DI GIS PER L'ANALISI DEL BACINO IDROGRAFICO

Diego SONDA

Dottore Forestale

INTRODUZIONE

Le attuali indagini territoriali si basano sull'analisi e sul trattamento di grandi quantità di dati. Per un impiego georeferenziato delle informazioni si ricorre sempre più spesso ai Sistemi Informativi Geografici (G.I.S., acronimo di Geographical Information System), insieme di strumenti in grado di acquisire, immagazzinare, recuperare, trasformare e riprodurre dati spaziali riferiti ad un territorio. Ciò ha consentito alla tecnologia G.I.S. una rapida diffusione negli ultimi anni e nello stesso tempo si è assistito ad uno sviluppo di numerosi prodotti software, che si differenziano tra loro per caratteristiche e funzionalità.

Nell'ambito di uno studio di carattere idrologico è preferibile adottare degli strumenti che danno priorità all'analisi delle caratteristiche morfometriche e tematiche, rispetto a quelli che si limitano ad una semplice descrizione delle stesse. Per le applicazioni dove è richiesta un'analisi morfometrica, tematica ed idrologica dei bacini idrografici sono da preferire sistemi GIS, che consentono di gestire sia dati vettoriali sia dati raster.

COSTRUZIONE DEL D.E.M. (DIGITAL ELEVATION MODEL)

Uno studio dettagliato e distribuito delle caratteristiche morfometriche di un bacino idrografico può essere effettuato disponendo di un modello digitale del terreno, ovvero di una rappresentazione numerica delle informazioni cartografiche del bacino stesso. Tale rappresentazione è generalmente di tipo vettoriale, ossia costituita da numerosi punti significativi, ciascuno dei quali definito da tre coordinate spaziali (latitudine, longitudine e quota). Oltre alla rappresentazione di tipo vettoriale si può adottare anche quella di tipo "raster", in cui la superficie del terreno è descritta da un numero più o meno grande di celle quadrate (unità territoriali di riferimento) (Dalla Fontana et. al., 1998; Sonda, 1998; Sonda, 2001).

L'uso di un modello numerico applicato al territorio permette di ottenere una dettagliata conoscenza della morfologia e di altri aspetti significativi, i quali si rivelano di fondamentale importanza per lo sviluppo di numerose applicazioni, tra cui quelle di carattere idrologico.

Una prima elaborazione è la realizzazione del modello digitale delle quote (D.E.M.). I dati necessari per la realizzazione del raster delle quote sono rappresentati dalle informazioni altimetriche, ossia curve di livello e singoli punti quotati. Fino a 5-6 anni fa queste informazioni non sempre erano disponibili e quindi si rendeva necessaria una lunga fase di digitalizzazione. Negli ultimi anni, invece, tali informazioni sono di facile reperimento e all'operatore spetta una sola operazione di verifica della bontà dei dati prima di procedere con le successive elaborazioni. Tale verifica consiste nell'individuare eventuali errori di digitalizzazione, ossia l'analisi della correttezza dei valori di quota attribuiti alle singole curve di livello o punti quotati. Nel caso in cui il bacino idrografico si collochi a confine fra due regioni possono emergere delle discontinuità lungo la linea di confine, questo per il diverso impianto delle carte tecniche, da cui sono state ottenute le informazioni altimetriche. Il problema è superato mediando l'andamento delle curve di livello in modo tale da eliminare le discontinuità. Questa operazione del tutto arbitraria e a discrezione dell'operatore non comporta delle variazioni significative ai fini delle successive analisi territoriali di carattere idrologico.

Nel momento in cui si dispone di tutte le informazioni altimetriche, la creazione del D.E.M. (Digital Elevation Model) è un'operazione rapida, che consente di ottenere il modello digitale delle quote in prima battuta e poi con una successiva elaborazione quello delle esposizioni e delle pendenze (Cazorzi, 1996; ESRI, 2004); tale elaborazione può avvenire adottando una maglia di analisi triangolare (TIN) oppure a celle quadrate (Raster). In quest'ultimo caso, la dimensione della cella deve essere scelta in funzione dell'estensione dell'area analizzata; generalmente si adottano celle di 10 m per bacini fino a 20-30 km² e celle di 20-25 m per bacini più estesi.

PRODUZIONE DELLE CARTE TEMATICHE

Carta dell'uso del suolo

Per la realizzazione della carta tematica dell'uso del suolo sono disponibili vari supporti digitali che possono essere consultati o elaborati. Il primo supporto è rappresentato dalle foto aeree georiferite, come per esempio le Ortofoto del Volo Italia 2000 e prossimamente Volo Italia 2004. Si tratta di fotografie aeree ortoriferite a colori con una risoluzione a terra pari a 1 metro. L'analisi di queste immagini consente di discriminare fra le diverse forme di uso del suolo. Per un'analisi più approfondita è necessaria una certa esperienza di fotointerpretazione, che consenta di distinguere per esempio fra le diverse forme di bosco (fustaia, ceduo, ecc.) e soprattutto delle verifiche in campo per le aree meno leggibili (aree in ombra).

I dati ottenuti con la fotointerpretazione possono essere affinati con eventuali dati accessori, che possono provenire per esempio da piani di assestamento o altri strumenti pianificatori, che consentono un maggiore dettaglio sulle aree analizzate.

Carta geologica

In genere le informazioni di carattere geologico sono riportate su supporto cartaceo e quindi è necessaria una fase più o meno lunga di digitalizzazione del loro contenuto. Un valido supporto per le analisi dei bacini idrografici è la carta geologica d'Italia redatta in scala 1: 25.000 (Autori Vari, 1972).

COSTRUZIONE DELLA CARTA DEL CN (Numero di curva)

Il metodo di calcolo dell'idrogramma di progetto proposto dal Soil Conservation Service (1972), consente di determinare la pioggia efficace mediante l'utilizzo del parametro CN (Numero di Curva). Il valore assegnato al parametro del CN può variare da 0 a 100 ed esprime la propensione alla generazione dei deflussi diretti delle diverse combinazioni suolo-soprassuolo. Valori bassi di CN identificano una situazione locale poco favorevole alla formazione del deflusso superficiale, mentre valori progressivamente crescenti caratterizzano superfici che tendono all'impermeabilità.

La mappa del CN nasce attribuendo alle diverse combinazioni di suolo-soprassuolo un valore che esprime la maggiore o minore impermeabilità. La propensione a produrre deflusso locale è funzione del tipo di uso del suolo e delle caratteristiche lito-pedologiche. Da ciò consegue la necessità di disporre di una carta dell'uso del suolo e di una in grado di esprimere la permeabilità del terreno. Quest'ultima, come previsto dalla metodologia del Soil Conservation Service, deve essere riferita ad una condizione di saturazione del terreno.

La carta dell'uso del suolo, generalmente, non necessita di ulteriori modifiche, cosa invece necessaria per la carta geologica, la quale deve essere reinterpretata in chiave di conducibilità idrica. La metodologia proposta dal Soil Conservation Service prevede una suddivisione qualitativa in quattro classi (gruppi idrologici), da A a D, con caratteristiche di attitudine crescente alla produzione di deflusso superficiale (impermeabilità crescente). Le cartografie con riportati dati di carattere idro-geologico sono piuttosto rare e pertanto si rende necessaria un'elaborazione a partire dalle carte geologiche tradizionali oppure da quella pedologica. La rilettura dell'una o dell'altra carta in termini di permeabilità a saturazione consente di definire le aree omogenee appartenenti al medesimo gruppo.

La carta dei litotipi fornisce, in genere, un'indicazione abbastanza approssimata della condizione di permeabilità. Un affinamento dei risultati si può ottenere utilizzando le informazioni che si possono dedurre da una carta pedologica. Infatti, a parità di litotipo la presenza di un suolo profondo e strutturato ha degli effetti sul deflusso superficiale diverso da quello che si può osservare in presenza di un suolo poco sviluppato, compatto o con roccia affiorante (Dalla Fontana et al., 1998).

Nota la mappa dei gruppi idrologici la realizzazione della mappa del CN avviene assegnando alle diverse combinazioni di permeabilità - uso del suolo un valore di CN. L'assegnazione di questi

valori è un'operazione che deve essere valutata con attenzione, in quanto una scelta di valori poco accorta può influenzare l'attendibilità del risultato finale.

CLASSE LITOLOGICA	GRUPPO IDROLOGICO
Alluvioni prevalentemente ghiaiose	A
Detrito di falda a ghiaia prevalente	A
Detrito di falda a sabbia e limo prevalenti	C
Laghi e corsi d'acqua	D
Morene grossolane	A
Prima Unità Carbonatica competente (Dolomia dello Sciliar, Formazione di Contrin, Calcarea di Esino, Formazione di Breno)	A
Prima Unità Carbonatica stratificata incompetente (Formazioni di La Valle, Livinallongo, S.Cassiano, Calcarea di Prezzo, Calcarea di Angolo)	D
Unità clastico evaporitica incompetente (Arenarie di V.G, Formazione a Bellerophon, Formazione di Werfen, ecc.) e Conglomerato di Richthofen	D
Vulcaniti basaltiche	D

Tabella 1 – Esempio di assegnazione delle diverse classi di litotipi ai gruppi idrologici.

L'applicazione distribuita del metodo proposto dal Soil Conservation Service comporta l'assegnazione di un valore di CN a ciascuna cella. Tale valore è letto in una tabella a doppia entrata, composta da n righe (quante sono le classi di uso del suolo) e 4 colonne. Queste ultime sono riferite ai quattro gruppi idrologici di permeabilità del suolo (A, B, C, D), mentre le righe, in numero variabile, sono riferite alle diverse categorie di uso del suolo presenti all'interno del bacino idrografico.

CLASSI USO DEL SUOLO	GRUPPI IDROLOGICI			
	A	B	C	D
Fustaia densa di conifere	18	27	40	50
Fustaia rada di conifere	23	32	50	55
Bosco di latifoglie	25	36	50	55
Ceduo scadente	35	45	58	68
Lariceti, cembrete e larici-cembrete	40	48	63	75
Pinete di Pino silvestre	38	49	64	73
Pascoli nudi o arborati	37	50	68	75
Prati e colture agrarie	41	47	65	76
Rupi boscate	40	50	65	75
Arbusteti e mughete	38	45	60	70
Improduttivo nudo	45	55	70	80
Aree urbanizzate	80	85	90	95
Piste da sci	50	65	75	80
Laghi e corsi d'acqua	99	99	99	99
Zone umide	90	90	90	90
Ghiacciai	95	95	95	95

Tabella 2 – Esempio di valori di CN assegnati ai complessi suolo – soprassuolo, ipotizzando condizioni di AMC pari a 2 e perdite iniziali 0.1 volte il contenuto idrico del terreno.

Il valore di CN proposto nella tabella precedente è riferito ad una condizione media di umidità del terreno all'inizio della precipitazione (AIDI, 2003; Dalla Fontana e Cazorzi, 1999; Dalla Fontana et al., 1998; Sonda, 1998). È possibile prendere in considerazione anche situazioni

diverse da quelle medie attraverso un parametro correttivo (AMC, Antecedent Moisture Condition), che esprime il diverso stato idrico del terreno. In relazione al parametro AMC il valore di CN, espresso per una condizione media, può essere aumentato o diminuito, ossia varia la capacità di produrre deflusso superficiale. Secondo la formulazione originaria il parametro AMC può assumere valori discreti variabili da 1 a 3 rispettivamente per una capacità di deflusso superficiale bassa (1), media (2) od elevata (3). In realtà il contenuto idrico del suolo presenta un comportamento continuo e quindi si ammette anche l'uso di valori intermedi. Si può prevedere poi una variabilità del parametro AMC anche al di fuori dei valori originariamente previsti, ovvero, talvolta il valore 3 non è in grado di esprimere in modo completo la massima capacità di produzione di deflusso del bacino idrografico (stato di saturazione). Pertanto in un'ipotesi progettuale, ipotizzando le condizioni più sfavorevoli per il bacino idrografico preso in considerazione, si può ammettere l'uso di valori di AMC superiori a 3. La correzione dei valori di CN in funzione del parametro AMC interviene a livello di applicazione del modello distribuito (Cazorzi, 1996; Cazorzi, 2002).

COSTRUZIONE DEL RETICOLO IDROGRAFICO SINTETICO

La produzione locale di deflusso è condizionata dalle caratteristiche del complesso suolo-soprassuolo, sintetizzate dal valore di CN, mentre la propagazione dello stesso alla sezione di chiusura del bacino è influenzata dalla forma ed alla lunghezza del percorso idrografico che si diparte da ciascuna cella, prima lungo il versante e poi nel reticolo idrografico.

L'informazione cartografica tradizionale rappresenta una porzione più o meno estesa della reale rete idrografica, ma non sufficiente a descrivere in modo esteso i percorsi dell'acqua lungo i versanti. Ne consegue che la maggior parte delle celle del bacino non sono connesse in modo univoco alla sezione di chiusura. Attraverso le analisi GIS, sulla base della sola mappa delle elevazioni (D.E.M.), è possibile ricavare un insieme di percorsi, che collegano ciascuna cella del bacino alla sezione di chiusura in modo univoco. L'insieme di percorsi, che si sviluppano seguendo le linee di massima pendenza, possono essere interpretati come un reticolo idrografico sintetico. In altre parole, il modello matematico simula la concentrazione dei deflussi superficiali prodotti da una precipitazione uniformemente distribuita, nell'ipotesi di perfetta omogeneità del suolo su tutto il bacino (Dalla Fontana et al., 1998).

Per la definizione dei percorsi dell'acqua è necessaria l'eliminazione di eventuali depressioni presenti all'interno del raster delle quote. Tale raster, infatti, può contenere celle la cui quota è inferiore a quelle delle otto celle circostanti (pits). Una depressione locale può essere reale (è il caso ad esempio di un lago o di doline in zone carsiche) oppure derivare sia dall'approssimazione indotta dal modello statistico di regressione delle superfici (ad esempio nel caso di valli molto strette oppure in zone con pochi punti quotati), sia da eventuali errori commessi in fase di digitalizzazione delle curve di livello. La presenza di un certo numero di pit non altera, di norma, la validità del modello altimetrico, ma in certe applicazioni si rivela essenziale come nel caso della determinazione dei percorsi idrologici (Dalla Fontana e Cazorzi, 1993). Attraverso alcune funzioni appositamente implementate nei software di analisi idrologica è possibile collegare ciascuna cella del bacino alla sezione di chiusura, ipotizzando che il deflusso superficiale si sviluppi uniformemente all'interno della cella e non tenendo conto quindi di eventuali concavità o convessità locali o di ostacoli presenti nel terreno (Cazorzi, 1996; Cazorzi, 2002, ESRI, 2004).

Le celle del raster "Area drenata" assumono un valore che esprime il numero di celle che fanno convergere il deflusso su quella cella, ossia è come definire il numero di celle che compongono il bacino idrografico sotteso da ciascuna cella. Noti i percorsi compiuti dall'acqua è importante conoscere anche la lunghezza degli stessi. Il raster dell'area drenata e della lunghezza dei percorsi rappresentano la base per proseguire nell'analisi idrologica (estrazione dei sottobacini e l'identificazione automatica dei relativi spartiacque, misura della "distanza idrologica" di ogni elemento dalla sezione di chiusura del bacino, ecc.) (Dalla Fontana et al., 1998; Dalla Fontana e Cazorzi, 1999).

Ipotizzando una distribuzione uniforme del deflusso sul bacino è possibile individuare l'area minima contribuyente (area di soglia) capace di formare per definizione un canale. Quando su una

cella converge un deflusso prodotto da un numero di celle pari o superiore all'area di soglia si ritiene che su tale cella il deflusso sia sufficientemente grande per assumere le caratteristiche di una corrente, di conseguenza la cella può essere classificata come "canale" e dunque definire il reticolo idrografico sintetico. Tutte le altre celle sono, per esclusione, classificate come "versante".

L'ipotesi della distribuzione uniforme del deflusso è un'ipotesi semplificativa, che va ad aggiungersi a quella sull'omogeneità spaziale dei suoli utilizzata nel calcolo dell'area drenata. Il reticolo idrografico reale, invece, è frutto di un'interazione più complessa che comprende anche le caratteristiche del suolo, ma che trova sicuramente nella morfologia della superficie il fattore dominante.

La suddivisione fra celle di versante e celle che compongono la rete idrografica avviene utilizzando un valore soglia definito sulla base del tipo di bacino idrografico analizzato e sui riscontri ottenuti da prove scientifiche in campo (AIDI, 2003). La scelta dell'area di soglia è un'operazione arbitraria, pertanto per valori diversi produce reticoli sostanzialmente differenti, ovvero più o meno espansi. Il confronto diretto con le "blue lines" ha un significato relativo in quanto queste ultime sono riferite al reticolo permanente, mentre è noto che in situazioni di piena il reticolo si espande in modo considerevole. In genere il reticolo che si ottiene appare significativamente più espanso di quello cartografico, pur conservandone la forma.

L'attribuzione di un valore di velocità media del deflusso superficiale lungo il versante e lungo il reticolo idrografico, consente di definire il tempo di propagazione dell'acqua caduta nelle singole celle. I dati attualmente a disposizione non sono molti, ma dalle verifiche in campo e studi condotti fino ad ora si assegna generalmente valori di circa 2 m/s sulla rete idrografica e 0.02 m/s lungo il versante. Tali valori concordano con quelli che si possono reperire in letteratura in condizioni di piena (AIDI, 2003).

BIBLIOGRAFIA

- AIDI, 2003, Calibrazione dei parametri cinematici del modello afflussi – deflussi – Relazione tecnico scientifica – Provincia Autonoma di Trento – Servizio Azienda Speciale di Sistemazione Montana
- Autori Vari, 1972, Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Servizio Geologico d'Italia
- Cazorzi F., 1996 – Watershed Oriented Digital Terrain Model. Manuale per l'utente, versione Win 95. Laboratorio IDEA (Idrologia Difesa del Suolo Ecologia e Ambiente) Agripolis, Università di Padova. Rapporto interno, pp. 80.
- Cazorzi F., 2002, Hygrid2k2 Guida di riferimento – Università degli studi di Udine
- Dalla Fontana G., Cazorzi F., 1993 – Effetti dei mutamenti d'uso del suolo sul regime idrologico del Sarca di Campiglio. Rapporto interno.
- Dalla Fontana G., Cazorzi F., 1999, Analisi territoriale e idrologica – calcolo dell'idrogramma di progetto per definite sezioni di chiusura. Laboratorio IDEA (Idrologia Difesa del Suolo Ecologia e Ambiente) Agripolis, Università di Padova.
- Dalla Fontana G., Cazorzi F., Rossi R., 1998, Piano degli interventi di sistemazione del bacino del rio Antermont, Calcolo portata di progetto. Laboratorio IDEA (Idrologia Difesa del Suolo Ecologia e Ambiente) Agripolis, Università di Padova.
- ESRI, 2004 – Manuale software ArcGis 9.0
- Soil Conservation Service, 1972, National Engineering Handbook, section 4 - Hydrology. Washington, D.C.
- Sonda D., 1998, Applicazione di criteri morfologici nella sistemazione dei torrenti: il caso della Val Campelle (Trento), Tesi di laurea, Laboratorio I.D.E.A., 1998.
- Sonda D., 2001, Valutazione della pericolosità idrogeologica sui conoidi alpini, Tesi di dottorato, Università di Padova, 2001.

LA VEGETAZIONE RIVIERASCA ALPINA

Paolo PAIERO

Università di Padova - Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Giovanni PAIERO

Università di Udine - Dip.to Georisorse e Territorio

INTRODUZIONE

I boschi rivieraschi – che spiccano quali componenti cospicue dei nostri paesaggi occupando, di norma, le aree di fondovalle lungo fiumi e torrenti o presso laghi, specchi d’acqua ed aree palustri ed umide in genere -, costituiscono degli habitat di notevole importanza per l’equilibrio idrogeologico del bacino idrografico che li comprendono. Questi ambienti - in condizioni di normalità -, per poter funzionare in modo equilibrato, evitando pericolose esondazioni e dissesti sui terreni adiacenti, devono avere una dimensione proporzionata alla funzione di accumulo temporaneo almeno delle acque di piena normale. Posizionati tra terra e acque, rappresentano quindi una prima barriera difensiva di sinergie di comunità biotiche – ricca di specie animali e vegetali specializzate – selezionate dai fattori morfologici, climatici ed edafici locali.

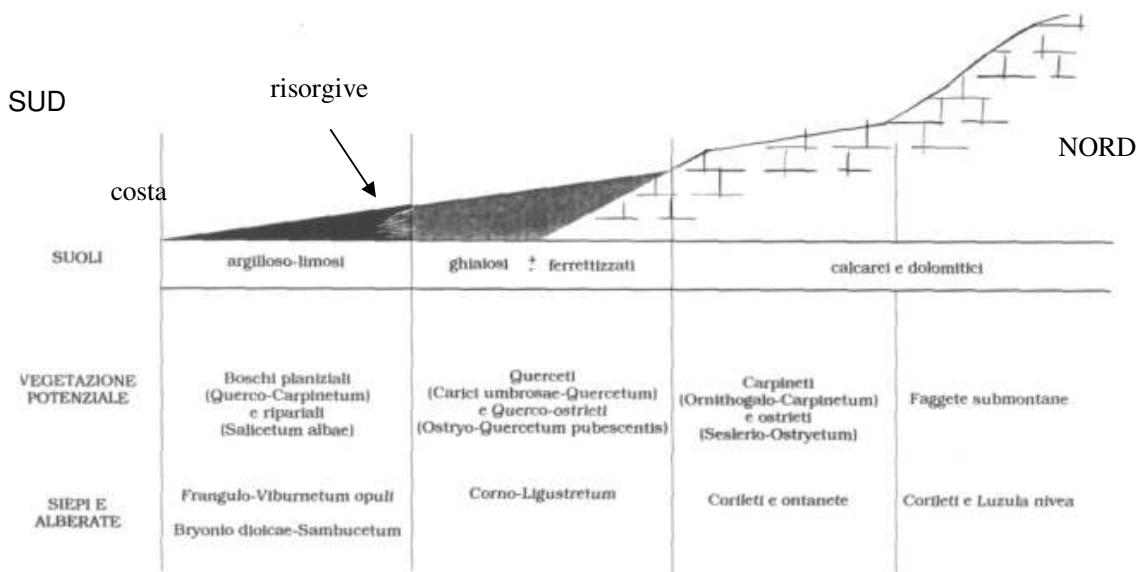


Fig. 1 – Condizioni geomorfologiche e vegetazioni potenziali dell’area prealpina orientale e suo avanterra.

L’ambiente rivierasco - sia per composizione che per struttura e funzionalità – risulta dunque tipicamente “azonale”, vale a dire che è del tutto svincolato dal resto delle biocenosi contermini e, come ricorda anche QUERINI (1989), dipende in primo luogo dal regime delle acque e poi da un insieme di fattori quali:

la posizione geografica che – nel caso delle nostre Alpi – influisce sul clima generale del territorio con caratteristiche di continentalismo (zone alpine interne) o di oceanicità (avanterra e zone marginali);

l’orografia che, se posta a breve distanza dal mare con barriere elevate, provoca un notevole movimento delle masse d’aria umida verso terra e viceversa;

l’altimetria e l’ampiezza della sezione montuosa, con conseguente “effetto di massa” sull’andamento termico e quindi sulla posizione altimetrica di flora e fauna (MARINELLI, 1896);

la geologia ed i tipi di substrato: alla prima - a seconda della morfologia e dei litotipi - si devono i vari fenomeni erosivi ed i movimenti franosi lungo i versanti; mentre le caratteristiche tessiture e strutturali dei secondi (grossolani, fini, compatti, ecc.) influiscono sulla capacità di ritenuta idrica, permeabilità, scorrimento superficiale e sulla pedogenesi medesima (Fig. 1);

la morfologia – aspra, accidentata ed instabile o più dolce e stabile - determina una maggiore o minore aggressività delle acque e la relativa circolazione superficiale e sotterranea (risorgive) (Fig. 2);

la tipologia vegetazionale, le linee evolutive dei soprassuoli, che risultano più o meno efficienti nei riguardi della protezione del suolo (Fig. 3).

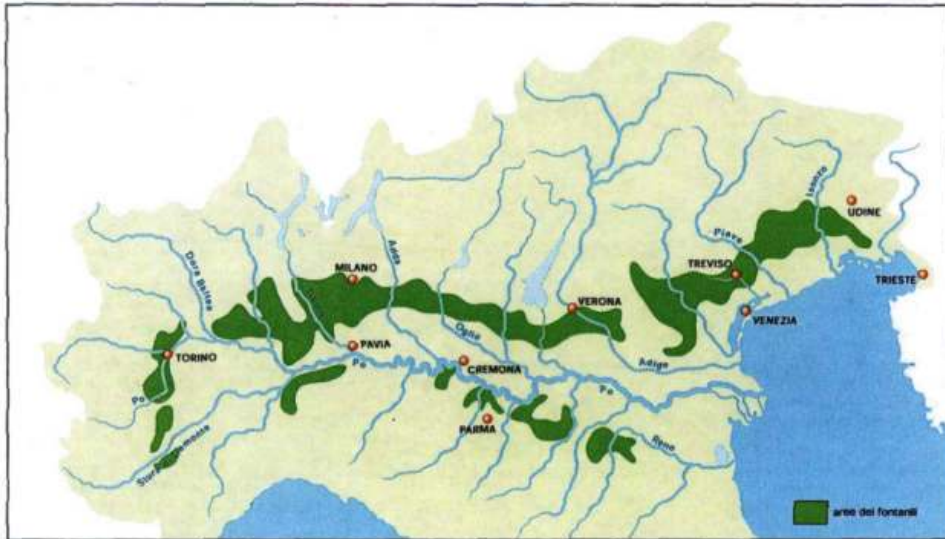


Fig. 2 – Le zone di risorgiva nell’avanterra alpino ed appenninico padano (da Carraro, 1998).

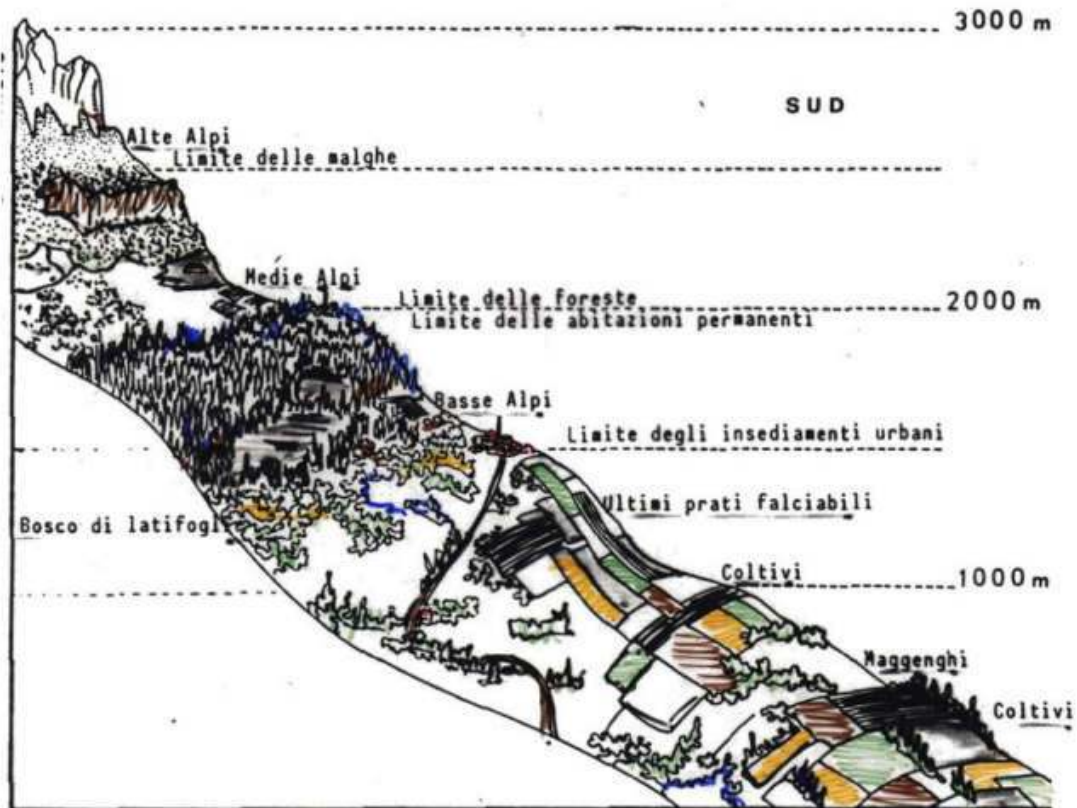


Fig. 3 - Distribuzione altimetrica della vegetazione sul versante meridionale delle Alpi (da Giacomini, Fenaroli, 1958).

L’ECOSISTEMA RIPARIALE

Caratteristiche generali

Poiché i boschi di ripa (da cui ripario o ripariale) risultano dei soprassuoli relativamente indipendenti dal clima locale, dato che come si è detto le loro componenti - tramite la selezione delle forme biologiche (Fig. 4) - dipendono dalla presenza e dal regime delle acque, che condizionano la genesi del suolo delle rive,

la disponibilità idrica ed il rifornimento di sostanza nutritive.

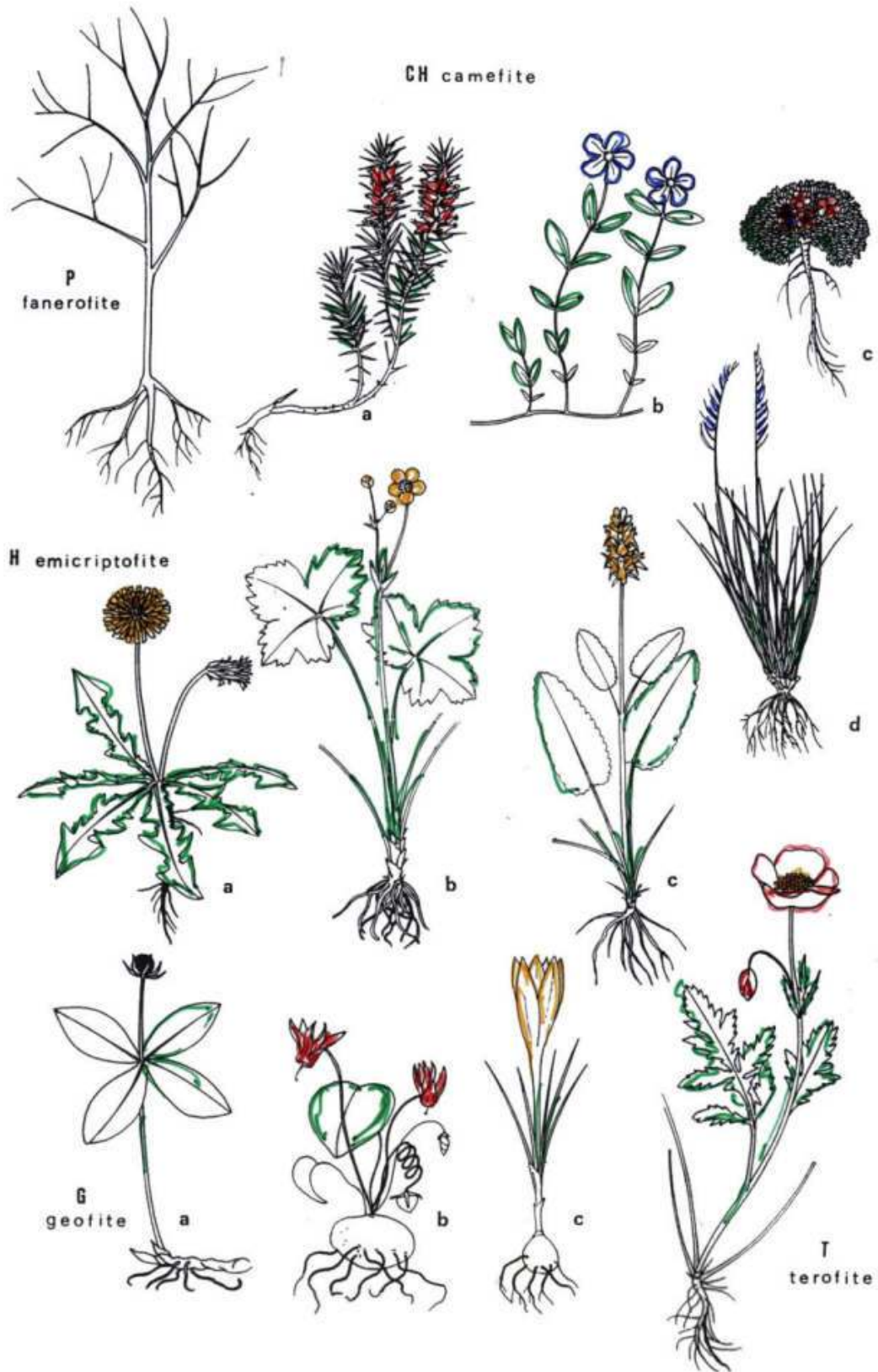


Fig. 4 – Forme biologiche vegetali secondo Raunkiaer (da Zenari, 1950).

Così che vengono normalmente allontanate da queste stazioni tutte quelle specie che non tollerano di avere costantemente le radici “a mollo” ed il fusto temporaneamente sommerso, come il faggio, la rovere, gli aceri, ecc. (Fig. 5).

Tuttavia anche i boschi riparali, come accade per il resto della vegetazione terrestre, presentano fisionomie e composizioni diverse in relazione alle condizioni climatiche delle stazioni da essi occupate. Così nelle pianure e colline delle aree temperate questo tipo di vegetazione è rappresentato da popolamenti forestali simili, con le debite eccezioni, per struttura e composizione ai boschi circostanti: ad es. i saliceti ed i pioppeti alluvionali rientrano, insieme con i quercu-carpineti planiziali, tra le vegetazioni forestali di latifoglie mesofile decidue. In queste stazioni il verde lussureggiante e la struttura stratificata del soprassuolo ricorda l’aspetto della foresta pluviale caldo-umida dei tropici: le numerose componenti arboreo-arbustive formano una fitta barriera al di sopra della quale si allargano le chiome delle specie predominanti, con tronchi ricoperti d’edera, mentre liane ed epifite pendono dai rami come festoni.

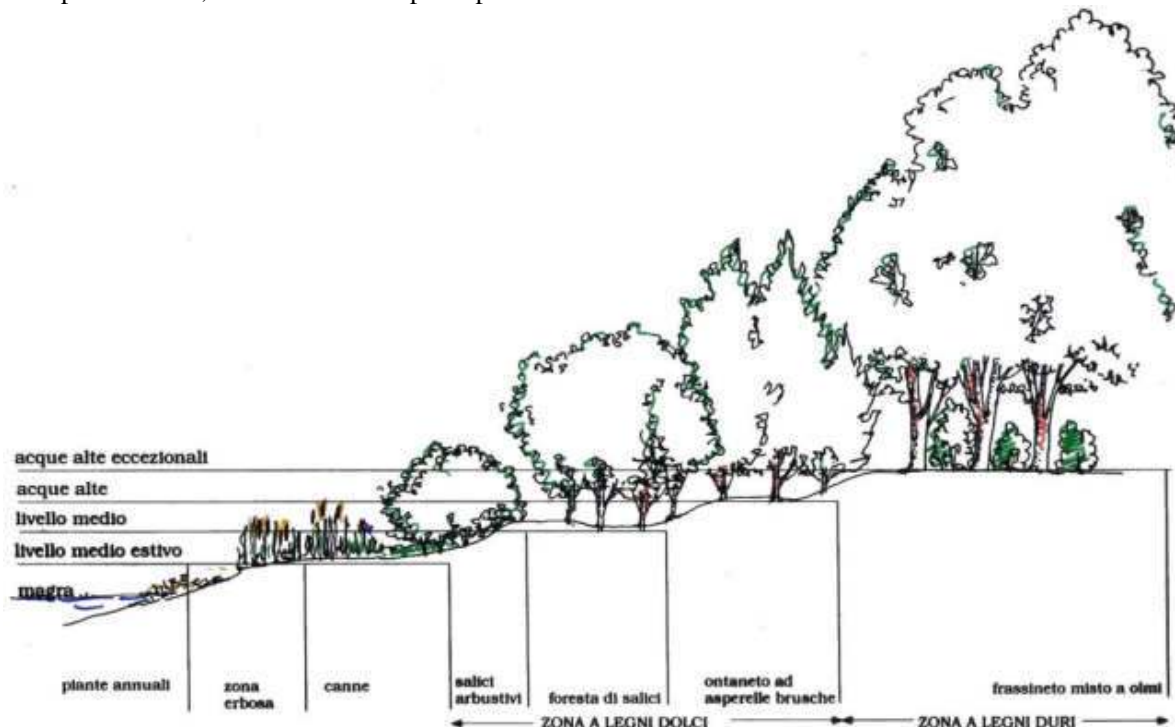


Fig. 5 – Profilo dei tipi vegetazionali rivieraschi e regime delle acque.

Le componenti biotiche dell’habitat ripario rispecchiano le categorie tipiche dell’ecosistema terrestre (Fig. 6).

Come in ogni ecosistema terrestre anche qui il punto di partenza sono i **produttori primari** (organismi autotrofi), che costituiscono il primo anello della catena alimentare. Negli habitat rivieraschi questi sono rappresentati in primo luogo dalle piante vascolari (a) che, insieme con altri organismi pigmentati producono, tramite la fotosintesi, la sostanza organica, cioè il nutrimento per la loro crescita e moltiplicazione. Il successivo anello è costituito dai **consumatori primari** (organismi eterotrofi), solitamente erbivori (b), quali uccelli, pesci, larve di insetti, ecc., una fauna sempre presente in copia nei boschi. A spese dei consumatori primari si sviluppa il livello dei **consumatori secondari** (anch’essi eterotrofi) (c), che si possono suddividere in due livelli: uno composto da carnivori, afferenti a diversi ordini del regno animale (uccelli rapaci, pesci, insetti predatori ed altri piccoli mammiferi), l’altro di organismi saprovervi, che si nutrono di detriti (invertebrati del suolo e del fondo dell’acqua). A completamento della catena alimentare vi sono infine gli organismi **decompositori** (d: funghi, batteri, lombrichi e artropodi, ecc.) che – quali agenti della decomposizione - vivono a spese di carcasse e spoglie di animali morti, rami, foglie, ed altre parti di piante abbandonate al suolo, che vengono così demolite e decomposte in sostanze semplici utilizzabili dai produttori (ODUM, 1971).

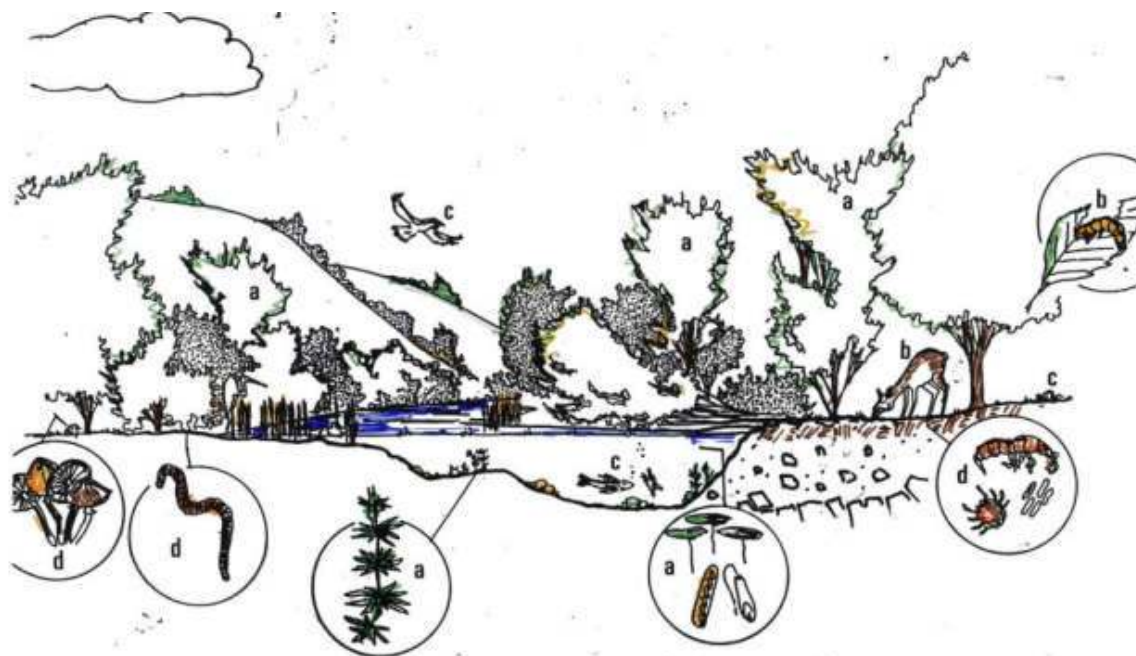


Fig. 6 - Schema di ecosistema rivierasco e relative componenti biotiche.

I° Liv.: produttori primari (autotrofi): a) piante verdi, alghe, ecc.

II° Liv.: consumatori (eterotrofi): b) erbivori (mammiferi, pesci, anfibi, insetti, ecc.)
c) carnivori (predatori, rapaci, roditori, ecc)

microconsumatori (eterotrofi detriticoli): uccelli, pesci, invertebrati, ecc.

III° Liv.: decompositori (eterotrofi saprofiti): d) funghi, batteri ed agenti della decomposizione della sostanza organica verso composti semplici utilizzabili dai produttori.

Serie vegetazionali ed aspetti microclimatici

La foresta alluvionale fluviale o bosco ripariale rappresenta quindi un soprassuolo forestale che si sviluppa lungo le sponde di un corso d'acqua o attorno ad un lago ed occupa, oltre alla riva vera e propria, anche gli eventuali tratti di terreno golenale fino ai primi terrazzi o agli argini naturali che, normalmente, separano le aree soggette a periodiche inondazioni da quelle più elevate retrostanti, occupate da colture agrarie ed altre attività antropiche (Fig. 5).

Nell'avanterra meridionale delle Alpi, l'ambiente rivierasco – rilevato in corrispondenza del passaggio tra l'alta e la bassa pianura (zona delle risorgive) – è caratterizzato da diverse serie di vegetazioni in relazione alla granulometria delle alluvioni depositate dal fiume. La situazione illustrata nello schema di Fig. 7 – applicabile, in linea di massima, a tutti i principali corsi d'acqua dell'avanterra alpino sud-orientale – mette in risalto due principali possibilità di evoluzione della vegetazione in dipendenza di una maggiore o minore capacità di drenaggio delle acque sui depositi alluvionali a diversa granulometria (ghiaie, sabbie e limi), alle quali se ne può aggiungere una terza conseguente alla presenza antropica. La prima di queste linee è la cosiddetta serie "magredile", che si verifica in stazioni caratterizzate da suoli ghiaiosi molto permeabili, talvolta ferrettizzati, soggetti ad una forte escursione termica annua, dove il punto di arrivo è una cenosi prativa arida (steppica).

La serie "golenale" è invece la linea di evoluzione classica dei terreni rivieraschi di pianura, in origine, coperti da bosco: suolo e vegetazione vedono una rapida evoluzione che, a causa della ricchezza ed abbondanza di nutrienti, possono raggiungere rapidamente il "climax" forestale costituito dal Quercocapinetto planiziale mesofilo.

Conoscere il sistema fiume in ambiente alpino
Atti del 41.mo corso di Cultura in Ecologia

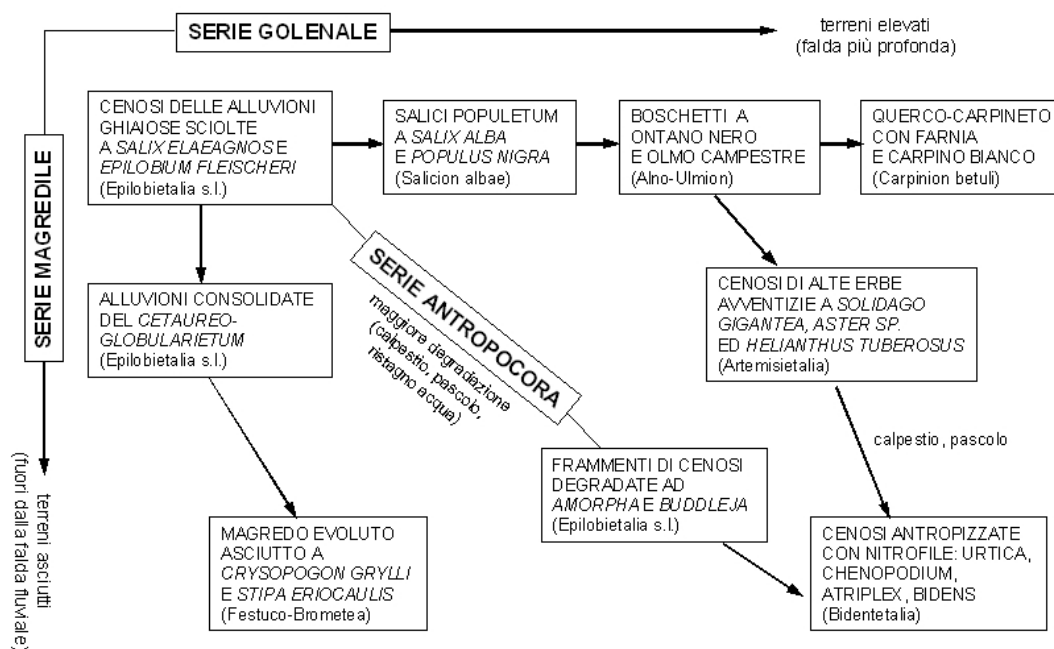


Fig. 7 – Verosimili direzioni evolutive della vegetazione ripariale tipica dei fiumi dell’avanterra alpino orientale (da Paiero et Al., 1996) (Per i livelli del sistema gerarchico fitosociologico vedi Tab. 1 e Oberdorfer, 1992).

Tab. 1 – Livelli del sistema gerarchico relativo alle associazioni presenti nel piano subalpino della bassa Venosta.

Livello	Sintaxon	Suffisso	Esempio	Famiglia	Specie
1	Associazione	-etum	Caricetum curvulae	Cyperaceae	Carex curvulae
			Festucetum halleri	Graminaceae	Festuca halleri
2	Alleanza	-ion	Caricion curvulae	Cyp./Gram.	Carex/Festuca
3	Ordine	-etalia	Caricetalia curvulae	idem	varie
4	Classe	-etaea	Caricetea curvulae	idem	varie

In genere su queste aree le comunità originarie subiscono più o meno ampie manomissioni da parte dell’uomo, così che vi è spesso un ingresso (inquinamento) di componenti avventizie o ruderali (nitrofile), dando vita alla cosiddetta serie “antropocora”. In montagna questi ambienti sono assai più semplificati per la riduzione delle componenti e l’evoluzione più lenta i cui stadi “ritornano” frequentemente al punto di partenza per vari tipi di “incidenti” (frane, erosione, smottamenti, ecc.).

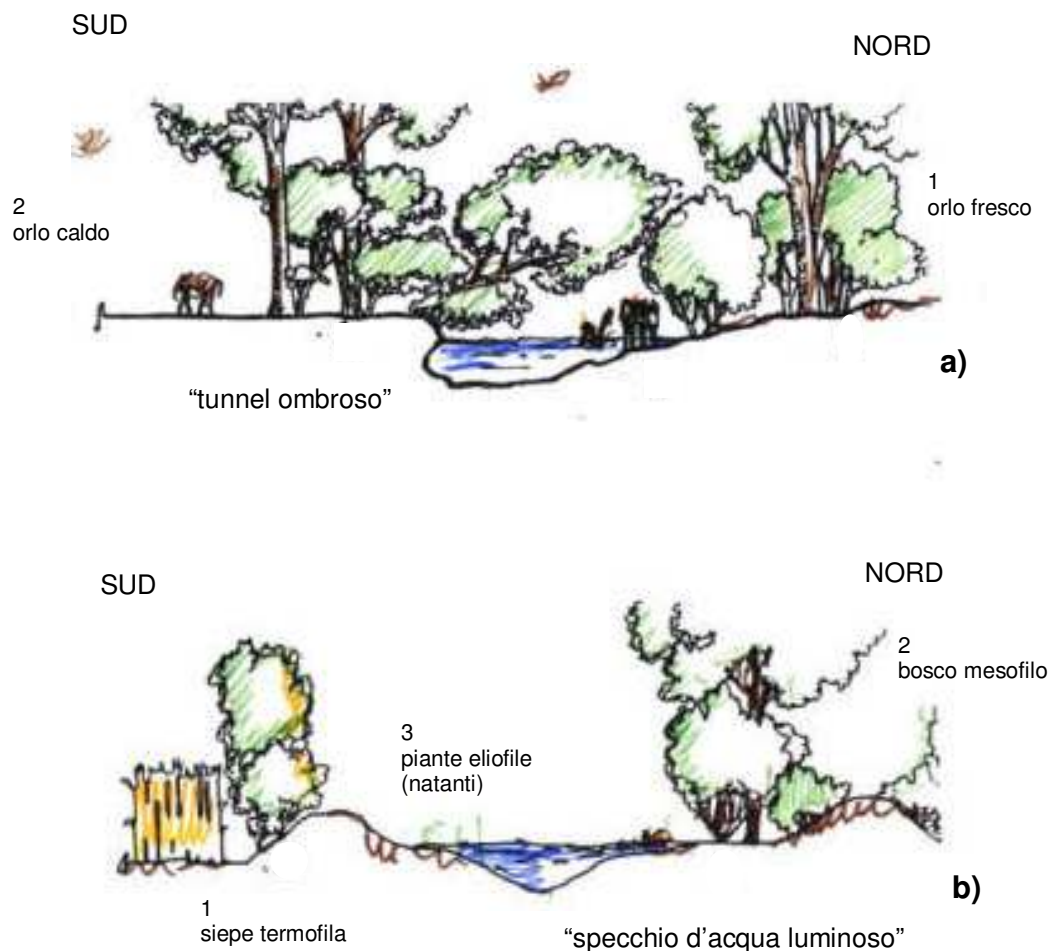


Fig. 8 – Tipi di microclimi rivieraschi condizionati dall'ampiezza del corso d'acqua:

a) alveo ombreggiato (1: lato fresco con specie mesofite e sciafile; 2: orlo caldo e ben esposto con specie termofile ed eliofile);

b) alveo ampio ed illuminato (1: siepe termofila; 2: bosco mesofilo con specie sciafile; 3: piante eliofile natanti o semisommerse).

Sempre in tema fitosociologico, è facile rendersi conto che in un'area rivierasca si possono individuare tre microclimi diversi a seconda dell'orientamento delle siepi e dei complessi alberati. A "solatio" (l'esposizione più calda ed illuminata) si trova il cosiddetto "orlo arido", composto dalle specie "eliofile" più termofile, spesso provviste di tipici adattamenti xeromorfi; mentre a "bacio" si localizza il mantello "fresco" con le specie "mesofile" e, sotto copertura, le piante "sciafile". Qualora lo specchio d'acqua risulti sufficientemente ampio, si osserva un tratto libero da vegetazione radicante - talvolta sostituita da idrofite natanti che amano la piena luce (*Ranunculus fluitans*, *Potamogeton* sp., ecc.) -, così che la superficie dell'acqua in ombra resta pulita e libera da infestanti (Fig. 8).

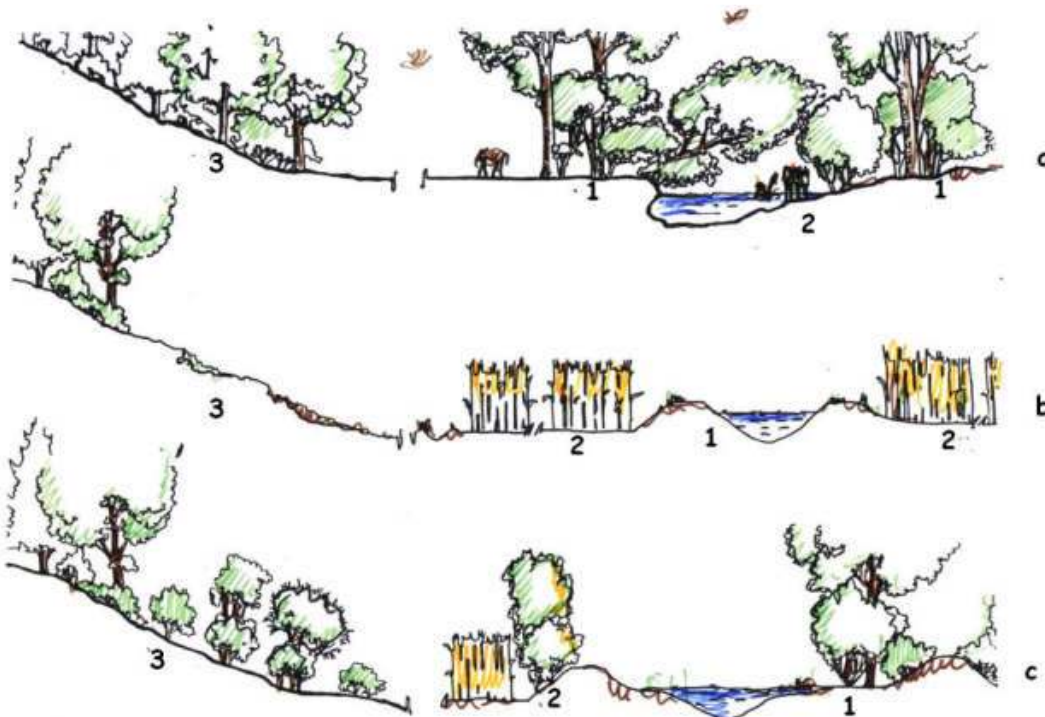


Fig. 9 - Modifiche del paesaggio e diversità ambientale: a) situazione originaria; b) l'area medesima dopo secoli di intensa antropizzazione (colture agrarie); c) il recupero ambientale ha riportato alcune componenti già scomparse (da Paiero, Semenzato, Urso, 1996).

Diversità biologica e saturazione delle specie

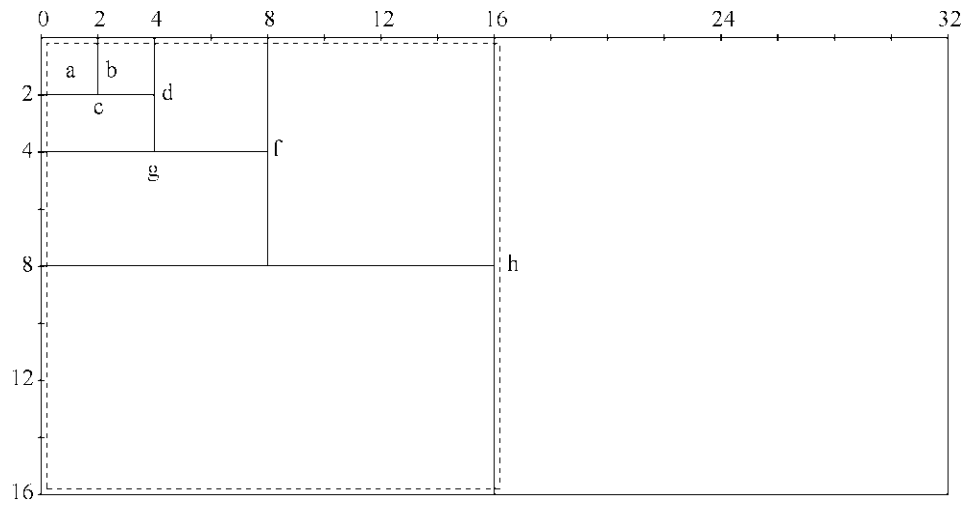
Anche se in passato la protezione ambientale si identificava spesso con la salvaguardia di singole specie in pericolo di estinzione, l'attuale filosofia conservazionistica ha messo in evidenza come una efficace tutela del paesaggio non possa prescindere dalla tutela (e ricostituzione) della complessità e diversità degli ecosistemi (Fig. 9a). E' infatti noto che l'agricoltura condotta, come avviene oggi, con criteri industriali, è la principale responsabile della progressiva riduzione della complessità dei sistemi naturali e dell'inquinamento biologico del territorio (Fig. 9b).

Se consideriamo che:

- nelle aree agricole le poche specie coltivate sono rappresentate da individui geneticamente molto simili e dotati di poche difese verso svariati parassiti;
- i consumatori sono fortemente ridotti sia perché le colture offrono meno cibo rispetto a quello normalmente a loro disposizione fuori dalle aree coltivate, sia per l'impiego di antiparassitari necessari per proteggere le produzioni;
- che i microrganismi del terreno sono quasi sempre molto scarsi, ostacolati come sono dalla trasformazione degli habitat, dall'uso di diserbanti e dalle stesse lavorazioni dei terreni;

è logico aspettarsi che in questa situazione nelle nostre campagne non vi sia più molto equilibrio tra i diversi fattori ecosistemici e che le varie componenti biologiche risultino assai carenti. Con l'impiego delle macchine, che ha imposto l'accorpamento delle aree, la bonifica dei terreni, la rettificazione e la semplificazione della rete idrografica, l'eliminazione di sorgenti, stagni, siepi ed alberate, ecc., le antiche linee del paesaggio – originatesi dopo secoli, se non millenni, di naturale evoluzione - appaiono cambiate e rese precarie, modificate come sono nelle loro componenti originarie. Se vogliamo ricostruire di nuovo un paesaggio equilibrato ed autosufficiente sarà necessario ritornare ad un minimo di vita nei campi, riportando le relative componenti paesaggistiche e ripristinando un certo grado di diversità ambientale (Fig. 9c).

Il numero delle diverse componenti dipende sempre dalla dimensione minima dei popolamenti (areale minimo dell'associazione: Fig. 10), così che l'incremento delle specie componenti una biocenosi (ad es. una siepe campestre) dipende alla fin fine dalla sua ampiezza (Fig. 11).



Area	Dimensione (m)	Sup. (mq)	Specie rilevate	Diff.
a	2 x 2	4	16	---
b	2 x 4	8	24	8
c	4 x 4	16	31	7
d	4 x 8	32	37	6
e	8 x 8	64	42	5
f	16 x 8	128	45	3
g	16 x 16	256	48	3
h	16 x 32	512	49	1

Fig. 10 – Metodo di calcolo dell'areale minimo dell'associazione.

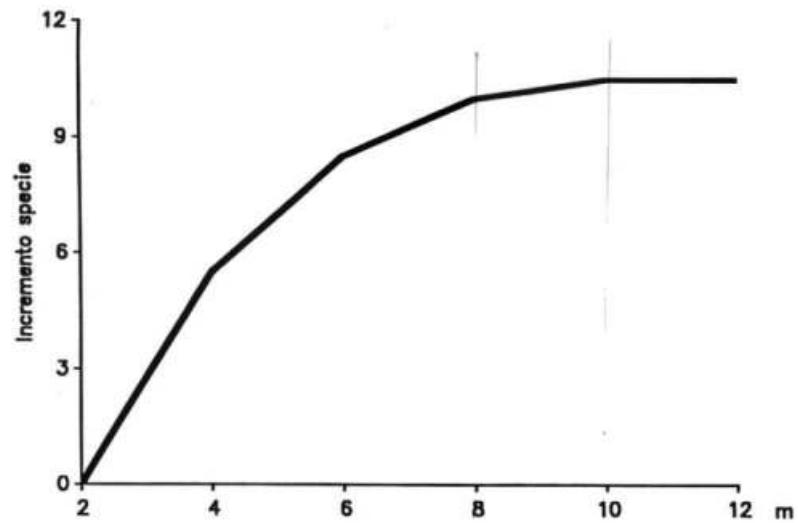


Fig. 11 - Curva delle specie in relazione all'ampiezza della biocenosi.

I tipi di bosco ripariale presenti sulle Alpi meridionali

Da quanto sopra descritto risulta che quando si parla di bosco ripariale si intende comunemente non solo l'area boscata che occupa la riva del corso d'acqua vera e propria, ma anche gli eventuali tratti di terreno adiacente (golene, versanti, compluvi, aree soggette a sommersione, ecc.) occupati da un tipo di vegetazione tendenzialmente igrofila, composta da specie con caratteristiche analoghe a quelle delle piante che occupano le aree ripariali.

Tali popolamenti - che hanno intrinsecamente un alto valore paesaggistico ed una elevata efficienza nella produzione di biomassa - non solo in pianura si presentano oggi fortemente condizionati e modificati dall'uomo con l'edificazione di argini, rettifiche dell'alveo, costruzione di manufatti difensivi di vario tipo e, naturalmente, l'eliminazione dei soprassuoli ripariali attraverso il taglio di alberi ed arbusti che - opportunamente governati -, da soli risolverebbero i vari problemi di difesa spondale e dei terreni adiacenti.

In queste stazioni lungo le rive - talvolta preceduti da popolamenti di piante erbacee e canne palustri immerse nell'acqua - troviamo quasi sempre fitte compagini di salici arbustivi (*S. cinerea*, *S. purpurea*, *S. daphnoides*, *S. elaeagnos*, *S. nigricans*, ecc.) ai quali segue una quinta di pioppi e salici arborei, costituenti l'associazione del *Salicetum albae* seguita dal *Frangulo-Salicetum* e dall'*Alnetum*, tutte associazioni queste che assicurano una valida protezione dei terreni retrostanti occupati dall'*Ulmo-Fraxinetum* e dal *Quercus-Carpinetum*. In montagna vi sono corrispondenti associazioni con componenti adatte ai nuovi ambienti, sia pure con una certa semplificazione della struttura che, da arboreo-arbustiva, passa generalmente ad arbustiva.

Le alluvioni sabbioso-ghiaiose, tipiche degli ampi alvei che solcano l'alta pianura risultano colonizzate da salici ed altre piante arbustive specializzate per questi ambienti umidi (*Salix*, *Buddleja*, *Amorpha*, ecc.).

I popolamenti ripariali d'altitudine edificano poi degli ambienti del tutto particolari: le ontanete di *Alnus incana* accolgono anche diversi salici fino ai margini del Rodoreto, dove l'ontano verde (*Alnetum viridis*) occupa i compluvi umidi dei versanti a bacio, mentre altre compagini di salice (*Salicetum waldsteinianae*, *S. helveticae*) contornano le aree umide presso sorgenti, paludi, torbiere, ecc. Le sponde rocciose dei torrentelli ospitano caratteristiche cenosi criofile, anticipando le vegetazioni tipiche dei suoli e delle vallette nivali (*Salicetum retuso-reticulatae*, *S. herbaceae*).

Sui suoli rocciosi dei substrati calcareo-dolomitici, dominano le specie calcifile quali *Salix glabra*, *S. alpina*, *S. waldsteiniana* e *S. mielichhoferi*. Il primo di questi, tendenzialmente termofilo, colonizza solitamente i macereti delle conoidi stabilizzate, mentre *S. alpina* è un elemento microtermo legato ai suoli calcarei primitivi (rendzina) sui quali caratterizza una fase evoluta del *Caricetum firmae*. Infine, nel piano alpino, sulle rocce sia di origine calcarea che silicea, si stabilisce l'habitat prediletto dal salice prostrato per eccellenza: *Salix serpyllifolia* (Fig.12), che da vita a caratteristici ed estesi tappetini verdi (MARTINI, PAIERO, 1988).



Fig. 12 - Ghiaione colonizzato da salici.

ADATTAMENTI DELLE PIANTE LEGNOSE ALL'AMBIENTE RIPARIO

Adattamenti morfofunzionali

Le piante che crescono lungo un fiume o attorno ad uno stagno hanno a disposizione acqua in abbondanza per la maggior parte dell'anno, grazie ad una ricca falda che viene rifornita direttamente per imbibizione dal vicino corso d'acqua, mentre i terreni golenali adiacenti restano sempre umidi a causa delle piene che, periodicamente, possono arrivare a sommergerli. Tuttavia questo tipo di habitat, apparentemente ideale per la vegetazione, presenta alcune peculiarità che possono ostacolare la colonizzazione da parte di piante non provviste di specifici adattamenti (Mariani Colombo P., Paiero P., 1988; Paiero, Calvino, Urso, 1993).

Innanzitutto il ristagno di acqua sul terreno impedisce i regolari scambi gassosi a livello radicale. L'anossia radicale viene evitata da alcuni salici attraverso lo sviluppo di radici avventizie alla base del fusto, così da favorire l'apporto di ossigeno alle radici e lo smaltimento di eventuali prodotti tossici. Questo tipo di adattamento non è presente nei pioppi, come dimostra la loro nota scarsa resistenza alla sommersione.

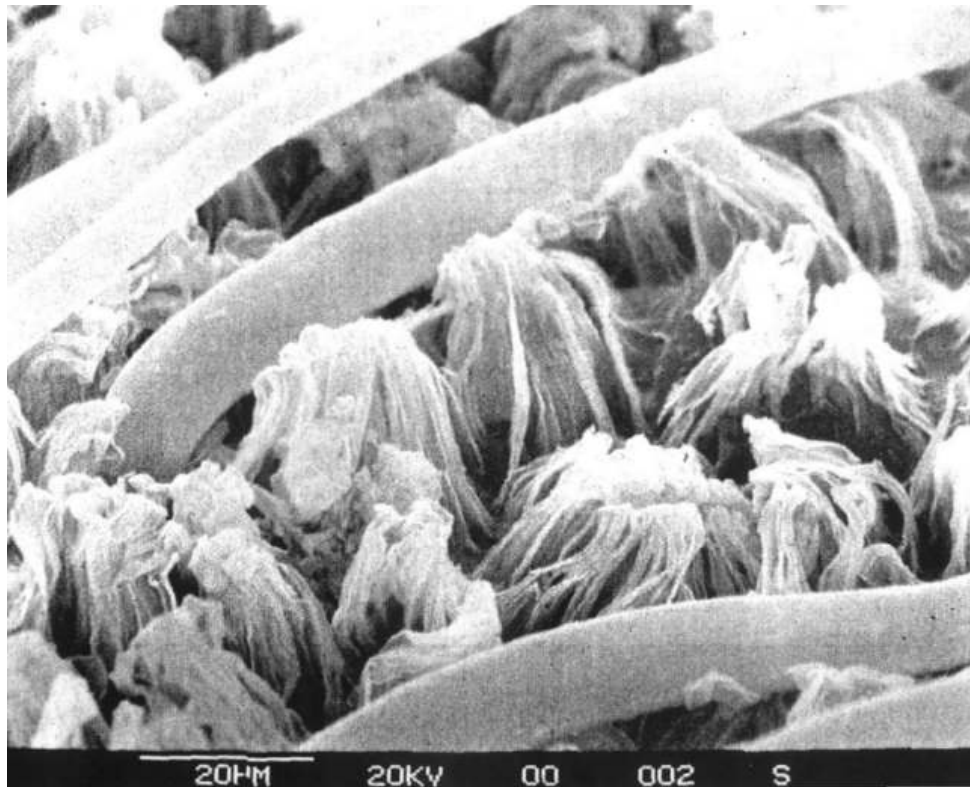


Fig. 13 – Copertura cerosa e peli sulla pagina inferiore di una foglia di salice bianco (*Salix alba*) (x 800).

Non solo l'abbondanza d'acqua ma anche la temporanea carenza può diventare un problema per le piante, quando d'estate, nei periodi di magra, la falda si abbassa al di sotto della portata delle radici: le piante delle aree ripariali, di norma abituate ad avere sempre acqua, possono trovarsi a dover sopportare anche un periodo "secco" più o meno lungo.

Per superare questi periodi critici le piante devono innanzitutto ridurre al minimo le perdite d'acqua per traspirazione dalla lamina fogliare, processo che ha un preciso scopo fisiologico, poiché è responsabile dell'assorbimento dell'acqua da parte delle radici ed abbassa al tempo stesso la temperatura delle foglie. La traspirazione avviene sia attraverso le aperture stomatiche sia attraverso la cuticola: ma mentre la prima può essere regolata dall'apertura e chiusura degli stomi, la seconda non è controllabile. Ecco quindi che molte piante presentano adattamenti a livello

cuticolare che diminuiscono quest'ultima perdita d'acqua: questi adattamenti di tipo morfologico sono i peli e speciali secrezioni ceroso epicuticolari che possono essere anche molto sviluppate.

Cere molto sviluppate compaiono anche sulle foglie dei salici di ripa, soprattutto sulla pagina inferiore, dove si presenta sotto forma di lamine disposte verticalmente che possono arrivare a coprire la rima stomatica, proteggendola così dall'aria calda e secca senza per questo occluderla del tutto (Fig. 13); i peli poi creano anche uno spesso strato feltroso (salici e pioppi), più evidente sulla pagina inferiore. Peli e cere fanno assumere alle foglie un caratteristico colore biancastro che riflette le radiazioni nocive (ultraviolette e infrarossi), oltre a dare un certo isolamento ed ombreggiamento alla stessa superficie fogliare (KRAMER P., KOZLOWSKI T., 1979).

La simbiosi micorrizica

Un adattamento particolare delle piante che colonizzano ambienti difficili può essere considerata la simbiosi con altri organismi vegetali. Per micorrizza si intende l'associazione simbiotica mutualistica che si realizza tra funghi del suolo e radici in una pianta superiore (Fig. 14).

Mediante la micorrizza entrambi i "partners" conseguono consistenti vantaggi: il fungo - organismo chemioeterotrofo, cioè utilizzatore di composti organici già elaborati -, ottiene dalla pianta verde il nutrimento carboidratico e, in cambio, ne permette una crescita più equilibrata e sicura attraverso l'ampliamento dell'assorbimento radicale di nutrienti inorganici e dell'acqua, un maggiore apporto di vitamine e sostanze della crescita, l'inibizione di patogeni radicali ed un aumento generale della resistenza della pianta alla siccità e alle temperature estreme del suolo.

Inaspettatamente anche in un ambiente ricco d'acqua ed apparentemente fertile, quale quello ripariale, quasi tutte le componenti arboree ed arbustive sono dotate di simbiosi micorriziche. La presenza di micorrize è stata accertata in diverse specie di salice (es. *Salix caprea*, *S. purpurea*, *S. repens*, *S. viminalis*, ecc.) e di pioppi (es. *Populus nigra* e *P. deltoides*).

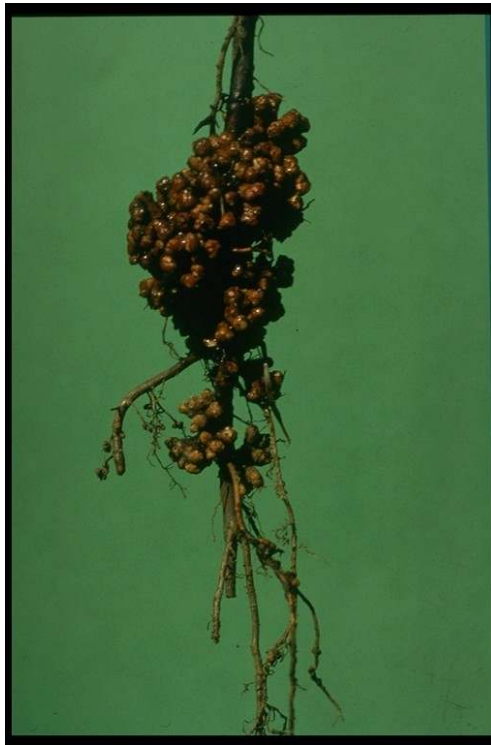


Fig. 14 – Tubercoli radicali in radice di ontano bianco.

In selvicoltura le micorrize possono essere utilizzate per raggiungere due obiettivi. Il primo

mira all'incremento della produzione di funghi commestibili, il che, nel caso delle Salicacee, si traduce nella possibilità di creare tartufaie artificiali nelle zone tipiche. Il secondo e più importante obiettivo è diretto a garantire una crescita regolare delle piante legnose che devono crescere in zone difficili. Nel caso di rimboschimenti e, più ancora, qualora si intenda destinare a bosco terreni incolti, prativi o abbandonati dalle colture agrarie o da altre attività, come quelle minerarie ed estrattive (cave dismesse), il successo della piantagione può venir favorito dalla presenza di funghi micorrizogeni: poiché le Salicacee svolgono di norma un ruolo importante nella protezione del suolo, la presenza di micorrize sulle radici è risultata di fondamentale importanza per la crescita di salici e pioppi sui terreni carboniferi sia in Europa che in America fino alle regioni artiche ed alpine. Dal momento che molte specie di alberi, tra i quali salici, pioppi ed ontani – generi di piante che formano normalmente micorrize –, sono tipici di terreni soggetti a periodiche sommersioni, si può verosimilmente supporre che tale adattamento risulti vantaggioso anche in questi habitat.

Nei lavori di rinaturalizzazione di corsi d'acqua risulta quindi di estrema importanza che il materiale di salice, ontano o altre specie sia già provvisto di micorrize onde facilitare l'affermazione delle nuove piantagioni, accelerando così la ricostruzione dei popolamenti ripariali originari al fine di un rapido ripristino degli equilibri idrogeologici già interrotti.



Fig. 15 – Vegetazione rivierasca lungo il Fiume Bacchiglione (Padova)

L'AMBIENTE RIPARIALE E L'UOMO

Indirizzi di tutela e conservazione dell'ambiente ripariale

Lo studio degli indirizzi di questi interventi devono essere dimensionati caso per caso e possono essere molto diversi in relazione a:

- i corsi d'acqua di pianura (Fig. 15);
- il torrente di montagna (Fig. 16);
- gli ambienti più elevati (aree subalpine con praterie e malghe) (Fig. 17).

Ogni intervento di recupero conservativo di ambienti degradati dovrebbe iniziare dall'individuazione dei vari fattori perturbativi degli equilibri naturali, siano essi di ordine geomorfologico, antropico o di altro genere. Nel caso degli ambienti rivieraschi si dovrà innanzitutto tener presente le modificazioni del regime idrico conseguente a prelievo di acque, canalizzazioni ed altre opere di regimazione che, anche se localizzate lontano dall'area in esame, possono causare importanti conseguenze sui sistemi ambientali sottostanti.

La realizzazione degli interventi di ricostruzione dovrà quindi essere preceduta da una serie di indagini conoscitive secondo sequenze già ben sperimentate, simili a quelle suggerite da AMADEI et AL. (1990) per il recupero di un'area golenale lungo il F. Reno, compresa nel Bosco Panfilia (Ferrara), come sotto riportato:

- studio fitosociologico delle associazioni vegetali;
- ricomposizione delle successioni dei vari habitat;
- individuazione dello stadio vegetazionale attuale;
- selezione dello stadio e relative associazioni valide per la ricostruzione;
- selezione delle componenti ecologicamente e biologicamente più adatte per la riedificazione dello stadio prescelto;
- scelta delle tecniche agronomiche e selvicolturali appropriate.



Fig. 16 – Ontaneti lungo il Fiume Inn (Bassa Engadina).

Per quanto riguarda le opere di manutenzione e consolidamento nel breve e lungo periodo merita considerare quanto suggerito da MARTINI, POLDINI (1981) per il caso del Noncello a Pordenone.

In genere le opere di recupero di terreni degradati si basano quasi sempre su interventi assai semplici, sia in fase di realizzazione delle piantagioni sia nei successivi lavori di manutenzione.

L'impiego di specie con spiccate caratteristiche di colonizzatrici è sempre di fondamentale importanza per le riuscita dei lavori, così che, nella maggior parte dei casi, l'esito dipende più da una corretta progettazione con una oculata scelta delle componenti, piuttosto che dall'applicazione di tecniche colturali sofisticate e costose. Per es. è preferibile mettere a dimora talee di salice di sicuro e pronto effetto piuttosto che realizzare piantagioni di specie pregiate in pane di terra, che poi devono essere sostenute con interventi costosi e difficili da realizzare (irrigazioni, concimazioni, potature, sfalcio delle infestanti, disinfezioni e trattamenti antiparassitari).

In ogni caso si dovrà badare che:

- le specie risultino ecologicamente compatibili con il nuovo ambiente;
- le varietà corrispondano ad ecotipi autoctoni;
- il postime da mettere a dimora sia robusto e ben conformato;
- è preferibile che le specie più pregiate sia messo a dimora con il pane di terra;
- possibilmente le piantine siano già micorrizzate;
- siano previste semplici pratiche agronomiche di sostegno per facilitare il primo attecchimento delle piantine.

La selezione delle specie e dei materiali utili per gli interventi di ricostruzione del verde ripariale deve innanzitutto tener conto di tutte quelle caratteristiche che rendono le piante meglio adatte al consolidamento del suolo, senza dimenticare le specifiche condizioni ambientali della stazione, nonché le specifiche esigenze paesaggistiche del territorio (Fig. 18).



Fig.17 - La Dora di Verney sotto il Piccolo S. Bernardo (Aosta)

Lo studio preliminare delle comunità vegetali e delle relative forme biologiche esistenti nel territorio costituisce, come si è detto, uno strumento fondamentale per una corretta selezione delle componenti più valide, sia dal punto di vista bioecologico sia da quello paesaggistico. Così per garantire una duratura funzionalità degli interventi di restauro conservativo di un'area degradata, si dovranno realizzare nuovi soprassuoli il più possibile vicini a quelli delle cenosi climatiche e/o agli stadi durevoli ivi già presenti, cioè costituiti da elementi in armonia con le condizioni ambientali del territorio (Tab. 2).

Particolare attenzione andrà rivolta all'utilizzazione di entità specifiche e sottospecifiche autoctone, così da evitare ogni possibile "inquinamento" floristico per aver utilizzato specie estranee provenienti da regioni geograficamente distanti dalle nostre, o varietà ed ecotipi di specie che, pur presenti nell'area considerata, presentano un "genotipo" diverso da quello selezionatosi localmente.



Fig. 18 - Antiche briglie di larice lungo il Rio Funes (Bolzano).

Tab. 2 - Caratteristiche sinecologiche e stagionali di alcune specie utili nella ricostruzione degli habitat rivieraschi.

Specie	Associazione (1)	Piano altitudinale (2)
<i>Pinus nigra</i>	Orno-Pinetum nigrae	montano inferiore
<i>Pinus montana</i>	Erico-Mugetum	subalpino
<i>Juniperus communis</i>	Quercetum pubescentis-petraeae (Crysopegonum grylli)	basale-subalpino
<i>Salix alba</i>	Salicetum albae	basale-montano
<i>Salix triandra</i>	Salicetum triandrae	basale-montano
<i>Salix nigricans</i>	Alnetum incanae (Salicetum eleagno-daphnoidis)	montano
<i>Salix glabra</i>	Salicetum glabrae	montano-snbalpino
<i>Salix appendiculata</i>	Alnetum viridis (Alno-Salicetum appendiculatae)	montano-subalpino
<i>Salix cinerea</i>	Frangulo-Salicetum cinereae	basale-montano
<i>Salix caprea</i>	Quercu-carpinetum s.l. (Abieti-Fagetum)	basale-montano
<i>Salix waldsteiniana</i>	Salicetum waldsteinianae	montano-subalpino
<i>Salix eleagnos</i>	Salici-Myricarietum (Salicetum eleagni)	basale-montano
<i>Salix purpurea</i>	Saponarieto-Salicetum purpureae (Salici-Myricarietum)	basale-montano
<i>Salix daphnoides</i>	Salici-Myricarietum	basale-montano
<i>Populus alba</i>	Salici-Populetum albae	basale-montano
<i>Populus nigra</i>	Salici-Populetum	basale-montano
<i>Populus tremula</i>	Alnetum incanae	montano
<i>Betula pendula</i>	boschi degradati e prati abbandonati	basale-montano
<i>Betula pubescens</i>	brughiere, paludi e torbiere	montano
<i>Alnus glutinosa</i>	Frangulo-Salicetum cinereae	basale
<i>Alnus incana</i>	Alnetum incanae	montano
<i>Alnus viridis</i>	Alnetum viridis	montano-subalpino
<i>Rosa canina</i>	Quercetum pubescentis-petraeae	basale-montano
<i>Rubus idaeus</i>	Anemone trifoliae-Fagetum/Abieti-Fagetum (Piceetum subalpinum)	montano
<i>Rubus ulmifolius</i>	Quercetum pubescentis petraeae	basale-montano
<i>Rubus caesius</i>	Quercetum pubescentis petraeae	basale-montano
<i>Pyrus pyraeaster</i>	Quercu-carpinetum s.l. (Anemone trifoliae-Fagetum)	basale-montano
<i>Malus sylvestris</i>	Quercu-carpinetum s.l.	basale-montano
<i>Sorbus aucuparia</i>	Abieti-Fagetum/Picetum s.l. (Erico-Mugetum)	montano-subalpino
<i>Amelanchier ovalis</i>	Quercetum pubescentis (Erico Mugetum)	basale-montano
<i>Cotoneaster nebrodensis</i>	Quercetum pubescentis (Erico Mugetum)	basale-montano
<i>Prunus spinosa</i>	Quercetum pubescentis	basale-montano
<i>Prunus avium</i>	Quercu-carpinetum s.l.	basale-montano
<i>Prunus padus</i>	Alnetum incanae (Salicetum eleagno-daphnoidis)	montano
<i>Laburnum anagyroides</i>	Quercetum pubescentis-petraeae (Orno-Ostryetum)	basale-submontano
<i>Laburnum alpinum</i>	Anemone trifoliae-Fagetum (Ostryo-Fagetum)	montano
<i>Lembotrops nigricans</i>	Quercetum pubescentis (Orno-Ostryetum)	basale-montano
<i>Chamaecytisus hirsutus</i>	Crysopegonum grylli (Ostryo-Quercetum pubescentis)	basale-montano
<i>Genista tinctoria</i>	Quercetum pubescentis-petraeae (Orno-Pinetum nigrae)	basale-montano
<i>Genista germanica</i>	Calluno-Genistetum (Quercetum pubescentis-petraeae)	basale-montano
<i>Genista pilosa</i>	brughiere e prati aridi	montano
<i>Spartium junceum</i>	Quercetum pubescentis (Quercetum ilicis/Genistetum)	basale-montano
<i>Colutea arborescens</i>	Quercetum pubescentis	basale-montano
<i>Amorpha fruticosa</i>	Salici populetum (Salici-Myricarietum)	basale-montano
<i>Coronilla emerus</i>	Orno-Ostryetum	basale-montano
<i>Frangula alnus</i>	Quercu-Carpinetum s.l. (Anemone trifoliae-Fagetum)	basale-montano
<i>Hippophae rhamnoides</i>	Hippophaetum	basale-montano
<i>Fraxinus ornus</i>	orno-ostrieti (Orno-Pinetum nigrae)	basale-montano
<i>Buddleja davidii</i>	sinantropica	basale-montano
<i>Viburnum opulus</i>	Salici-Populetum / Ulmo-Fraxinetum (Fagetum s.l.)	basale-montano
<i>Viburnum lantana</i>	Quercetum pubescentis / Orno-Pinetum nigrae	basale-montano

(1) Associazioni vegetali secondo Oberdorfer (1992);

(2) Il piano altitudinale è quello proposto da Giacomini, Fenaroli (1958)

CONCLUSIONI

Per recuperare un ambiente degradato occorre ricostruirne le rispettive componenti partendo da quelle che la natura mette a disposizione. Davanti a noi infatti il paesaggio dispiega i suoi modelli naturali, evolutisi attraverso secoli e millenni. Un buon metodo di studio della vegetazione è quello fitosociologico che, partendo dalla singola comunità vegetale (l'associazione), risale alla serie degli stadi attraverso i quali le fitocenosi si evolvono verso i rispettivi climax caratteristici.

Nelle zone dove il clima temperato determina una lunga stagione vegetativa, si sviluppano i boschi di latifoglie decidue che rinnovano la chioma di anno in anno. Là dove il clima è meno favorevole e l'estate breve, compare la foresta di aghifoglie. Così ad ogni livello altitudinale vi sarà un tipo di vegetazione e relative forme biologiche via via adattate alle specifiche condizioni stagionali. **Sta a noi utilizzare bene ciò che la natura ci mostra!**

BIBLIOGRAFIA

- AMADEI S., PAIERO P., PRETO G., 1990 - Il bosco Panfilia. *Monti e Boschi*, 4(5): 25-33.
- CARRARO V., 1998 - Vegetazione e flora del Parco del Sile. Canova, Treviso.
- GIACOMINI V., FENAROLI L., 1958 - La Flora. *Conosci l'Italia*, Vol. 2, T.C.I., Milano.
- KRAMER P., KOZLOWSKI T., 1979 - *Physiology of woody plants*. Academic Press, N.Y.
- MARIANI COLOMBO P., PAIERO P., 1988 - Alcune considerazioni sull'autoecologia del genere *Salix*.
L. Scritti di Selvicoltura in onore di Alessandro De Philippis: 197-208.
- MARINELLI O., 1896 - Una particolarità relativa ai limiti altimetrici dei fenomeni fisici e biologici nelle Alpi. *Riv. Geogr. Ital.*, 3: 559-562.
- MARTINI F., PAIERO P., 1988 - I salici d'Italia. Lint, Trieste.
- MARTINI F., POLDINI L., 1980 - Il paesaggio vegetale del F. Noncello nell'area urbana di Pordenone. *Gortania*, 2:123-156, Udine.
- MINARDI P., PAIERO P., 1995 - Importanza delle simbiosi batteriche attinorizziche in selvicoltura. Atti della giornata di studio sugli imboschimenti a prioritaria funzione ambientale di terreni di pianura. Padova : 26 Novembre 1994, Regione del Veneto, Mestre (VE).
- OBERDORFER E., 1992 - *Suddeutsche Pflanzengesellschaften*. IV, Fischer Verlag, Jena
- ODUM E. P., 1971 - *Fundamentals of Ecology*. Holt, Rinehart and Winston, Inc., London.
- PAIERO P., CALVINO A., URSO T., 1993 - La vegetazione ripariale dei nostri fiumi: caratteristiche biologiche ed aspetti ambientali. In: Paiero P., *Criteri di ricostruzione della vegetazione forestale lungo i corsi d'acqua*. Regione del Veneto, Mestre (VE).
- PAIERO P., SEMENZATO P., URSO T., 1996 - *Biologia vegetale applicata alla tutela del territorio*. Ed. Progetto, Padova.
- QUERINI R., 1989 - Analisi dei severi limiti posti dalla piogge intense alla idrologia forestale nelle Alpi Carniche e Giulie: *Ass.It. Idronomia*. Quaderno di Idron. Montana n.8:139-167.
- ZENARI S., 1950 - *Elementi di Fitogeografia*. CEDAM, Padova.

**CONOSCERE LA VEGETAZIONE RIPARIA: L'INFLUENZA DEL
REGIME IDROLOGICO E DELLA MANUTENZIONE**

Antonio ANDRICH

Dottore Forestale

PREMESSA

Il "sistema fiume" con l'acqua, l'alveo, le sponde e le rive costituisce un variegato insieme di habitat per un elevato numero di organismi viventi. Modellati dagli agenti atmosferici ed in base alle caratteristiche litologiche delle zone attraversate, i corsi d'acqua presentano una notevole diversità strutturale che conferisce a ciascun fiume una propria "personalità". Tenuto conto dei fenomeni di erosione, di trasporto e, analogamente, di deposito, la morfologia dell'alveo dei corsi d'acqua si evolve continuamente e con essa gli assetti ecosistemici sia da un punto di vista strutturale che funzionale. Secondo i criteri del dinamismo idro-morfologico i fiumi si possono distinguere tre principali tratti (Lachat 1991),

a - alvei di montagna: situati in formazioni rocciose e caratterizzati da un'azione erosiva o di scavo;

b - alvei di collina: nel corso d'acqua diminuisce la forza erosiva ed inizia la fase di deposito dei materiali più grossolani (ciottoli, ghiaia), mentre l'alveo che si viene a formare è ampio, ramificato, intrecciato ed a morfologia instabile (durante le piene, il fiume può modificare la forma ed il tracciato piuttosto rapidamente);

c - alvei di pianura: questi tratti dei fiumi sono caratterizzati da profili rettilinei che tendono, verso la foce, a creare anse e meandri facendo assumere al corso d'acqua un tracciato sinuoso.

Ognuno di questi tratti è caratterizzato anche dalle componenti biologiche: in primis la fauna e la flora. Per quel che concerne quest'ultima, in relazione alle condizioni morfologiche, alla quota e soprattutto al regime idraulico dei corsi d'acqua, va evidenziato che la vegetazione fluviale si distribuisce in associazioni e serie dinamiche nel tempo e nello spazio. Ad esempio le briofite (muschi) colonizzano, spesso le superfici a contatto con l'acqua; le piante erbacee superiori raramente sono in grado di vivere nelle acque correnti più o meno rapide, ma alcune eccezioni sono rappresentate, ad esempio, da: Callitriche, Myriophyllum e Ranunculus; fossi, canali e fiumi a corrente lenta sono più adatti, invece, allo sviluppo di altri vegetali acquatici quali le idrofite (Elodea, Glyceria, Nymphaea, Nuphar e Potamogeton).

Le elofite o vegetali semiacquatici, tipici delle rive (Carex, Petasites, Phragmites, Schoenoplectus e Typha) per difendersi dalla forza della corrente hanno sviluppato sistemi radicali molto efficaci.

Gli arbusti, soprattutto appartenenti al genere Salix, si insediano successivamente, mentre gli alberi occupano aree ancora più distanti dall'alveo di magra formando tipiche cenosi forestali.

Le specie vegetali che colonizzano le zone inondabili vengono periodicamente selezionate dalle piene in quanto sono soggette ad alcuni fenomeni fisici limitanti quali:

a - l'effetto meccanico della trazione;

b - la sommersione ed il relativo prolungato ristagno idrico nel suolo;

c - l'apporto di materiali organici e minerali (limi, ecc.);

d - le variazioni del livello della falda acquifera

La vegetazione riparia, oltre a costituire un ambiente naturale di fondamentale importanza per la sopravvivenza di numerose specie animali legate all'ecosistema fluviale, è in grado di ridurre i carichi inquinanti (nitrati e fosfati) provenienti dalle aree agricole limitrofe (fasce tampone).

Ma l'aspetto di un corso d'acqua dipende anche dagli interventi operati dall'uomo. Nella maggior parte dei paesi industrializzati i corsi d'acqua hanno subito pesanti interventi di "regimazione" ed i tratti rimasti ancora naturali sono diminuiti drasticamente negli ultimi decenni.

Va inoltre evidenziato l'aspetto che concerne l'utilizzo delle risorse idriche: un grave problema, tuttora insoluto, è quello degli eccessivi prelievi di ingenti quantità d'acqua resi possibili, ad esempio, dai grandi sbarramenti o dalle derivazioni idriche, per svariati usi (agricoli, artigianali, industriali o domestici), in quanto le portate di restituzione, chiamate anche residuali, non consentono il mantenimento di un sufficiente equilibrio ecologico del corso d'acqua. La gestione dei prelievi e delle restituzioni all'interno delle rete idrografica è uno degli aspetti di chiaro interesse antropico che condiziona in modo importante lo sviluppo della vegetazione alveale e quindi le interazioni con il regime idrologico e la gestione degli interventi di manutenzione.

REGIME IDROLOGICO E CENOSI RIPARALI

L'ecosistema fluviale o torrentizio è generalmente un ambiente complesso, un sistema ecologico con dinamiche spaziali e temporali che si intrecciano in un continuo rincorrersi di equilibri mai definitivi. L'ambiente alpino è costituito da una rete idrografica, all'interno della quale si distingue un reticolo di corsi d'acqua con dinamiche attive e condizionate in modo importante dalla morfologia, dal substrato litologico e geologico e dalle opere idrauliche realizzate dall'uomo negli ultimi 100 anni.

All'interno dei bacini montani si può distinguere in modo chiaro un reticolo di primo livello, costituito essenzialmente dal corso d'acqua principale (ad esempio riferendosi alla realtà della provincia di Belluno: il T. Cismon, il T. Cordevole, il T. Boite, il Piave stesso, ecc.) seguito da livelli di secondo e terzo ordine che evidenziano una certa varietà ambientale e si distinguono sia sotto il profilo morfologico che vegetazionale e paesaggistico, per arrivare fino ai solchi erosivi (figura 1) che si generano a livello della testata dei bacini.



Figura 1. articolazione della rete idrografica minore nel bacino del T. Cismon

Accanto all'acqua, l'elemento vitale e origine di ogni dinamica, ci sono le sabbie, le ghiaie, i ciottoli che disegnano le linee morfologiche del greto, la vegetazione con i popolamenti pionieri a carattere erbaceo ed arbustivo, i boschi ripariali che sfumano nelle formazioni vegetazionali dei versanti laterali delle vallate, le rupi boscate, i detriti di falda e le forre.

La variabilità connessa al regime idrologico implica di fatto continue modificazioni, a volte anche repentine, che influiscono sui vari elementi della cenosi; anche se l'aspetto che colpisce maggiormente è il continuo ridisegno della morfologia e della vegetazione che implica spesso una variabilità nei popolamenti pionieri sia in termini spaziali che di composizione. Il torrente determina quindi la periodica costruzione e distruzione di habitat non favorendo la naturale successione ecologica; viceversa rimescolando spesso le situazioni favorisce un continuo ringiovanimento delle cenosi vegetali quasi in un gioco ciclico di ricolonizzazione delle superfici vergini che emergono dopo ogni evento di piena.

Le cenosi vegetali dislocate lungo un corso d'acqua costituiscono molto spesso un tipo di vegetazione azonale relativamente indipendente dall'effetto altitudine. Vale a dire che le sue componenti non sono state selezionate tanto dal clima generale o locale quanto dal regime delle acque,

che condiziona la genesi del suolo, la disponibilità idrica ed il rifornimento di sostanze nutritive (Paiero, 1991).

Portata e velocità dell'acqua in particolare determinano il continuo modellamento dell'idrosistema e generano delle risposte da parte delle componenti biotiche del sistema, la cui conoscenza e la cui comprensione sono alla base di una corretta pianificazione e gestione dell'ambito fluviale o torrentizio. Non solo la portata ma anche la sua variabilità influisce sulla morfologia del corso d'acqua e conseguentemente sullo sviluppo delle formazioni ripariali.

Molte delle superfici boscate sono in un certo senso un'espressione provvisoria; in particolar modo le formazioni pioniere vengono spazzate via o completamente ridimensionate al passaggio delle piene ordinarie primaverili e autunnali.

Nelle situazioni in cui la pianura alluvionale del torrente si fa più ampia vi è la tendenza a formare dei grandi depositi laterali ed a volte longitudinali (figura 2), che vengono coinvolti dagli eventi di piena in funzione dell'altezza che raggiungono rispetto al piano di scorrimento delle acque. I depositi alluvionali che raggiungono i 2-3 m di altezza vengono ricoperti da boschi di una certa maturità in particolare dove l'alveo raggiunge larghezze considerevoli. Sono queste le aree meno influenzate dalla dinamica torrentizia e non a caso qui si sviluppano le formazioni più interessanti da un punto di vista ecologico, naturalistico e paesaggistico.



Figura 2. saliceto su terrazzo alluvionale del t. Cordevole

A condizionare la morfologia dell'alveo, e conseguentemente la distribuzione della vegetazione riparia, non è solamente la portata liquida ma anche il trasporto solido. Anzi i fenomeni di trasporto oltre a stravolgere completamente la fisionomia dell'alveo, condizionano pesantemente le traiettorie dell'acqua durante e dopo gli eventi di piena.

Si cita ad esempio quanto successo lungo l'asta della bassa valle del T. Cordevole durante il fenomeno alluvionale dell'autunno 2000, durante il quale sono stati misurati circa 1000 mm di pioggia, tra ottobre e novembre, sia nella stazione pluviografica di Agordo che in quella di Sospirolo. In questo caso l'eccezionalità dell'evento è stato nella durata complessiva delle piogge e nella conseguente continuità dei deflussi sopra la soglia di trasporto. Ciò significa che per circa due mesi il

torrente è stato in una condizione idraulica di morbida prolungata con continuo trasporto di materiale. In altri casi un effetto simile si è avuto con la realizzazione di piogge molto intense e concentrate in brevi periodi e portate al colmo notevoli caratteristiche di tempi di ritorno molto più lunghi (Andrich et al., 2001). Le modifiche in almeno due aree boscate, apparentemente stabili e colonizzate da vegetazione forestale, lungo la valle sono state pesanti (Figura 3) e questo ovviamente deve far riflettere sia sulle cause degli eventi, sia sul ruolo e sulla gestione della vegetazione ripariale in relazione al regime delle acque.

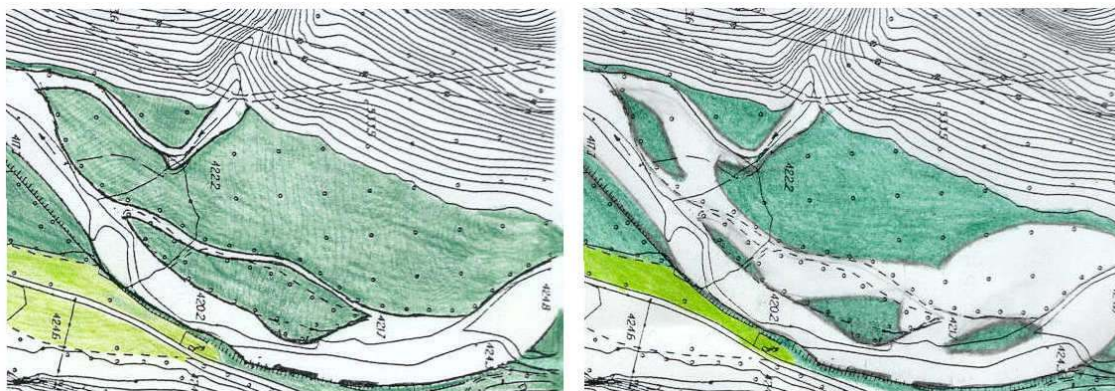


Figura 3. esempio di riduzione della superficie a bosco dopo un evento alluvionale. Val Fogarè lungo la Val Cordevole, estate 2000 e primavera 2001

La naturalità delle associazioni pioniere più volte sottolineata, deve essere quindi valutata anche in riferimento al regime idraulico. In generale un regime controllato ad esempio dai prelievi dell'Enel, può favorire uno sviluppo eccessivo di questi popolamenti in sezioni "sensibili" dal punto di vista della sicurezza idraulica. La carenza di morbide favorisce uno sviluppo eccessivo dei popolamenti che raggiungono altezze troppo elevate in relazione al rischio idraulico. La vegetazione che viene trascinata dalla corrente durante le piene, infatti, può essere una causa di esondazione, come anche di sbarramenti effimeri che poi si traducono in ondate di piena particolarmente distruttive.

Ecco spiegata anche la presenza di grandi quantità di materiale vegetale lungo i greti dato dall'intreccio di radici, ramaglia e tronchi che fungono da accumulo di sostanza organica e da isole di propagazione sia per la colonizzazione da seme che per via agamica (ricaccio di talee dalle gemme avventizie di salici, pioppi ed ontani).

Molto spesso c'è una situazione di presenza diffusa della vegetazione all'interno degli alvei, ma le interferenze tra il regime delle acque e la vegetazione riguardano sostanzialmente la rete secondaria e le zone maggiormente antropizzate.

LA VEGETAZIONE PIONIERA ALVEALE

L'alveo del torrente è sempre un ambiente dinamico all'interno del quale i filoni della corrente corrono disegnando andamenti meandriformi, tra i depositi alluvionali, i detriti grossolani, gli accumuli di ramaglia e le superfici rivestite da vegetazione. I torrenti in ambito alpino sono caratterizzati, in particolare, da un notevole trasporto solido di ghiaie e ciottoli. Durante gli eventi di piena l'azione erosiva della corrente si alterna ai fenomeni di deposito dando luogo a sponde quasi verticali e ad accumuli che si alzano anche di 2-3 m rispetto alla quota del talweg.

Le zone centrali del greto sono perciò continuamente rinnovate, mentre le porzioni vegetate sono interessate con frequenza variabile, dal passaggio della corrente e dal rilascio di sabbie, limi e ghiaie. Sono questi ambienti di transizione tra l'alveo attivo ed i boschi ripariali ad essere interessati dai fenomeni di colonizzazione sia a carattere erbaceo che arbustivo.

Si tratta di substrati poveri, spesso prevalentemente minerali con enorme variabilità anche in spazi ridotti, all'interno dei quali si possono alternare ghiaie sciolte a ghiaie consolidate a sabbia o limo a residui vegetali (ceppaie, ramaglia, ecc.). La variazione edafica anche su piccola scala

determina lo sviluppo di specie diverse o di associazioni differenti. Sui detriti trovano un ambiente idoneo le specie xerofile; nelle conche e tra i massi si insediano specie più esigenti in quanto ad umidità e substrato. Nelle pozze con acqua stagnante si trova la vegetazione acquatica. Negli isolotti che si elevano dalla quota media dell'alveo o lungo le sponde, accanto alle specie erbacee entrano anche dei nuclei di salici e pioppi o dei veri e propri tappeti di salice di ripa o di salice rosso (figura 4) che però molto spesso non hanno il tempo di consolidare il substrato e di affermarsi, e vengono spazzati periodicamente dalle piene.



Figura 4. Colonizzazione a *Salix elagnos*

In caso contrario si sviluppano dei salici-populeti con presenza di ontano bianco, betulla, robinia, ecc.. Tra le principali formazioni pioniere si ricordano:

Saliceti a *Salix eleagnos*

Le comunità a salice di ripa sono tipiche formazioni pioniere lungo i corsi d'acqua con regime torrentizio. Accanto al *Salix eleagnos* si trova meno rappresentato il *Salix purpurea*, affiancato dal *Populus nigra* e dall'*Alnus incana*, in situazioni di maggior igrofilia. Il salice di ripa si può trovare anche con coperture del 80-90% su depositi di ghiaie e ciottoli che spesso affiorano all'interno dell'alveo dando vita a delle vere e proprie isole. Questa associazione rappresenta uno stadio pioniero spesso distrutto dalle piene ordinarie, ma che dimostra una grande prontezza nel riformarsi grazie alla capacità vegetativa molto accentuata dei salici.

Queste comunità, che raramente superano lo stadio arbustivo, sono un elemento di naturalità ed il loro significato è sostanzialmente legato al regime idraulico del corso d'acqua.

Saliceti con *Pinus sylvestris*

In alcuni casi i saliceti di ripa assumono una particolare conformazione grazie alla consistente presenza del *Pinus sylvestris* che può anche diventare la specie principale. Ciò si verifica su detriti alluvionali in condizioni di aridità e al margine dell'alveo di piena su aree meno influenzate dalla dinamica torrentizia. Queste formazioni sono sicuramente indice di naturalità e confermano la grande attitudine colonizzatrice del pino silvestre.

Saliceti con *Buddleia davidii*

La *Buddleia davidii* è una specie di origine asiatica ormai naturalizzata e ben diffusa all'interno delle zone alveali rimaneggiate. In particolare la troviamo frequente compagna all'interno delle

formazioni di salici pionieri in zone di margine. La troviamo generalmente ai margini di formazioni in uno stadio primario di evoluzione con una facies vicina alle associazioni pioniere.

Formazioni a *Salix* spp., *Alnus incana*, *Populus nigra*, *Pinus sylvestris*.

Negli accumuli di ghiaia che si elevano dall'alveo per più di due metri, spesso formati in seguito al deposito di ramaglia durante gli eventi alluvionali, si insedia una vegetazione pioniera costituita da una formazione mista composta da specie a spiccata vocazione colonizzatrice quali: *Salix eleagnos*, *Salix purpurea*, *Alnus incana*, *Populus nigra*, *Pinus sylvestris*. In generale in queste situazioni l'acqua passa solo in caso di piena (una o due volte all'anno), per cui riescono a svilupparsi accanto alla vegetazione erbacea anche i primi stadi pionieri della vegetazione arbustiva.

Formazioni a *Hippophae rhamnoides*

L'associazione arbustiva formata da olivello spinoso in forma quasi pura, o accompagnato da salice di ripa e salice rosso è una formazione a carattere pioniero che si sviluppa su suoli sassosi di greto con caratteristiche di xerofilia e che segue nella successione vegetazionale primaria l'associazione a *Myricaria germanica*. E' un'associazione di greto con caratteri di naturalità, con significato pioniero ed interessante soprattutto per la sua presenza alternata ad altre formazioni che rappresentano stadi evolutivi maggiori. Colonie a olivello spinoso, rappresentano un elemento caratteristico e di diversità biologica.

Formazioni a *Calamagrostis pseudophragmites*

Altra formazione di greto pioniera è quella a *Calamagrostis pseudophragmites* specie erbacea guida dell'associazione *Salicetum eleagni*. Questa graminacea si contraddistingue per la sua altezza che può superare il metro e per le sue spighe rosse che in estate ed all'inizio dell'autunno caratterizzano il greto dei torrenti.

La troviamo perciò inframmezzata ai saliceti a *Salix eleagnos* magari accompagnata da qualche pianta di *Buddleia davidii*, *Populus nigra*, *Alnus incana*, *Salix daphnoides*. Dove ci sono delle depressioni a fondo sabbioso o sui terrazzi di sabbia anche in mezzo all'alveo, si trovano ampie colonie a *Calamagrostis pseudophragmites*. Interessante per il suo significato pioniero e come indice di naturalità rappresenta un elemento in grado di arricchire la complessità ambientale delle formazioni pioniere.

LA VEGETAZIONE RIPARIALE

Nei vecchi depositi alluvionali, consolidati nel tempo poiché non interessati da piene ordinarie, la vegetazione pioniera si evolve verso forme più evolute secondo le successioni ecologiche naturali. Nella situazione più semplice e meno stabile si riscontrano formazioni di ontano bianco pressoché pure o accompagnate da salici ed altre latifoglie in misura variabile. Questi boschi crescono su suoli più evoluti potenzialmente in grado di dar luogo a suoli forestali complessi, vengono interessati dalle piene solo in casi eccezionali, ma spesso sono attraversati da vecchie ramificazioni che periodicamente vedono transitare l'acqua deviata dal filone principale della corrente, che condiziona localmente lo sviluppo delle specie erbacee e degli arbusti negli stadi giovanili (figura 5).

Solo in alcuni casi queste formazioni evolvono verso forme più complesse dal punto di vista vegetazionale. Si riscontra ad esempio, in alcuni alvei, la presenza di alnete sottoposte ad un soprassuolo di pino silvestre ed abete rosso (associazione riconducibile all'*Alno incanae-Pinetum sylvestris*). In altri casi ancora accanto alle conifere prendono piede il frassino maggiore e l'acero di monte dando forma a boschi in grado di evolversi verso gli aceri-frassineti o a forme meno comuni quali gli alno-frassineti. In ogni caso spesso le formazioni presentano delle caratteristiche sfumate, con continue varianti dovute alla composizione e spesso alle diverse percentuali di copertura delle varie specie o ad altri fattori come l'età, la struttura, la densità.



Figura 5. Vecchio ramo fluviale, periodicamente percorso dall'acqua

Si riportano di seguito alcuni esempi.

Saliceti con *Salix alba*

I saliceti con *Salix alba* nel loro aspetto maturo sono dei boschi con lo strato arboreo dominato dal salice. All'interno dell'ambiente in oggetto riscontrano solamente lembi di ridotte superfici o piante isolate all'interno delle formazioni riparie. Infatti tale associazione si sviluppa in ambienti di greto con spiccata igrofilia, cosa del tutto rara lungo gli alvei montani a causa dei lunghi periodi di magra che caratterizzano il regime idraulico. La mancanza di portate di morbida ed il livello della falda piuttosto basso favoriscono di fatto le associazioni xeriche. Fanno eccezione le formazioni che si sviluppano nella parte bassa delle vallate alpine (in provincia di Belluno ad esempio il F. Piave lungo la Valbelluna, il T. Cison a monte del Lago del Corlo, ecc.). Tali situazioni si creano laddove la larghezza del corso d'acqua è notevole (200-500 m) e quindi non vi è interazione tra il regime ordinario e lo sviluppo della vegetazione, o anche in presenza di zona di risorgiva con la formazione di piccoli laghetti e acque ferme.

La presenza di esemplari arborei di *Salix alba* stanno ad indicare maggiore umidità edafica ed un suolo a maggior contenuto organico: li troviamo infatti nelle piccole depressioni con falda più vicina alla superficie ricoperte da sabbie, lungo i rami laterali percorsi da acqua corrente; vicino alle pozze d'acqua e a zone a fondo sabbioso, in corrispondenza di risorgive e fontane. Sono elementi che denotano una certa evoluzione del suolo e la presenza di acqua nel terreno in modo continuativo nel corso dell'anno. Sono formazioni di assoluto interesse anche se di limitata estensione sia perché rappresentano una situazione di una certa maturità da un punto di vista vegetazionale, sia perché evidenziano una variabilità di ambienti che è un buon indice anche in relazione alla diversità biologica.

Alnete ad *Alnus incana*

Queste formazioni sono di gran lunga le più diffuse all'interno dell'area montana. Mediamente sono caratterizzate da una presenza dell'ontano con coperture pari al 60-80 % ed una struttura monoplana che negli stadi giovanili si presenta molto densa e di difficile percorribilità (figura 6). L'*Alnetum incanae* è un'associazione tipica degli alvei torrentizi che si spinge fino al piano alpino, su suoli alluvionali a detrito grossolano. E' ovviamente una formazione a carattere pioniero che alle volte riesce ad evolvere verso formazioni appartenenti a successioni secondarie più mature e più stabili.

Sono popolamenti che si insediano normalmente ai margini dell'alveo di piena e lungo le barre laterali. A fianco dell'ontano bianco partecipano a questi consorzi altre latifoglie quali i salici, il frassino, l'acero, il pioppo nero, ecc. In alcuni casi queste latifoglie possono andare a costituire il piano dominante, con coperture del 20-30 %.



Figura 6: *Alnetum incanae* durante la stagione non vegetativa

Formazioni a *Salix* spp., *Alnus incana*, *Populus nigra*

In alcuni casi tale bosco si evolve in un popolamento ad uno stadio più evoluto (salici -populeti) e si presenta con un piano dominante dove sveltano degli esemplari di *Populus nigra*, ed un piano dominato costituito da un bosco misto di ontani, salici ed altre latifoglie. La composizione e la

distribuzione delle specie indicano comunque situazioni di estrema variabilità ed un popolamento con una struttura sostanzialmente irregolare. La presenza poi di specie nitrofile come la robinia ed il sambuco che quasi sempre entrano in queste formazioni, indicano un certo disturbo in parte legato alle dinamiche torrentizie, in parte ai frequenti tagli (concessioni demaniali) ed in parte dovuto ai processi di colonizzazione al margine degli alvei.

Anche nel caso di una certa evoluzione del soprassuolo, almeno da un punto di vista strutturale, si tratta comunque di formazioni ancora influenzate dal regime idrologico. La loro superficie infatti può venire modificata anche in modo consistente col passaggio di portate di piena consistenti o di morbide prolungate.

Alnete con *Pinus sylvestris*

Questa particolare associazione rappresenta tra quelle alveali, la cenosi vegetale di maggior pregio e significato per quanto riguarda l'aspetto evolutivo. Il popolamento si manifesta con una struttura irregolare, ma sostanzialmente distinta in due strati di copertura: un piano dominante composto da *Picea abies* e *Pinus sylvestris* ed un piano dominato composto da *Acer pseudoplatanus*, *Alnus incana* e *Fraxinus excelsior*. Nel piano arbustivo si mescolano con frequenza variabile molte altre specie tra cui *Alnus incana*, *Salix eleagnos*, *Cornus sanguinea*, *Ligustrum vulgare*, *Frangula alnus*, *Viburnum lantana*, *Lonicera xylosteum*, *Corylus avellana*, *Ostrya carpinifolia*, ecc. Questo formazione pur non presentandosi sempre omogenea per struttura e composizione può essere ricondotta all'associazione *Alno incanae-Pinetum sylvestris*, che si sviluppa sui greti fluviali e torrentizi in uno stadio abbastanza evoluto, pur non essendo una vegetazione tipicamente ripariale (Pedrotti e Gafta, 1996). Rappresenta uno stadio più evoluto rispetto ai salici-populeti e si distingue nettamente dalle ontanete, in quanto l'*Alnus incana* ha, all'interno di questo consorzio, una copertura che si aggira sul 30% e non partecipa allo strato dominante.

Si tratta di consorzi localizzati in aree meno influenzate dalle dinamiche torrentizie e per questo hanno potuto raggiungere un livello di maturità e stabilità decisamente maggiore rispetto ad altre associazioni, manifestando perciò un valore anche da un punto di vista ecosistemico e naturalistico.

Alnete con *Fraxinus excelsior*

In alcune situazioni i popolamenti ad *Alnus incana* sono accompagnati in maniera più consistente da specie nobili quali il frassino che può partecipare al consorzio con coperture superiori al 10 % nel piano arboreo e decisamente maggiori nel piano erbaceo come rinnovazione.

Questo accade più spesso nelle posizioni più interne dei popolamenti ripariali, dove in ogni caso l'alneta si arricchisce anche della presenza del pino silvestre e dell'abete rosso nel piano dominante, oltre al frassino maggiore già citato, assumendo le caratteristiche di un bosco ripariale più evoluto, appartenente a successioni vegetazionali superiori, con maggiore stabilità in termini ecosistemici e sicuramente più apprezzabile da un punto di vista naturalistico. Una formazione di questo tipo si trova ad esempio in Valle di S. Lucano nell'Agordino.

La vegetazione ripariale di transizione

La diversità dei consorzi vegetazionali, è una condizione che varia sia nel tempo che nello spazio. All'interno del reticolo idrografico sono molteplici le unità vegetali che afferiscono o ai popolamenti pionieri o alle formazioni ripariali, ma che lateralmente spesso si mescolano alle formazioni di versante o di forra, che interagiscono con le dinamiche torrentizie proprie dei corsi d'acqua. Si tratta di formazioni tipicamente forestali e influenzate più da dinamiche di versante che non da quelle proprie del regime idraulico. Tra queste si ricordano ad esempio:

Alnete con *Fraxinus excelsior* e *Acer pseudoplatanus*

Formazione con una presenza determinante sia del frassino che dell'acero. In queste formazioni a struttura articolata ed irregolare spesso il pino silvestre e l'abete rosso formano il piano dominante che sovrasta un piano dominato di poco inferiore costituito da frassini, aceri ed in misura minore

ontani. La maggior consistenza delle specie mesiche anche all'interno del piano arboreo e la presenza di un'elevata copertura di frassino, possono far pensare ad una realtà più sfumata con lembi o nuclei più vicini ad associazioni assimilabili agli aceri-frassineti. Si citano, per la loro rarità, le formazioni miste dove accanto al frassino e all'acero di monte, si mescolano i tigli, l'olmo montano, l'acero riccio, il tasso, ecc., che si trovano nella forra della Val del Grisol in Comune di Longarone (A. Andrich et altri, 2001).

Alnete con *Ostrya carpinifolia*

In molte situazioni vi è continuità tra le formazioni di versante e quelle alveali. Di fatto l'unica barriera è rappresentata spesso dalla presenza di una strada, ma non è così significativa e non rappresenta un diaframma insormontabile per le piante. Così accade spesso che a contatto con le formazioni di versante, si formino dei consorzi misti a prevalenza di ontano bianco ed accompagnati dall'*Ostrya carpinifolia* con percentuali anche del 20 %, oltre ad altre latifoglie. Questi boschi si sviluppano spesso nei dintorni della viabilità o nelle posizioni marginali dei popolamenti ripariali ed infatti vedono un'abbondante partecipazione di specie nitrofile ed indicatrici di disturbo antropico quali il nocciolo, che tendono a svilire il valore ecologico della comunità vegetale.

Pinete con *Pinus nigra*

Anche queste formazioni si sviluppano lungo i versanti laterali, sottoforma di pinete rupicole, a volte anche come popolamenti arborei, ma solo su modeste superfici, e più spesso compenstrate con formazioni ad ostrya, dove quest'ultimo vegeta nel piano dominato sottoposto. Anche in questo caso va sottolineata l'elevata naturalità dei popolamenti. Va segnalata comunque sulle pinete, la presenza della processionaria (*Thaumetopoea pytiocampa*), lepidottero parassita specializzato del pino nero e, a volte, diffuso ampiamente anche sul pino silvestre.

Pinete con *Pinus sylvestris*

Sui versanti ed in particolare sui detriti di falda detritica troviamo le pinete eso-mesalpiche a pino silvestre a volte con la partecipazione dell'ostrya e della betulla. Formazioni interessanti da un punto di vista naturalistico raggiungono in alcuni tratti la base dei versanti.

Mughete

Le mughete sono formazioni di alta quota tipiche di substrati calcarei, che in alcune valli (Val Cordevole ad esempio) rappresentano uno dei fenomeni di dealpinizzazione, peraltro abbastanza frequenti nell'area alpina. Fattori climatici e geolitologici unitamente alle dinamiche di versante (frane, crolli, ruscellamenti, ecc.) hanno permesso in alcuni casi, la discesa di questa e di altre specie fino al fondovalle, ai margini degli alvei o sui terrazzi alluvionali.

Ostietri

Queste formazioni esulano da quelle alveali in quanto si sviluppano ai piedi dei versanti laterali. Tra queste si possono citare gli orno-ostietri e gli ostietri primitivi di forra localizzati all'imbocco delle varie valli laterali e quindi localizzati sulla rete idrografica secondaria. Va segnalata in questo caso l'elevata naturalità di queste formazioni ed il loro elevato valore naturalistico.

Faggete submontane

Anche questa formazione è presente lungo i versanti ed in particolare lungo le valli laterali. Interessa comunque in modo marginale l'area di fondovalle.

LA GESTIONE DELLA VEGETAZIONE E LA SICUREZZA IDRAULICA

La manutenzione della vegetazione ripariale nasce sostanzialmente dall'esigenza di garantire una determinata sicurezza dal punto di vista idraulico, in particolar modo per i centri di fondovalle. L'abbandono del territorio, ha condizionato lo sviluppo della vegetazione forestale laddove un tempo si praticavano le attività tipiche dell'agricoltura montana con la conseguente colonizzazione diffusa da parte del bosco. Il presidio del territorio svolto dagli agricoltori consentiva inoltre di tenere sotto controllo la colonizzazione degli alvei da parte delle specie ripariali e/o delle specie con caratteristiche pioniere, mantenendo efficiente tutta la rete drenante principale e secondaria con particolare riferimento alla parte alta dei bacini montani.

Se si escludono gli alvei di fondovalle caratterizzati da larghezze del greto compatibili con la presenza di fasce perifluviali piuttosto estese e continue, il resto della rete idrografica montana si presenta con alvei relativamente modesti e mediamente invasi da vegetazione arbustiva ed arborea. La presenza di tale vegetazione rappresenta un rischio potenziale sotto il profilo della sicurezza idraulica ovviamente, anche in riferimento al grado di antropizzazione del territorio (strade, ponti, aree urbanizzate, ecc.)

Come già ricordato, l'evoluzione in termini qualitativi e quantitativi di molte formazioni pioniere dipende dal regime idraulico. Molte delle superfici boscate sono in un certo senso un'espressione provvisoria; in particolar modo le formazioni pioniere vengono spazzate via o completamente ridimensionate al passaggio delle piene ordinarie primaverili e autunnali.

Ma anche i terrazzi alluvionali, che si presentano spesso coperti da vegetazione con caratteristiche arbustive/arboree, non hanno vita lunga. Magari si tratta di formazioni interessanti da un punto di vista ecologico, naturalistico e paesaggistico; la loro stessa struttura e la statura media possono ingannare sul fatto che si tratti di situazioni stabili. Molte volte si tratta di popolamenti con un'età inferiore ai 10 anni, la cui genesi è legata alla gestione controllata delle portate più che a dinamiche naturali.

La naturalità delle associazioni pioniere, e la conseguente gestione, deve essere quindi valutata anche in riferimento al regime idraulico. In considerazione dei vari parametri che influenzano la dinamica vegetazionale all'interno dei corsi d'acqua, è importante definire quali sono i limiti ed confini sia per quel che riguarda il tema sempre più attuale della sicurezza idraulica, sia per quel che riguarda la valenza ambientale dei popolamenti ripariali, cercando un difficile ma possibile equilibrio tra questi due aspetti così importanti della gestione del territorio.

In questo senso, riprendendo quanto già detto precedentemente, si devono distinguere le situazioni di fondovalle con larghezze ampie e lo sviluppo di fasce perifluviali pressoché stabili, dal resto della rete idrografica alpina, caratterizzata spesso da un notevole grado di disordine e di potenziale pericolo che la vegetazione, non gestita, rappresenta. E' auspicabile quindi una programmazione per il taglio della vegetazione attraverso dei piani di manutenzione ordinaria, che consentano non tanto l'eliminazione della vegetazione, quanto il suo controllo, il suo ringiovanimento e la sua gestione ordinata e finalizzata anche ad un ruolo di consolidamento spondale. Non va infatti tralasciata l'importanza che svolge una vegetazione arbustiva riparia, anche sotto il profilo del consolidamento del suolo e la difesa dall'erosione, compatibilmente con la salvaguardia della sezione idraulica. Si citano ad esempio le fasce perimetrali di salice di ripa che spesso proteggono il piede delle pendici soggette ad importanti fenomeni franosi. Il controllo e la gestione di tali fasce è più che opportuno per garantire anche il controllo del trasporto solido.

LA RESISTENZA DELLE PIANTE

Si fa un breve cenno alla possibilità di utilizzare, nella fase di progettazione e pianificazione degli interventi lungo i corsi d'acqua, alcune tipologie e tecniche che afferiscono alla disciplina dell'ingegneria naturalistica, le quali ben riassumono il doppio obiettivo della necessità di sicurezza e della necessità di tutela ambientale e rivitalizzazione del territorio.

Da prove effettuate in laboratorio ed in campo da ricercatori austriaci ed in base ai risultati del cantiere sperimentale lungo il fiume Wien a Vienna, si sono ottenuti alcune interessanti indicazioni sul comportamento delle piante rispetto al deflusso delle acque.

I dati relativi alla flessibilità delle piante in funzione delle specie e del diametro del fusto hanno dimostrato che la flessibilità delle piante è in relazione allo sviluppo delle stesse. Fino a 4 cm di diametro le piante hanno una risposta elastica più o meno accentuata. Sopra tale soglia, indipendentemente dalla specie, le piante non si flettono più o in modo irrilevante. Aumentando la tensione si arriva poi al punto di rottura (Florineth, 1998).

Tra le specie con elevata flessibilità ci sono l'ontano nero, l'ontano bianco ed i salici. Acero e frassino si comportano invece in modo più rigido e sopportano anche forze di trazione più elevate prima di raggiungere il limite di rottura.

Per non compromettere la capacità di deflusso delle acque è pertanto necessario tenere i popolamenti giovani e con diametro piccolo nella parte inferiore della scarpata. Adatti a questo scopo sono il *Salix triandra*, il *Salix purpurea*, il *Salix viminalis* perché crescono più lentamente delle altre specie e si mantengono sottili. Questo comporta minori interventi di manutenzione (ceduazione).

Le piante giovani avendo un'elevata flessibilità si piegano al flusso dell'acqua ed in caso di piena vengono completamente sommerse. La velocità dell'acqua viene condizionata in modo marginale e le condizioni di flusso tra il centro dell'alveo e le sponde sono paragonabili.

Il vantaggio dell'utilizzo delle tecniche di ingegneria naturalistica sta nel fatto che queste vengono realizzate disponendo le talee o la ramaglia con un criterio di elevata densità e massima copertura della superficie. Ciò comporta lo sviluppo di molti ricacci giovani e che rimangono a lungo sottili. Solo dopo parecchi anni i salici si rinforzano con un calo dei polloni ed un aumento del diametro. Solo a questo punto anche con piene considerevoli è probabile che l'acqua non riesca più a piegare e a sommergere le piante che dunque esercitano un effetto di riduzione della velocità dell'acqua ostacolandone il flusso in modo più o meno significativo.

La resistenza opposta dalle piante è quindi in funzione della specie, dello sviluppo del diametro e della chioma che dipendono a loro volta dall'età ma anche dalle condizioni stazionali.

Per quanto riguarda la resistenza allo sradicamento, questo dipende da un lato dalla forza della corrente e dalle caratteristiche del trasporto solido, dall'altro lato dalle specie presenti, dal loro sviluppo, dal volume della chioma e dalla quantità di rami, dal volume dell'apparato radicale, dal diametro del fusto del colletto.

Alcune ricerche realizzate sia su piante autoctone di varia età dislocate su suoli diversi, che su specie messe a dimora nelle stesse condizioni stazionali, hanno messo in evidenza valori superiori alla forza esercitata dalla corrente (Oplatka, 1998). O per l'esattezza solo nel primo anno di vita le piante possono essere sradicate dalla corrente, mentre con l'età la loro resistenza aumenta e lo sradicamento si può verificare solo per erosione del terreno. In questo senso è ottimale l'uso di specie con apparati radicali forti e con distribuzione capillare delle radici in superficie ed in profondità. Ciò impedisce il dilavamento del suolo e l'erosione.

È stato calcolato, che la resistenza alla trazione di certe radici di graminacee è di 20-30 N/m² (Borkenstein), quella degli arbusti è di 100-140 N/m² e quella della copertura diffusa di salici è di 150-300 N/m² anche se tali valori possono essere in alcuni casi superati (fino a 450 N/m²), paragonabili ai valori di resistenza a trazione delle scogliere in pietrame; i salici conferiscono stabilità al terreno in maniera dinamica, in modo direttamente proporzionale al loro sviluppo.

Per la messa in sicurezza della parte inferiore delle sponde dei fiumi, oltre al salice rosso (*Salix purpurea*) e altri salici, è interessante l'uso dell'ontano nero (*Alnus glutinosa*) e del pallon di maggio (*Viburnum opulus*) ovviamente in contesti idraulici diversi da quelli alpini. La messa a dimora delle piante può essere abbinata all'utilizzo di legname e pietrame da utilizzare al piede delle sponde, nel punto più soggetto all'azione erosiva.

Come già sottolineato la scelta delle specie va fatta anche tenendo presente i costi di manutenzione ovvero gli interventi di taglio di ceduzione previsti per mantenere giovane ed elastica la difesa spondale viva.

In conclusione la vegetazione esercita un ruolo importante nel consolidamento delle sponde, va peraltro gestita sia da un punto di vista della composizione che del portamento per evitare che si trasformi in un ostacolo idraulico. Va chiarito però, che la capacità consolidante della vegetazione nulla può contare davanti a fenomeni di piena accompagnati da dinamiche di trasporto solido con stravolgimenti morfologici dell'alveo.

ASPETTI NORMATIVI

Tra le varie normative che interessano l'argomento in questione se ne ricordano alcune particolarmente interessanti per gli aspetti gestionali. Il R.D. 25.7.1904 n. 523, art. 97 recita ad esempio: "Sono opere ed atti che non si possono eseguire se non con speciale permesso del prefetto e sotto l'osservanza delle condizioni dal medesimo imposte i seguenti: (omissis) c) i dissodamenti dei terreni boscati e cespugliati laterali ai fiumi e torrenti a distanza minore di metri cento dalla linea a cui giungono le acque ordinarie".

Il D.M. 20.8.1912, art. 12 recita: "Sono da impiegarsi i materiali rustici del sito, pietre, legnami, chiedendo alla forza della vegetazione i materiali viventi per il consolidamento dei terreni, ricorrendo anche ad opere miste di legname e sasso. Nelle frane sono da evitare le costruzioni murali, adottando invece piccole palizzate, graticciate o fascinate basse, inerbamenti o piantagioni di alberi di pronto accrescimento".

Il D.P.R. 14.04.1993: "Atto di indirizzo e coordinamento alle regioni recante criteri e modalità per la redazione dei programmi di manutenzione idraulica e forestale", mette l'accento sui lavori da eseguirsi nell'ambito degli ecosistemi fluviali e volti al recupero dell'efficienza idraulica e ambientale, i quali contribuiscono anche a limitare la necessità, per quanto possibile, di nuove opere in tali complessi e delicati ecosistemi.

L'art. 1, comma 2 precisa: "Gli interventi devono avere, altresì, finalità di manutenzione e caratteristiche tali da non comportare alterazioni sostanziali dello stato dei luoghi".

Devono porsi come obiettivo il mantenimento ed ripristino del buon regime idraulico delle acque, il recupero della funzionalità delle opere idrauliche e la conservazione dell'alveo del corso d'acqua, riducendo, per quanto possibile, l'uso dei mezzi meccanici.

Il D.P.R. 14.04.1993 elenca le "tipologie degli interventi manutentori" da effettuarsi nei corsi d'acqua regimati e non regimati. Tale decreto costituisce atto di indirizzo e coordinamento alle regioni per la redazione dei programmi di manutenzione idraulica e forestale nell'ambito dei finanziamenti di cui alla legge del 19 Luglio 1993, n. 236.

La Regione del Veneto con Delibera di Giunta Regionale n. 4003 del 30.08.1994, ha voluto raccogliere lo spirito del Decreto e calarlo all'interno della realtà regionale approvando una circolare applicativa. La Delibera ribadisce che appare opportuno che il D.P.R. 14.04.1993 venga assunto quale linea guida per al realizzazione degli interventi di manutenzione sui corsi d'acqua ricadenti nel territorio regionale.

In particolare il PROSPETTO "B" della circolare n. 32 della Regione Veneto (D.G.R. 4003/94), richiama alcuni aspetti tecnici di esecuzione dei lavori inerenti la vegetazione esistente nell'ambito dell'ecosistema fluviale. Vengono di seguito indicati tali aspetti:

L'esecuzione degli interventi, volta a realizzare sezioni d'alveo che garantiscono il deflusso delle portate di piena ammissibili, deve essere effettuata in modo tale da non compromettere le funzioni biologiche del corso d'acqua e delle comunità vegetali ripariali. (art. 2 comma 1 lett.b - D.P.R. 14/4/93).

Eventuali deroghe (nel senso quindi di prendere in considerazione piene ricorrenti di maggior cadenza temporale), possono essere consentite solo per i corsi d'acqua "regimati" in relazione a fenomeni circoscritti di rischio idraulico nei centri abitati e per le infrastrutture e pertanto da giustificare dal punto di vista tecnico (art.1 comma1 del D.P.R. 14/4/93).

La vegetazione arbustiva ed arborea presente nell'alveo attivo (quello cioè con tempo di ritorno orientativamente trentennale), valutata la sua effettiva pericolosità ai fini del deflusso regolare delle piene ricorrenti, va eliminata, possibilmente nei periodi di riposo vegetativo.

Nella valutazione delle necessità di eliminare la vegetazione in alveo va considerata anche l'opportunità di un taglio parziale (es. eliminazione dei soli soggetti più sviluppati) se in presenza di corsi d'acqua di notevole rilevanza bio-ecologica e paesaggistica o in ambito di parco naturale.

Va infine rilevata l'opportunità che nella progettazione ed esecuzione degli interventi di manutenzione idraulica e forestale vadano salvaguardate il più possibile le eventuali qualità ambientali esistenti dell'ecosistema fluviale in termini di naturalità, diversità biologica di flora e fauna e la presenza di habitat per la sopravvivenza e la riproduzione dell'avifauna.

IL TAGLIO DELLA VEGETAZIONE

I boschi delle fasce ripariali del reticolo idrografico non sono soggetti ad una gestione selvicolturale pianificata, ma normalmente vengono gestiti attraverso delle concessioni demaniali ai privati per la produzione di legna da ardere, o agli Enti che gestiscono la manutenzione ordinaria del territorio come le Comunità Montane.

La predisposizione di un progetto di taglio presuppone una procedura sia sotto il profilo tecnico che amministrativo. Il taglio e l'asporto della vegetazione non comporta di per sé alcuna modificazione sotto il profilo morfologico e non altera dunque l'assetto dell'alveo e delle sponde da un punto di vista strettamente fisiografico. Peraltro vengono ad essere modificati, in modo temporaneo, i caratteri territoriali di questo specifico ambiente sotto il profilo paesaggistico ed ecosistemico.

Le azioni di pulizia idraulica e quindi anche quelle di taglio, in Regione del Veneto, vanno autorizzate dall'Ufficio regionale competente ovvero dal Genio Civile. Si possono distinguere in sostanza due situazioni.

La redazione di un piano generale comprendente ipotesi di tagli di manutenzione lungo una serie di aste all'interno ad esempio dello stesso Comune o Comunità Montana.

La semplice richiesta di una concessione di taglio che va sempre inoltrata al Genio Civile.

Nel primo caso il piano verrà vagliato in Commissione consultiva provinciale (alla stregua di un progetto) presso gli Uffici del Genio Civile e vi sarà il rilascio di una concessione sentito anche il Servizio Forestale competente. Nel secondo caso, se la quantità di legna da tagliare è modesta, il Genio Civile rilascia l'autorizzazione al taglio, sentito sempre la Struttura forestale regionale competente, senza passaggi in Commissione.

Da un punto di vista generale, per un'Amministrazione è consigliabile procedere con la redazione di un progetto generale di taglio di manutenzione relativo ad una o più aste o tratti di asta corredato da idonea cartografia, che contenga le ragioni dell'intervento da un punto di vista della sicurezza idraulica, le modalità ed i tempi dell'intervento e la quantificazione, o stima forestale ed economica, relativa alla composizione dei popolamenti alveali ed al volume o peso dei soggetti arbustivi o arborei da tagliare. I popolamenti ricadenti all'interno dell'alveo attivo sono di fatto proprietà del Demanio ed il loro valore economico è riportato nella "Tabella dell'Ufficio tecnico Erariale della Provincia per il prezzo di macchiatico della legna da ardere e del legname da lavoro".

Come detto il progetto va presentato al competente Ufficio del Genio Civile Regionale, il quale approva l'intervento e dà l'autorizzazione a procedere. Trattandosi in ogni caso di una concessione di taglio di boschi di proprietà del Demanio, la stima economica viene approvata dal competente Ufficio forestale regionale ed ad essa fa seguito il versamento della quota corrispondente al valore del legname da tagliare.

In sostanza dunque l'iter procedurale prevede due ordini di costo: la previsione progettuale e la realizzazione dell'intervento di taglio a carico dell'Ente o del privato, e il corrispettivo del valore del legname da tagliare in base ai prezzi (Euro/quintale) della Tabella dell'Ufficio tecnico Erariale, indipendentemente dalla motivazione dell'intervento di taglio (legna da ardere, manutenzione ordinaria e/o straordinaria collegata alla riduzione del rischio idraulico, ...). In taluni casi il prezzo di macchiatico della legna può essere considerato nullo a causa della difficile ubicazione, della carenza di viabilità di accesso, dello stato e della struttura dei popolamenti, ecc. Se tale stima viene approvata dal competente Ufficio forestale, non è dovuto alcun versamento dato che il valore della legna è stato dichiarato nullo. Una volta tagliata ed allestita la legna può essere portata via per successive utilizzazioni, oppure viene lasciata sul posto.

I COSTI DELLA MANUTENZIONE

Il lavoro di manutenzione dell'efficienza idraulica di un corso d'acqua montano, in particolar modo per gli aspetti riguardanti il controllo della vegetazione alveale, riveste un ruolo fondamentale e piuttosto complesso.

La quantificazione del legname da tagliare e la valutazione dei costi legati alle operazioni di taglio e accatastamento sono elementi di difficile definizione e comunque assai relativi e variabili da

un corso d'acqua all'altro.

A ben guardare i fattori da vagliare sono diversi:

Identificazione delle operazioni di manutenzione

Modalità di realizzazione del taglio

Superfici interessate dagli interventi in rapporto con la larghezza dell'alveo

Organizzazione del lavoro riferita alla manodopera, ai macchinari e agli strumenti, alla viabilità di accesso

Periodicità dell'intervento

Per semplificare si possono ipotizzare nell'area montana tre tipologie di alveo e di vegetazione ripariale:

gli alvei attivi significativi con fasce di vegetazione riparia dell'ordine dei 10 m o comunque caratterizzati dalla presenza di boschetti compatti o terrazzi alluvionali coperti da ontanete più o meno mature

gli alvei di terzo ordine con alvei attivi larghi pochi metri e la vegetazione riparia distribuita essenzialmente lungo la direttrice del corso d'acqua, mescolata con le specie dei popolamenti forestali dei versanti che spesso invadono e colonizzano il talweg.

gli alvei di fondovalle con fasce di vegetazione ripariale sia in destra che in sinistra idrografica con larghezze che mediamente superano i 20-30 m caratterizzate dalla presenza di specie sia arboree che arbustive ovvero popolamenti abbastanza evoluti e stabili

Sulla scorta di alcune esperienze territoriali, si possono ipotizzare delle stime per la valutazione dei costi delle operazioni di taglio ed allestimento del materiale vegetale, che un Ente territoriale deve affrontare.

1° caso

Fasce riparie ai lati dell'alveo attivo; formazioni ad ontano bianco, salici ed altre specie in misura minoritaria; larghezza delle fasce variabile dai 10 ai 20 m al massimo; accessibilità buona; squadra composta da tre operatori afferenti al C.C.N. dei lavoratori agricoli-forestali; operazioni di taglio a raso ed allestimento in cataste

Una squadra tipo di tre operai è in grado di tagliare ed allestire una superficie di circa 50 mq in un'ora di lavoro. Ovviamente tale produttività è variabile in funzione dell'accessibilità del sito, della conformazione dell'alveo, del tipo di vegetazione e dell'esperienza degli operai (figura 7). Si possono dunque ipotizzare due prezzi:

1,00 €/mq in situazioni relativamente facili

2,00 €/mq in situazioni ambientali più difficili.



Figura 7. Salici e ontani invadono i greti asciutti

Il taglio di un ettaro di ontaneta si può aggirare dunque su un costo di circa 7-8.000,00 €/ha se consideriamo il solo costo della manodopera e di 9-10.000,00 €/ha se consideriamo anche le attrezzature. La resa è di circa 170 metri steri, ovvero di 850q.li/ha che tradotto in metri cubi significa circa 150 mc/ha.

Tale valore corrisponde con valori riportati in bibliografia: si cita ad esempio il dato riferito ad un rilievo relascopico, all'interno di un'ontaneta di ontano bianco nei pressi del laghetto Rodela sul T. Ausor nel bacino idrografico del Cismon (O. Andrich et altri, 2001).

Complessivamente dunque il costo finale è di circa 10-12,00 €/q.le.

2° caso

Vegetazione riparia con insediamento diffuso lungo l'asse longitudinale del torrente; formazioni miste con la presenza di specie provenienti dai popolamenti forestali dei versanti; presenza anche di piante d'alto fusto tipo conifere; larghezza delle fasce variabile ma contenuta e concentrata alla base dei versanti; accessibilità mediocre; squadra composta da tre-quattro operatori afferenti al C.C.N. dei lavoratori agricoli-forestali; operazioni di taglio a raso ed allestimento in cataste.

Anche in questo caso facendo riferimento ad alcune esperienze territoriali si può risalire a dei costi di utilizzazione. Tralasciando le analisi dettagliate i risultati danno i seguenti costi medi espressi in questo caso per chilometro di asta.

Il costo unitario per interventi su situazioni in assenza di manutenzione ordinaria è di circa 4-5.000,00 €/km. Interventi successivi si possono stimare con dei costi sicuramente ridotti della metà. Tale cifra si giustifica per il fatto che si fa riferimento a tutte quelle situazioni già evidenziate di alvei con larghezze modeste intorno ai 5 m, dove sono assenti popolamenti con sviluppo trasversale con presenza di boschi o gruppi omogenei per struttura ed età. Si tratta piuttosto di intervenire su situazioni di disordine idraulico con piante diffuse lungo l'asta in modo assolutamente casuale e comunque per lo più concentrate ai bordi dell'alveo. In questo caso non è possibile risalire ad un costo unitario (€/q.le) per l'eccessiva variabilità territoriale.

3° caso

Discorso a parte meritano i fiumi con fasce periferuali permanenti, con boschi evoluti e stabili. In questa situazione possono cambiare sia i parametri economici, poiché le condizioni orografiche sono decisamente più favorevoli rispetto agli altri 2 casi, e l'accessibilità consente l'accesso ai mezzi meccanici, sia i parametri selvicolturali poiché ci troviamo di fronte a dei popolamenti più caratterizzati dal punto di vista fitosociologico (aceri-frassineti, alno-frassineti, formazioni riconducibili all'associazione *Alno incanae-Pinetum sylvestris* o ai saliceti a *S. alba*, ecc.), ed anche più evoluti da un punto di vista strutturale, quindi con maggiore stabilità e statura.

Al di là dei problemi di carattere nomenclaturale, risulta più facile in questi casi dare delle indicazioni di gestione e quindi di taglio che favoriscano una certa evoluzione del soprassuolo, puntando su di una determinata composizione dello strato arboreo dominante e di quello dominato. A livello potenziale dunque alcune aree a bosco possono avere un futuro non rappresentando necessariamente un ostacolo idraulico (è possibile un loro allagamento con tempi di ritorni molto grandi più che una loro asportazione). Certo la concessione demaniale ai privati, non può garantire una gestione oculata e quindi gli interventi spesso favoriscono l'accesso di specie invadenti ed esotiche, quali la robinia, la buddleia, l'indaco bastardo,



Figura 8. Esempio di taglio in un alno-frassineto

l'ailanto o i tappeti di rovi che paralizzano l'evoluzione delle formazioni vegetazionali.

Viceversa andrebbero proprio eseguiti dei tagli in grado di limitare l'invasione delle specie nitrofile, esotiche, l'eliminazione di eventuali nuclei compatti di conifere (piantagioni di abete rosso assolutamente inaffidabili dal punto di vista del consolidamento, dell'assetto strutturale e della stabilità), per favorire l'evoluzione di boschi stabili compatibilmente con il regime idraulico (figura 8).

I costi in questo caso possono essere simili a quelli adottati per gli interventi selvicolturali in condizioni di boschi gestiti con piani di taglio programmato o per gli interventi di miglioramento boschivo in ambito più strettamente forestale.

BIBLIOGRAFIA

- Andrich A. et altri (2001). Studio di 15 biotopi in area dolomitica. Regione del Veneto-ARPAV-Centro Valanghe Arabba.
- Andrich O. et altri (2001). Laghetto Rodela. Regione del Veneto-ARPAV-Centro Valanghe Arabba.
- Florineth F., (1999), Analisi del limite. *Acer* n. 4/99, 71 - 75.
- Lachat B. (1991), *Le cours d'eau - Conservation, entretien et aménagement*. Consiglio di Europa - Strasburgo.
- Pedrotti F., Gafta D. (1996). *Ecologia delle foreste ripariali e paludose dell'Italia*. Università degli Studi di Camerino.

**VALUTAZIONE DI ALCUNE COMPONENTI DEL BILANCIO
IDROLOGICO IN BACINI DI TIPO ALPINO**

Silvia DEGLI ESPOSTI

Università di Padova - Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

Daniele NORBIATO

Università di Padova - Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

Roberto DINALE

Ufficio Idrografico, Provincia Autonoma di Bolzano

Marco BORGA

Università di Padova - Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

SOMMARIO

La memoria si sofferma su alcune ben note difficoltà nella stima di due componenti del bilancio idrologico: precipitazioni e flussi evapotraspirativi. Per i bacini di tipo montano, le incertezze (e, soprattutto, le distorsioni) che influenzano tali valutazioni sono sufficientemente importanti da alterare il bilancio idrologico. Con riferimento ai bacini idrografici dell'alto bacino del fiume Adige, vengono illustrate alcune conseguenze delle sottostime degli afflussi meteorici, dovute all'effetto combinato degli errori sistematici nella misura delle precipitazioni nevose e della scarsa rappresentatività delle misure pluviografiche in relazione all'influenza orografica sulle precipitazioni. Un'applicazione modellistica pluriennale mostra come sia necessario applicare alcuni parametri correttivi nella stima delle precipitazioni al fine di ottenere valutazioni affidabili delle componenti del bilancio idrologico. Per quanto riguarda i flussi evapotraspirativi, vengono confrontati fra loro due note formulazioni per la stima della evapotraspirazione potenziale (Penman-Monteith e Hargreaves-Samani), utilizzando dati relativi alla stazione meteorologica di Arabba, nelle Dolomiti Venete.

INTRODUZIONE

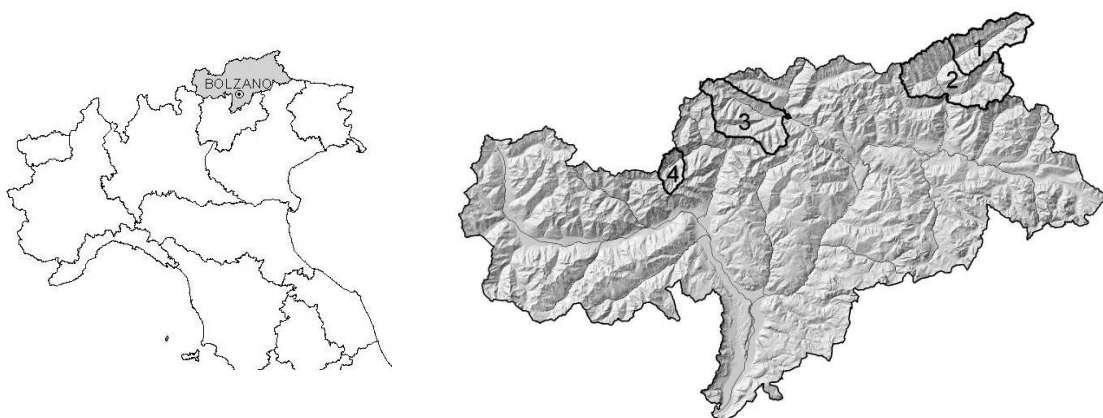
Un'adeguata conoscenza delle componenti del bilancio idrologico è fondamentale per la razionale gestione delle risorse idriche. Infatti, in misura sempre maggiore, la soluzione di molti problemi di ordine tecnico richiede la capacità di descrivere adeguatamente le componenti essenziali del ciclo idrologico, spesso tramite l'impiego di modelli numerici in grado di descrivere la trasformazione degli afflussi meteorici nei corrispondenti deflussi. E' questo il caso, per esempio, della stima delle portate di magra (Falappi e Grossi, 1998; Becciu et al., 2000), oppure della previsione in tempo reale delle piene mediante l'impiego di modelli continui del ciclo idrologico (WMO, 1992; Degli Esposti, 2005). Un'ipotesi di lavoro comune a tutti i modelli idrologici riguarda la chiusura del bilancio idrologico e la verifica dell'equazione di continuità; è peraltro interessante osservare che in genere non è possibile offrire una verifica sperimentale di tale equazione a scala di bacino (Beven, 2001). Normalmente, infatti, non è possibile misurare a tale scala l'evapotraspirazione reale, e pertanto gli errori nelle misure cumulate degli afflussi e dei deflussi tendono a confluire nel termine evapotraspirativo, che viene convenzionalmente determinato, quando si operi sull'anno idrologico e quindi assumendo trascurabili le variazioni di invaso, come differenza fra le prime due componenti. Le incertezze divengono tuttavia molto più importanti in bacini di tipo alpino, dove la stima degli afflussi meteorici e dei flussi evapotraspirativi è affetta da significative distorsioni. In tali situazioni è spesso possibile riscontrare come il bilancio idrologico non possa essere chiuso sulla base delle quantità misurate. A riprova, sono riportati in Tabella 1 gli elementi essenziali del bilancio idrologico per quattro bacini idrografici relativi all'alto corso del fiume Adige, caratterizzati da coefficienti di deflusso medio annuale maggiore o prossimo ad uno. Quando si assuma che le misure di deflusso siano indistorte, o comunque più affidabili rispetto a quelle di precipitazione, risulta che la valutazione delle precipitazioni medie areali presenta una sottostima significativa. Tale sottostima è dovuta essenzialmente a tre fattori: i) i sistematici errori di misura delle precipitazioni solide da parte dei pluviografi; ii) la scarsa rappresentatività delle misure pluviografiche in relazione agli effetti dell'orografia sulle precipitazioni; iii) la possibile influenza dello scioglimento glaciale, nella attuale fase di regresso. La quantificazione della sottostima e l'eventuale correzione degli afflussi meteorici non è semplice; infatti, se si attende a tale valutazione imponendo la chiusura del bilancio idrologico, risulta necessario effettuare una contestuale quantificazione dei flussi evapotraspirativi reali, che risultano funzione, essi stessi, delle precipitazioni che si intendono correggere.

La memoria affronta questi temi sulla base di una serie di misure ed applicazioni modellistiche relative a bacini idrografici dell'alto bacino dell'Adige. Dopo la presentazione dell'equazione del bilancio idrologico a scala di bacino (Sezione 2), vengono descritte una serie di misure atte a quantificare, a scala puntuale, gli errori sistematici di misura delle precipitazioni nevose da parte dei pluviografi (Sezione 3). Viene successivamente illustrata (Sezione 4) una applicazione modellistica per alcuni bacini altoatesini, nell'ambito della quale è stata implementata una metodologia di correzione degli afflussi meteorici. Nell'ambito della stessa sezione vengono discusse due metodologie per la stima dell'evapotraspirazione potenziale L'influenza dei fattori di correzione sulla

modellazione del bilancio idrologico viene brevemente discussa nella Sezione 5.

L'EQUAZIONE DI CONTINUITA' PER BACINI MONTANI

La caratterizzazione del bilancio idrologico per bacini di tipo montano richiede la preliminare individuazione di cosa si intenda per bacino montano. In effetti, non esiste una definizione oggettiva ed universalmente accettata di 'bacino montano' (Price et al., 2004). Alcune definizioni rimandano all'influenza dei processi di accumulo e fusione nivale sul regime idrologico e quindi alla quota media del bacino - è di questo tipo, per esempio, la definizione utilizzata in Svizzera, dove si considera come montano un bacino la cui quota media eccede la soglia di 1550 m s.l.m. (Weingartner e Aschwanden, 1992); una definizione simile è stata utilizzata da Kapos et al. (2002) e da Viviroli e Weingartner (2004). Su questa base, si indica qui come 'montano' un bacino il cui regime risulta fortemente influenzato dai processi idrologici di formazione ed ablazione della coltre nivale.



a) b)
 Figura 1. Area di studio. a) Alto bacino del fiume Adige; b) localizzazione dei quattro bacini idrografici considerati nell'indagine (1: Aurino a Cadi Pietra; 2: Aurino a Caminata; 3: Ridanna a Vipiteno; 4: Plan a Plan).

Tabella 1. Elementi caratteristici del bilancio idrologico annuale per quattro bacini idrografici altoatesini (periodo di osservazione: 1992-1998) (superfici glaciali da Kuhn, 1997)

Bacino	Superficie (km ²)	Superficie glaciale (km ²)	Quota media (m s.l.m.)	Afflussi osservati (mm)	Deflussi osservati (mm)	Coefficiente deflusso
Aurino a Cadi Pietra	148.6	5.55 (3.7 %)	2168	914	1290	1.41
Aurino a Caminata	418.4	18.96 (4.5%)	2090	898	1168	1.30
Plan a Plan (94-98)	48.2	0.77 (1.6 %)	2381	943	1312	1.39
Ridanna a Vipiteno	209.6	9.57 (4.5 %)	1910	986	933	0.95

L'equazione generale per il bilancio idrologico (equazione di bilancio di massa) è la seguente:

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (1)$$

dove I rappresenta i flussi entranti (rappresentati dalle precipitazioni), O quelli uscenti (rappresentati dai deflussi e dai flussi evapotraspirativi) ed S l'immagazzinamento, sia superficiale (nei corpi idrici superficiali, nel manto nevoso e nei ghiacciai) che sotterraneo (nella regione insatura del suolo e nelle falde acquifere). Quando l'equazione (1) venga applicata ad un bacino idrografico si

ottiene:

$$P - Q - ET = \frac{\Delta V + \Delta F + \Delta N + \Delta G}{\Delta t} \quad (2)$$

dove con P si indica il volume di afflusso meteorico, con Q il volume di deflusso, con ET il volume perso per evapotraspirazione, con ΔV la variazione di invaso superficiale, con ΔF la variazione di invaso sotterranea, con ΔN la variazione di invaso nel manto nevoso e con ΔG la variazione di invaso nei ghiacciai. Con Δt viene indicato l'intervallo temporale a cui si riferisce la valutazione.

Per bacini a forte componente nivale, l'equazione di bilancio viene convenzionalmente applicata al periodo compreso fra il 1 ottobre e il 30 settembre dell'anno successivo, al fine di limitare le incertezze relative alle stime dei termini di variazione di accumulo nivale.

PROBLEMI DI MISURA DELLA PRECIPITAZIONE SOLIDA TRAMITE APPARECCHI PLUVIOMETRICI

Il problema degli errori sistematici nella stima di precipitazione ottenuta da pluviografi, ed in particolare le incertezze dovute all'influenza del vento ed alla turbolenza si sono imposte all'attenzione degli idrologi da lungo tempo (Sevruk, 1992). Il tema della correzione delle misure pluviometriche per tener conto di tali errori sistematici, soprattutto nel caso della precipitazione solida, ha ricevuto notevole attenzione negli ultimi anni, man mano che l'entità degli errori sistematici veniva quantificata, anche in relazione alle tipologie standard nazionali delle apparecchiature (Larson e Peck, 1974; Goodison, 1978, 1981; Groisman e Easterling, 1994; Yang, 1999). Un progetto intercomparativo del WMO, concluso nel 1998 (Goodison et al., 1998) ha permesso di individuare una apparecchiatura standard per la misura di riferimento delle altezze di precipitazione (il Russian Double Fence, descritto in Figura 2), di valutare l'entità degli errori relativi determinati tramite l'impiego delle tradizionali apparecchiature nazionali, ed infine di individuare le sorgenti di errore più significative.

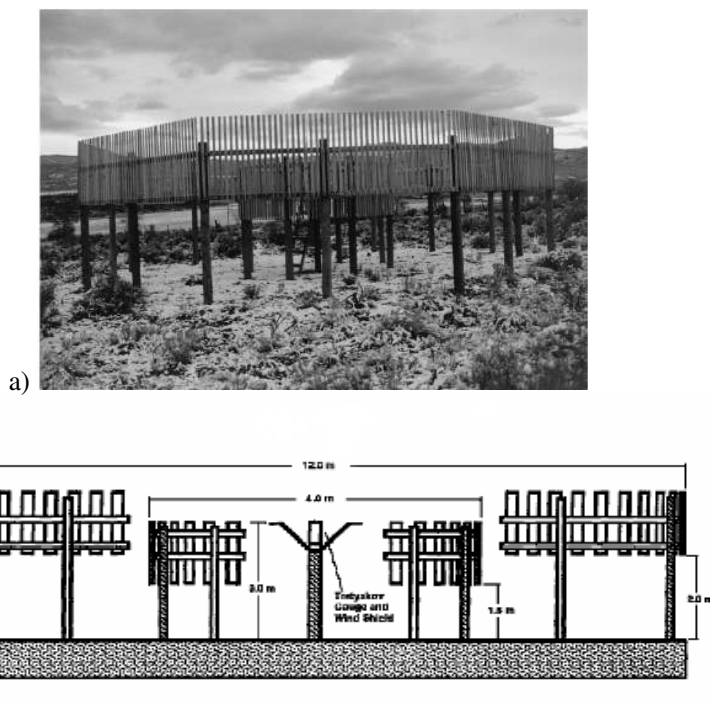


Figura 2. a) Fotografia e b) struttura di un pluviometro di tipo "Russian Double Fence", utilizzato come riferimento nello studio WMO (Goodison et al., 1998).

I risultati ottenuti tramite questa indagine comparativa hanno evidenziato che, anche per velocità del vento relativamente modeste (pari a 2 m s^{-1}), l'entità dell'errore sistematico di sottostima delle precipitazioni solide può raggiungere, per i normali apparecchi non dotati di schermatura, anche valori prossimi al 50%.

Per quanto riguarda la regione considerata, le evidenze sperimentali sopra menzionate sono confortate dai risultati di una analisi effettuata su dati riportati per la stazione dell'ENEL localizzata a Careser diga, a 2600 m s.l.m., in prossimità del ghiacciaio omonimo, nel Trentino occidentale (Nani, 2005). Nell'ambito della valutazione sono state comparate le altezze di equivalente in acqua della precipitazione nevosa misurata su tavoletta con i corrispondenti valori misurati da pluviometro totalizzatore riscaldato e con funzionamento a bascula, con bocca posta a 2,20 m sul suolo. La comparazione ha interessato il periodo compreso fra il 1.11.2000 ed il 31.05.2004. I valori del fattore correttivo stagionali, calcolati come rapporto fra l'equivalente in acqua della neve fresca caduta ed la corrispondente altezza di precipitazione misurata da pluviometro, sono risultati variabili fra 1.73 e 2.1. Il fattore correttivo della precipitazione è risultato significativamente correlato con la temperatura dell'aria (individuando un aumento del fattore correttivo al diminuire della temperatura) e con l'altezza di neve al suolo (suggerendo una relazione con la diversa altezza alla quale viene a trovarsi la bocca dello strumento rispetto alla superficie della neve).

MODELLAZIONE DEL BILANCIO IDROLOGICO E CORREZIONE DELLE PRECIPITAZIONI

I processi di trasformazione afflussi-deflussi sono stati simulati per l'alto bacino dell'Adige utilizzando un modello concettuale in grado di tener conto dei processi di accumulo e fusione nivale, dei processi evapotraspirativi e della ricarica della falda; il modello così concepito consente di simulare in modo continuo il ciclo idrologico, ed è inserito in un sistema complessivo per la previsione in tempo reale dei deflussi di piena (ARFFS: Adige River Flood Forecasting System; Degli Esposti, 2005).

Il modello idrologico utilizzato rappresenta una variazione del modello Probability Distributed Moisture (PDM) (Moore e Clarke, 1981), nel quale si assume che il bilancio relativo all'interazione della precipitazione con gli strati superficiali del suolo, sia regolato, in ogni punto del bacino, da una capacità di saturazione del terreno. Questa viene schematizzata, a livello puntuale, con un vaso elementare di capacità c . Il livello dell'acqua contenuta negli invasi è incrementato dalla precipitazione totale ed è esaurito dalla evapotraspirazione e dai processi di drenaggio e percolazione. L'afflusso meteorico, ed il conseguente assorbimento del terreno, provocano la graduale saturazione del bacino che si manifesta nell'aumento del livello d'acqua contenuta negli invasi e nella conseguente riduzione della loro capacità residua. Quando la precipitazione netta eccede la capacità residua dell'invaso elementare si ha generazione di deflusso, secondo una modalità che, a scala di bacino, presenta evidenti analogie con lo schema 'dunniano' di eccesso di saturazione. Il bacino viene pertanto interpretato come un insieme di infiniti invasi elementari, ciascuno dei quali caratterizzato da una propria capacità c [mm]. Di conseguenza la capacità c viene interpretata come una variabile casuale con funzione di distribuzione di probabilità $f(c)$ [mm^{-1}]; la proporzione di invasi elementari con profondità compresa nell'intervallo $(c, c+dc)$ viene fornita dal prodotto $f(c)dc$, mentre con $F(c)$ [-] viene denotata la funzione di distribuzione cumulata. Si ipotizza infine che i diversi elementi siano tra loro intercomunicanti, permettendo una redistribuzione del livello idrico al loro interno su tutto il bacino.

La configurazione di PDM qui utilizzata fa riferimento ad una distribuzione di Pareto per la capacità di invaso:

$$F(c) = 1 - [1 - (c/c_{\max})]^b \quad (3)$$

dove c_{\max} [mm] rappresenta la massima capacità di invaso nel bacino ed il parametro b [-] controlla il grado di variabilità spaziale di tale capacità.

Le perdite dovute ad evapotraspirazione sono introdotte assumendo la seguente semplice

relazione funzionale fra il deficit di umidità a scala di bacino ed il rapporto fra il tasso reale di evapotraspirazione (ET_a) e quello potenziale (ET_p) al tempo t :

$$\frac{ET_a(t)}{ET_p(t)} = 1 - \left\{ \frac{S_{max} - S(t)}{S_{max}} \right\}^{b_e} \quad (4)$$

dove S_{max} [mm] rappresenta la capacità massima di invaso sul bacino, b_e rappresenta un parametro definito positivo, e con $S(t)$ si indica il contenuto di umidità del bacino all'istante t (e pertanto $S_{max} - S(t)$ rappresenta il deficit di umidità). All'aumentare del valore del parametro b_e i flussi evapotraspirativi reali assumono valori più vicini, per un assegnato valore di deficit di umidità del suolo, a quelli potenziali. La formulazione adottata per la valutazione dell'evapotraspirazione potenziale è basata sul modello proposto da Hargreaves-Samani (Hargreaves e Samani, 1985), che presenta il vantaggio di richiedere l'impiego dei soli dati di temperatura.

La rappresentazione matematica adottata per l'accumulo e lo scioglimento nivale si diversifica per i periodi piovosi e per quelli asciutti. Lo scambio di energia all'interfaccia aria-neve è espresso essenzialmente in funzione della temperatura dell'aria e, in particolare, il bilancio energetico del manto nevoso è riassunto mediante una relazione, di origine empirica, che esprime la quantità di neve sciolta in un giorno tramite il prodotto fra un fattore di scioglimento, definito su base morfoenergetica (Cazorzi e Dalla Fontana, 1996), e la differenza fra la temperatura dell'aria ed una temperatura di soglia (WMO, 1986).

Per quanto riguarda l'impostazione del bilancio idrologico, vengono nel seguito descritte i) le procedure di stima della precipitazione, suddivisa nelle due fasi (solide e liquide), e le corrispondenti correzioni intese a limitare gli effetti dell'errore sistematico di misura della precipitazione solida e dell'influenza dell'orografia, e ii) la valutazione dei tassi di evapotraspirazione potenziale.

Stima della fase solida e liquida della precipitazione media areale e correzione dei corrispondenti contributi

L'accuratezza della descrizione dei processi idrologici di trasformazione afflussi-deflussi che hanno luogo nei bacini di tipo alpino è influenzata in maniera significativa dalla corretta definizione del tipo di precipitazione, il cui stato di aggregazione può presentarsi come solido oppure liquido. Il parametro genericamente utilizzato per distinguere gli afflussi solidi da quelli liquidi è costituito dalla quota dell'isoterma cui corrisponde la transizione dallo stato solido a quello liquido. A tale riguardo, è bene osservare che lo scioglimento delle idrometeore non costituisce un processo istantaneo localizzabile ad una quota ben precisa; in realtà, esso impegna uno strato di atmosfera di spessore non trascurabile, pari ad alcune centinaia di metri. Le condizioni termiche all'interno di questo strato (indicato spesso in letteratura come *'melting layer'*) sono dominate da due processi che hanno effetti contrastanti (Borga et al., 1997): infatti, mentre da un lato si ha il normale aumento di temperatura dell'aria al diminuire della quota, dall'altro il processo di scioglimento richiede il trasferimento di notevoli quantità di calore sensibile dall'atmosfera alle particelle (per ogni grammo di ghiaccio che fonde, circa 335 J sono rimossi dall'ambiente circostante), anche se il raffreddamento dell'aria satura produce a sua volta una diminuzione dell'umidità specifica, con conseguente liberazione di calore di condensazione. Quale effetto complessivo di questi processi si osserva lo stabilirsi di condizioni pressoché isoterme all'interno dello strato, ad una temperatura leggermente superiore a quella di fusione. Nel caso di atmosfera satura, lo scioglimento della idrometeora ha inizio a quote immediatamente inferiori rispetto a quella di zero termico, mentre in condizioni di sub-saturazione, lo scioglimento ha inizio a quote anche notevolmente inferiori rispetto a quella corrispondente a 0°C; in queste situazioni, infatti, la pressione di vapore dell'ambiente è inferiore rispetto a quella che si ha sulla superficie della particella a 0°C, e pertanto può verificarsi evaporazione di vapor d'acqua dalla superficie. Lo scioglimento dell'idrometeora inizia pertanto solo quando il trasferimento di calore sensibile dall'ambiente all'idrometeora supera la sottrazione di calore latente alla particella provocata dal processo di sublimazione.

Nell'ambito del modello, la temperatura di transizione è fissata ad 1.5°, senza operare

correzioni per l'umidità dell'aria. La precipitazione, il cui valore medio areale viene calcolato tramite l'applicazione della procedura di Thiessen, dopo un'eventuale correzione per gli effetti dell'orografia, realizzata tramite l'impiego di un parametro correttivo indicato come PCF (*'Precipitation Correction Factor'*), viene considerata uniformemente distribuita sul bacino da analizzare. Sotto tale ipotesi, la distinzione del contributo solido e liquido si basa sull'analisi della curva ipsometrica: la frazione d'area che, su tale curva, corrisponde alla quota di transizione identifica la percentuale relativa al contributo solido, mentre la frazione residua costituisce la percentuale corrispondente al contributo liquido. La frazione di precipitazione solida viene successivamente moltiplicata per un fattore correttivo, indicato come SCF (*'Snowfall Correction Factor'*).

Stima della evapotraspirazione in ambiente alpino: impiego del modello di Hargreaves-Samani

Come riportato nella precedente sezione, il modello di trasformazione afflussi-deflussi fa uso del modello di Hargreaves-Samani (Hargreaves e Samani, 1985) per la stima dei flussi evapotraspirativi potenziali. La qualità delle stime che è così possibile ottenere è stata valutata sulla base del confronto con i valori di evapotraspirazione potenziale ottenuti tramite l'equazione di Penman-Monteith (Penman, 1948; Monteith, 1965).

L'equazione che esprime l'evapotraspirazione potenziale (ET_p , in mm d⁻¹) secondo Penman-Monteith ha la forma seguente (Maidment, 1993):

$$ET_p(t) = \frac{1}{\lambda \rho_w} \left[\frac{\Delta A + \rho_a c_p (e_s - e_d) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)} \right] \quad (5)$$

dove Δ [kPa °C⁻¹] è il valore del gradiente de_s/dT della tensione di vapore saturo e_s rispetto alla temperatura, A [MJ m⁻² d⁻¹] è l'energia radiativa netta disponibile, $(e_s - e_d)$ è il deficit della tensione di vapore e_d [kPa] alla superficie del fogliame, calcolata all'altezza dove viene determinata anche la resistenza aerodinamica, r_a [s m⁻¹], mentre r_s [s m⁻¹] rappresenta la resistenza stomatica della vegetazione (nel calcolo dell'evapotraspirazione potenziale r_s è posto uguale a zero). Nell'equazione (5) ρ_a e ρ_w [kg m⁻³] indicano rispettivamente la densità dell'aria e dell'acqua, c_p il calore specifico dell'aria a temperatura costante, pari a 1.013 kJ kg⁻¹ °C⁻¹, γ è la costante psicrometrica [kPa °C⁻¹], e λ il calore latente di evaporazione, pari a 2.501 MJ kg⁻¹.

Come indicato da Allen et al. (1998) il flusso di calore con il terreno può essere trascurato per valutazioni di tipo giornaliero, come quelle utilizzate nell'ambito qui di interesse. Per la stima dell'evapotraspirazione potenziale sono stati utilizzati i valori orari di radiazione solare, temperatura ed umidità dell'aria, velocità del vento presso la stazione di Arabba (1645 m s.l.m.) nell'arco di 5 anni. Le valutazioni di evapotraspirazione potenziale giornaliera mediate sui 5 anni sono riportate in Figura 3, mentre i valori cumulati annui sono riportati in Tabella 2. Essi variano, sui cinque anni considerati, tra un minimo di 473 mm ad un massimo di 538 mm, con un valore medio pari a 502 mm.

L'equazione di Hargreaves-Samani (Hargreaves e Samani, 1985) ha invece la forma seguente:

$$ET_p(t) = 0.0023 \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T + 17.8) \quad (6)$$

che fornisce l'evapotraspirazione potenziale in mm d⁻¹, ed in cui T rappresenta la temperatura dell'aria [°C], mentre T_{max} e T_{min} [°C] indicano rispettivamente la temperatura media massima e minima mensile. Infine, R_a indica il valore della radiazione extraatmosferica (astronomica) in mm d⁻¹.

Il metodo viene consigliato in letteratura (Hargreaves e Allen 2003) quando l'impiego venga richiesto per periodi elementari non troppo brevi (generalmente superiori ad una settimana); è questo il caso tipicamente rappresentato dalle applicazioni di modellistica idrologica continua. Per esempio, Shuttleworth (in Maidment, 1993), indica, sulla base di intercomparazioni riportate in Jensen et al. (1990), l'equazione di Hargreaves-Samani come modello di riferimento nel caso in cui siano disponibili solo dati di temperatura dell'aria per la stima dell'evapotraspirazione potenziale. È noto, tuttavia, che questa tecnica tende a sottostimare/sovrastimare l'evapotraspirazione potenziale in

condizioni di elevata/modesta ventosità (Ravelli e Rota, 1994). Il valore del coefficiente presente nella formulazione originale (0.0023) corrisponde infatti ad una velocità media del vento pari a circa 100 km d⁻¹; per velocità del vento maggiori, dovrebbero essere adottati valori del coefficiente più elevati (e viceversa). Anche nel caso qui considerato il metodo di Hargreaves-Samani presenta una buona correlazione con i risultati ottenuti tramite Penman-Monteith (confronti effettuati su intervalli settimanali, qui non riportati). Tuttavia, l'esigenza di adottare un fattore correttivo per l'applicazione del metodo di Hargreaves-Samani in ambiente alpino emerge chiaramente dal confronto fra le stime ottenute utilizzando quest'ultima equazione e l'equazione (5) (Tabella 2).

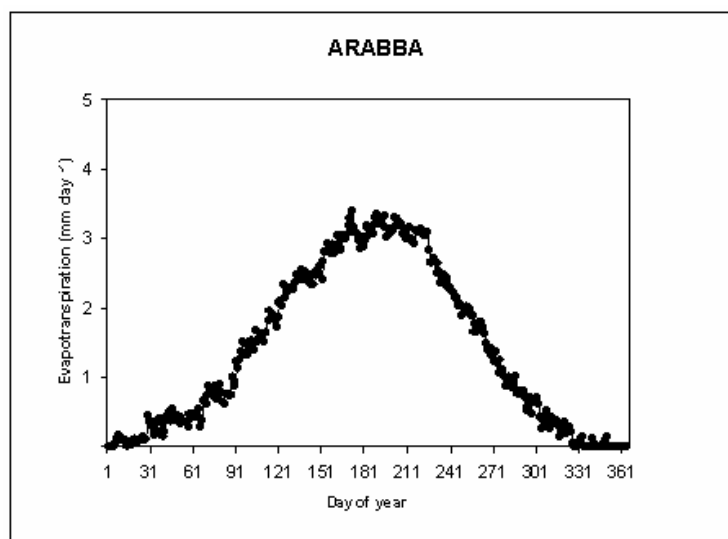


Figura 3: Valori di evapotraspirazione potenziale giornaliera – calcolata tramite l'equazione (5) - per la stazione di Arabba come valor medio sugli anni 1997-1999 e 2002-2003.

Tabella 2. Analisi dei valori di evapotraspirazione potenziale valutati tramite Penman-Monteith (ET_{PM}) e tramite Hargreaves-Samani (ET_{HS}) per la stazione di Arabba per gli anni 1997-1999 e 2002-2003.

Anno	ET _{PM} (mm)	ET _{HS} (mm)	Rapporto (ET _{PM})/(ET _{HS})
1997	480	667	0.72
1998	502	664	0.76
1999	517	662	0.78
2002	473	651	0.73
2003	538	685	0.78
media	502	665.8	0.75

L'esame della Tabella 2 consente di concludere che il metodo di Hargreaves-Samani sovrastima il tasso di evapotraspirazione potenziale annuo di circa il 32% (almeno per la stazione di Arabba); pertanto la sua applicazione dovrebbe essere accompagnata dall'impiego di un fattore correttivo pari a circa 0.75. Confronti effettuati da Turri et al. (1998) sulla base di dati agrometeorologici relativi a 6 stazioni della Provincia di Trento confermano che, anche in questi casi, il metodo di Hargreaves-Samani, confrontato con i risultati ottenuti tramite il metodo di Penman-Monteith, tende a sovrastimare il tasso di evapotraspirazione; gli errori sistematici così individuati vanno da 3% (per la stazione di Trento) a 35% (per la stazione di Borgo Valsugana). L'applicazione del metodo di Hargreaves-Samani nell'ambito della modellazione idrologica qui descritta è stata quindi effettuata tramite l'impiego di un fattore correttivo pari a 0.75.

INFLUENZA DELLA CORREZIONE DELLA PRECIPITAZIONE SULLA MODELLAZIONE DEL BILANCIO IDROLOGICO

I risultati ottenuti tramite l'applicazione del modello idrologico ai bacini di studio, utilizzando le correzioni per gli afflussi meteorici e la valutazione dei flussi evapotraspirativi precedentemente descritte, sono sintetizzati nelle Tabelle 3 e 4. I valori dei coefficienti correttivi utilizzati (riportati in Tabella 2) risultano ai limiti superiori rispetto a quanto riportato in letteratura (Merz e Bloeschl, 2004) per una cospicua serie di bacini austriaci, almeno per quanto riguarda la correzione relativa alla precipitazione in forma solida. Tali valori probabilmente riflettono l'incidenza anche di fattori che esulano dalla sottostima strumentale della precipitazione solida, come gli effetti dell'intercettazione nivale sulle chiome arboree, e quindi sono in qualche modo collegate alla rappresentazione modellistica utilizzata nel presente studio. Le correzioni dovute alla influenza dell'orografia sulle precipitazioni risultano generalmente in accordo (anche se al limite inferiore) con alcune stime effettuate da Borga e Da Ros (1995) circa l'incremento delle precipitazioni con la quota in questa regione. Si può notare come i valori di precipitazione media areale così corretta risultino notevolmente aumentati rispetto ai valori osservati, con incrementi che vanno da circa 30% per il Rio Ridanna a circa 73% per il Plan a Plan. I valori di evapotraspirazione potenziale variano da 395 mm (per il bacino a quota media più elevata, il Rio Plan a Plan) a 446 mm (per il bacino posto a quota più bassa, il Ridanna a Vipiteno), mentre il rapporto tra il tasso di evapotraspirazione reale e quello potenziale varia da 0.54 (Aurino a Cadipietra) a 0.77 (Plan a Plan). Sia le stime di evapotraspirazione potenziale che quelle reali risultano in buon accordo con analoghe valutazioni riportate da Gurtz et al. (1999) per alcuni bacini alpini in Svizzera. La stima complessiva del valore medio dei deflussi che è così possibile conseguire risulta eccellente.

Il bilancio idrologico così articolato non include il contributo dovuto all'ablazione glaciale, che, in questa fase di generale regressione degli apparati glaciali, è opportuno valutare. Il valore del contributo (riferito all'area glaciale interessata), stimato sulla base di bilanci di massa effettuati in zone prossime a quelle di studio, varia da 500 a 1500 mm all'anno (Rossi e Zanon, 1996) con variazioni dovute essenzialmente alla quota della fascia altitudinale in cui si distende l'apparato glaciale (Ranzi e Bacchi, 1998). Per esempio, l'ablazione glaciale per il Ghiacciaio di Fontana Bianca-Weissbrunnferner, nel bacino del Valsura (Val d'Ultimo), calcolata come valore medio su 11 anni (1983/84 - 1987/88 and 1991/92 - 1996/97) è stata valutata in 544 mm annui (comunic. pers. Kaser, 2002). Qualora si consideri per l'ablazione glaciale un valore di 1000 mm annui e lo si applichi alle aree glaciali ricomprese nei bacini qui considerati (Tabella 1), il contributo corrispondente, rapportato all'area complessiva dei bacini stessi, assume valori variabili fra 16 mm per il Plan e 45 mm per l'Aurino a Caminata. Si tratta in genere di valori sufficientemente modesti che possono rientrare nel margine di incertezza delle valutazioni generali delle componenti principali del bilancio idrologico. E' evidente tuttavia che, per bacini idrografici nell'ambito dei quali la superficie glaciale rappresenti una frazione più significativa, il contributo della corrispondente ablazione può costituire un contributo importante nel calcolo del bilancio.

CONCLUSIONI

L'applicazione del bilancio idrologico ad alcuni bacini montani rivela come gli afflussi meteorici possano essere sottostimati in modo percentualmente significativo, quando le precipitazioni solide rappresentano un contributo rilevante. Le cause alla base di tali errori sistematici possono essere riconosciute nella i) sottostima delle precipitazioni cadute in forma solida, a causa degli effetti del vento e della turbolenza e nella ii) insufficiente rappresentatività delle misure pluviografiche in relazione all'influenza dell'orografia sulla precipitazione. La memoria ha indicato come sia possibile mitigare gli effetti di tali errori, nel contesto di un'applicazione di modellistica idrologica pluriennale. I valori di precipitazione corretti risultano incrementati in modo considerevole rispetto ai corrispondenti valori misurati. Occorre tuttavia riconoscere che tali incrementi dipendono in modo significativo sia dalla scelta del metodo utilizzato per la valutazione dei flussi evapotraspirativi potenziali che dalla struttura del modello di trasformazione idrologica impiegato.

Tabella 3. Influenza della applicazione dei fattori correttivi PCF e SCF sulla stima della precipitazione per quattro bacini idrografici altoatesini (periodo di osservazione: 1992-1998)

Bacino	PCF [-]	SCF [-]	Precipitazioni corrette (mm)	Pioggia corretta (mm)	Neve Corretta (mm)
Aurino a Cadipietra	1.2	2.0	1551	643	908
Aurino a Caminata	1.2	2.0	1494	661	833
Plan a Plan (94-98)	1.2	1.9	1635	582	1053
Ridanna a Vipiteno	1.1	1.6	1271	745	526

Tabella 4. Influenza della applicazione dei fattori correttivi PCF e SCF sulla simulazione del bilancio idrologico annuale per quattro bacini idrografici altoatesini (periodo di osservazione: 1992-1998)

Bacino	Precipitazioni corrette (mm)	Deflussi Simulati (mm)	ET reale (mm)	ET potenziale (mm)	Errore medio % simulazione deflussi
Aurino a Cadipietra	1551	1311	232	424	1.6
Aurino a Caminata	1494	1168	321	422	0
Plan a Plan (94-98)	1635	1336	305	395	1.8
Ridanna a Vipiteno	1271	945	317	446	1.2

BIBLIOGRAFIA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., e Smith, M. 1998: Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrig. Drain. Paper No. 56*, Rome.
- Becciu, G., Bianchi, A., Fassò, C.A. e Larcana, E., 2000: Quick calculation of minimum in-stream flow in drainage basins in Central Alps. *New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life*, Maione, Majone Lehto & Monti (eds), 2000 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 138 41
- Beven, K., 2001: On hypothesis testing in hydrology. *Hydrol. Proc.*, 15, 1655-1657.
- Borga, M. e Da Ros, D., 1995: Stima delle precipitazioni medie areali in bacini alpini. *Quaderni di Idronomia Montana*, 14, pp. 69-100, 1995.
- Borga, M., Anagnostou, E.N. e Krajewski, W.F., 1997: A simulation approach for validation of a bright band correction method. *J. Appl. Meteorol.*, 36(11), 1507-1518, 1997.
- Cazorzi, F. e Dalla Fontana, G., 1996: Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index. *J. Hydrol.*, 181, 169-187, 1996.
- Degli Esposti, S., 2005: *Flood forecasting and rainfall-runoff modelling for alpine basins*. Relazione per Dottorato di Ricerca, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università di Padova, 2005.
- Falappi, L. e Grossi, G. 1998: Applicazione comparata di modelli idrologici a simulazione continua per lo studio delle portate di magra nelle Alpi Lombarde, *Proc. XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania, 9-12 Settembre 1998 (II)*: 353-364.
- Goodison, B. E., Accuracy of Canadian snow gauge measurements. *J. Appl. Meteorol.*, 17(10), 1542-1548, 1978.
- Goodison, B. E., Compatibility of Canadian snowfall and snow cover data, *Water Resour. Res.*, 17(4), 893-900, 1981.
- Goodison, B. E., Louie, P. Y. T., e Yang, D. , 1998: WMO solid precipitation measurement intercomparison, final report, *WMO/TD 872*, 212 pp., World Meteorol. Organ., Ginevra, Switzerland, 1998.
- Groisman, P. Y., e Easterling, D.R., 1994: Variability and trends of total precipitation and snowfall over the United States and Canada, *J. Clim.*, 7(1), 184-205, 1994.
- Gurtz, J., Baltensweiler, A. e Lang, H., 1999: Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrol. Process.* , 13, 2751-2768, 1999.
- Hargreaves, G. H. e Samani, Z. A., 1985: Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.*, 1(2), 96-99, 1985.
- Hargreaves, G.H. e Allen, R.G., 2003: History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration

- Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129, 1, 53-63, 2003.
- Jensen, M.E., R. D. Burman and R.G. Allen 1990: Evapotranspiration and irrigation requirements. ASCE Manual 70, p.332, 1990.
- Khun, M., 1997: Rapporto per l'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano (non pubblicato).
- Kapos, V., Rhind, J., Edwards, N., Price, M.F. e Ravilious, C., 2000: Developing a map of the world's mountain forests. In: *Forests in Sustainable Mountain Development: a State of Knowledge Report for 2000*, M.F. Price e N. Butt (Eds.), IUFRO research series 5. CAB International, Wallingford, UK, 4-9.
- Larson, L. W., and E. L. Peck, Accuracy of precipitation measurements for hydrological modeling. *Water Resour. Res.*, 10(4), 857-863, 1974.
- Maidment, D.R., 1993: *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Merz, R. e Bloeschl, G., 2004: Regionalisation of catchment model parameters. *J. Hydrol.*, 287, 95-123, 2004.
- Monteith, J.L., 1965: Evaporation and the environment. *Symp. Soc. Expl. Biol.*, 19, 205-234, 1965.
- Moore, R. J., e Clarke, R. T. , 1981: A distribution function approach to rainfall runoff modeling. *Water Resour. Res.*, 17(5), 1367-1382, 1981.
- Nani, A., 2005: Analisi e confronto di osservazioni nivo-meteorologiche alla stazione di Careser Diga (TN). Tesi di laurea triennale in Tecnologie Forestali ed Ambientali, Facoltà di Agraria.
- Penman, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London*, A193, 120-145, 1948.
- Price, M.F., Lysenko, I. e Gloersen, E., 2004: La delimitation des montagnes européennes/Delineating Europe's mountains. *La revue de géographie alpine/J. Alpine Res.*, 92, 61-86.
- Ranzi, R. e Bacchi, B., 1998: Il bilancio idrologico nelle aree montane per la stima delle disponibilità idriche: alcuni problemi aperti. *Proc. XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania, 9-12 Settembre 1998 (II)*: 348-358.
- Ravelli, F. e Rota, P., 1994: Carta frequenziale della evapotraspirazione di riferimento irriguo (ET_0) delle pianure litoranee del Mezzogiorno d'Italia. *Irrigazione e Drenaggio*, 1, 5-97, 1994.
- Rossi, G.C. e Zanon, G., 1996: Bilans hydrologiques du bassin versant du glacier de Careser (Alpes Centrales) au cours de trois années 1992-95. *La Houille Blanche*, 5, 79-84, 1996.
- Sevruk, B., 1992: Snow cover measurements and areal assessment of precipitation on soil moisture. World Meteorological Organization, Operational Hydrology Report n. 35, Ginevra, 1992.
- Turri, F., Toller, G. e Ferrari, P., 1998: Applicazione di alcuni metodi di calcolo della evapotraspirazione di riferimento (ET_0) ai dati agrometeorologici della Provincia di Trento (1984-1997). Rapporto del Centro Agrometeorologico Provinciale – Istituto Agrario di S. Michele all'Adige (TN), 1998.
- Viviroli, D. e Weingartner, R., 2004: The hydrological significance of the European Alps. In: *Hydrological Atlas of Switzerland*, R. Weingartner e M. Spreafico (Eds.), Plate 6.4, Swiss National Hydrological and Geological Survey, Berna.
- Weingartner, R. e Aschwanden, H., 1992: Discharge regime – the basis for the estimation of average flows. In: *Hydrological Atlas of Switzerland*, R. Weingartner e M. Spreafico (Eds.), Plate 5.2, Swiss National Hydrological and Geological Survey, Berna.
- World Meteorological Organization, 1986: Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational Hydrology report n. 23, Ginevra, 1986.
- World Meteorological Organization, 1992: Simulated real-time intercomparison of hydrological models. Operational Hydrology report n. 38, Ginevra, 1992.
- Yang, D., 1999: An improved precipitation climatology for the Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 26(11), 1625-1628, 1999.

**INTERAZIONE TRA VEGETAZIONE E DEFLUSSO E STABILITÀ
DELLE SPONDE**

Gian Battista BISCHETTI

Istituto di Idraulica Agraria - Università di Milano

INTRODUZIONE

La vegetazione presente sulle sponde dei corsi d'acqua esercita una serie di complesse funzioni ecologiche ed interagisce con i processi di deflusso e d'instabilità, divenendo secondo le situazioni, un elemento accettato ed incentivato o un problema da eliminare o contenere.

La vegetazione spondale riveste un ruolo fondamentale dal punto di vista ecologico, essendo uno degli elementi fondamentali dell'ambiente fluviale per le sue funzioni di habitat, di sorgente di biodiversità, di tampone nei confronti delle pressioni circostanti. Tale ruolo, oltre che dal punto di vista culturale, è ormai riconosciuto anche a livello normativo come nel caso del D. Lgs. 152/99 che tra le sue finalità ha anche quella di "...mantenere la capacità naturale di autodepurazione dei corpi idrici, nonché la capacità di sostenere comunità animali e vegetali ampie ben diversificate".

Da molti secoli, inoltre, alla vegetazione è riconosciuta la funzione stabilizzante nei riguardi delle sponde sia per quanto riguarda l'erosione che i movimenti di massa; tracce dell'utilizzo di piante per la stabilizzazione delle sponde, ad esempio, si trovano in forma esplicita già in documenti del 1591 reperiti in Cina (Lee, 1985 cit. Greenway, 1987). Tale positiva azione ha portato nel tempo all'utilizzo delle piante in numerose opere di difesa spondale. Questo tipo di opere, che dopo essere state abbandonate nel recente passato a favore di quelle realizzate con materiali inerti, da alcuni anni sono state rivalutate nell'ambito delle tecniche di ingegneria naturalistica, essendo in grado di abbinare le esigenze di difesa con quelle del mantenimento o della ricostituzione di un ambiente il più possibile naturale.

La presenza di vegetazione sulle sponde, tuttavia, presenta anche una serie di problematiche di carattere idraulico legate all'interazione che essa ha con il libero deflusso delle acque, diminuendo la capacità di convogliamento della portata in occasione degli eventi di piena. Tali problematiche sono anch'esse note da tempo avendo ispirato un passo del R.D. n. 523 del 15 luglio 1904 "Testo unico sulle opere idrauliche", tuttora vigente, che vieta "le piantagioni che si inoltrino dentro gli alvei ... a costringere la sezione normale e necessaria al libero deflusso delle acque" e "le piantagioni di qualunque sorta di alberi, arbusti ... lungo fiumi, torrenti ...".

La presenza di vegetazione sulle sponde dei corsi d'acqua, di conseguenza, pur essendo auspicabile per tutti i suoi numerosi effetti positivi rappresenta un elemento che in talune situazioni può causare problemi. In questi casi occorre valutare con attenzione i diversi effetti esercitati dalla vegetazione in generale e dai diversi tipi di vegetazione in particolare; nei confronti del deflusso, infatti, l'effetto delle piante varia significativamente in relazione all'*habitus*, alla specie, all'età, alle pratiche di manutenzione.

EFFETTO DELLA VEGETAZIONE SULLE SEZIONI IDRAULICHE

La presenza di vegetazione in alveo o più frequentemente sulle sponde, interagisce con il movimento stesso dell'acqua all'interno delle sezioni e con i processi d'erosione e d'instabilità delle sponde. Tali interazioni hanno diverse conseguenze sia di carattere positivo, che negativo (figura 1), sia nei riguardi della stabilità delle sponde del deflusso.

In generale, la presenza di vegetazione agisce sulla stabilità delle sponde attraverso tre meccanismi, i) la trattenuta delle particelle superficiali del terreno ostacolando l'asportazione da parte della corrente, ii) il rinforzo meccanico attraverso la presenza di radici che esercitano un'azione assimilabile ad un aumento di coesione, iii) la riduzione del contenuto idrico del terreno che compone la sponda attraverso l'evapotraspirazione delle piante e la conseguente diminuzione delle pressioni interstiziali.

Dal punto di vista idraulico i meccanismi d'interazione sono due: i) la presenza di vegetazione aumenta la scabrezza con conseguente riduzione della velocità dell'acqua, aumento dei tiranti idrici e riduzione della portata massima che la sezione è in grado di convogliare, ii) la vegetazione occupa una parte della sezione riducendone la porzione disponibile per il deflusso.

La riduzione di velocità da una parte comporta la riduzione dell'effetto erosivo su sponde e fondo con conseguente aumento della stabilità della sezione, dall'altra, ne aumenta la possibilità di deposizione di materiale che riduce la sezione utile, con conseguente aumento del rischio di esondazione. A scala di rete idrografica, inoltre, la riduzione generalizzata della velocità ha anche un

effetto sui tempi di trasferimento del deflusso favorendo la laminazione delle piene e riducendone i picchi.

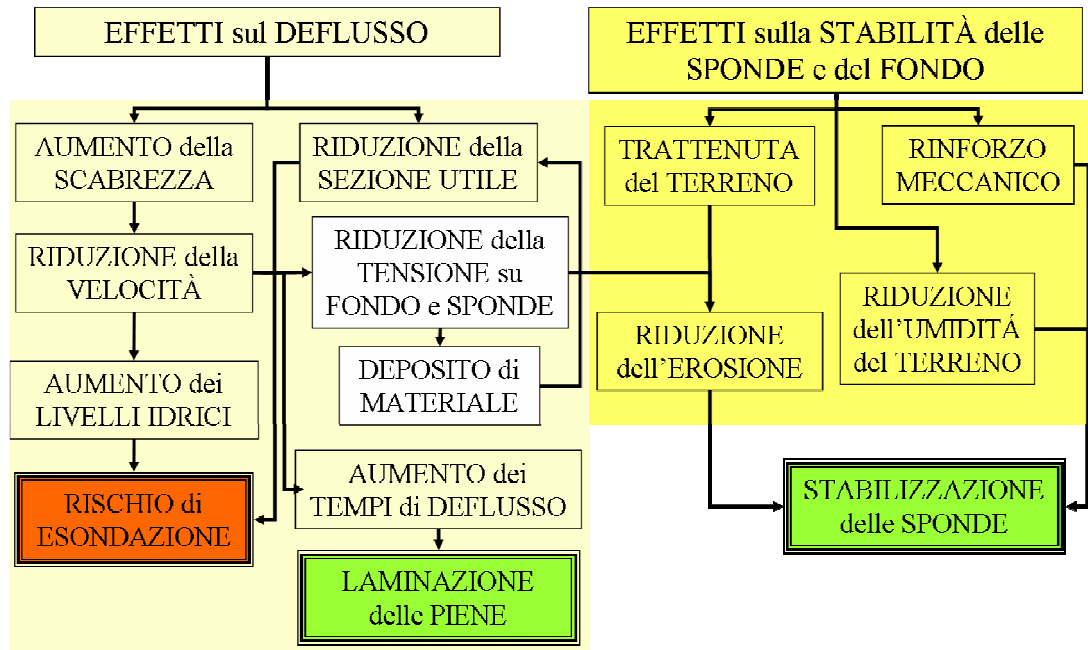


Figura 1: effetti della vegetazione sulle sezioni idrauliche

In generale, quindi, non è possibile stabilire a priori l'effetto complessivo della vegetazione, ma occorre valutare ciascun caso utilizzando procedure adeguate. L'effetto complessivo, infatti, dipenderà oltre che dalle caratteristiche idrauliche della sezione anche dalle caratteristiche meccaniche e morfologiche della vegetazione presente (o da insediare), che possono essere differenti in funzione della specie, dello stadio fenologico, dell'età e dell'eventuale manutenzione effettuata. In genere, inoltre, all'interno di una stessa sezione coesistono situazioni vegetazionali differenti in funzione della distanza dal fondo e della frequenza di superamento dei livelli idrometrici che devono essere tenute presenti.

STABILITÀ DELLE SPONDE

Le sponde sono soggette a due tipologie d'instabilità che spesso si combinano: i fenomeni erosivi ed i fenomeni di massa. Nel presente contributo, tuttavia, verranno presi in considerazione solamente questi ultimi.

Come qualsiasi superficie inclinata costituita da terreno, le sponde sono soggette a movimenti di massa quando le tensioni di taglio dovute alla forza gravitazionale superano le resistenze al taglio offerte dal materiale che costituisce la sponda stessa.

Da un punto di vista descrittivo, possiamo definire diverse tipologie di movimenti gravitativi che interessano le sponde. In relazione alle loro composizione granulometrica e stratigrafica (figura 2): i) movimenti planari, tipici di sponde ripide con materiali non coesivi non stratificati, ii) movimenti rotazionali, tipici di sponde poco o mediamente ripide con materiali coesivi non stratificati, iii) sporgenze, tipiche di situazioni in cui si ha una stratificazione in cui gli strati superiori sono dotati di coesione mentre quelli inferiori sono facilmente erodibili, iv) cedimenti dovuti a sifonamento della sponda in corrispondenza di strati intermedi facilmente erodibili.

Da un punto di vista quantitativo, è possibile applicare gli schemi geotecnici maggiormente attinenti al cinematisimo di collasso più probabile.

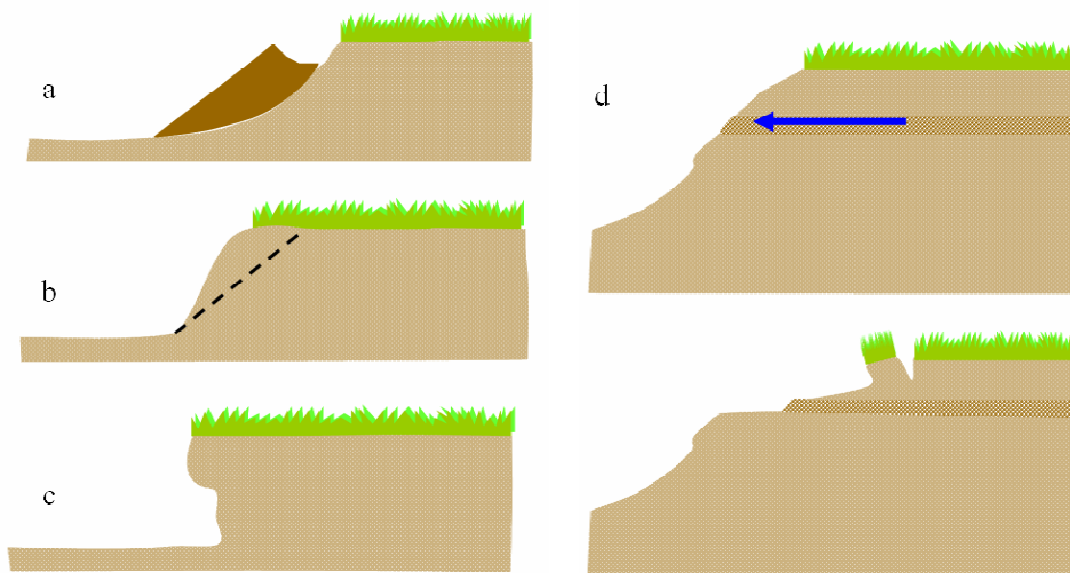


Figura 2: forme di dissesti di sponda, a) movimenti planari, b) movimenti rotazionali, c) sporgenze, d) cedimenti dovuti a sifonamento della sponda (modificata da Hagerty, 1991).

La schematizzazione più semplice è quella che prevede lo scivolamento di una massa triangolare su una superficie planare (figura 3).

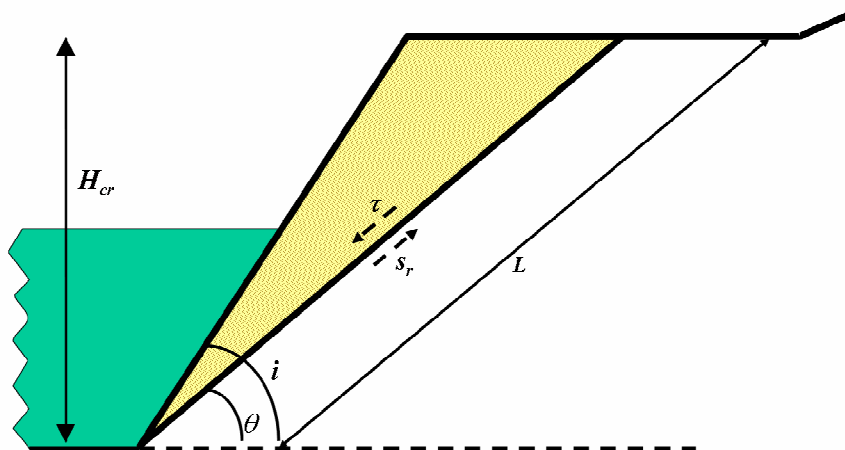


Figura 3: scivolamento planare triangolare

Per tale situazione è possibile definire il Fattore di Sicurezza, applicando il principio dell'equilibrio limite e il criterio di rottura di Mohr-Coulomb secondo cui la resistenza offerta dal materiale (s_r) è data da:

$$s_r = C' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (1)$$

dove C' è la coesione complessiva offerta dal terreno e dalle radici presenti [kPa], σ è la pressione di sconfinamento [kPa], u è la pressione interstiziale [kPa], ϕ' è l'angolo di resistenza al taglio del materiale[°].

Il Fattore di Sicurezza (FS), quindi, può essere espresso come:

$$FS = \frac{C' + (\gamma_t \cos \theta - u) \cdot \tan \phi'}{\gamma_t \sin \theta} \quad (2)$$

con θ angolo del piano di scivolamento.

Data la semplicità geometrica del cono di scivolamento, nel caso di terreno asciutto (pressione interstiziale nulla), è possibile ricavare l'altezza critica della sponda (H_{cr}) (ASCE, 1998):

$$H_{cr} = \frac{4C' \sin i \cos \phi'}{\gamma_t [1 - \cos(i - \phi')]} \quad (3)$$

con i angolo della sponda [$^\circ$], γ_t peso nell'unità di volume del terreno [kN/m^3]

Tale schematizzazione è però eccessivamente semplificata di ciò che avviene effettivamente in quanto la forma della massa di distacco è generalmente più complessa e la superficie di scivolamento non passa esattamente per l'intersezione tra fondo e sponda (Simon et al., 1991). Osman e Thorne (1988), Simon et al. (1991) e Darby e Thorne (1996), riconoscendo che lo schema del cono è eccessivamente semplificato rispetto alla realtà, mantenendosi nelle medesime ipotesi dell'equilibrio limite e del criterio di rottura di Mohr-Coulomb, ne hanno proposto delle varianti che tengono conto dell'effettiva geometria della massa instabile, della pressioni interstiziali e delle pressioni del battente presente nel corso d'acqua (figura 4).

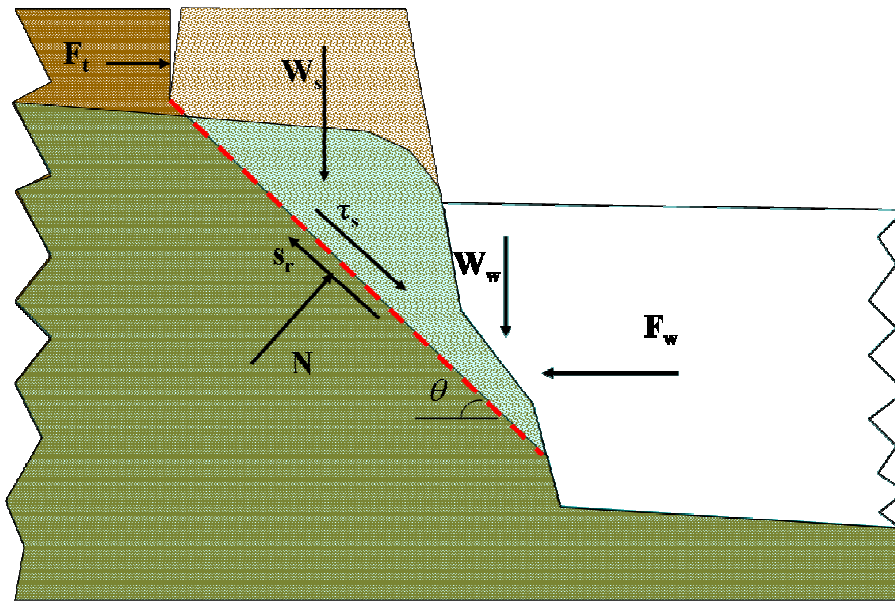


Figura 4: schematizzazione di Darby e Thorne (1996)

Gli autori, inoltre, hanno proposto una serie di soluzioni che tengono conto dei diversi livelli del pelo libero nel corso d'acqua e della saturazione della sponda; per tali relazioni si rimanda al lavoro originale o al lavoro di Darby et al. (2000).

Partendo da tale modello, Simon et al. (1999, 2000) hanno proposto un ulteriore raffinamento in grado di tenere conto anche della stratificazione, della suzione negli strati insaturi e della presenza di vegetazione. Per la valutazione della suzione (c_a), in particolare, gli Autori utilizzano la relazione di Fredlund e Rahardjo (1993):

$$c_a = c' + (u_a - u) \tan \phi^b = c' + \psi \tan \phi^b \quad (4)$$

e la relazione del Fattore di Sicurezza diviene:

$$FS = \frac{\sum_{j=1}^N C'_j L_j (S_j \tan \phi'_j) + [W_j \cos i - U_j + P_j \cos(\beta - i)] \tan \phi'}{\sum W_j \sin i - P_j \sin(\beta - i)} \quad (5)$$

dove u_a è la pressione dell'aria, ψ è il potenziale matriciale, L è la lunghezza del piano di scivolamento, P è la pressione idrostatica esercitata dai tiranti nel corso d'acqua, il pedice j si riferisce allo strato considerato ed N è il numero degli strati.

Se la schematizzazione sopra illustrata sembra in grado di rappresentare in maniera adeguata i fenomeni tipici di sponde ripide (60-70°), nel caso di sponde con pendenze medio-basse, tale schema sembra essere discutibile (Millar e Quick, 1997; ASCE, 1998) e sarebbe meglio riferirsi agli schemi utilizzati per i movimenti di tipo rotazionale quale ad esempio il metodo dei conci (figura 5). Per la descrizione di tali metodi, che costituiscono uno standard della pratica geotecnica, si rimanda ai numerosi testi di geotecnica.

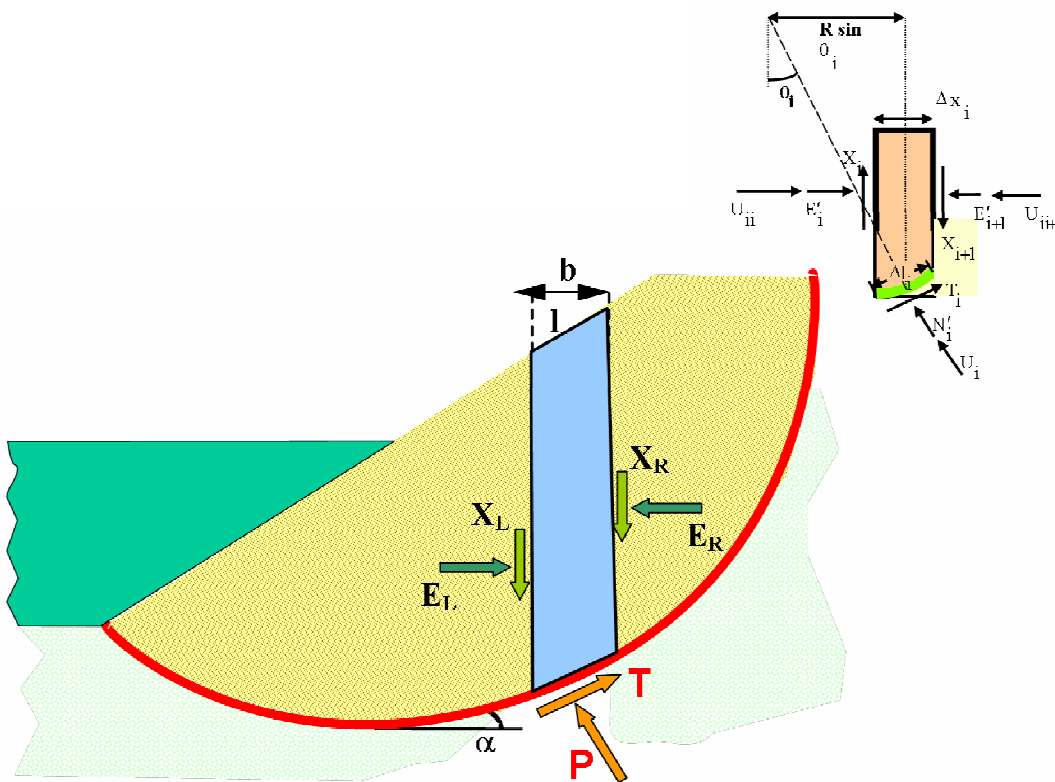


Figura 5: schema di risoluzione dei conci

Per quanto riguarda l'effetto della vegetazione, come detto, essa agisce sia sulla riduzione del contenuto d'acqua, che sull'aumento della coesione.

Dal punto di vista meccanico il comportamento di un terreno radicato è analogo a quello di un materiale composito costituito da una matrice relativamente plastica in cui sono inserite fibre elastiche dotate di resistenza alla trazione sufficientemente elevata. Quando il terreno viene sottoposto a tensioni di taglio, attraverso la tensione tangenziale che si sviluppa tra le particelle di terreno e la superficie esterna delle radici, viene mobilizzata una resistenza aggiuntiva dovuta allo sviluppo di forze di trazione all'interno delle radici stesse ed il suolo nel suo complesso acquisisce una maggior resistenza.

L'entità del rinforzo, quindi, dipenderà dalla quantità di radici presenti nel terreno alle diverse profondità e dalla resistenza delle singole radici. La sua quantificazione può essere effettuata attraverso prove di taglio dirette ma, data la loro complessità, in genere si preferisce fare ricorso a modelli di carattere più generale basati sulla teoria dei terreni rinforzati con fibre. A tale riguardo, sono stati proposti diversi approcci basati sugli elementi finiti, sulle caratteristiche di deformazione dei materiali compositi rinforzati con fibre, di tipo statistico ed anche quelli semplificati basati sull'equilibrio limite delle forze. Questi ultimi (Wu, 1976; Waldron, 1977; Wu et al., 1979; Waldron e Dakessian, 1981; Gray e Ohashi, 1983) ipotizzando che la radice sia cilindrica, sia linearmente elastica, che si estenda attraverso la superficie di taglio in direzione perpendicolare ad essa e che l'angolo di resistenza al taglio del suolo non venga influenzato, portano a scomporre la resistenza alla trazione mobilizzata dalla radice in una forza che contrasta direttamente quella di taglio ed una perpendicolare al piano di taglio stesso che aumenta la pressione di confinamento σ .

L'incremento di resistenza al taglio dovuto alla presenza delle radici, c_r , si può quindi esprimere come:

$$c_r = k' t_r \quad (6)$$

dove t_R è la resistenza alla trazione media mobilizzata per unità di area del suolo [kPa], k' tiene conto della scomposizione della resistenza a trazione delle radici, che sulla base di semplici considerazioni geometriche può essere espresso come

$$k' = (\cos\theta \tan\phi + \sin\theta) \quad (7)$$

con θ è l'angolo di distorsione delle radice rispetto alla perpendicolare al piano di taglio e ϕ è l'angolo di resistenza al taglio del terreno.

Attraverso un'analisi di sensitività, Waldron (1977) e Wu et al. (1979) hanno evidenziato come di norma k' vari tra 1.0 e 1.3 ($40^\circ < \theta < 70^\circ$ e $25^\circ < \phi < 40^\circ$) e comunemente viene accettato un valor medio di 1.15.

La resistenza alla trazione media mobilizzata per unità di area t_R (kPa) del suolo può essere valutata come:

$$t_R = T_r a_r \quad (8)$$

dove T_r (MPa) è la resistenza media alla trazione mobilizzata per unità di area occupata dalle radici e a_r è il rapporto di area radicata A_r/A , cioè la frazione di sezione trasversale di suolo (A) effettivamente occupata dalle radici (A_r).

T_r dipende, oltre che dalla specie, anche dal loro diametro (d) secondo una relazione di potenza del tipo (Burroughs e Thomas, 1977; Gray e Sotir, 1996; Bischetti, 2001; Bischetti et al., 2005):

$$T_r(d) = \alpha d^{-\beta} \quad (9)$$

dove α e β sono costanti che dipendono dalla specie considerata.

In alcuni casi sono anche state proposte relazioni differenti (Hathaway e Penny, 1975; Zhou et al., 1998; Schmidt et al., 2001).

Data la dipendenza della resistenza dal diametro espressa dalla (9), la (8) deve essere riscritta come:

$$t_R = \sum_{i=1}^N T_{r_i} \frac{A_{r_i}}{A} \quad (10)$$

dove N è il numero di classi di diametro i considerate.

Per quanto riguarda il rapporto di area radicata, esso è un parametro che dipende fortemente dalle condizioni locali dell'ambiente in cui crescono la piante, dalla specie e dalla profondità, per cui la (10) deve essere riscritta come:

$$t_R(z) = \sum_{i=1}^N T_{r_i} \frac{A_{r_i}(z)}{A} \quad (11)$$

Nel caso di movimenti superficiali, infine, il rinforzo complessivamente esercitato dalle radici è dato sia da quelle presenti sul piano di scivolamento (*coesione basale delle radici*) che da quelle che si trovano sul piano di distacco laterale (*coesione laterale delle radici*); mentre sul piano di taglio la resistenza mobilizzata è solo quella delle radici effettivamente presenti a tale profondità, lungo la superficie laterale viene mobilizzata la resistenza di tutte le radici presenti dal piano campagna fino alla profondità Z , per cui:

$$c_{\text{tot}}^Z = \frac{[\sum_{z=1}^M \sum_{i=1}^N \alpha d_{i,z}^{-\beta} a_{i,z}]}{Z} \cdot \Delta Z \quad (12)$$

$$c_{\text{base}}^Z = \sum_{i=1}^N \alpha d_{i,Z}^{-\beta} a_{r,i,Z} \quad (13)$$

con Z (m) profondità della superficie di taglio, N numero classi di diametro, M numero di classi di profondità.

La somma dei due contributi definisce la resistenza aggiuntiva potenzialmente fornita dalle radici presenti nel terreno. In realtà la resistenza a trazione effettivamente mobilizzata dipende dal comportamento della radice nel terreno, essa può: i) rompersi, mobilizzando l'intera resistenza alla trazione, ii) allungarsi senza rompersi, mobilizzando solo una parte della resistenza alla trazione, iii) sfilarsi, mobilizzando una parte ancora minore della sua resistenza.

Su tale punto, tuttavia, la letteratura non è concorde, mentre alcuni autori considerano l'intera resistenza aggiuntiva (Roering et al., 2003; Schmidt et al., 2001), altri ritengono che sia opportuno considerare un coefficiente di riduzione (Waldron and Dakessian, 1981; Hammond et al., 1992; Bischetti et al., 2004). In effetti, Riestenberg (1987 Cit. Wu, 1995) dimostra che mentre per porzioni di apparato radicale non ramificato la resistenza a trazione aumenta con la deformazione fino ad un picco in corrispondenza della rottura della radice, quando si utilizza una porzione ramificata la resistenza effettivamente mobilizzata oscilla continuamente con dei picchi in corrispondenza della rottura delle radici principali, che non avviene contemporaneamente. Nel terreno, quindi, al momento pochi studi sono stati condotti in questa direzione e tra questi Hammond et al. (1992) suggeriscono per coperture forestali un valore pari a 0.56, mentre Waldron e Dakessian (1981) trovano nell'ambito di prove di taglio diretto in laboratorio per piantine di orzo un valore di 0.82; tale differenza dovrebbe essere dovuta alla diversa tipologia di apparato radicale: il primo ramificato, multiorientato e con diametro delle radici eterogeneo, il secondo poco ramificato, monorientato perpendicolarmente al piano di taglio e con diametro delle radici omogeneo.

Per tenere conto di questo fenomeno, la coesione aggiuntiva può quindi essere espressa come:

$$c_r^Z = k' k'' \left(c_{\text{base}}^Z + c_{\text{laterale}}^Z \right) \quad (14)$$

dove k'' tiene appunto conto del fatto che non tutte le radici mobilitano contemporaneamente la loro massima resistenza.

Per quanto riguarda le informazioni di base per l'applicazione dei modelli di rinforzo, negli ultimi anni diversi ricercatori hanno contribuito ad espandere le conoscenze sulle caratteristiche di resistenza delle radici delle diverse specie forestali, mentre minore è il numero dei lavori relativi alla densità di radicazione con la profondità (Bischetti et al., 2005), soprattutto per l'ambiente ripario (Shields e Gray, 1993; Abernethy e Rutherford, 2001; Simon e Collison, 2002; Czernin e Phillips, 2005).

In generale, i valori di a_r sono nell'ordine di decimi o centesimi di percento, e decrescono con la profondità (per i valori delle singole specie analizzate si rimanda ai lavori originali).

Relativamente all'effetto sulle pressioni interstiziali, le esperienze sono molto limitate, tra queste Simon et al., (2000), Simon e Collison (2002) e Rinaldi et al., (2004).

Simon e Collison (2002) mostrano come l'effetto della vegetazione generi coesioni apparenti non trascurabili. Sebbene la presenza di vegetazione arborea non sia tuttavia in grado di eliminare completamente la possibilità che si verifichino tensioni di suzione nulle, soprattutto negli strati più superficiali nella stagione invernale, il fattore di sicurezza rimane comunque superiore all'unità a differenza dei tratti di sponda con copertura erbacea o privi di copertura.

Gli studi di Simon et al., (2000) e di Rinaldi et al., (2004) evidenziano, invece, come le condizioni più critiche per le sponde si verifichino dopo il picco di piena, quando le pressioni interstiziali del terreno sono elevate e invece la pressione di confinamento esercitata dal livello idrometrico si è annullata.

SCABREZZA IN ALVEI VEGETATI

La vegetazione presente sulle sponde, come accennato in precedenza, incrementa le resistenze al

moto esercitate dalle sponde, diminuendo la velocità della corrente e la portata che può essere convogliata dal corso d'acqua stesso senza esondare.

Le resistenze al moto, in genere, sono espresse in termini di scabrezza e per canali a pelo libero possono essere descritte dalla relazione di Darcy-Weisbach:

$$i_E = \frac{fv^2}{8gR} \quad (15)$$

incui i_E è la cadente della linea dei carichi totali [-], f è il coefficiente di resistenza di Darcy-Weisbach [-], v è la velocità dell'acqua [$m\ s^{-1}$], g è l'accelerazione di gravità [$m\ s^{-2}$], $R = \frac{A}{P}$ è il raggio idraulico [m], P [m] è il perimetro bagnato relativo alla sezione A [m^2].

Nelle applicazioni pratiche, in genere, al posto della relazione di Darcy-Weisbach vengono utilizzate le formule empiriche che fanno riferimento all'equazione di Chezy ed al moto uniforme¹:

$$i_E \equiv J \equiv i = \frac{v^2}{C^2 R} \quad (16)$$

dove J [-] è la cadente piezometrica, i è la pendenza del fondo [-], C è il coefficiente di scabrezza di Chezy [$m^{1/2}\ s^{-1}$], che è quindi in rapporto con il coefficiente di resistenza di Darcy-

Weisbach attraverso la relazione $C = \sqrt{8g/f}$.

Nel caso dei corsi d'acqua naturali, le relazioni relative al coefficiente di scabrezza comunemente utilizzate per il calcolo della portata e della tensione al fondo sono quelle di Gauckler-Strickler e di Manning

$$C = K_s R^{1/6} \quad (17)$$

con k_s coefficiente di Strickler [$m^{1/3}\ s^{-1}$]

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (18)$$

con n coefficiente di Manning [$m^{-1/3}\ s$].

Combinando la relazione Chezy con l'equazione di continuità è possibile valutare la portata che può defluire in una certa sezione:

$$Q = AC\sqrt{Ri} \quad (19)$$

e quindi;

$$Q = Ak_s R^{2/3} i^{1/2} \quad (20)$$

$$Q = A \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \quad (21)$$

con Q è la portata [m^3/s].

Per alvei naturali, i valori dei coefficienti di Strickler e di Manning, sono disponibili nell'ambito delle numerose tabulazioni reperibili nella letteratura. Tali valori, tuttavia, sono costanti, e non vengono fatti dipendere dalle caratteristiche della corrente e della vegetazione, ipotizzando che solo il deflusso venga influenzato dalla vegetazione e non viceversa. In realtà la vegetazione è in grado di modificare la propria forma e la resistenza offerta al deflusso in funzione delle proprie caratteristiche biomeccaniche e della forza della corrente che la investe.

Per valutare l'effettiva resistenza esercitata dalla vegetazione sul deflusso, quindi, occorre tenere presente che a differenza dei materiali inerti, generalmente rigidi, la vegetazione ha una mutua interazione con la corrente e che esercita una resistenza differente in relazione alla velocità della corrente, al grado di sommersione, alla densità e tipologia delle piante.

A grandi linee si può distinguere tra vegetazione *erbacea*, caratterizzata da altezze limitate ed elasticità elevata, vegetazione *arbustiva*, caratterizzata da altezza paragonabile a quella del tirante

¹ Si ricorda che le condizioni caratteristiche del moto uniforme implicano l'eguaglianza tra pendenza della linea dei carichi totali, cadente piezometrica (per canali a pelo libero coincide con la superficie della corrente) e pendenza del fondo.

idrico ed elasticità significativa, e vegetazione *arborea*, caratterizzata da altezza elevata ed elasticità limitata (figura 6).

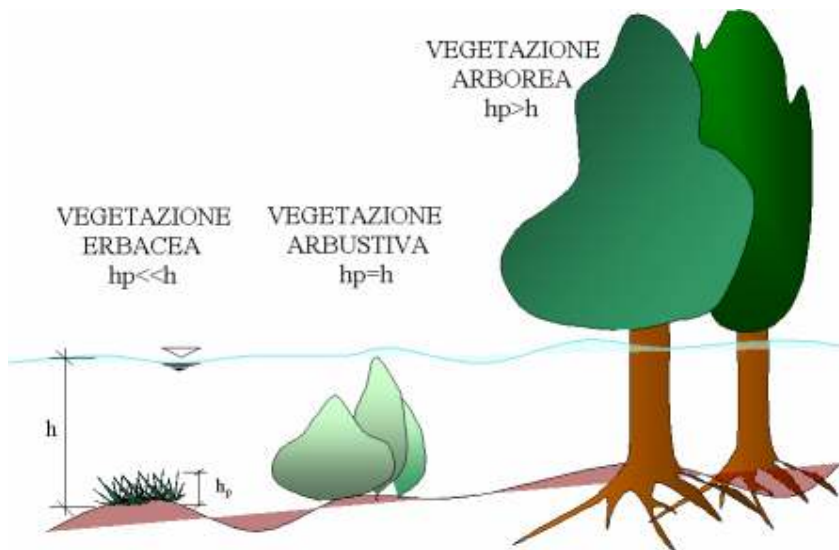


Figura 6: tipologie di vegetazione e loro interazione con la corrente

Vegetazione erbacea

La caratteristica peculiare della vegetazione erbacea è quella di essere di altezza limitata rispetto ai tiranti idrici che comunemente si hanno nei corsi d'acqua e di essere estremamente flessibile e quindi di piegarsi completamente quanto è sottoposta ad una corrente. Il comportamento della vegetazione erbacea in termini di resistenza al moto è quindi sensibilmente differente, in funzione, oltre che della specie e della densità, anche del grado di sommersione cui essa è sottoposta.

Adottando una schematizzazione che fa riferimento al coefficiente di Manning, Ree (1949) ha dimostrato che i valori della scabrezza aumentano al crescere del livello idrico fino al raggiungimento delle cime della vegetazione, dopodiché si ha una flessione delle piante con una conseguente brusca riduzione della scabrezza (figura 7). Chiaramente, la resistenza è anche influenzata dalle caratteristiche della vegetazione (flessibilità, lunghezza, numero di foglie, ecc.); minore influenza ha invece la forma della sezione.

Estese sperimentazioni condotte dai ricercatori del S.C.S U.S.D.A. (S.C.S., 1966 in Schwab et al., 1981) su canali inerbiti hanno evidenziato una relazione tra l'indice di Manning e il prodotto vR , (velocità media della corrente per raggio idraulico) molto utile ai fini progettuali.:

$$n = \frac{1}{[2.08 + 2.30x + 6 \ln(10.8vR)]} \quad (22)$$

con x compreso tra 1 e 5, in funzione delle caratteristiche di elasticità della vegetazione.

Tale relazione, che assume una certa rilevanza in ambito progettuale, tuttavia, per la sua forte natura empirica può essere applicata solo nelle condizioni di sperimentazione, cioè nell'ipotesi di canale largo e con moto prevalentemente bidimensionale. Alcuni Autori fanno poi notare come il prodotto vR sia legato alla tipologia di moto del fluido, rappresentata dal numero di Reynolds R_e pari a vR/μ (con μ =viscosità del mezzo liquido).

Un approccio più approfondito, di tipo semi-empirico è stato realizzato da Kouwen (1988). Analogamente alla relazione proposta per determinare il coefficiente di Darcy-Weisbach λ in funzione della scabrezza al fondo, è possibile applicare la seguente equazione:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = a + c \log\left(\frac{y}{k_w}\right) \quad (23)$$

dove a e c dipendono dal tipo e dallo stato della vegetazione, y è il tirante idrico e k_w è la

scabrezza equivalente della vegetazione.

Nel caso di vegetazione eretta a è pari a 0,15 mentre c è uguale a 1,85; nel caso di vegetazione prona $a = 7,6-9,9$ mentre $c = 0,6-0,8$.

Sempre Kouwen (Kouwen, 1988; Kouwen e Unny, 1973) associa attraverso una relazione semi-empirica, l'indice di scabrezza alle caratteristiche biomeccaniche della vegetazione ed in particolare al parametro di resistenza a flessione in Newton, MEI , dato dal prodotto tra: E = modulo di elasticità lineare [Pa], I = momento di inerzia degli steli [m^4], M = densità relativa definita come numero di steli per unità di area. La relazione che lega alla resistenza a flessione è la seguente:

$$\frac{k_v}{h_v} = 0.14 \left(\frac{\left(\frac{MEI}{\tau_0} \right)^{1/4}}{h_v} \right)^{1.59} \quad (24)$$

con h_v =altezza della vegetazione eretta [m].

Il MEI può essere determinato dalle seguenti relazioni:

$$MEI = 319 \cdot h_v^{3.3} \quad \text{per la vegetazione verde} \quad (25a)$$

$$MEI = 2.45 \cdot h_v^{2.26} \quad \text{per la vegetazione morta o dormiente} \quad (25b)$$

$$MEI = 233 \cdot h_v^{3.125} \quad \text{media dei due casi precedenti (proposta da Kouwen)} \quad (25c)$$

Negli ultimi anni, vi è stato un rinnovato interesse scientifico verso questo argomento che sta producendo una notevole mole di lavori cui si rimanda per approfondimenti (Fischer-Antze et al., 2001; Carollo et al., 2002; Stone e Tao Shen, 2002; Wilson et al., 2003).

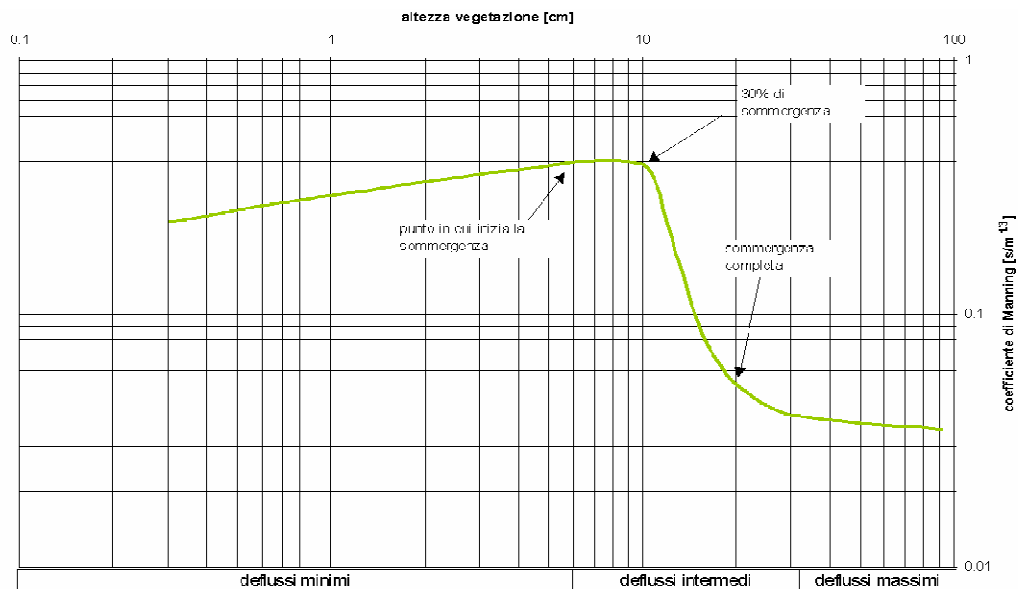


Figura 7: variazione della scabrezza della vegetazione erbacea (modificata da Ree, 1949)

Vegetazione arborea

Nel caso di vegetazione rigida parzialmente sommersa, qual è in genere quella arborea, l'approccio comunemente utilizzato per il calcolo della resistenza da essa esercitata, è quello di considerarla come aggiuntiva a quella esercitata dal contorno bagnato; la resistenza globale della vegetazione viene ipotizzata come somma della resistenza delle singole piante.

Ragionando nell'ipotesi di moto uniforme, viene assunto che la componente della forza peso nella direzione del moto di un tratto di canale debba essere bilanciata dagli sforzi che si esercitano al contorno bagnato e dalla resistenza idrodinamica esercitata dalle piante (Petryk e Bosmanjian., 1975;

figura 8). Sulla base della relazione di resistenza per corpi rigidi, la resistenza esercitata dalla singola pianta può essere definita come:

$$R_{p_i} = \gamma \frac{v^2}{2g} C_R A_{p_i} \quad (26)$$

con C_R coefficiente di resistenza idrodinamica (1.0÷1.5), A_{p_i} sezione dell'ingombro medio della pianta i -esima.

Introducendo una scabrezza equivalente ($n_{eq}=n_0+n_{veg}$) si ottiene:

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \frac{R^{4/3}}{2g} \sum_{i=1}^N C_R \frac{A_{p_i}}{LP}} \quad (27)$$

con L lunghezza del tratto considerato

Isolando il termine di scabrezza dovuto alla sola vegetazione si ottiene:

$$n_{veg} = \sqrt{\frac{R^{4/3}}{2g} \sum_{i=1}^N C_D \frac{A_{p_i}}{LP}} \quad (28)$$

in cui il termine $\sum_{i=1}^N \frac{A_{p_i}}{LP}$ rappresenta la densità delle piante.

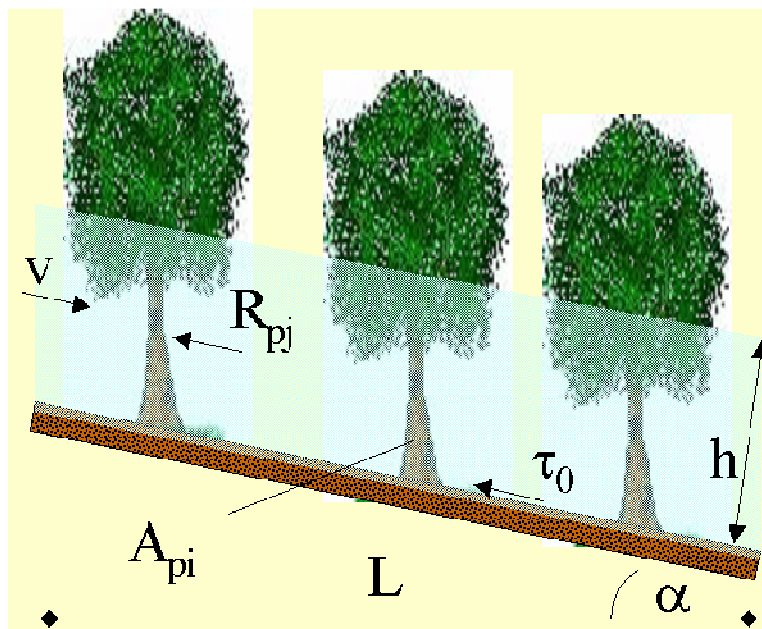


Figura 8: resistenza esercitata dalla vegetazione arborea

Vegetazione arbustiva

A differenza della vegetazione erbacea, quella arbustiva presenta due significative differenze: una minor flessibilità complessiva e distinta tra tronco e rami e foglie, un'altezza maggiore e quindi una minor sommersibilità. La vegetazione arbustiva di ripa, quale quella costituita da salici, canneti, ecc., è caratterizzata innanzitutto da una notevole elasticità dei fusti e dei rami che ne determinano un adattamento alla corrente in relazione alla forza esercitata dalla corrente stessa: dapprima, infatti, in corrispondenza di bassi livelli di sommersione e velocità ridotte, la vegetazione si modifica limitatamente ed ha un comportamento essenzialmente di tipo rigido, poi mano a mano che il grado di sommersione e la velocità crescono, le piante tendono ad assumere una forma idrodinamica riducendo l'ingombro e flettendosi nel senso della corrente, infine, quando non sono più in grado di modificare il proprio portamento, le piante tornano a comportarsi come corpi rigidi (figura 9).

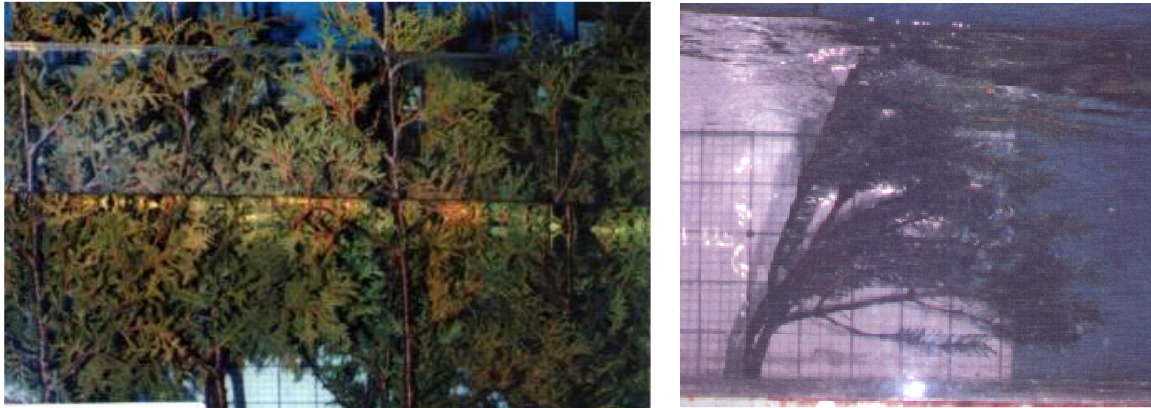


Figura 9: comportamento idrodinamico della vegetazione arbustiva (da Kouwen, 2003)

Questo comportamento è stato dimostrato e studiato sperimentalmente (Fathi-Moghadam e Kouwen, 1997; Vischer e Oplatka, 1998; Kouwen e Fathi-Moghadam, 2000).

Da un punto di vista concettuale, per la valutazione della resistenza offerta da questo tipo di vegetazione occorre tenere conto della superficie vegetata esposta in direzione longitudinale e trasversale alla corrente, delle sue caratteristiche meccaniche, nonché delle tensioni che la corrente esercita su di esse. Le sperimentazioni condotte in particolare da Fathi-Moghadam e Kouwen (1997) e da Vischer e Oplatka (1998) hanno messo in evidenza che per questo tipo di vegetazione, entro il range di comportamento elastico la legge che lega la resistenza al moto alla velocità è sostanzialmente lineare, con una proporzionalità diretta, che la sezione che la vegetazione offre alla corrente diminuisce con la velocità e il grado di sommergenza e che il prodotto $v \cdot C_v A_v$ è di fatto sostanzialmente costante.

Ne consegue che l'equazione della resistenza dei corpi rigidi:

$$F = \gamma \frac{v^2}{2g} C_v A_v \quad (29)$$

si riconduce ad un'equazione del tipo:

$$F = K \gamma \frac{v}{2g} \quad (30)$$

con F forza resistente esercitata dalla vegetazione, v velocità della corrente, C_v coefficiente di resistenza e A_v superficie resistente sommersa del corpo nel senso della corrente (che rappresenta l'area che assorbe la quantità di moto della corrente), K costante che esprime il prodotto $v \cdot C_v A_v$.

La conseguenza pratica di tali considerazioni è che negli alvei con vegetazione flessibile il coefficiente di scabrezza diminuisce al crescere della velocità, la velocità media della corrente è quindi superiore a quella che generalmente viene calcolata considerando la vegetazione come un elemento rigido, e di conseguenza la portata massima che può transitare nella sezione è notevolmente superiore.

A titolo d'esempio Kouwen e Fathi-Moghadam (2000), sulla base di alcune sperimentazioni effettuate sulla resistenza esercitata dalle chiome di conifere, calcolano per un'area golenale con una densità di conifere dell'80% un coefficiente di scabrezza di Manning di 0.122, 0.089 e 0.073 per velocità di 0.2, 0.8 e 1.9 m/s, contro valori costanti di 0.10±0.12 riportati in letteratura. Si tenga presente che per un tratto di alveo trapezoidale (scarpa 1:2) della larghezza di 10 m, un tirante di 3 m e pendenza 1%, per valori di scabrezza quali quelli sopraccitati corrispondono portate di 24.4, 33.4 e 40.7 m³/s.

Al momento, purtroppo, le sperimentazioni condotte sono piuttosto limitate e non sono ancora disponibili parametri che possano essere utilizzati nei calcoli a livello applicativo.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Gli effetti che la vegetazione esercita nelle sezioni idrauliche sono complessi e riguardano sia la stabilità delle sponde che le resistenze esercitate nei confronti del deflusso.

Mentre nei confronti della stabilità delle sponde gli effetti sembrano essere sostanzialmente tutti positivi (rinforzo meccanico e riduzione delle pressioni neutre), nel caso delle resistenze esercitate l'effetto dipende da una serie di fattori legati sia alle caratteristiche della corrente che a quelle della vegetazione.

Le recenti ricerche hanno infatti evidenziato che l'entità delle resistenze esercitate dipende innanzitutto dalla tipologia di vegetazione. Nel caso della vegetazione arborea caratterizzata da una sostanziale rigidità e bassi livelli di sommergenza si ha un comportamento di tipo rigido ed è la vegetazione che influenza univocamente la corrente. Nel caso della vegetazione erbacea, caratterizzata da elevata flessibilità ed elevati livelli di sommergenza, al crescere della velocità della corrente si ha una flessione totale della vegetazione con una drastica riduzione della scabrezza che può raggiungere valori inferiori a quelli di partenza. Nel caso della vegetazione arbustiva, infine, che rappresenta la tipologia prevalente in ambito spondale, si hanno caratteristiche di flessibilità e di sommergenza intermedie che determinano una complessa interazione tra vegetazione e deflusso. In generale, gli studi finora condotti hanno dimostrato che all'aumentare della velocità la vegetazione arbustiva tende ad assumere un comportamento idrodinamico, riducendo l'area impattante e quindi le resistenze. Dal punto di vista applicativo, tuttavia, tali studi non sono ancora utilizzabili ed è necessario ulteriore lavoro sperimentale sia per approfondire gli aspetti teorici, sia per fornire i parametri per le specie di maggiore interesse.

BIBLIOGRAFIA

- Abernethy B., Rutherford, I. D. (2001): The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes*, 15, 63–79.
- Armanini A. (1999): *Principi di idraulica fluviale*, BIOS, Cosenza, 152 pp.
- ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment. (1998): River width adjustment. I: Processes and mechanisms. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 124, 881–902.
- Bischetti G. B. (2001): Effetto stabilizzante della vegetazione sui versanti: caso di studio di due specie alpine ai versanti della Val Dorena (Valcamonica). *AIIA 2001: Ingegneria Agraria per lo sviluppo dei paesi del Mediterraneo*, Vieste (FG).
- Bischetti G.B., Simonato T., Chiaradia E. (2004): Valutazione del contributo degli apparati radicali nell'analisi di stabilità e movimenti franosi superficiali. *Rivista di Ingegneria Agraria*. vol. 3, pp. 33-40.
- Bischetti G.B., Chiaradia E.A. Simonato T., Speziali B., Vitali B., Vullo P., Zocco A. (2005): Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy), *Plant and Soil*, (accettato per la stampa)
- Burroughs E. R., Thomas B R (1977): Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability, *USDA Forest Service Research Paper INT-190*, 27 pp.
- Carollo F. G., Ferro V., Termini, D. (2002): Flow Velocity Measurements in Vegetated Channels , *Journal of Hydraulic Research ASCE*, 128, 7, 664-673.
- Czernin A., Phillips C.J. (2005): Stabilising characteristics of the New Zealand cabbage tree (*Cordyline australis*), *International Conference on Eco-Engineering "the use of vegetation to improve slope stability"*, 13-17 settembre 2004, Thessaloniki, Grecia.
- Darby S.E., Thorne C.R. (1996): Development and testing of river-bank stability analysis. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 122(8): 443–454.
- Darby S.E., Gessler D. E, Thorne C. R. (2000): Computer program for stability analysis of steep, cohesive riverbanks, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 175-190.
- Fathi-Moghdam M., Kouwen N. (1997): Nongrid nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 123(1), 51-57.
- Fischer-Antze T., Stoesser T., Bates P.D., Olsen N.R.B. (2001): 3D numerical modelling of open-

- channel flow with submerged vegetation, *Journal of Hydraulic Research ASCE*, 39, 3, 303-310.
- Fredlund D.G., Rahardjo H. (1993): *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons: New York.
- Gray D.H., Ohashi, H. (1983): Mechanics of fiber reinforcement of sand, *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*, 109, 335-353.
- Greenway D. T. (1987): Vegetation and slope stability. In *Slope stability*, M G Anderson e K S Richards (a cura di), 187-230, John Wiley, New York, U.S.A.
- Gray, D.H., Sotir, R.B. (1996): *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control*, J. Wiley, Chichester, UK.
- Hagerty D.J. (1991): Piping/sapping erosion: I. Basic considerations. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 117, 991-1008.
- Hammond C., Hall D., Miller S., Swetik P. (1992): *Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0*, General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station, 1992.
- Hathaway R.L., Penny D. (1975): Root strength in some *Populus* and *Salix* clones, *New Zealand Journal of Botany*, 13, 333-344.
- Kouwen N. (1988): Field estimation of the biomechanical properties of grass, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 26(5), 559-568.
- Kouwen N. (1992): Modern approach to design of grassed channels, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118, 5.
- Kouwen N., Unny T.E. (1973): Flexible roughness in open channels, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 99(5), 713-728.
- Kouwen N., Li R.M. (1980): Biomechanics of vegetated channel linings, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 106(6), 1085-1103.
- Kouwen N. (2003): *Using vegetation properties to predict flow resistance and erosion rates*, International Workshop on RIParian FORest, Trento, Italia, 20-22 febbraio 2003.
- Kouwen N., Fathi-Moghdam M. (2000): Friction factor for coniferous trees along rivers, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 126, 732-740.
- Millar R. G., Quick M. C. (1997): Discussion of "Development and testing of riverbank stability analysis" by Stephen Darby and Colin Thorne, *Journal of Hydraulic Engineering* 123, 1051.
- Osman A.M., Thorne C.R. (1988): Riverbank stability analysis. Part I: Theory. *Journal of Hydraulics Division, ASCE* 114(2): 125-
- Petryk, S., Bosmajian, G. (1975): Analysis of flow through vegetation *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 101,871-884.
- Ree W.O. (1949): Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways, *Agric. Engineering*, 30, 184-187, 189.
- Riestenberg M.M. (1987): *Anchoring of thin colluvium on hillslopes by roots of sugar maple and white ash*, PhD Dissertation, University of Cincinnati, Ohio, USA.
- Riestenberg M. M., Sovonik-Dunford S. (1983): The role of woody vegetation in stabilizing slopes in the Cincinnati area. Ohio. *Geol. Soc. Am. Bull.* 94, 506-518.
- Roering J. J., Schmidt K. M., Stock J. D., Dietrich W. E., Montgomery D. R. (2003): Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.* 40, 237-253.
- Rinaldi M., Casagli N., Dapporto S., Gargini A. (2004): Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events, pore water *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 237-254.
- Schmidt K. M., Roering J. J., Stock J. D., Dietrich W. E., Montgomery D. R., Schaub T. (2001): The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.* 38, 995-1024.
- Schiolds F. D., Gray D. H. (1992): Effects of woody vegetation on the structural integrity of sandy levees. *Water Resources Bulletin*, 28,(5), 917-931.
- Simon A., Collison A.J.C. (2002): Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability, *Surface Processes and Landforms*, 27, 527-546.
- Simon A., Wolfe W.J., Molinas A. (1991): Mass-wasting algorithms in an alluvial channel model. *Proceedings of the 5th Federal Interagency Sedimentation Conference*, Las Vegas, Nevada: 8-

22-8-29.

- Simon A., Curini A., Darby S.E., Langendoen E.J. (2000): Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35, 193-217.
- Schwab G.O., Frevert R.K., Talcott W.E., Kenenth K.B. (1981): *Soil and Water Conservation Engineering*, The Ferguson Foundation Agricultural Engineering Series, John Wiley and sons, New York, U.S.A., 3° edizione, 525 pag.
- S.C.S. (1966): Handbook of channel design for soil and water conservation, SCD-TP-61.
- Stone B. M., Tao Shen H. (2002): Hydraulic Resistance of Flow in Channels with Cylindrical Roughness, *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 128, 5, 500-506.
- Vischer V.D., Oplatka M., (1998): Der strömungswiderstand eines flexiblen ufer- und vorlandbewuchses, *Wasserwirtschaft*, 88, 1-5.
- Waldron L. J. (1977): The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 843-849.
- Waldron L.J, Dakessian S. (1981): Soil reinforcement by root: calculation of increased soil shear resistance from root properties, *Soil Science*, 132, 427-435.
- Wilson C. A. M. E, Stoesser T., Bates P.D., Batemann Pinzen A. (2003) Open Channel Flow through Different Forms of Submerged Flexible Vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 129, 11, 847-853.
- Wu T. H. (1976): *Investigation on landslides on Prince of Wales Island. Alaska Geotech. Rpt. No 5*, Dpt. Of Civil Eng., Ohio State Univ., Columbus, USA, 1976.
- Wu T H. (1995): *Slope stabilization*, in: Morgan, R.C.P. e Rickson, R.J. (a cura di) Slope stabilization and erosion control – a bioengineering approach, E&FN SPON, Londra
- Wu T. H., McKinnel W. P., Swanston D. N. (1979): Strength of tree roots on Prince of Wales Island, Alaska. *Can. Geotech. J.* 16 (1), 19-33.
- Zhou Y., Watts D., Li Y., Cheng X. (1998): A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. *Forest Ecology and Management*, 103, 107-120.

**I TORRENTI COME CONDIZIONE DI EQUILIBRIO
MORFODINAMICO E LA PORTATA FORMATIVA**

Paolo BILLI

Università di Ferrara - Dipartimento di Scienze della Terra

INTRODUZIONE

Gli alvei montani sono quelli numericamente più diffusi in natura in quanto drenano la testata ed i fianchi delle vallate andando a confluire nel collettore principale che poi, più a valle, si allarga nel fiume di pianura. Attraverso la loro azione di trasporto forniscono agli alvei di pianura i sedimenti indispensabili per il mantenimento degli equilibri naturali di erosione e deposizione. Essi stessi rappresentano però una condizione di equilibrio che viene raggiunta attraverso alcuni adattamenti che si traducono principalmente nella organizzazione dei clasti del letto e nell'adeguamento delle sue dimensioni alla portata formativa. I torrenti montani possono essere caratterizzati da un alveo inciso in roccia oppure essere a fondo mobile quando modellano il letto nei propri sedimenti. I primi molto raramente possiedono una pianura alluvionale e, quando è presente, è costituita da lembi isolati, talora terrazzati, sopraelevati rispetto all'alveo in roccia del torrente. I versanti si raccordano direttamente con l'alveo che riceve i prodotti, anche grossolani, della loro disaggregazione meteorica. In ambedue i casi, sebbene a grande scala la morfologia dell'alveo può essere assunta come rettilinea, non si riscontrano tratti perfettamente rettilinei più lunghi di 10 volte la larghezza del canale e, anche quando questi appaiono più lunghi, il filone principale della corrente segue un percorso sinuoso spostandosi da una sponda all'altra. Negli alvei montani a fondo mobile tale andamento è anche connesso con la tipica alternanza di rapide (*'riffle'*) e tratti a minore pendenza del letto (*'pool'*) e di barre laterali aderenti in posizione alterna alle sponde. Queste barre sono costituite da sedimenti anche molto grossolani ed hanno di solito una larghezza massima comparabile con quella del canale, mentre la lunghezza è più variabile essendo comunemente compresa tra 2 e 6-7 volte la larghezza. Il tracciato altimetrico e planimetrico dei torrenti in roccia è fortemente influenzato dalle caratteristiche della roccia affiorante (composizione, durezza, stratificazione) e dalla tettonica che l'ha interessata di recente (faglie, giacitura, fratturazione). In questi tratti, il controllo esercitato dalla roccia in posto sulla morfologia del canale è totale ed il tracciato altimetrico può essere interrotto da piccole cascate, mentre quello planimetrico può assumere anche una certa sinuosità (rapporto tra lunghezza del canale e lunghezza della valle). Ove siano presenti fratture importanti, che rappresentano delle linee di debolezza nella roccia, il fiume può scavare profonde e spettacolari gole che spesso raccordano tratti alluvionali e vallate più ampie dello stesso corso d'acqua.

Gli alvei montani a fondo mobile, sebbene abbiano pendenze piuttosto elevate, per la presenza nel letto di sedimenti talora molto grossolani, mostrano una dinamica morfologica piuttosto limitata e ristretta, secondo molti autori ad eventi con portate molto elevate.

La morfologia di un corso d'acqua è il risultato di continui aggiustamenti dell'interazione tra frequenza ed entità degli eventi di piena e l'alimentazione dei sedimenti. Questi processi, pur essendo evidentemente legati, non sempre possono essere descritti da modelli semplici ed i loro effetti relativi sono spesso condizionati da fattori esterni come il clima, la litologia del substrato roccioso, la vegetazione e, recentemente, anche dall'uomo.

LA PORTATA FORMATIVA

L'idea che una portata caratteristica che rappresentasse l'integrazione di tutti questi fattori naturali e che fosse espressione diretta della geometria dell'alveo ha da sempre attratto l'attenzione degli studiosi. In realtà, in un corso d'acqua naturale, la portata varia molto ampiamente, da condizioni di flusso di magra a picchi di piena, coprendo fino a tre-quattro ordini di grandezza. Le dimensioni e la quantità di sedimenti prodotti dai processi erosivi sui versanti variano secondo un intervallo ancora più grande. Tutto ciò rende, ovviamente, complesso e difficile definire le relazioni tra portata e morfologia di un alveo. La quantificazione di alcune delle variabili in gioco si è rilevata molto problematica. In particolare determinare l'alimentazione dei sedimenti e le loro caratteristiche granulometriche si è rivelato, allo stato attuale delle conoscenze, un obiettivo ancora non raggiungibile. La maggior parte degli studiosi si è quindi rivolto all'approfondimento e all'analisi delle variabili misurabili con maggiore precisione come la geometria idraulica del canale, i sedimenti del letto, le portate liquide e, sebbene con minore affidabilità, quelle solide.

La morfologia di un alveo mobile viene modificata da tutte le portate capaci di trasportare sedimenti e Wolman e Miller (1960) hanno sviluppato un modello concettuale che descrive l'influenza

della frequenza ed entità del flusso sull'efficacia relativa del trasporto dei sedimenti nei corsi d'acqua naturali. Questo fondamentale paradigma è rappresentato in figura 1 dove il prodotto della curva della distribuzione di frequenze delle portate liquide con la curva che rappresenta la variazione di trasporto solido con le portate da luogo ad una terza curva che rappresenta la distribuzione di frequenza delle portate solide. In altre parole, questo semplice diagramma ci mostra che la maggior quantità di sedimenti nel lungo periodo è trasportata da portate comprese in uno stretto campo. Gli eventi di piena più grandi, ovviamente, trasportano grandi quantità di sedimenti, ma la loro frequenza è così bassa che la quantità di sedimenti trasportata è in realtà una piccola porzione della quantità totale trasportata nel lungo periodo. Le portate più efficaci nel conferire ad un corso d'acqua il suo assetto morfologico sono quindi quelle che trasportano una moderata quantità di sedimenti, ma che si verificano con una maggiore frequenza. Il modello di Wolman e Miller è stato testato utilizzando prevalentemente dati di trasporto in sospensione che sono molto abbondanti nel mondo. I sedimenti trasportati in sospensione però, sebbene rappresentino mediamente il 90% del materiale che esce da un bacino idrografico (soprattutto se di dimensioni medio-grandi; nei bacini montani questo valore si può ridurre anche al 50-60%), non possono essere considerati un valido riferimento in quanto solo una loro piccola proporzione è presente nel letto. Per confermare l'ipotesi di Wolman e Miller che la *portata efficace* è quella che forma il canale è necessario introdurre dati di trasporto al fondo che, soprattutto negli alvei ghiaiosi, sono molto pochi e non sempre affidabili.

Altri autori, soprattutto Leopold et al. (1964), hanno indicato la portata ad alveo pieno ("*bankfull discharge*") come la portata formativa ed hanno proposto una serie di relazioni significative tra portata al bankfull e parametri geometrici dell'alveo. Più recentemente Andrews e Nankervis (1995) e Torizzo e Pitlick (2004) hanno mostrato una chiara corrispondenza tra portata efficace e portata al bankfull (Fig. 2).

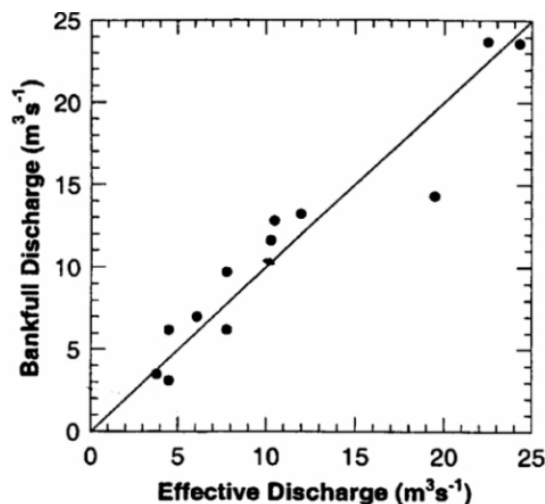
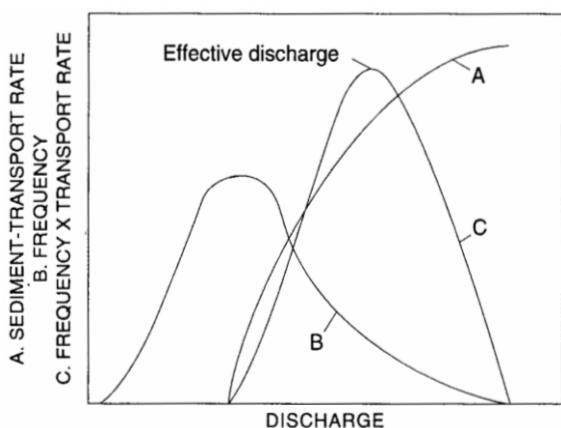


Fig.1 Modello Wolman-Miller per la determinazione della portata efficace

Fig. 2 – Ridisegnato da Torizzo e Pitlick (2004)

Negli alvei a fondo mobile la portata al bankfull è quindi associata alle condizioni di trasporto al fondo necessarie per mantenere la geometria del canale in equilibrio con la quantità dell'alimentazione dei sedimenti e la loro distribuzione granulometrica. In un alveo ghiaioso, tipicamente il materiale di fondo inizia a muoversi con un flusso pari a circa il 60% della portata al bankfull e l'80% della quantità annuale di materiale trasportato al fondo viene mobilizzata con flussi compresi 0.8 e 1.6 volte la portata al bankfull. Secondo uno studio di Andrews e Nankervis (1995), condotto su 17 corsi d'acqua ghiaiosi delle Montagne Rocciose in Colorado con area del bacino idrografico compresa tra 3706 e 3.96 km² (media 462 km²) e portate al bankfull comprese tra 0.70 e 85.2 m³/s, l'80% del trasporto al fondo annuale è trasportato durante 15 giorni l'anno da flussi che rappresentano il 27% del volume annuale di ruscellamento superficiale. Questi risultati confermano l'ipotesi di Wolman e Miller (1960) che, in un intervallo di tempo di più anni, le caratteristiche morfologiche, idrauliche e sedimentologiche di un alveo mobile naturale non confinato sono determinate dalle portate che

trasportano la maggior parte dei sedimenti.

Nei torrenti di montagna, invece, si verificano spesso condizioni di confinamento laterale. Ciò impedisce un adeguamento della sezione e ed una conseguente riduzione della pendenza che consentirebbe di dissipare l'eccesso di energia del flusso stabilendo un coerente flusso di sedimenti di fondo. I torrenti di montagna, caratterizzati da pendenze generalmente elevate e comunque superiori a 0.05 e da un'elevata alimentazione di sedimenti grossolani (data la prossimità con le zone di produzione dei sedimenti sui versanti), comunemente rispondono in maniera più articolata e, ove non possono adeguare liberamente la loro larghezza, tendono ad organizzare i clasti del letto in strutture trasversali con caratteristiche tali da dissipare l'eccesso di energia del flusso, ma consentire al tempo stesso uno scambio continuo di sedimenti tra letto e materiale in transito. Queste considerazioni risultano confermate anche da un recente studio di D'Agostino e Vianello (2004) sul T. Cordevole, in cui le varie tipologie morfologiche identificate e riferibili alla classificazione di Montgomery e Buffington (1997), rapide a scivolo, rapide a gradini, tratti a gradinata (step-pool), pozze isolate (pool) e letto piano, mostrino una certa tendenza ad aumentare la larghezza al diminuire della pendenza.

Secondo molti autori (vedi per es. Chin, 2003), le strutture a gradinata svolgono un ruolo importante nella stabilizzazione degli alvei montani a forte pendenza, rinnovandosi soltanto in occasione di eventi alluvionali di una certa entità. La distanza in linea retta tra gradino e gradino è generalmente compresa tra 1 e 3 volte la larghezza al bankfull ed il rapporto tra altezza del gradino e distanza tra i gradini oscilla intorno ad una volta e mezzo la pendenza della sequenza (Abrahams et al., 1995).

Esperienze di campagna su di un torrente dell'Appennino bolognese (Billi e Preciso, in preparazione) hanno mostrato che i clasti che compongono gli allineamenti trasversali delle strutture a gradinata non vengono necessariamente rimossi soltanto in occasione di portate con lungo tempo di ritorno, ma anche con portate al bankfull o prossime ad essa, confermando l'ipotesi di Wolman e Miller (1960) anche per i torrenti montani.

UN'ESPERIENZA DI CAMPAGNA

Al fine di studiare i processi genetici e dinamici delle strutture a gradinata sono state effettuate delle esperienze di campagna su un torrente montano nell'altopiano etiopico, il Derek Wenz, posto a circa 3050 m di quota slm. In un tratto caratterizzato da allineamenti trasversali, regolarmente distanziati, sono stati marcati tutti i clasti componenti la struttura e ne è stata rilevata l'esatta posizione con un teodolite.

Successivamente alla stagione delle piogge (di tipo monsonico in quest'area) è stato ripetuto il rilevamento del tratto e sono state effettuate delle osservazioni sull'evoluzione delle strutture trasversali e sul movimento dei clasti marcati. In generale si è osservata una elevata mobilità dei clasti più grandi anche con bassi tiranti d'acqua e con livelli di energia della corrente inferiori rispetto a quelli stimati dalle più comuni formule per la determinazione dell'inizio del moto dei clasti. La maggior parte dei gradini hanno mostrato una forma di sfondamento nella parte centrale, altri sono stati completamente rimossi, mentre alcune strutture trasversali si sono formate ex-novo. Gli allineamenti trasversali del primo rilievo hanno caratteristiche geometriche che li rendono assimilabili a grossolane antidune con una lunghezza d'onda media L_w di 3.4 m ($< 0.5 B$, larghezza al bankfull). Nel secondo rilievo si è invece osservato un marcato aumento della lunghezza d'onda che ha raggiunto un valore medio di $0.72 B$ (5.6 m), molto più in accordo con i valori di L_s delle strutture a gradinata. Introducendo poi i valori di L_w (primo rilievo) e di L_s (secondo rilievo) nel diagramma di Allen (1985) (Fig. 3), si osserva come, considerando anche profondità diverse (H , con H intorno ad 1 m equivalente alla portata al bankfull), i valori di L_w cadano sempre nel campo delle antidune, mentre quelli di L_s rientrano nel campo degli step-pool. L'esperienza del Derek Wenz dimostra che anche nei torrenti di montagna vi sono condizioni di equilibrio che vengono raggiunte modificando il proprio letto ed in particolare l'organizzazione degli elementi di scabrezza più grossolani. Inoltre si constata come strutture a gradinata si formino anche con portate al bankfull ed abbondante alimentazione dei sedimenti, che il flusso è in grado di muovere clasti di dimensioni superiori al D_{50} e che può assumere numeri di Froude intorno ad uno, espressione di condizioni di transizione o di flusso superiore.

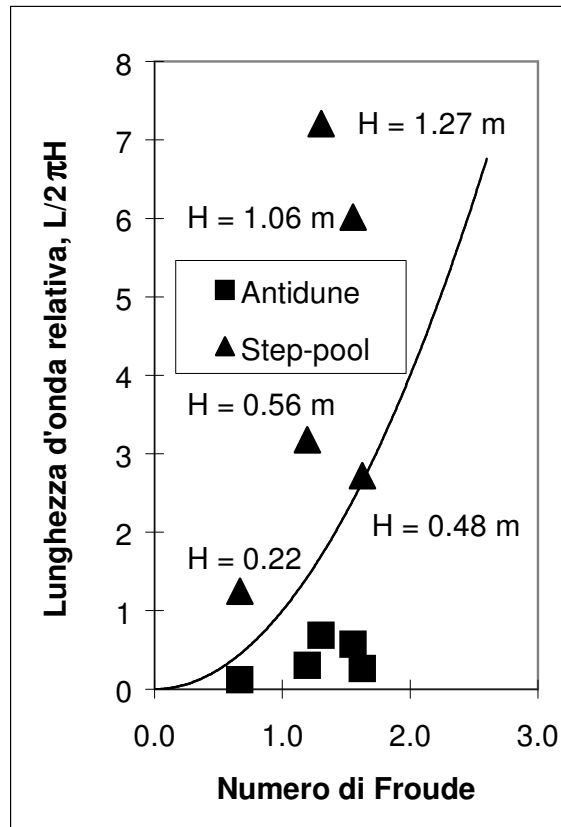


Fig. 3 – Diagramma di Allen (1985) per la determinazione del campo di esistenza delle antidune in cui sono riportati i dati del Derek Wenz relativi al primo (antidune) e al secondo (step-pool) rilievo dopo le piogge monsoniche.

BIBLIOGRAFIA

- Abrahams, A.d., Li, G., Atkinson, J.F. (1995): *Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance*, Water Resour. Res, 31, 2593-2602.
- Allen, J.R.L. (1985): *Principles of physical sedimentology*, Allen & Unwin, London, 272 pp.
- Andrews, E.D., Nankervis, J.M. (1995): *Effective discharge and the design of channel maintenance flows for gravel-bed rivers*, AGU, Geophys. Monograph 89, 151-164.
- Chin, A. (2003): *The geomorphic significance of step-pool in mountain streams*, Geomorphology, 55, 125-137.
- D'Agostino, V., Vianello, A. (2004): *Analisi di campo sulla larghezza a piene rive in un torrente delle Dolomiti*, Riv. Ing. Agr, 4, 53-68.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P. (1964): *Fluvial processes in geomorphology*, Freeman, San Francisco, 522 pp.
- Torizzo, M., Pitlick, J. (2004): *Magnitude-frequency of bed load transport in mountain streams in Colorado*, Jour. Hydrology, 290, 137-151.
- Wolman, M.G., Miller, J.P. (1960): *Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes*, Jour. Geol., 68, 54-74.

MORFOLOGIA E DINAMICA DEI CORSI D'ACQUA DI MONTAGNA

Vincenzo D'AGOSTINO

Università di Padova – Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali

PREMESSA: LO SPAZIO DEL CORSO D'ACQUA

Il modo più consono che ha l'uomo per convivere con il "sistema fiume" si traduce sia in una corretta interpretazione dello "spazio" occupato dalla sua natura morfologica, sia in un recupero graduale, ove questo risulti disturbato, dei suoi elementi morfologici caratteristici.

La delimitazione della zona territoriale influenzata direttamente da un corso d'acqua è stata oggetto negli ultimi anni di un processo di revisione critica che ha coinvolto, oltre che la comunità scientifica internazionale (Brookes e Shields, 1996), anche un aggiornamento normativo della realtà italiana. E' mutato in modo sostanziale l'approccio culturale e scientifico per la definizione, nel senso più esteso del termine, di *alveo fluviale*.

Il Testo Unico sulle opere idrauliche (25 luglio 1904, n.523) definiva l'alveo di un fiume in modo piuttosto rigido, parlando di sponde fisse o comunque di linee di delimitazione determinabili secondo la discrezione dei Prefetti. Successivamente, con l'acquisizione di una più consistente mole di dati da parte del Servizio Idrografico Nazionale, la definizione di alveo demaniale è stata fatta coincidere con la fascia territoriale del corso d'acqua interessata da 75 eventi di piena su 100 (alveo di piena ordinaria). Più recentemente (leggi 36 e 37 del 5 gennaio 1994) è stato affermato, almeno in linea di principio, un utilizzo delle acque superficiali e sotterranee "secondo criteri di solidarietà" e senza pregiudicare "la vivibilità dell'ambiente, l'agricoltura, la fauna e la flora acquatiche, i processi geomorfologici e gli equilibri idrologici". Sono stati inoltre attribuiti al Demanio dello Stato i tratti d'alveo ed i terreni golenali abbandonati, nonché le isole fluviali di neoformazione.

Le iniziative legislative si sono riflesse anche in materia di gestione e sistemazione dei corsi d'acqua, auspicando interventi di rinaturalizzazione, o rinaturazione per la salvaguardia del habitat fluviale. Analogamente, nella comunità scientifica internazionale è oramai invalso l'uso del termine "river restoration" (Brookes e Shields, 1996) per indicare le misure che inducono il ritorno del corso d'acqua allo stato funzionale e strutturale antecedente all'intervento di disturbo dell'uomo.

Per i corsi d'acqua montani è stato recentemente introdotto il concetto di "ricostruzione morfologica" (D'Agostino, 1996a; Lenzi et al., 2000), che sottolinea come il punto obbligato per una ricreazione dell'ambiente fluviale in zona montana sia proprio la lettura della morfologia che compete al tratto di corso d'acqua oggetto dell'intervento e la successiva ricostituzione di questo stato morfologico.

La conoscenza dello spazio territoriale che è proprio di un fiume avviene mediante l'identificazione delle *fasce di pertinenza fluviale*, denominate "river corridor", che possono essere definite attraverso differenti metodologie.

Govi e Turrilo (1994) individuano le fasce di pertinenza, oltre che nell'alveo inciso, in una particolare porzione di terreno limitrofo. Quest'ultimo è interessato da piene con una frequenza tale da mantenere dinamicamente inalterata la morfologia d'insieme e risultare comunque conservativa per le funzioni biologiche dell'ambiente ripariale. Partendo da questa premessa gli Autori individuano le fasce fluviali in funzione delle tipologie d'alveo più ricorrenti in pianura.

Interessante è anche l'approccio geomorfologico proposto da Dutto (1995), che si impernia su tre principali fasi di approfondimento:

- analisi dei sistemi fluviali o riconoscimento lungo il collettore degli alveo-tipi rappresentativi;
- studio del comportamento degli alveo-tipi in tempo di piena;
- riconoscimento delle tendenze evolutive per almeno gli ultimi 100 anni.

Una certa attenzione richiede l'applicazione del concetto di pertinenza fluviale ai corsi d'acqua montani a carattere torrentizio. La fascia di pertinenza dei torrenti montani, che presentano alvei con un certo grado di incisione, può infatti risultare troppo limitata se il suo riconoscimento è condotto senza tenere conto della forte dinamicità dei processi erosivi o deposizionali che possono attivarsi. La continuità morfologica di un corso d'acqua montano è anche condizionata da fattori esterni ricorrenti, quali i restringimenti della valle, gli affioramenti rocciosi, l'interazione con i versanti instabili, gli accumuli di frane, l'edificazione delle conoidi. La presenza di centri abitati limita inoltre, assai di frequente, la zona di pertinenza del torrente ad una fascia ristretta nell'intorno del tracciato unicursale e rettilineo imposto dall'uomo. Sarebbe invece più corretto considerare, quale aree di pertinenza, anche i possibili percorsi lungo i quali il torrente può "divagare" durante le piene, specie in concomitanza delle alluvioni che si associano a fenomeni molto intensi di trasporto dei sedimenti.

CONDIZIONI DI EQUILIBRIO E MORFOLOGIA DEI CORSI D'ACQUA

L'osservazione di campo della morfologia delle forme fluviali é il principale strumento per interpretare la dinamica di un corso d'acqua, per valutare il suo grado di stabilità e per prevedere quale potrà essere la sua risposta ad un evento di piena di una certa eccezionalità.

L'estesa produzione scientifica sulla morfologia dei corsi d'acqua testimonia l'articolata complessità delle forme fluviali che si osservano in natura e sottolinea la difficoltà di riassumere, mediante un'unica classificazione, la varietà delle configurazioni che i corsi d'acqua presentano.

La classificazione proposta da Rosgen (1994) perviene alla identificazione dei differenti tipi morfologici, incrociando la natura del materiale dominante costituente il fondo (roccia, massi, ciottoli, ghiaia, sabbia, limo/argilla) con quattro parametri di natura esclusivamente geometrica: sinuosità, rapporto tra larghezza dell'alveo a piene rive e corrispondente profondità della corrente, pendenza del pelo libero, rapporto di confinamento della sezione (larghezza di piene rive/larghezza della piana alluvionale).

Il limite della classificazione di Rosgen è rappresentato dal non esplicitare il nesso tra la codifica delle diverse forme fluviali ed i processi che determinano i differenti assetti morfologici.

Nel condurre un'analisi morfologica, la prima distinzione che può operarsi è quella fra un corso d'acqua che scorre in roccia ed uno di tipo alluvionale. Il primo, fatte salve le eccezioni che mettono in gioco substrati rocciosi piuttosto erodibili o discontinuità tettoniche, presenta dei processi di adattamento e modellamento della sua sezione e del profilo di fondo molto dilatati nel tempo e comunque spazialmente contenuti. Il secondo scorre sui sedimenti (le alluvioni) da esso stesso trasportate e può modificare la sua forma anche repentinamente a causa dei fenomeni di trasporto, erosione o deposito dei sedimenti. Nella tipologia alluvionale la dinamica d'alveo comprende anche la possibilità, assai frequente, che, ad una evoluzione morfologica anche molto rapida, si affianchino processi di modellamento più lenti ed indotti da un disequilibrio fra i parametri favorevoli l'erosione, come la portata liquida Q e la pendenza longitudinale del fondo S , e le variabili che a questa si oppongono (favorendo la deposizione dei sedimenti), quali la portata solida Q_s e le dimensioni granulometriche (D) dei sedimenti superficiali e sottosuperficiali che compongono il letto.

Un principio che regola indistintamente la dinamica di un fiume, a prescindere dalla morfologia che esso assume, è quello espresso da Lane (1955). L'Autore afferma che un fiume tende sempre a conservare o a ripristinare una situazione di equilibrio in modo che le variazioni di Q_s e di D siano controbilanciate da Q ed da S . Si può scrivere questa relazione di proporzionalità in forma dimensionalmente omogenea (Simon e Darby, 1999):

$$Q S \cong Q_s D_{50} \quad (1)$$

ove:

- Q è la portata liquida formativa per il canale (m^3/s);
- S è la pendenza longitudinale del fondo del canale (m/m);
- Q_s è il carico di materiale solido o portata solida per larghezza unitaria di canale (m^2/s); questa variabile esprime l'alimentazione solida da monte, piuttosto che la capacità di trasporto che il corso d'acqua è in grado di sviluppare localmente;
- D_{50} è la dimensione rappresentativa del materiale d'alveo (m); il pedice indica che, sottoponendo un campione dei sedimenti ad una vagliatura, il D_{50} è la dimensione della maglia del setaccio che lascia passare il 50% (in peso o in numero) del campione.

L'eq.(1) è anche nota come bilancia di Lane, poiché il prevalere di uno dei due prodotti che vi compaiono determina lo spostamento momentaneo del corso d'acqua verso un stato di deposizione (prevalenza del fattore $Q_s D_{50}$) o di erosione (prevalenza del fattore $Q S$). Così, ad esempio, si ipotizzi che, preesistendo una condizione di equilibrio, si realizzi una traversa fluviale per la produzione di energia idroelettrica. La conseguenza dell'intervento, non intervenendo variazioni nel regime idrologico del bacino idrografico sotteso (quindi di Q), sarà una brusca riduzione della alimentazione solida (Q_s) che transita a valle. L'ago della bilancia di Lane si sposterà decisamente nella direzione dell'erosione, fino a che il fiume, vedendo progressivamente abbassato il suo profilo, le sponde incise e l'alveo allargato, avrà ritrovato una nuova e più ridotta pendenza energetica (S). Il prodotto che compare al primo membro dell'eq.(1) esprime anche il lavoro compiuto dalla corrente in virtù della

forza di gravità. Se si indica con γ (N/m³) il peso specifico dell'acqua, si può introdurre la variabile:

$$\Omega = \gamma Q S \quad (2)$$

che rappresenta il tasso di perdita di energia potenziale per unità di lunghezza del canale. Ω è espressa in W/m ed è comunemente denominata "stream power". La stream power viene spesso rapportata alla larghezza (B) del canale, prendendo il nome di stream power unitaria ($\omega = \Omega / B$; W/m²). Indicando con τ (N/m²) lo sforzo tangenziale medio che agisce lungo il contorno bagnato della sezione e con V (m/s) la velocità media della corrente, sussiste anche l'identità:

$$\omega = \frac{\Omega}{B} = \tau V \quad (3)$$

In ogni corso d'acqua, in definitiva, il tasso di lavoro svolto dalla corrente per unità di larghezza del canale è espresso dal prodotto dello sforzo tangenziale medio per la velocità media del flusso. Yang e Song (1979) e Chang (1980) hanno dimostrato che un corso d'acqua, passando attraverso la ricerca di uno stato di equilibrio dinamico, sceglie il suo andamento plano-altimetrico e la forma della sua sezione tendendo a minimizzare Ω o, identicamente, a sviluppare il suo moto con il minimo tasso di dissipazione energetica. Quest'ipotesi è straordinariamente vicina alla "legge del minimo sforzo" già espressa da Leonardo da Vinci (in De Micheli, 1991), secondo il quale "Ogni azione naturale è fatta per via brevissima. Ogni azione naturale è fatta da essa natura, nel più breve modo e tempo che sia possibile".

Per Leopold (1994) il funzionamento di un fiume può paragonarsi a quello di una "macchina" che funziona come un sistema aperto. Questa macchina, essendo alimentata dagli afflussi meteorici, dispone sempre di energia potenziale da dissipare. La dissipazione di energia, se il sistema è stazionario, è il risultato di un compromesso fra il tentativo di minimizzare il lavoro svolto complessivamente (somma di Ω lungo il suo corso) e la tendenza a distribuire questo lavoro nel modo più uniforme possibile, cioè a minimizzare la produzione di entropia del sistema. L'ultima condizione equivale ad un andamento uniforme della stream power unitaria ($\omega = \Omega / B$) e non riesce a essere soddisfatta simultaneamente alla condizione di minimizzazione del lavoro complessivo. L'andamento plano-altimetrico di un corso d'acqua esprime in sostanza, secondo Leopold (1994), il tentativo di soddisfare in modo congiunto, ovvero sia di mediare, le due condizioni anzidette.

La stream power è una variabile molto rilevante per valutare la mobilità di un alveo, poiché esistono dei valori abbastanza ben definiti in corrispondenza ai quali essa è in grado di determinare l'inizio del moto dei sedimenti e l'avvio del trasporto solido di fondo (Williams, 1983).

Anche le classificazioni delle varie morfologie sono, in ultima analisi, una risposta alla ricerca dell'equilibrio espresso dalla bilancia di Lane, soprattutto se si tiene conto del fatto che una limitazione all'azione modellante della corrente (espressa da Q_s e D_{50}) include anche le dissipazioni energetiche S_S e S_F (esprese in termini di cadenti energetiche, m/m), indotte rispettivamente dalle irregolarità planimetriche ed altimetriche del corso d'acqua. Se si tiene conto dell'eq.(2), si potrebbe quindi proporre una relazione ancor più generale di quella di Lane (1955), esprimendo l'eq.(1) nella forma (D'Agostino, 2003):

$$\Omega / \gamma \cong \alpha Q_s (D_{50} S_S S_F) \quad (4)$$

dove α è una costante di proporzionalità, S_S rappresenta la dissipazione energetica di tipo continuo causata dalla sinuosità del corso d'acqua. S_F esprime invece tutte quelle dissipazioni energetiche che non possono essere espresse solo in funzione del D_{50} e che sono imputabili all'andamento altimetrico del profilo (con le sue irregolarità) e alla forma della sezione. S_F è legato sia ai corpi sedimentari vegetati e non (barre longitudinali e mediane) che si osservano negli alvei naturali, sia alle forme di organizzazione dell'alveo (bruschi salti e rapide) che inducono una successione di dissipazioni energetiche di tipo localizzato.

ASSETTI MORFOLOGICI DEI CORSI D'ACQUA DI MONTAGNA

Il reticolo idrografico di molti bacini alpini può essere scomposto in due distinte tipologie di canale: incisioni colluviali e tratti alluvionali. Il reticolo alluvionale sottintende tutti i tratti di quei collettori il cui letto è costituito dai sedimenti che il flusso idrico è in grado di trasportare e selezionare. A differenza di un canale in roccia, un tratto alluvionale è soggetto ad un'evoluzione della sua geometria abbastanza dinamica nel tempo, potendo dare luogo, sia spazialmente che temporalmente, all'alternarsi di fenomeni di erosione e di deposizione. Come reticolo colluviale viene intesa la porzione del reticolo idrografico che si sviluppa nella parte superiore del bacino idrografico, caratterizzata da incisioni più o meno evidenti del substrato, causate prevalentemente dalla concentrazione del deflusso idrico superficiale. I solchi di incisione colluviali possono essere considerati come piccoli corsi d'acqua di testata, i quali esibiscono una debole o effimera capacità di trasporto (Montgomery e Buffington, 1997). La limitata profondità di incisione e il carattere effimero dei deflussi nella rete colluviale sembrano non garantire la mobilizzazione di gran parte del sedimento che può essere immesso nel canale (Dietrich e Dunne, 1978). Il deflusso intermittente può rimuovere parte di tale materiale, ma non è tale da determinare processi di selezione e trasporto assimilabili a quelli che avvengono nella rete idrografica principale (Montgomery e Buffington, 1997; D'Agostino e Vianello, 2005).

Nei tratti colluviali di bacini montani a forte pendenza sono anche possibili trasporti di sedimento in forma massiva (colate detritiche o fangose), legati talora al processo di formazione stessa del canale e determinati da una molteplicità di fattori, quali apporto di materiale da canali in roccia superiori, franamenti superficiali di versante, rilasci impulsivi di sedimenti accumulatisi nel tempo nel reticolo per l'azione di intrappolamento indotta dalla vegetazione in alveo o dai detriti legnosi.

Il reticolo colluviale assume importanza, poiché costituisce la componente elementare del reticolo idrografico. Le tipologie colluviali possono essere considerate gli elementi iniziali della rete idrografica e rappresentano la forma di transizione da impluvio non inciso a rete idrografica (Montgomery e Dietrich, 1989).

Nell'ambiente alpino-dolomitico lo sviluppo di tale tipologia morfologica è favorito dalla litologia dei suoli. I canali colluviali si generano nei terreni morbidi e propensi all'azione di modellamento da parte del deflusso superficiale (figura 1). Trattasi di substrati di origine sedimentaria a prevalenza limoso-argilloso ascrivibili al Ladinico inferiore (Trias) e i cui suoli sono assai plastici.

Un'indagine condotta da D'Agostino e Vianello (2005) nel reticolo di testata del bacino dell'Alto rio Cordevole ha determinato la seguente regione di esistenza del reticolo colluviale:

$$35 S^{0.87} \leq \Omega_{bk} \leq 312 S^{0.97} \quad (5)$$

essendo Ω_{bk} il valore della stream power per la portata di piene rive ($Q=Q_{bk}$, eq.2); i valori di Ω_{bk} che ricadono al di fuori della regione definita dalla (5) competono inferiormente al deflusso non incanalato su versante e superiormente al reticolo alluvionale.

Bacini idrografici a dominanza calcareo-dolomitica non presentano lo sviluppo di una rete effimera colluviale, sostituita spesso da canali detritici di testata che si innestano direttamente sul reticolo alluvionale.

A valle del reticolo colluviale, i corsi d'acqua montani sono generalmente a debole tortuosità e vengono per questo identificati come canali rettilinei. L'aggettivo "rettilineo" non è da interpretarsi in modo troppo rigido, poiché tutti corsi d'acqua posseggono, in misura più o meno marcata, una certa tortuosità. In natura si osservano, infatti, assai raramente, tratti che si mantengono rettilinei per una lunghezza superiore a 20-25 volte la loro larghezza.

I canali rettilinei si trovano prevalentemente nei settori montani e pedemontani dei bacini idrografici e sono caratterizzati da pendenze abbastanza elevate e da una granulometria dei sedimenti grossolana ed eterogenea. Il campo di pendenze tipico si colloca generalmente sopra al 1-2%, anche se non mancano esempi di canali rettilinei su pendenze anche più ridotte. Altre caratteristiche che possono presentare sono: l'assenza di pianure alluvionali estese, affioramenti rocciosi lungo le sponde e nel letto, presenza poco sviluppata di corpi sedimentari centrali, sezioni di forma abbastanza

confinata e con profilo del fondo piuttosto incassato nella valle. La forma di trasporto solido che si considera caratterizzante è il moto dei sedimenti in prossimità del fondo (trasporto di fondo o trasporto per scorrimento del letto). Questo può essere affiancato anche da fenomeni di moto dei sedimenti in forma ancora più massiva, quali le correnti iperconcentrate e le colate detritiche (debris flow). Le colate si verificano in quei corsi d'acqua a forte torrenzialità, che presentano pendenze medie superiori al 20% e che sottendono, in genere, bacini dell'estensione inferiore ai 10 km² (D'Agostino, 1996b).



Figura 1 – Tratto d'alveo di tipo colluviale alla testata del torrente Cordevole (Belluno).

I corsi d'acqua rettilinei sono contraddistinti da un livello energetico piuttosto elevato. La stream power unitaria si mantiene sempre al di sopra dei 300 W/m² e, più spesso, dei 1000 W/m² (Nanson e Croke, 1992). Nella ricerca di un equilibrio questa energia viene controbalanciata dalle granulometrie elevate dei sedimenti (fattore D_{50} , eq.4) e dall'organizzazione in unità morfologiche altamente dissipative (fattore S_F , eq.4) rappresentate dalle rapide e gli step pool. Lo sviluppo di queste unità viene bruscamente interrotto, o quantomeno alterato, nel caso che da monte si renda improvvisamente disponibile una portata solida (Q_s) in eccesso, liberata, ad esempio, da una grossa frana connessa con l'alveo.

I tratti a rapida e a step pool si sviluppano preferenzialmente su pendenze superiori al 3-4%. Le prime unità si presentano come degli scivoli dove si concentrano (anche per alcune decine di metri) i sedimenti più grossolani (figura 2). Questi vanno come a "tappettare" l'unità a rapida, conferendole una buona stabilità. Le rapide si accompagnano ad una forte scabrezza dell'alveo che, per la distribuzione casuale dei massi più grossi, dà luogo ad una dissipazione energetica di tipo quasi continuo (D'Agostino et al., 2001). Talora, all'interno di un tratto a rapida, alcuni degli elementi più grossolani risultano parzialmente allineati in senso trasversale; si formano così delle successioni di gradini che non occupano l'intera larghezza del canale e la cui interdistanza risulta irregolare (figura 3).

Gli step pool si sviluppano con un profilo longitudinale a gradinata (figure 4 e 5), che si traduce, dal punto di vista idraulico, in una successione di salti (step) e di pozze (pool). Le perdite energetiche avvengono, lungo il thalweg, ad impulsi e sono concentrate nelle pool. Gli step sono costituiti dall'allineamento trasversale di una o due file dei sedimenti più grossolani che compongono l'alveo. Entro le pool erosive si concentrano superficialmente i sedimenti più fini; i sedimenti crescono poi progressivamente di dimensioni procedendo verso lo step di valle. Se un tratto a step pool non ha subito particolari processi di sovralluvionamento, il profilo schematizzato di una pool, dal piede di uno step alla testa dello step successivo, risulta in contropendenza (figura 6). Grazie alla presenza dei continui salti idraulici, queste strutture, specie in condizioni di magra, sono fortemente dissipative,

mentre le perdite energetiche si attenuano quando gli step, annegati da valle, vengono quasi sommersi dall'altezza del flusso.



Figura 2 – Unità morfologica a rapida: torrente Félizon (Belluno).



Figura 3 – Unità morfologica a rapida con assetto a gradini: torrente Val di Campovecchio - Riserva Valli di S. Antonio (Brescia).



Figura 4 – Sequenza morfologica a step pool: Klammlbach - valle dei Dossi (Bolzano).



Figura 5 – Sequenza morfologica a step e pool: rio Molino di Gais - valle Aurina (Bolzano).

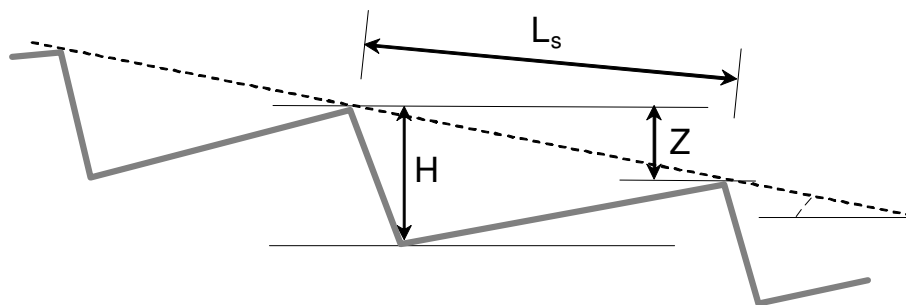


Figura 6 – Profilo di fondo schematico di una sequenza a step e pool.

Gli step pool si organizzano generalmente in sequenze di almeno 2 o 3 unità in successione con un'interdistanza (o lunghezza d'onda) abbastanza regolare fra step e step (o fra pool e pool).

Una recente indagine (D'Agostino e Vianello, 2004) condotta alla testata del rio Cordevole ha messo in evidenza che la larghezza a piene rive delle sequenze a step pool e delle rapide tende a crescere quasi linearmente con l'area drenata, ma che il tasso di crescita della larghezza delle unità a step pool è inferiore di circa un 30% rispetto a quello delle rapide. Questo risultato può essere

attribuito alla circostanza che i tratti a step pool prediligono, per la loro formazione, le sezioni più confinate, e al fatto che le rapide, assicurando un corazzamento quasi continuo del fondo, incoraggiano una maggiore erosione laterale delle sponde.

L'altezza complessiva H (figura 6) degli step ricade solitamente all'interno del campo di valori (D'Agostino e Lenzi, 1998):

$$H = (1 \div 4) D_{90} \quad (6)$$

e, mediamente, il rapporto H/D_{90} si aggira intorno a 2-2.5 (D_{90} è il diametro per il quale il 90% del materiale campionato in alveo è più fine).

Uno degli elementi più caratteristici degli step pool è la lunghezza d'onda degli step (L_s , figura 6), che esprime anche l'interdistanza fra sezioni del canale aventi velocità medie della corrente simili. Da un'analisi condotta in campo da D'Agostino e Lenzi (1998) su alcuni tratti di cinque diversi torrenti a step e pool (49 sequenze per complessive 253 unità) è emersa la relazione:

$$L_s = (0.5 \div 1.6) B \quad (7)$$

essendo B la larghezza a piene rive degli step, con un valore medio del rapporto L_s/B pari ad 1.

Negli step pool il campo di moto è dominato dai ripetuti salti idraulici, cosicché, specie in condizione di piena, si sviluppano a valle degli step dei vortici di copertura (totalmente o parzialmente annegati) che dipendono dalla profondità del flusso e dall'altezza dello step. Secondo questa ipotesi il fattore di scala più determinante per L_s potrebbe essere l'altezza degli step (H) od il dislivello (Z) fra step e step (figura 6). Prendendo in esame le misure condotte da D'Agostino e Lenzi (1998) in un campo di pendenze tra il 5% e il 30%, si ottiene un valore medio del rapporto L_s/H pari a 5.7, con il 70% dei valori compresi tra 4 e 7. Operando inoltre una regressione ai minimi quadrati con l'utilizzo di una semplice legge di potenza, si ottiene una relazione abbastanza stretta tra la lunghezza d'onda (L_s in m) ed il dislivello Z (in m) tra step e step:

$$L_s = 6.18 Z^{0.48} \quad (8a)$$

L'eq.(8a) (figura 7) è caratterizzata da un coefficiente di determinazione pari a 0.49, che è ancora più elevato di quello ottenibile considerando il legame tra L_s e H .

Poiché l'altezza del flusso è direttamente legata alla portata liquida e quest'ultima determina la dimensione della larghezza a piene rive (B) del canale (Leopold, 1994; D'Agostino e Vianello, 2004), un miglioramento dell'eq.(8a) può ottenersi rielaborando i dati di D'Agostino e Lenzi (1998) per mezzo di una correlazione multipla che faccia dipendere L_s sia da Z che da B . Conducendo quest'analisi si ottiene l'espressione (tutte le variabili sono in unità metriche):

$$L_s = 2.73 Z^{0.32} B^{0.47} \quad (8b)$$

che, per il coefficiente di determinazione piuttosto elevato (0.71), sembra confermare la doppia dipendenza di L_s dal dislivello Z fra gli step e dalla profondità del flusso (o dalla portata formativa).

La dimensione Z risulta, in genere, sempre inferiore ad H , determinando, come si è detto, una contropendenza del fondo per il tratto d'alveo compreso fra il punto di massima erosione entro la pool e lo step a valle. Negli step naturali risulta mediamente:

$$Z = \beta H \quad (9)$$

con la costante β che è in genere prossima a 0.7 (Abrahams et al.,1995). I dati di D'Agostino e Lenzi (1998) forniscono la relazione (figura 8):

$$Z = 0.72 H \quad (10)$$

con un coefficiente di determinazione pari a 0.72.

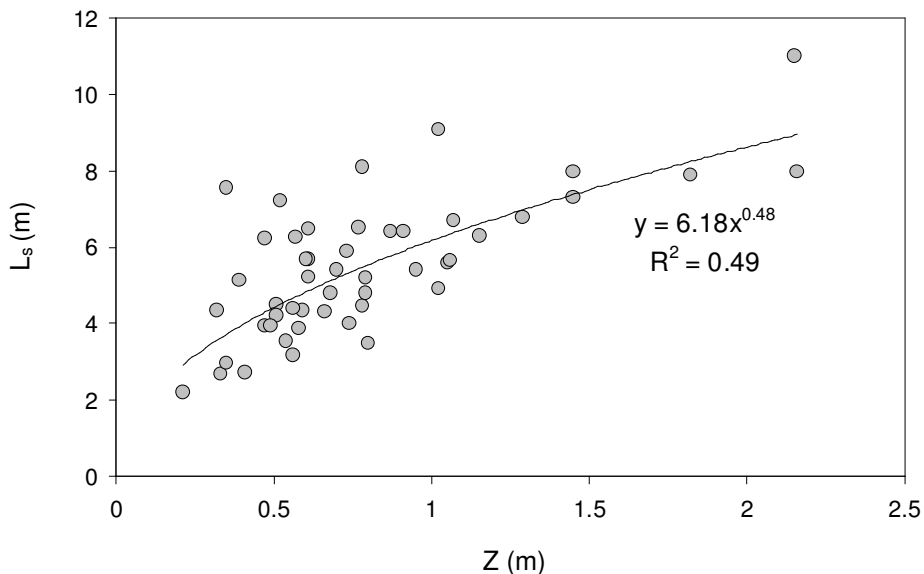


Figura 7 – Relazione tra la lunghezza d'onda media degli step (L_s) e il dislivello (Z) fra step successivi (rielaborazione dei dati di campo di D'Agostino e Lenzi, 1998; valori medi per sequenza).

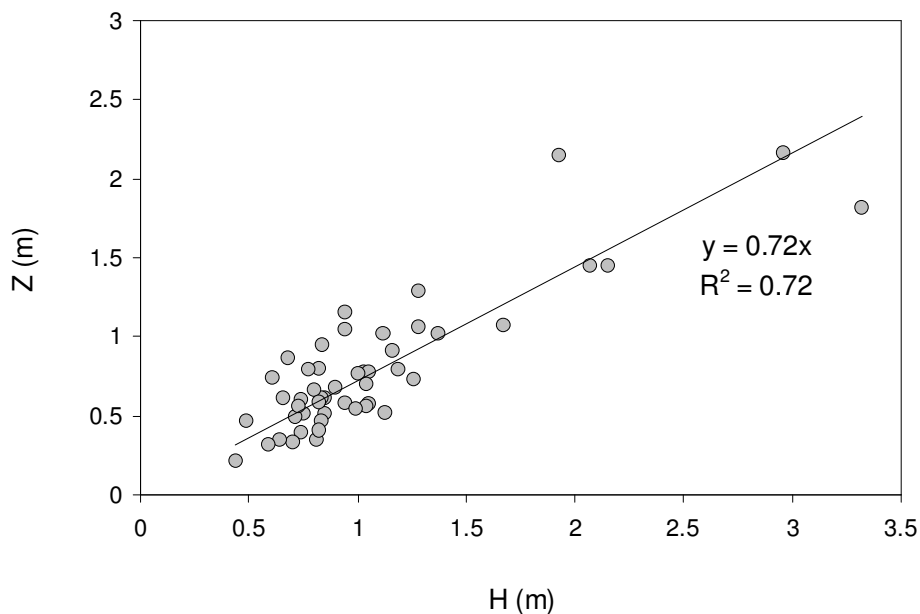


Figura 8 – Relazione tra l'altezza complessiva degli step (H) e il dislivello (Z) fra step successivi (rielaborazione dei dati di campo di D'Agostino e Lenzi, 1998; valori medi per sequenza).

Un valore del coefficiente β pari a $2/3$ corrisponde anche mediamente, secondo le sperimentazioni di laboratorio condotte da Abrahams et al. (1995), all'assetto morfologico che determina, a parità di Q ed L_s , la minima velocità media del flusso all'interno della sequenza (la velocità media di queste sperimentazioni è il risultato del tempo di trasferimento medio della massa liquida lungo la successione di step e pool). Secondo questa teoria gli step pool sembrerebbero tendere ad una configurazione tale da massimizzare la resistenza al moto.

Un'altra successione morfologica assai ricorrente nei corsi d'acqua rettilinei e, in particolare, negli alvei con fondo in sabbia e/o ghiaia, è quella dei riffle pool. Più rara è invece la loro presenza in corsi d'acqua dominati dalla presenza di massi (Leopold et. al., 1964). Queste unità si osservano più frequentemente nei settori pedemontani dei bacini idrografici in un campo di pendenze del fondo compreso tra lo 0.5% e il 3%. I riffle, analogamente alle rapide, sono dei tratti dove il canale aumenta la sua pendenza e dove sono presenti le granulometrie più grossolane. Il tratto a riffle si localizza quasi in corrispondenza all'inizio di una barra laterale, segue quindi una lunga pool, che ha il suo punto di massimo sviluppo trasversale al termine e poco a valle della barra (figure 9 e 10). Il successivo riffle è indotto dalla presenza di una barra laterale localizzata sulla sponda opposta rispetto alla precedente.



Figura 9 – Riffle seguito da un pool: Rio Felizòn (Belluno)

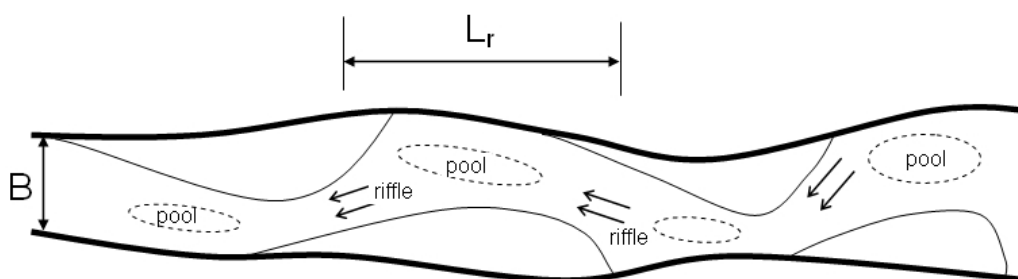


Figura 10 – Schema planimetrico di un tratto d'alveo con morfologia a riffle pool.

La genesi dei riffle pool sembra da attribuire al fatto che, pur essendo il canale rettilineo, l'andamento sinusoidale del filone principale della corrente induce la formazione di corpi sedimentari alternati, ai quali si accompagnano, specie in condizioni di magra e di morbida, fenomeni accelerativi (nel riffle) e decelerativi (nel pool) del flusso.

L'osservazione delle interdistanze fra riffle successivi (lunghezza d'onda L_r , figura 10) ha evidenziato che la larghezza del canale (B) in condizioni di piene rive (bankfull) sembra essere il parametro morfologico che più influenza L_r . I riffle, nei corsi d'acqua rettilinei, presentano mediamente una lunghezza d'onda compresa nel campo:

$$L_r = (5 \div 7) B \quad (11)$$

con un valor medio del rapporto L_r/B molto prossimo a 6 (Keller e Melhorn, 1978).

Yalin (1992) giustifica l'eq.(11) osservando che la struttura macroturbolenta della corrente induce la formazione di vortici orizzontali aventi dimensioni proporzionali alla larghezza stessa del canale e localizzati ad una distanza teorica pari a circa $2 \pi B \cong 6.3 B$. La stessa distanza fra i vortici è poi anche quella che determina la deformazione dell'alveo in riffle e pool, come conseguenza delle ritmiche fluttuazioni del campo di moto.

Si ricorda che l'alternanza di riffle e pool si manifesta, con modalità leggermente differenti, anche nei tratti vallivi dei fiumi ad andamento meandriforme. Tuttavia in questi casi l'alternanza di fenomeni accelerativi e decelerativi è maggiormente legata al continuo sbandamento delle linee di corrente lungo il meandro, piuttosto che ad un forte condizionamento dei corpi sedimentari.

Montgomery e Buffington (1997) hanno proposto la definizione di unità morfologica a letto piano per i tratti dove il profilo di fondo ha un andamento regolare e con pendenza costante, la sezione conserva una certa prismaticità e l'alveo è caratterizzato da granulometrie più uniformi rispetto ai tratti limitrofi e dalla quasi totale assenza di massi. I tratti a letto piano (figura 11) riflettono una condizione di sostanziale equilibrio fra stream power ed alimentazione solida e presentano una certa similitudine con i riffle, dai quali si differenziano per la mancanza di barre longitudinali lungo le sponde. Nei corsi d'acqua alpini queste unità sono in genere di breve lunghezza e si localizzano dove il profilo presenta localmente, rispetto ai tratti a monte ed a valle, una diminuzione di pendenza. I tratti a letto piano costituiscono spesso l'allungamento e la prosecuzione di pool e fungono da collegamento fra morfologie a forte corazzamento (rapide e step).



Figura 11 – Tratto a letto piano: Ru d'Al Plan - valle di Fanes (Bolzano).

Su pendenze del fondo più contenute rispetto ai canali rettilinei (approssimativamente in un campo compreso tra lo 0.01% e il 2÷3 %) si può osservare la tipologia fluviale a rami intrecciati (detta anche braided), caratterizzata da un fitto intreccio o reticolo di canali di dimensioni simili, separati da barre longitudinali mediane (isole) a forma di losanghe (figura 12). Le barre possono essere di due tipi (Billi, 1994):

quelle che vengono sommerse da una portata di piena annuale e sono prive di vegetazione.

quelle di maggiore elevazione, caratterizzate da sedimento più fine, con vegetazione erbacea ed arbustiva e con un certo grado di evoluzione del suolo.



Figura 12 – Tratto a rami intrecciati alla testata del torrente Aurino (Bolzano).

Una misura del grado di ramificazione dell'alveo può essere espressa, oltre che dal numero dei rami attivi sulla larghezza del canale, anche dal rapporto (I_b) fra la somma delle lunghezze di tutti i rami presenti su un certo tratto divisa per la lunghezza del canale più largo del tratto (Friend e Sinha, 1993). I_b è superiore a 5 per un canale fortemente intrecciato, anche se rapporti superiori a 3.5 sono piuttosto rari.

Il fattore di controllo più caratteristico dei canali di tipo braided è il rapporto fra larghezza e profondità che, quando supera 50, favorisce fortemente lo sviluppo dell'andamento ramificato dell'alveo. Le condizioni di formazione di un tratto braided sono essenzialmente da ricercarsi nell'abbondanza di alimentazione solida da monte, nella possibilità di un facile aggiustamento della larghezza (sponde erodibili anche per valori contenuti di Q) e in un regime altamente variabile delle portate liquide che favorisce un trasporto solido di fondo irregolare. In generale questi tratti di corsi d'acqua esprimono l'incapacità a fare defluire mediante un unico canale tutta la portata solida (Q_s) che essi ricevono da monte, dando luogo a processi deposizionali (Leopold et al., 1964). La deposizione di sedimenti al centro dell'alveo finisce per indurre erosioni laterali e l'allargamento complessivo del canale. L'assetto ramificato riflette anche la risposta del canale alla ricerca di una configurazione più efficiente per lo smaltimento della portata solida. Come è deducibile dalla formula sulla capacità di trasporto solido al fondo proposta da Bagnold (1980), canali relativamente stretti e con una profondità del flusso contenuta sono in grado, a parità di stream power unitaria, di massimizzare la capacità di smaltimento della portata solida unitaria. Questa osservazione è anche più intuitiva se si considera che la comparsa delle barre centrali ha l'effetto di ridurre la larghezza effettiva di deflusso, aumentando la velocità media della corrente.

Nei settori più vallivi dei bacini idrografici, quando alla diminuzione della pendenza si accompagnano un aumento della portata liquida, una marcata riduzione della granulometria dei sedimenti ed un incremento del trasporto solido in sospensione, i tratti a rami intrecciati tendono a

scompare per lasciare spazio alla morfologia meandriforme.

Leopold e Wolman (1957) hanno determinato analiticamente la seguente condizione di esistenza dei tratti a canali intrecciati:

$$S > 0.012 Q_{bk}^{0.44} \quad (12)$$

dove S (m/m) è la pendenza del canale e Q_{bk} (m^3/s) è la portata a piene rive; Q_{bk} può essere identificata, in mancanza di misurazioni dirette, come la portata contrassegnata da un tempo di ritorno compreso tra 1 e 2 anni (Leopold, 1994).

Il mancato soddisfacimento della relazione (12) implica, invece, la probabile formazione di canali di tipo rettilineo o meandriforme.

I corsi d'acqua di tipo braided che si sviluppano su un substrato sabbioso hanno mediamente, a parità di Q_{bk} , pendenze più contenute rispetto ai braided ghiaiosi. Molto significativa in tal senso è l'estesa analisi condotta da Van den Berg (1995) che mette in gioco, nel valutare le condizioni di soglia per lo sviluppo del braiding, anche il D_{50} del materiale d'alveo. Si rientra, secondo lo studio di Van den Berg, nel campo dei canali intrecciati, quando la stream power unitaria soddisfa la relazione:

$$\omega > 900 D_{50}^{0.42} \quad (13)$$

con D_{50} (espresso in m) compreso tra 0.0001 m e 0.1 m. L'eq.(13), se applicata alle sabbie ($D_{50}=0.001$ m) e ai ciottoli ($D_{50}=0.1$ m), dà luogo rispettivamente a valori di ω di 49 W/m^2 e di 340 W/m^2 , risultato che è praticamente coincidente con l'intervallo di 50-300 W/m^2 già proposto da Nanson e Croke (1992) per le piane alluvionali interessate dallo sviluppo di canali intrecciati. Di un certo interesse è anche il confronto fra l'eq. (13) e la relazione empirica proposta da Williams (1983) per individuare il valore di stream power unitaria che corrisponde alla soglia di inizio del trasporto di sedimenti del letto di dimensioni D (m). Definendo come critico questo valore (ω_c , W/m^2), la relazione risulta:

$$\omega_c = 586 D^{1.29} \quad (14)$$

valida per D compreso fra 0.01 e 1.5 m.

In figura 13 si riportano gli andamenti delle eq.(13) e (14) nel campo dei diametri dove le due relazioni sono entrambe valide (nell'eq.14 si è posto $D=D_{50}$). L'eccesso di ω rispetto ad ω_c che risulta necessario perché si sviluppi una morfologia braided risulta decrescente al crescere della granulometria dei sedimenti del corso d'acqua.

Anche nei fiumi braided si osserva la presenza di tratti a riffle pool; questi, però, rispetto a quelli dei canali rettilinei, risultano più distanziati ed irregolari e presentano una dinamica vivace ed un assetto un po' più precario a causa delle continue migrazioni delle barre verso valle e degli spostamenti dei relativi canali.

UN QUADRO DI SINTESI

L'identificazione della morfologia di un corso d'acqua alluvionale deve risultare come la logica conseguenza della "lettura" dei processi dinamici che regolano il moto dei suoi sedimenti.

Operando una sintesi dei tipi morfologici presi in esame nel precedente paragrafo, si potrebbe effettuare una classificazione delle unità morfologiche di un corso d'acqua montano secondo il seguente schema:

1. i tratti colluviali rappresentano unità-canale modellate quasi esclusivamente dalla portate liquida;
2. i tratti a rapida ed a step pool sono unità che compensano, mediante i fattori D_{50} e S_F

(eq.4), una stream power localmente elevata;

3. i tratti a *riffle pool* e a *letto piano* sono unità che assecondano un sostanziale equilibrio tra alimentazione solida e stream power; nei tratti a riffle pool l'alimentazione solida è un po' più elevata rispetto ai tratti a letto piano;
4. i tratti a *canali intrecciati* sono unità che riescono a regolare l'alimentazione solida proveniente da settori del reticolo idrografico con capacità di trasporto più sostenuta.

A questi assetti morfologicamente ben definiti possono affiancarsi quelle situazioni dove:

5. l'alveo subisce un eccesso di stream power e non trova nel breve periodo le risorse per compensarla: *tratti incisi in fase di scavo* che tendono a trovare un equilibrio riducendo quota del thalweg e pendenza;
6. l'alveo subisce un eccesso di alimentazione solida che la stream power non è in grado di smaltire: *tratti deposizionali* che non riescono ad evolvere in un sistema distributivo ben organizzato (tipo braided) a causa del continuo apporto di sedimenti e poiché sono condizionate topograficamente da una bassa pendenza locale della valle e/o idrologicamente da una portata formativa limitata.

In molti casi reali il processo di riconoscimento può risultare incerto e condurre a classificazioni non concordi tra i diversi osservatori. Devono invece riconoscersi in modo univoco le modalità secondo le quali il corso d'acqua compensa da monte a valle la sua perdita di energia potenziale, servendosi o meno dei sedimenti che trasporta, adattando, di conseguenza, forma, andamento planimetrico e profilo, ed interagendo con i condizionamenti topografici, geolitologici e vegetazionali della valle.

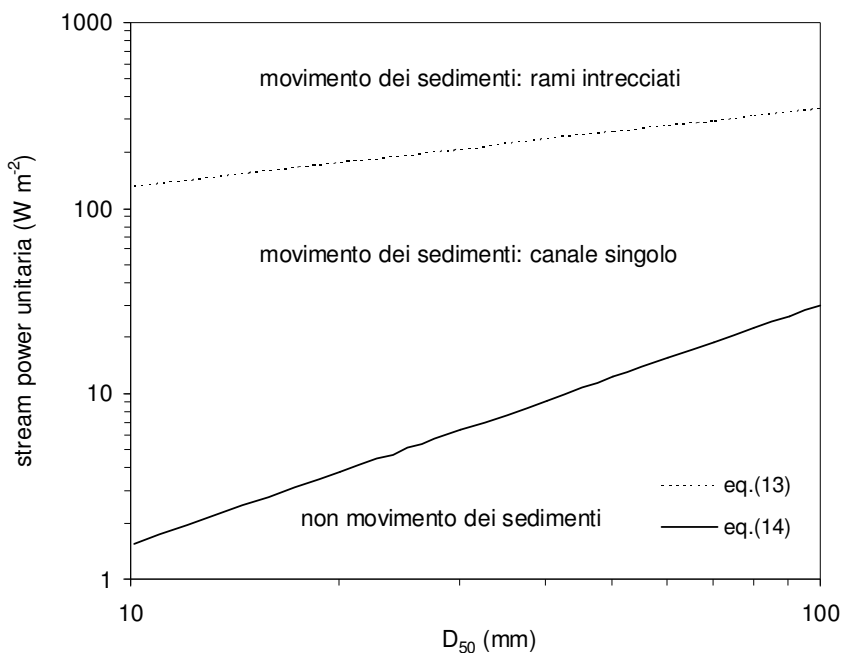


Figura 13 – Andamento dei valori di stream power unitaria che indicano, per un assegnato diametro D_{50} , le condizioni di inizio del trasporto solido di fondo (eq.14) e di sviluppo di un alveo a rami intrecciati (eq.13).

BIBLIOGRAFIA

- Abrahams A.D., Li G., Atkinson J. F. (1995): *Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance*, Water Resources Research, 31, 2593-2602.
- Bagnold R.A. (1980): *An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers*, Proceedings of the Royal Society, 372A, 453-473.
- Billi P. (1994): *Morfologia dei corsi d'acqua*, Verde Ambiente, 5, 61-70.
- Brookes A., Shields jr F.D. (1996): *Perspective on river channel restoration*, in A. Brookes e D. Shields jr (eds.), *River channel restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects*, Wiley, Chichester, England, 1-19.
- Chang H.H. (1980): *Geometry of gravel streams*, Journal of the Hydraulic Division American Society of Civil Engineers, 106, HY9, 1443-1456.
- Dietrich W. E., Dunne T. (1978): *Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain*, Z. Geomorphology, 29, 191 – 206.
- D'Agostino V. (1996a): *La rinaturalizzazione dei torrenti montani*, Quaderni del Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Dipartimento TeSAF, Università degli Studi di Padova, 33, 1-7.
- D'Agostino V. (1996b): *Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del trentino orientale*, Scritti dedicati a Giovanni Tournon, AIIA 1^a Sezione – Associazione Idrotecnica Italiana, 111-123.
- D'Agostino (2003): *Dinamica dei corsi d'acqua ed interventi di ricostruzione morfologica*, in L. Pagani (ed.), *Quaderni dell'Università degli Studi di Bergamo - Centro Studi sul Territorio: Corsi d'acqua e aree di sponda – Tecniche d'intervento sui corsi d'acqua e sulle aree spondali*, Bergamo University Press, Edizioni Sestante, 21-34.
- D'Agostino V., Lenzi M. A. (1998): *La massimizzazione della resistenza al flusso nei torrenti con morfologia a step pool*, XXVI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania, Atti, I, CUECM, Catania, 281-293.
- D'Agostino V., Vianello A. (2004): *Analisi di campo sulla larghezza a piene rive in un torrente delle Dolomiti*, Rivista di Ingegneria Agraria, 4, anno XXXV, 53-68.
- D'Agostino V., Vianello A. (2005): *Identificazione morfodinamica del reticolo idrografico: integrazione fra rilievi di campo e tecniche GIS*, in V. Ferro (ed.), *Quaderni di Idronomia Montana*, 24: *Recenti acquisizioni nel settore delle sistemazioni idraulico-Forestale*, editoriale Bios, Cosenza, 271-290.
- D'Agostino V., Sonda D., Lenzi M.A. (2001): *La strutturazione fluvio-morfologica dei corsi d'acqua montani*, Il controllo dei fenomeni torrentizi – Scienza, tecnica e strumenti, Quaderni di Idronomia Montana, 19/1, editoriale Bios, Cosenza, 87-102.
- De Micheli M. (1991): *Leonardo l'uomo e la natura*, Universale Economica Feltrinelli, Milano.
- Dutto F. (1995): *Tendenza evolutiva dei corsi d'acqua e definizione delle fasce di pertinenza fluviale*, in U. Maione e A. Brath (eds.), *Moderni criteri di sistemazione degli alvei fluviali*, Bios, Cosenza, 199-222.
- Friend P.F., Sinha R. (1993): *Braiding and meandering parameters*, in J.L. Best e C.S. Bristow (eds.), *Braided rivers*. Special Publication of the Geological Society of London, 75, 105-111.
- Govi M., Turrilo O. (1994): *Problemi di riconoscimento delle fasce di pertinenza fluviale*, IV Convegno Internazionale di Geoingegneria, Difesa e valorizzazione del suolo e degli acquiferi, Torino, 161-172.
- Keller E.A., Melhorn W.N. (1978): *Rhythmic spacing and origin of pools and riffles*, Bulletin of the Geological Society of America, 89, 723-730.
- Lane E.W. (1955): *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 81, 1-17.
- Lenzi M. A., D'Agostino V., Sonda D. (2000): *Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti. Criteri metodologici ed esecutivi*, Editoriale Bios, Cosenza.
- Leopold L.B. (1994): *A view of the river*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Leopold L.B., Wolman M.G. (1957): *River channels patterns – braided, meandering and straight*, United States Geological Survey Professional Paper, 282 B, 39-85.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. (1964): *Fluvial processes in Geomorphology*, W.H. Freeman

- & Company, San Francisco, USA (ristampato da Dover Publication Inc., New York, 1995).
- Montgomery D. R., Buffington J. M. (1997): *Channel-reach morphology in mountain drainage basins*, Geological Society of American Bulletin, 109 (5), 596-611.
- Montgomery D. R., Dietrich W. E. (1989): *Source areas, drainage density, and channel initiation*, Water Resources Research, 25(8), 1907-1918.
- Nanson G.C., Croke J.C. (1992): *A genetic classification of floodplains*, Geomorphology, 4, 459-486.
- Rosgen D.L. (1994): *A classification of natural rivers*, Catena, 22, 169-199.
- Simon A., Darby S.E. (1999): *The nature and significance of incised river channels*, in A. Simon e S. Darby (eds.), *Incised river channel: processes, forms and management*, Wiley, Chichester, England, 3-18.
- Van den Berg J.H. (1995): *Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers*, Geomorphology, 12, 259-279.
- Williams G.P. (1983): *Paleohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environment*, Geografiska Annaler, 65A, 227-244.
- Yalin M.S. (1992): *River mechanics*, Pergamon, Oxford, England.
- Yang C.T., Song C.S.S. (1979): *Theory of minimum rate of energy dissipation*, Journal of the Hydraulic Division American Society of Civil Engineers, 105, HY7, 769-784.

**L'ANALISI GRANULOMETRICA DEI SEDIMENTI NEI CORSI
D'ACQUA MONTANI**

Alessandro VIANELLO

Università di Padova – Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali

INTRODUZIONE

Lo studio della morfologia di un corso d'acqua naturale e delle caratteristiche idrauliche non può prescindere dall'analisi del materiale costituente il letto; tale analisi, basata sulla determinazione della distribuzione granulometrica dei sedimenti, risulta essere necessaria per molteplici finalità quali:

- Analisi della capacità di trasporto solido di fondo (bedload) posseduta dal corso d'acqua; stima della portata solida;
- Studio della scabrezza idraulica;
- Analisi delle condizioni di inizio trasporto solido di fondo (portata di moto incipiente, velocità della corrente, sforzo tangenziale);
- Indagine sul fenomeno di coarsening e fining in funzione dell'incremento di area drenata e di portata liquida (*downstream diameter variation*);
- Caratterizzazione e differenziazione tra tipologie morfologiche dei torrenti montani (step pool, rapide, letto piano, riffle pool) sulla base anche delle caratteristiche sedimentologiche del materiale superficiale;
- Valutazione degli habitat fluviali.

La granulometria può essere definita come la caratterizzazione, in termini statistici, di una miscela (campione) di particelle di sedimento. L'analisi granulometrica dei sedimenti d'alveo si basa su metodologie statistiche, poiché riguarda solo un campione scelto sulla totalità del sedimento presente. Queste metodologie consentono di determinare la distribuzione di classi diametriche di un campione di materiale e, successivamente, i diametri caratteristici competenti a tale campione rilevato. I passaggi dell'analisi granulometrica possono essere così riassunti:

- prelievo e analisi del campione di sedimento;
- determinazione delle frequenze relative e cumulate;
- calcolo dei diametri caratteristici (percentili);
- determinazione dei parametri di distribuzione (media, deviazione standard).

Esiste una classificazione dei sedimenti, proposta dall'American Geophysical Union (AGU) (tabella 1), in cui si evidenziano le classi diametriche attribuibili ai diversi tipi di sedimento: boulder (masso), cobble (ciottolo), gravel (ghiaia), sand (sabbia), silt (limo) e clay (argilla). La classificazione per diametri segue la scala di Wentworth, basata sulla progressione esponenziale dei diametri, del tipo (eq. (1)):

$$D = 2^{-\phi} \quad (1)$$

dove D (diametro) è espresso in mm.

Ipotizzando, infatti, di avere una distribuzione log-normale del sedimento (assai frequente), per trasformarla in una distribuzione normale (gaussiana o a campana) si introduce perciò una scala in forma di potenza (eq. (2)) espressa attraverso l'indice ϕ :

$$-\phi = \log_2 D \quad (2)$$

dove, in genere, ogni classe diametrica è costituita da incrementi di $-\phi$ pari a 0.5.

Con valori di $-\phi$ compresi tra 12 e -12 si descrive, quindi, l'intera distribuzione granulometrica, dai massi all'argilla (tabella 1). Il valore $D = 2$ mm ($\phi = -1$) rappresenta il limite di separazione tra sedimento fine (sabbia, limo e argilla) e grossolano (ghiaia, ciottoli e massi).

Tipo di sedimento	Indice: - ϕ $2^{-\phi}$	Classe diametrica D (mm)
Massi molto grossi	$2^{12} - 2^{11.5}$	4096 – 2896
Massi molto grossi	$2^{11.5} - 2^{11}$	2896 – 2048
Massi grossi	$2^{11} - 2^{10.5}$	2048 – 1448
Massi grossi	$2^{10.5} - 2^{10}$	1448 – 1024
Massi medi	$2^{10} - 2^{9.5}$	1024 - 724
Massi medi	$2^{9.5} - 2^9$	724 – 512
Massi piccoli	$2^9 - 2^{8.5}$	512 – 362
Massi piccoli	$2^{8.5} - 2^8$	362 – 256
Ciottoli grossi	$2^8 - 2^{7.5}$	256 – 181
Ciottoli grossi	$2^{7.5} - 2^7$	181 - 128
Ciottoli piccoli	$2^7 - 2^{6.5}$	128 – 90
Ciottoli piccoli	$2^{6.5} - 2^6$	90 – 64
Ghiaia molto grossa	$2^6 - 2^5$	64 – 32
Ghiaia grossa	$2^5 - 2^4$	32 – 16
Ghiaia media	$2^4 - 2^3$	16 – 8
Ghiaia fine	$2^3 - 2^2$	8 – 4
Ghiaia molto fine	$2^2 - 2^1$	4 – 2
Sabbia molto grossa	$2^1 - 2^{0.5}$	2 – 1.4
Sabbia grossa	$2^{0.5} - 2^{-1}$	1.4 – 0.5
Sabbia da media a molto fine	$2^{-1} - 2^{-4}$	0.5 – 0.06
Limo	$2^{-4} - 2^{-8}$	0.06 – 0.004
Argilla	$2^{-8} - 2^{-12}$	0.004 – 0.002

Tabella 1: classi e dimensioni dei sedimenti proposte dall' American Geophysical Union, sulla base della scala di Wentworth.

LE CURVE GRANULOMETRICHE

L'analisi di un campione di sedimenti prevede la determinazione delle curve granulometriche, le quali sono di due tipi:

- 1) curva di frequenza relativa (f);
- 2) curva di frequenza cumulata (F).

1) Curva relativa: esprime la percentuale (frequenza) di ogni classe diametrica rispetto al totale del campione. Tale curva mostra un andamento, in genere, a campana, ma può presentare più valori modal (picchi). In termini analitici, la curva relativa rappresenta la derivata prima della curva di frequenza cumulata (figura 1).

2) Curva cumulata: esprime la percentuale (riferito al totale del campione) del sedimento più fine (o passante) relativamente ad ogni classe diametrica. Essa è l'integrale della curva di frequenza relativa; è crescente e termina a 100 (100% passante) (figura 1).

Sulla curva di frequenza cumulata vengono determinati i diametri percentili (D_x), associati ad una certa percentuale di passante. Ad es., il D_{50} rappresenta il diametro del campione di sedimento corrispondente al 50% in peso del materiale passante.

I percentili possono essere determinati graficamente dalla curva cumulata, in modo però approssimativo, o più correttamente in modo analitico attraverso interpolazione lineare, secondo l'equazione (3):

$$\varphi_x = \varphi_{\text{inf}} + \frac{\varphi_{\text{sup}} - \varphi_{\text{inf}}}{F_{\text{sup}} - F_{\text{inf}}} \cdot (F_x - F_{\text{inf}}) \quad (3)$$

Dove ϕ_x è l'indice relativo al percentile F_x incognito, e ϕ_{inf} e ϕ_{sup} sono gli indici immediatamente

inferiori e superiori ricavabili dai dati di F (frequenza).

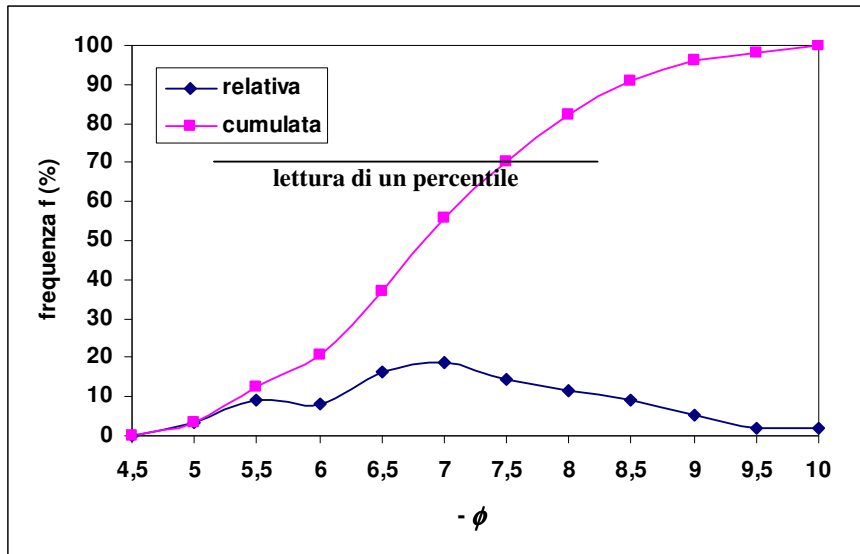


Figura 1: esempio di curva relativa e cumulata

La granulometria del sedimento superficiale, in particolare nei torrenti montani, risulta in genere eterogenea. Per tale motivo, la curva relativa di un campione risulta, spesso, distante da una gaussiana, mostrando perciò più picchi di frequenza, o si presenta sbilanciata verso granulometrie grossolane o fini (figura 2).

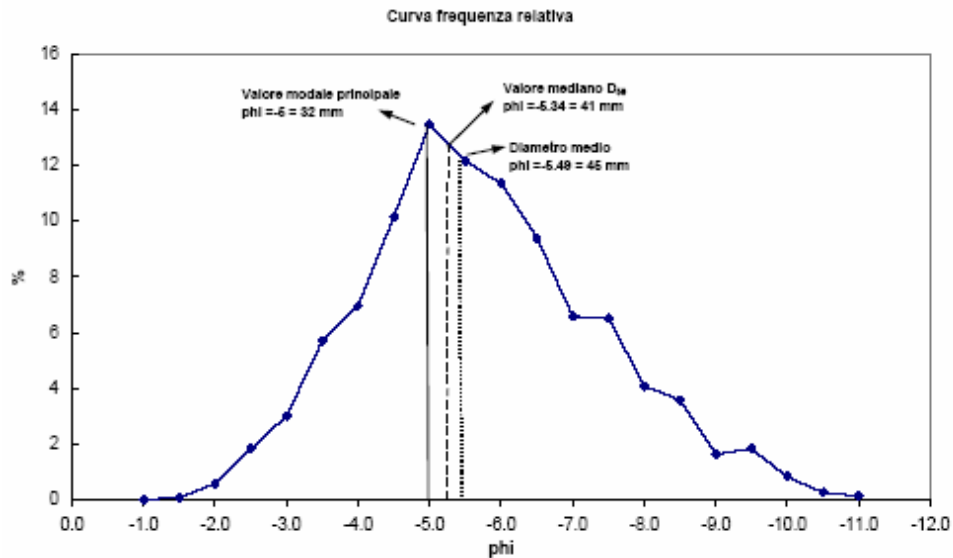


Figura 2: curva relativa con media, moda e mediana rappresentate.

Si fa uso, quindi, nell'analisi statistica della granulometria del sedimento, di parametri relativi a:

- 1- tendenza centrale (moda, media, mediana);
- 2- ampiezza della distribuzione (deviazione standard, modulo di uniformità);
- 3- simmetria;

Moda: dato di classe che mostra la frequenza relativa maggiore (picco della distribuzione).

Diametro medio: baricentro della curva di frequenza relativa dato dall'equazione (4):

$$\varphi_m = \frac{\sum f_i \cdot \varphi_i}{100} \quad (4)$$

Mediana: centro della distribuzione cumulata; corrisponde al diametro che divide la curva in due parti equivalenti in termini di area, corrispondente al D_{50} .

Moda, media e mediana coincidono solo in caso di curva perfettamente simmetrica (curva normale). Nella realtà, poiché il sedimento è generalmente costituito da materiale eterogeneo, soprattutto nei corsi d'acqua montani, il D medio tende ad essere maggiore del D_{50} (asimmetria della curva, con coda verso granulometrie grossolane).

Ampiezza della curva: definisce l'uniformità e l'eterogeneità della granulometria del campione analizzato. Quanto più una miscela granulometrica è eterognea (granulometrie fini e grossolane), minore è il grado di uniformità e il grado di classazione (figura 3). I parametri che definiscono tali caratteristiche sono:

Deviazione standard: $\sigma = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$ (5)

Coefficiente di uniformità: $U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ (6)

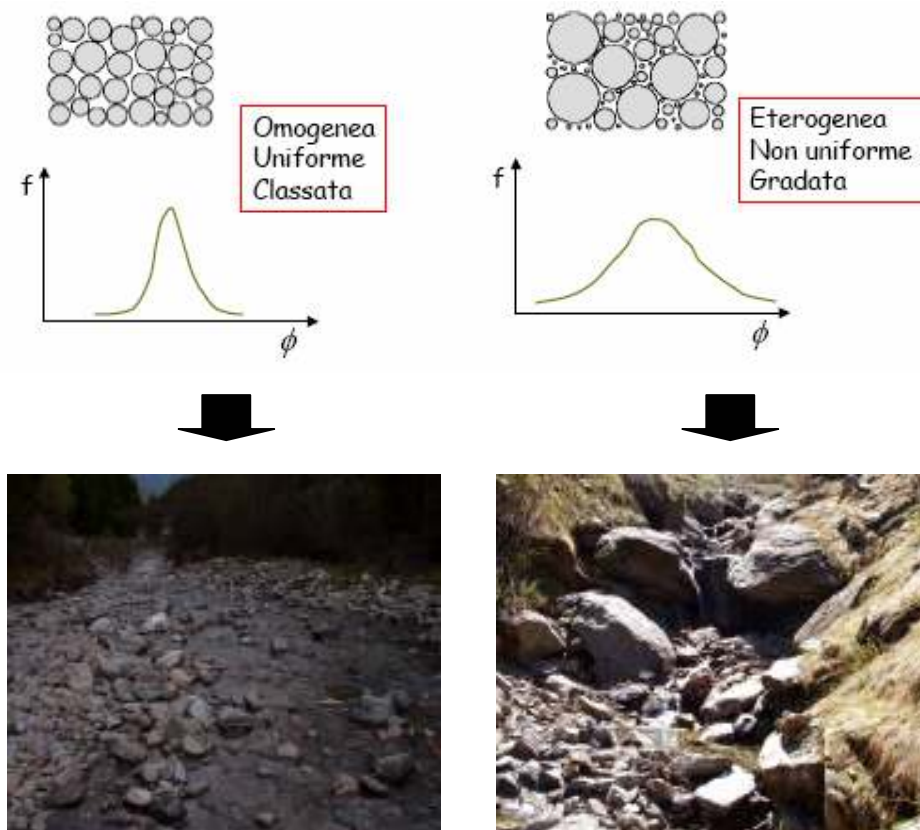


Figura 3: andamento della curva relativa in funzione della differenza di omogeneità, uniformità e classazione del sedimento. Esempi di bassa (zona deposizionale) e di elevata eterogeneità.

Coefficiente di classazione (Folk e Ward, 1957), preciso perché sensibile alle code della distribuzione (D_5, D_{95})
$$s = \left| \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} \right| + \left| \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6} \right| \quad (7)$$

Minore è s , maggiore risulta il grado di classazione e quindi l'omogeneità del sedimento.

Modulo di Kramer $M = A_1 / A_2$; è il rapporto tra le 2 aree (inferiore e superiore) individuate dal D_{50} sulla curva cumulata. Minore è M , maggiore è l'omogeneità del sedimento.

3- Simmetria della curva: i torrenti montani presentano sedimenti dove forte è la frequenza di elementi grossolani. La curva relativa di frequenze mostrerà, frequentemente, una coda verso la parte grossolana, determinando una asimmetria della curva stessa. Il coefficiente di asimmetria (Folk e Ward, 1957) è dato dall'eq. (8)

$$sk = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{50}}{\varphi_{84} - \varphi_{16}} - \frac{\varphi_{50} - \varphi_5}{\varphi_{95} - \varphi_5} \quad (8)$$

In cui valori di $sk < 0$ descrivono asimmetria verso la frazione grossolane e viceversa; $sk = 0$ indica, invece, perfetta simmetria della curva (omogeneità granulometrica).

Metodologia di analisi granulometrica: come si determina la relazione diametro-frequenza

Esistono due metodologie di stima analitica della granulometria del sedimento, finalizzate alla determinazione delle curve di frequenza relativa e cumulata e dei diametri caratteristici.

1. Metodo ponderale

Tale metodo prevede il prelievo di un campione rappresentativo della gamma granulometrica costituente il letto del corso d'acqua. L'analisi consiste nel vagliare la quantità di sedimento con setacci a maglie quadrate di dimensioni standard. Per ogni vagliatura, si pesa il sedimento trattenuto. La curva granulometrica che si ottiene esprime l'andamento delle percentuali in peso del campione passate attraverso i vagli con maglie di diversa dimensione. In tal modo, il D_{50} (diametro caratteristico) del campione vagliato definisce il lato della maglia che lascia passare il 50% in peso del materiale setacciato.

Il metodo ponderale è particolarmente adatto per campioni volumetrici, generalmente costituiti da granulometrie comprese tra la ghiaia grossa e la sabbia finissima. Il metodo ponderale consente l'analisi, perciò, a volumi di sedimento appartenenti non solo allo strato superiore del letto, ma anche a strati più profondi. In corsi d'acqua sabbiosi la distinzione tra strato superficiale corazzato e sottosuperficiale ha poco significato, mentre ne ha molta nei torrenti montani e nei *gravel-bed rivers* (figura 4). In questi ultimi casi, il metodo ponderale si rivolge solitamente agli strati sottostanti a granulometria fine, mentre lo strato superficiale grossolano viene interessato da campionamento superficiale (metodo numerale).

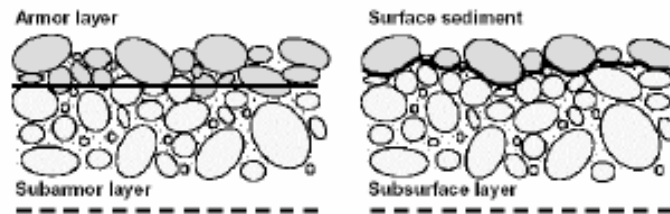


Figura 4: strati superficiale e sottosuperficiale di un sedimento in un torrente montano ad elevata pendenza.

Nel metodo ponderale, la massa di materiale da prelevare (M , in kg) è funzione del D_{max} , secondo una legge di potenza al cubo. Ciò in ragione del fatto che si vuole che il D_{max} costituisca una frazione assai bassa del volume totale del campione (0.1 – 1%). Sulla base di tale relazione di potenza, si capisce come applicare tale metodologia a corsi d'acqua a granulometria maggiore della ghiaia determini una massa ed un volume da prelevare enorme. Per evitare ciò, Church et al. (1987) hanno proposto la relazione tra massa da prelevare e D_{max} (in m) del sedimento del tipo:

$$M = 2.87D_{\max} - 44.8 \quad (9)$$

La profondità minima di campionamento (Z_{\min}), una volta rimosso lo strato superficiale, in genere deve seguire la relazione proposta da Diplas e Fripp (1992):

$$Z_{\min} = 2D_{\max} \quad (10)$$

Gli strumenti utilizzati nel metodo ponderale sono dei setacci (vaghi) con maglie di dimensioni differenti. In genere, i setacci possiedono maglie quadrate di grandezza standard, ad intervalli di 0.25ϕ , e dimensioni minime di 0.053 mm (sabbia finissima).

METODO NUMERALE

Tale metodo si attua nei casi in cui si voglia determinare una curva granulometrica di un letto costituito da sedimenti grossolani, è il caso dei *gravel-bed rivers* e dei torrenti montani ad elevata pendenza. Il metodo numerale si applica, perciò, per campioni superficiali di sedimento; nei torrenti montani, infatti, si assiste spesso ad una marcata differenziazione granulometrica tra lo stato sovrastante (spesso corazzato e dominato da granulometrie grossolane: figura 5) e quello sottostante a prevalente frazione fine.



Figura 5: letto di un torrente montano. Caratteristiche dello strato superficiale, costituito da granulometrie grossolane ed eterogenee. Ogni elemento (ciottolo) è caratterizzato da tre assi principali; il diametro di riferimento per la classificazione granulometrica corrisponde al diametro dell'asse medio (asse b).

Il metodo numerale prevede la costruzione di una curva granulometrica non più basata sulle percentuali in peso del sedimento passante (metodo ponderale), ma in cui le percentuali passanti si riferiscono a frequenze numerali dei diametri del campione in esame. In pratica, si procede al

conteggio delle particelle appartenenti ad una determinata classe diametrica.

Ogni ciottolo può essere assimilato ad un ellissoide (tre assi principali: maggiore, medio, minore). Sia nel metodo ponderale che in quello numerale, il diametro di riferimento è quello corrispondente all'asse medio del ciottolo. Nella determinazione della granulometria numerale si prevede di non rimuovere il materiale dal letto, bensì di misurare direttamente in campo il diametri intermedio. L'esecuzione del metodo numerale prevede l'utilizzo di strumenti quali calibri, per la misura del diametro dei singoli elementi campionati, o di piastrine forate con fori ad intervalli di 0.5 o 0.25 ϕ (da 2 mm a 180 mm) (figura 6).



Figura 6: esempio di piastrina forata per la determinazione della classe diametrica a cui appartiene il singolo elemento rilevato.

Metodologie di campionamento superficiale (numerale)

Esistono varie modalità di esecuzione del campionamento numerale, sulla base di quanto proposto da diversi Autori. Le tecniche più utilizzate possono essere distinte in *parziali* e *totali*.

Metodologie parziali: sono quelle più frequentemente utilizzate per il campionamento superficiale, comprendendo il metodo lineare (*transect line* o *pebble counts*) e a reticolo (Wolman, 1954) (*grid by number* o *grid counts*). Questi metodi non sono adatti a caratterizzare la componente sabbiosa (diametri < 2 mm).

Il metodo di campionamento del reticolo si esegue su un'area, quello lineare lungo una linea avente in genere direzione parallela al senso della corrente. In entrambi i casi si individua il tratto d'alveo sul quale eseguire il campionamento. Quindi, viene prefissata una unità spaziale di campionamento, ovvero un intervallo fisso di campionamento dei singoli elementi; tale unità deve essere dell'ordine del diametro (o del doppio del diametro) dei massi più grossi presenti nell'area di misura, in modo da evitare il doppio conteggio degli elementi grossolani, fonte di errore.

Per il campionamento a reticolo (*grid by number*), sul letto del corso d'acqua si traccia una griglia con maglie quadrate di lato pari all'unità spaziale di riferimento scelta; i punti sui quali si andranno a misurare i diametri degli elementi, corrispondono agli incroci (nodi) delle maglie della griglia (figura 7).

Utilizzando il metodo lineare, lungo la linea verranno evidenziati i punti (intervalli spaziali) di campionamento.



Figura 7: esempio di campionamento superficiale utilizzando il metodo a reticolo (grid-by-number). Le misure dei diametri vengono effettuate sui singoli elementi localizzati in corrispondenza dei nodi della maglia.

Indipendentemente dal metodo utilizzato, perché l'analisi dia risultati rappresentativi dell'area di studio, risulta necessario campionare almeno 80 punti. Quindi, se ad esempio si effettua un campionamento a reticolo con dimensione della maglia pari a 0.5 m, sarà necessario coprire una superficie dell'ordine di circa 20 m². La metodologia a reticolo è quella più comunemente utilizzata, poiché permette di coprire una buona superficie che sia rappresentativa del tratto indagato; il metodo lineare, invece, è consigliabile solo quale alternativa all'impossibilità di eseguire il campionamento a reticolo, ad esempio in tratti d'alveo assai stretti o con deflussi elevati.

Metodologie totali (areal samples): metodologie di campionamento che coprono superfici elevate; tali criteri appaiono poco adatti per alvei grossolani (presenza di ciottoli e massi). Le metodologie totali spesso vengono effettuate attraverso rilievo fotografico dell'area in esame, da cui si risale ai diametri degli elementi.

Errori derivanti dall'esecuzione di rilievi granulometrici superficiali (metodologia numerale)

L'esecuzione di rilievi granulometrici superficiali può determinare l'esistenza di errori che possono inficiare l'attendibilità e la correttezza del rilievo stesso. Si riconoscono tre tipologie di errore:

- statistico: deriva dall'estrazione del campione dalla popolazione; tale errore si riduce aumentando la numerosità del campione stesso.
- errore dell'operatore: deriva dalla tendenza a misurare clasti di dimensioni intermedie.

L'errore aumenta con il numero di operatori impiegati nel campionamento. Altre cause d'errore vanno ricercate nell'identificazione, prelievo e misura dell'elemento da parte dell'operatore; tendenza ad evitare zone poco accessibili; difficoltà di misura in condizioni di elevata sommergezza; le particelle più fini ($D < 4-16$ mm) tendono a venire trascurate, così come anche i massi più grossi.

spaziale: deriva dall'eterogeneità spaziale del sedimento in un tratto del corso d'acqua; questa eterogeneità rende il campione non rappresentativo del tratto in esame. Nei corsi d'acqua pedemontani e montani, raramente si osservano tratti granulometricamente omogenei spazialmente. L'eterogeneità spaziale aumenta e si osserva su scala minore quanto maggiore è la pendenza locale del corso d'acqua (figura 8).

Per ridurre la possibilità di errori dovuti all'operatore, risulta preferibile (dove è possibile) l'utilizzo del metodo a reticolo, più preciso, e l'uso di modelli a fori quadrati per classi di 0.5ϕ (da -1 a -7.5). In ogni caso, campionamenti relativi a materiale con elevata percentuale di frazione fine determinano sempre errori elevati; i metodi di campionamento parziali non si dovrebbero utilizzare, perciò, per analisi di dettaglio riguardanti ad esempio D_5 o D_{16} .



Figura 8: eterogeneità granulometrica evidente in un tratto di un torrente montano ad elevata pendenza.

Schemi di campionamento

Relativamente al campionamento superficiale (numerale), si possono riconoscere 2 tipologie di schemi spaziali di campionamento, riassumibili in:

Integrati (campionamenti rapidi ma poco precisi);

Localizzati (effettuati su piccole aree, es. per tipologie morfologiche).

1. Integrati: per tale tipologia di schemi si possono utilizzare campionamenti lineari o a zig-zag (es. lungo il percorso del corso d'acqua, soprattutto se di testata e a granulometria piuttosto omogenea), oppure a reticolo o transetti (trasversalmente al corso d'acqua) uniformemente separati, in modo tale da coprire più superficie possibile; i transetti, inoltre, saranno tanto più ravvicinati quanto maggiore è l'eterogeneità granulometrica entro il tratto analizzato.

2. Localizzati: campionamenti più puntuali rispetto agli schemi integrati. La localizzazione del campionamento avviene sulla base della differenziazione tra varie tipologie morfologiche (es. riffle, pool, barre laterali) o tra unità sedimentarie (zone con granulometrie fini, medie o grossolane). Gli schemi di campionamento localizzato sono adatti per tratti in cui elevata è l'eterogeneità granulometrica, determinando una maggior precisione di analisi. Essi vengono spesso utilizzati per il rilievo granulometrico relativo a singole tipologie morfologiche riscontrabili in un corso d'acqua naturale, in particolare nei torrenti montani. Tali schemi consentono di analizzare, ad esempio, il grado di corazzamento di una certa tipologia morfologica (es. step pool, rapide, pools), il sedimento fine depositato nei pool, oppure per stimare la variazione granulometrica superficiale a valle di soglie artificiali o naturali o lungo le barre di deposito laterali (figura 9).



Figura 9: esempi di tratti in cui possono venire effettuati rilievi superficiali di tipo localizzato; barre laterali e scavi a valle di soglie artificiali o naturali.

Caratterizzazione morfologica dei torrenti montani sulla base dell'analisi granulometrica

La morfologia dei torrenti montani risulta spesso assai variabile, in funzione di molteplici fattori quali pendenza, geometria della sezione, condizionamenti esterni e, non ultime, le caratteristiche granulometriche del letto. Nei torrenti si identificano diverse morfologie di fondo, le quali possono essere classificate in tipologie caratterizzate da elevata capacità di trasporto e tipologie dove prevale la tendenza all'accumulo dei sedimenti. Nelle prime rientrano le rapide (*cascades*) e le strutture a gradinata (*step pool*), mentre alle seconde appartengono i tratti a letto piano (*plane bed*) e le sequenze a *riffle pool* (tipiche soprattutto di corsi d'acqua vallivi o pedemontani).

La granulometria dei corsi d'acqua montani è caratterizzata, come si è già evidenziato, da una elevata eterogeneità; la distribuzione dei sedimenti sulla superficie del letto, tuttavia, può costituire un elemento di differenziazione tra vari assetti morfologici dell'alveo. Morfologie quali *step pool* (Fig. 10) e rapide (Fig. 11), tipiche di pendenze sostenute e di condizioni di elevata capacità di trasporto ed incisione del letto, sono caratterizzate, in tutti i torrenti montani appartenenti anche ad ambienti ed assetti geologici differenti, da un'elevata frequenza delle classi diametriche grossolane, le quali conferiscono alle strutture elevata stabilità ed alti livelli di macroscabrezza.

- Step pool (sequenza)

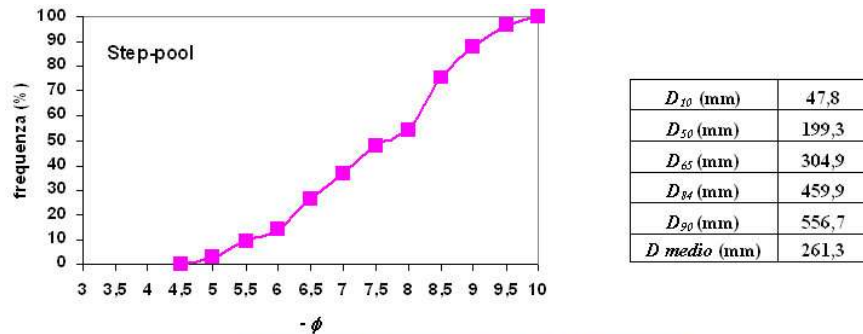


Figura 10: sequenza a step pool (alto corso del torrente Cordevole, Arabba - Belluno).

Le morfologie a *step pool*, inoltre, manifestano una segregazione abbastanza evidente tra i gradini (*steps*), costituiti dal materiale di maggiori dimensioni, ed i *pool*, nei quali si accumula il materiale più fine. Tale segregazione risulta meno evidente nelle rapide, dove si assiste ad una maggiore eterogeneità spaziale. I *plane bed* (Fig. 12), caratterizzati da un tendente accumulo di sedimenti, manifestano una maggiore omogeneità nella distribuzione granulometrica, oltre che dimensioni del materiale generalmente minori rispetto a *steps* e *cascades*.

Rilievi granulometrici superficiali (campionamento numerale), effettuati localmente in corrispondenza di differenti tipologie morfologiche, possono risultare perciò utili al fine di ottenere ulteriori fattori di differenziazione tra le tipologie. Campionamenti localizzati di questo tipo consentono, inoltre, di verificare ad esempio come, al variare della pendenza locale del corso d'acqua, varia la distribuzione granulometrica entro stesse tipologie morfologiche. A titolo d'esempio, vengono confrontate le curve granulometriche cumulate ed i principali diametri caratteristici (D_x) relative a

differenti tipologie morfologiche (*step pool*, *rapide*, *plane bed*) riscontrate in uno stesso torrente alpino.

- rapide

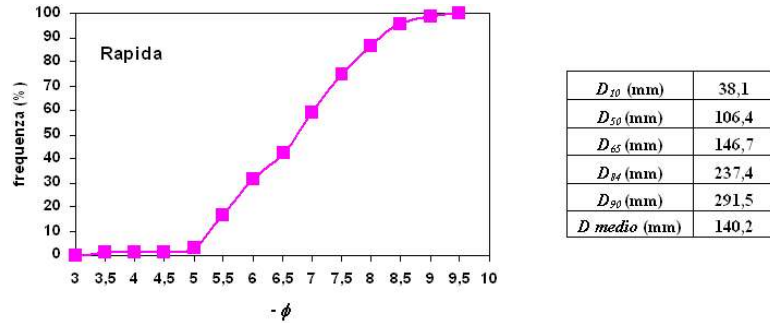


Figura 11: morfologia a rapida (alto corso del torrente Cordevole, Arabba - Belluno).

- plane bed

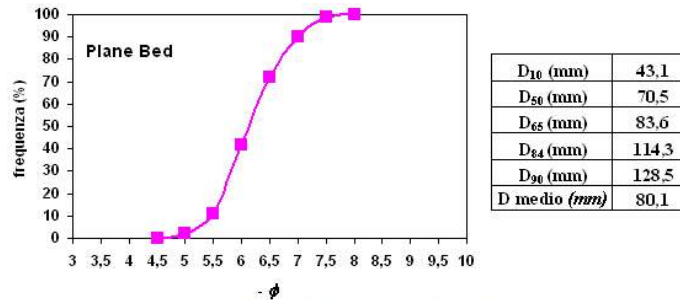


Figura 12: tratto a plane bed (alto corso del torrente Cordevole, Arabba - Belluno).

Step pool e *rapide* possiedono i valori più alti dei percentili e di diametro medio del sedimento; il confronto tra le curve cumulate consente, inoltre, di verificare come *rapide* e *step pool* sono costituite da sedimenti con un'alta percentuale di materiale grossolano.

Le morfologie a *step pool* e le *rapide* mostrano, in genere, una sovrapposizione nella

distribuzione granulometrica (Vianello, 2000). Risulta evidente, come si può osservare nel grafico di figura 13 rappresentante gli spettri di variazione dei diametri campionati nelle diverse tipologie morfologiche, che morfologie a rapida e a *step pool* sono caratterizzate da evidente eterogeneità granulometrica (ampiezza degli spettri elevata) e da un'elevata frequenza di materiale grossolano. I plane bed, infine, possiedono maggiore omogeneità granulometrica, associata a diametri medi fini.

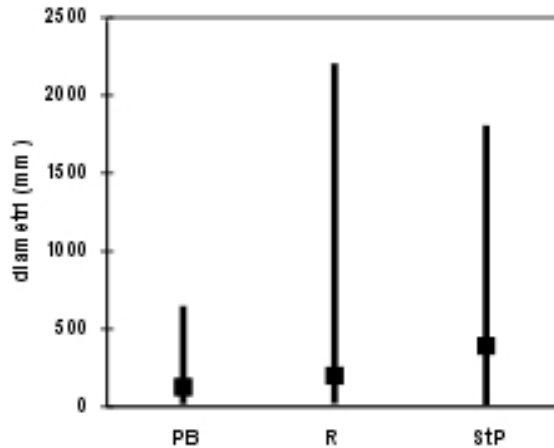


Figura 13: distribuzione granulometrica del materiale campionato in corrispondenza di differenti tipologie morfologiche di un torrente montano (torrente Prampèr, Belluno).

BIBLIOGRAFIA

- Folk R.L., Ward W.C. (1957). Brazos river bar: a study of significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.*, 27, 3 – 26.
- Church M. A., McLean D.G., Wilcott J. F. (1987). *River bed gravels: sampling and analysis*. In: *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*. New York: John Wiley and Sons, Ltd., 45 pp.
- Diplas P., Fripp J. B. (1992). *Properties of various sediment sampling procedures*. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 118 (7), 955 – 970.
- Vianello A. (2000): Indagine di campo sulle unità fluvio-morfologiche di un torrente alpino ad elevata produzione di sedimenti: il caso di studio del torrente Prampèr in Val Zoldana (Belluno). Tesi di laurea in Scienze Forestali ed Ambientali, Università degli Studi di Padova.
- Wolman M. G. (1954). *A method of sampling coarse river-bed material*. *American Geophysical Union*, 35 (6), 951 – 956.

**IL TRASPORTO SOLIDO DI FONDO E LE COLATE DETRITICHE:
FENOMENOLOGIA ED EFFETTI SULL'ASSETTO DEI CORSI
D'ACQUA A FORTE PENDENZA**

Lorenzo MARCHI

CNR IRPI – Sezione di Padova

INTRODUZIONE

La dinamica del sedimento nei corsi d'acqua montani, specialmente in quelli che drenano i bacini di minori dimensioni e presentano le pendenze più elevate, può manifestarsi attraverso processi di caratteristiche assai diverse.

In particolare, trattando dei processi che si generano in risposta a piogge di forte intensità o ad altri subitanei apporti idrici; una distinzione fondamentale è quella fra piene con trasporto solido (al fondo ed in sospensione) e colate detritiche.

Una colata detritica può essere definita come un movimento di massa rapido che si sviluppa per azione della gravità ed interessa una miscela ad alta concentrazione composta da materiale solido eterogeneo ed acqua. La frazione solida, oltre al sedimento, può comprendere altri materiali: nei bacini boscati è spesso importante la presenza di detrito legnoso grossolano.

Colata detritica è la traduzione italiana dell'inglese *debris flow*, termine ampiamente utilizzato anche nella nostra lingua. L'affermazione del termine "colata detritica" è piuttosto recente e si è accompagnata all'accresciuto interesse che, da circa due decenni, questi fenomeni riscuotono presso la comunità scientifica e fra gli specialisti interessati alla gestione dei bacini montani.

La collocazione delle colate detritiche, a cavallo fra piene con trasporto solido e frane, è all'origine di particolari difficoltà nell'inquadramento di questi processi.

La distinzione fra le colate detritiche e le piene con trasporto solido si basa principalmente sulla diversa concentrazione solida, dalla quale discendono importanti differenze nel comportamento reologico complessivo. Le colate detritiche si presentano come miscele solido-liquide ad elevata concentrazione, che, in prima approssimazione, possono essere assimilate a fluidi monofasici, nei quali acqua e solidi si muovono con la stessa velocità. Al contrario, nelle piene idriche con trasporto solido, il sedimento trasportato al fondo ha velocità diversa da quella dell'acqua con sedimento in sospensione in cui è immersa.

Un importante elemento che differenzia le colate detritiche dalle frane in senso stretto è rappresentato dal fatto che molte frane conservano, almeno parzialmente, la struttura iniziale del materiale interessato dal movimento. Ciò non avviene per le colate detritiche: la massa fluente subisce forti deformazioni, fino a risultare completamente rimaneggiata. Questa differenza viene meno se si confrontano colate detritiche e valanghe di roccia e di detrito (*rock avalanche* e *debris avalanche*); in questo caso, il diverso ruolo dell'acqua è un importante fattore di distinzione. Mentre la dinamica delle valanghe di roccia e di detrito è controllata dalle interazioni fra particelle solide, nelle colate di detrito intervengono sia le forze che agiscono sulla frazione solida, sia quelle che interessano la componente liquida.

Il corretto riconoscimento dei fenomeni e delle parti della rete idrografica che possono essere interessati dall'uno o dall'altro tipo di processi è della massima importanza per la determinazione della pericolosità e per la scelta delle misure di mitigazione del rischio. Non si intende con questo affermare semplicisticamente che le colate detritiche producano necessariamente condizioni di pericolo più gravi di quelle generate dalle piene con trasporto solido, ma si sottolinea la necessità di adottare metodi di analisi e, conseguentemente, misure di mitigazione adatte ai due diversi tipi di fenomeni torrentizi.

Le fondamentali diversità fra piene idriche con trasporto solido e colate detritiche emergono anche dal rilievo strumentale dei fenomeni. A titolo di esempio, si presentano nella figura 1 gli idrogrammi relativi a due eventi, provocati da piogge di forte intensità, registrati in due bacini alpini di dimensioni simili: il Rio Cordon (5 km²) ed il Torrente Moscardo (4.1 km²). L'idrogramma registrato sul Rio Cordon (figura 1a) è relativo ad una piena idrica con trasporto solido (Lenzi et al., 1999), quello del Torrente Moscardo (figura 1b) ad una colata detritica. Si nota la minor durata complessiva della colata detritica, che presenta anche un tempo al colmo molto più breve. Inoltre, mentre nel Rio Cordon sono stati misurati separatamente i deflussi liquidi, il trasporto in sospensione e quello al fondo, ciò non sarebbe stato possibile per il Torrente Moscardo. La colata detritica i cui idrogrammi sono presentati nella figura 1b, pur se apparentemente più fluida rispetto ad altre descritte nella letteratura specialistica, si è infatti manifestata attraverso il passaggio di una densa miscela caratterizzata da un'intima commistione delle componenti solida e liquida (Deganutti et al., 2000; Marchi et al., 2002).

Alle diverse caratteristiche reologiche delle piene con trasporto solido e delle colate detritiche fanno riscontro importanti differenze nelle caratteristiche morfologiche e sedimentologiche dei

depositi. Da ciò deriva l'importante significato diagnostico dei depositi ai fini del riconoscimento della tipologia dei processi torrentizi.

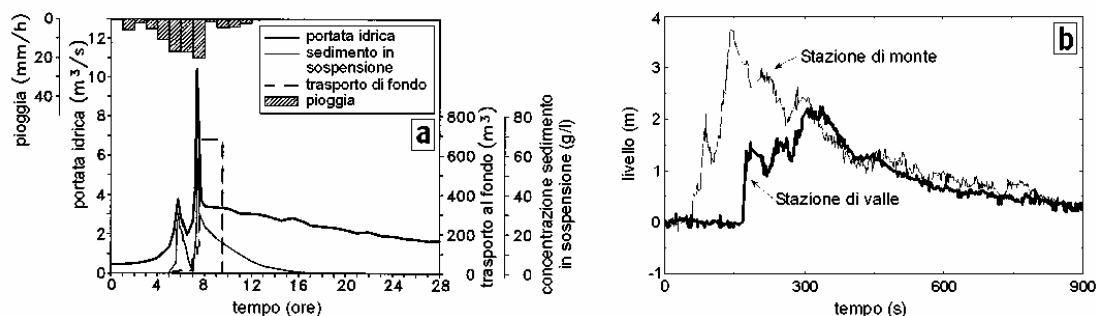


Figura 1. Idrogramma di una piena con trasporto solido (a - Rio Cordon, 14.09.1994) e di una colata detritica (b - Torrente Moscardo, 08.07.1996).

CLASSIFICAZIONE E FENOMENOLOGIA DEI PROCESSI TORRENTIZI

Numerose sono le classificazioni dei processi torrentizi proposte nella letteratura scientifica. Alcune sono particolarmente mirate alla caratterizzazione dei collettori interessati dalle diverse forme di trasporto del sedimento, mentre altre inquadrano i processi torrentizi in un contesto più ampio, evidenziandone somiglianze e differenze rispetto ai fenomeni franosi. Ad esemplificare i due approcci, vengono qui brevemente richiamate le classificazioni di Aulitzky (1982) e di Pierson e Costa (1987).

La classificazione di Aulitzky (1982) distingue quattro tipi di torrenti sulla base del comportamento atteso in occasione di eventi "estremi", ponendo particolare riguardo ai processi che interessano il conoide alluvionale o, comunque, le parti inferiori dell'asta torrentizia:

- torrenti da colata detritica (Murstossfähige Wildbäche – Debris-flow torrents);
- torrenti da piena di detriti (Murfähige Wildbäche – Debris-flood torrents);
- torrenti con trasporto solido (Geschiebeführende Wildbäche – Bedload torrents);
- torrenti con sole piene idriche (Nur Hochwasser führende Wildbäche - Flood creeks).

Nella classificazione di Pierson e Costa (1987), i processi sono distinti in base alla velocità ed alla concentrazione della frazione solida (figura 2).

La concentrazione di una miscela di acqua e sedimenti può essere espressa in volume (C_v) o in peso (C_w),

$$C_v = \frac{V_s}{V_s + V_a} \quad (1)$$

$$C_w = \frac{W_s}{W_s + W_a} \quad (2)$$

dove V_s rappresenta il volume della frazione solida, V_a il volume liquido, W_s il peso della frazione solida W_a il peso della componente liquida

I limiti verticali che distinguono le varie classi nella figura 2 sono approssimati, giacché l'appartenenza di una miscela solido-liquida all'una o all'altra classe di processi dipende anche dalla distribuzione granulometrica della frazione solida e dalle caratteristiche fisiche e chimiche delle particelle. Pierson e Costa (1987) sottolineano che, in una data area geografica, le caratteristiche fisiche dei sedimenti presentano una variabilità minore rispetto alla concentrazione: ciò fa di

quest'ultima un parametro più idoneo ad una classificazione su base reologica.

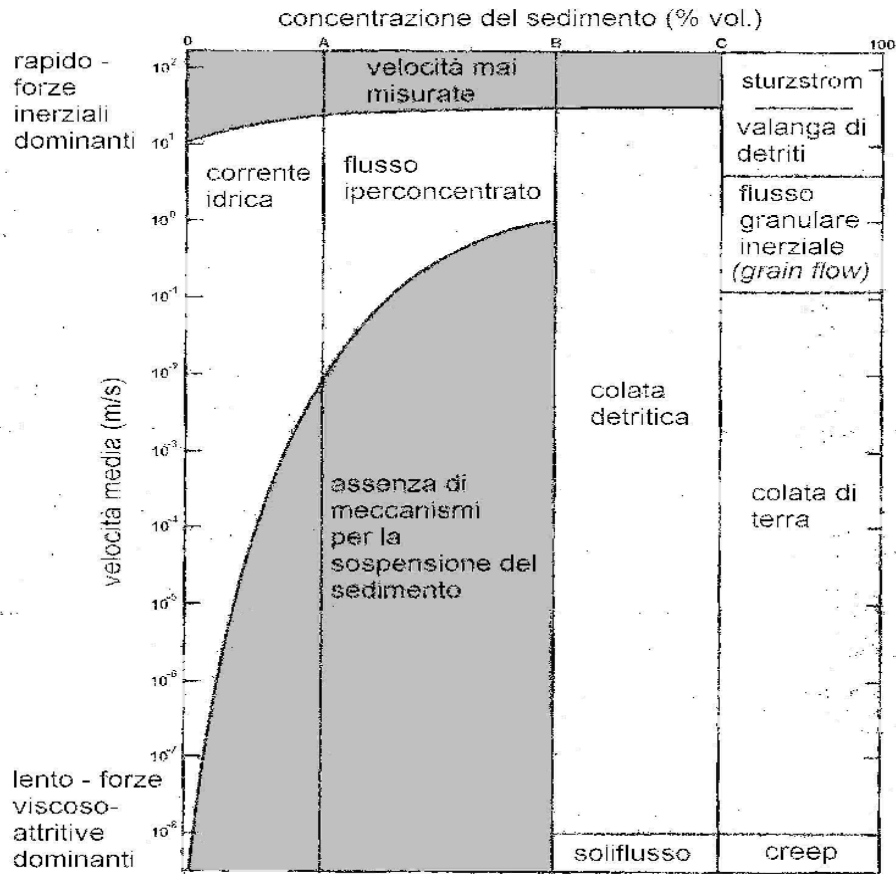


Figura 2. Classificazione dei flussi subaerei di miscela acqua-sedimento (da Pierson e Costa, 1987).

Nella classificazione di Pierson e Costa, solo le correnti idriche sono fluidi Newtoniani, mentre un comportamento non-Newtoniano accomuna i flussi iperconcentrati (o correnti iperconcentrate) alle miscele con la maggiore incidenza di solidi. Il fluido interstiziale è costituito da acqua nel caso delle correnti idriche, da acqua e particelle fini nei flussi iperconcentrati e nelle colate di detrito (con la possibilità di una modesta presenza di bolle d'aria nella matrice delle colate detritiche), da acqua, aria e particelle fini nei processi caratterizzati dalle concentrazioni solide più elevate (a destra del limite verticale C nella figura 2). Il soliflusso è stato accostato alle colate detritiche, alle quali è accomunato dal fatto di interessare materiali saturi, anche se le caratteristiche fenomenologiche del movimento appaiono più prossime a quelle del *creep* e delle colate di terra più lente.

Entrambe le classificazioni citate comprendono un termine intermedio fra piene con trasporto solido e colate detritiche (piena di detriti in Aulitzky e flusso iperconcentrato in Pierson e Costa). Piene idriche e colate detritiche si pongono dunque come termini estremi di un ampio spettro di processi che coinvolgono il trasporto di acqua e sedimenti in alvei naturali. È importante ricordare come la transizione fra piene con trasporto solido e colate detritiche comprenda delle situazioni intermedie, il cui riconoscimento può essere non agevole, ma che meritano di essere considerate, anche ai fini sistematori, nei casi in cui si ritiene che la concentrazione solida possa trascendere quella propria del trasporto al fondo, pur senza attingere agli elevati valori che caratterizzano le colate detritiche.

Nella letteratura scientifica sono stati proposti valori diversi della concentrazione solida propria dei vari processi di trasporto. Ad esempio, Costa (1988) indica valori della concentrazione del

sedimento in volume fino a 0.2 per le correnti idriche con trasporto solido, da 0.2 a 0.47 per i flussi iperconcentrati e fra 0.47 e 0.77 per le colate detritiche. Valori massimi nettamente più bassi ed un campo di variabilità più limitato (fra 0.45 e 0.55) sono indicati per le colate detritiche da O'Brien (2003).

CRITERI PER IL RICONOSCIMENTO

Il riconoscimento dei processi torrentizi può basarsi su tre principali approcci:

- storico-documentario;
- geomorfologico-sedimentologico;
- morfometrico.

Il contributo che i dati storici, intendendo con ciò le informazioni documentarie edite ed inedite, possono fornire al riconoscimento della tipologia dei processi torrentizi varia in modo sostanziale a seconda della disponibilità e della qualità delle informazioni. L'utilizzo di documentazione storica, oltre a contribuire al riconoscimento della tipologia dei fenomeni torrentizi che interessano un bacino idrografico, può dare utili indicazioni sulla frequenza dei processi di maggiore intensità e, in alcuni casi, dati quantitativi sulla loro entità.

Si sottolinea che il riconoscimento delle colate detritiche può basarsi su descrizioni di elementi tipici di questi fenomeni, mentre raramente la terminologia utilizzata in relazioni e memorie è quella in uso attualmente. Si riportano alcuni esempi di descrizioni di colate detritiche in grado di consentire un attendibile riconoscimento di questi processi; in altri casi gli elementi reperibili nella documentazione storica non sono altrettanto univoci nel definire la tipologia dei fenomeni di trasporto.

“Questo torrente dà origine nelle grandi montane a delle vere e talvolta poderose e pericolose colate di fango, mescolate a macigni e a poca acqua, talvolta interamente dissimulata” (Marinelli, 1898).

“... si presenta il fenomeno della discesa in massa delle ghiaie lungo canali di scarico, anche se superficialmente la quantità d'acqua fluente appaia assai limitata” (Bonicelli, 1928).

“... una corrente melmosa che procede con velocità ridotta, ma con violenza ... in linguaggio locale «la boa»” (Caldart, 1955).

“... soprattutto in occasione d'importanti temporali, gli enormi detriti di falda ed il materiale minuto depositato negli alvei dei fossati scendono sotto forma di grandi ondate alluvionali, arrestandosi sulla conoide, le cui campagne ed abitati furono più di una volta invasi dalla massa semifluida dell'alluvione” (Bresaola, 1929 citato da Cerato, 1999).

Le caratteristiche morfologiche e sedimentologiche dei depositi osservabili lungo gli alvei e sui conoidi alluvionali possono fornire importanti elementi, spesso utilizzabili anche a notevole distanza di tempo dagli eventi, per il riconoscimento della tipologia dei processi. Numerosi sono gli studi che trattano di questa tematica: si possono ricordare, oltre al già citato lavoro di Aulitzky (1982), i classici contributi di Johnson e Rodine (1984) e di Costa (1984).

In generale, nelle aree urbanizzate, per le quali sono spesso disponibili informazioni storiche d'archivio, scarseggiano le evidenze morfologiche e sedimentologiche utilizzabili per il riconoscimento tipologico dei processi torrentizi. Il contrario avviene nelle zone in condizioni relativamente più naturali.

Si ricordano brevemente le principali evidenze di terreno indicative del verificarsi di colate detritiche:

- depositi di forma lobata caratterizzati da una brusca terminazione frontale (figure 3 e 4);
- depositi in forma di argini laterali lungo i canali di deflusso (figura 5);
- sezioni che evidenziano depositi scarsamente classati e con presenza di massi e ciottoli immersi in una matrice fine (figura 6).

Non di rado si presentano situazioni in cui, pur non essendo riconoscibili depositi ascrivibili ad un particolare evento di colata detritica, si osservano elementi morfologici, quali presenza di grossi massi sparsi, solcature e gibbosità sulla superficie dei conoidi alluvionali (figura 7) o depositi in forma

di cordoni allungati (figura 8), che indicano che questi fenomeni si sono verificati in passato.



Figura 3. Depositi di colata detritica: lobo terminale (Arroyo del Medio, Argentina).



Figura 4. Depositi di colata detritica: lobo terminale (Torrente Miozza, Friuli).



Figura 5. Depositi di colata detritica: argini laterali (Torrente Moscardo, Friuli).



Figura 6. Sezione di depositi di colata detritica (Torrente Moscardo, Friuli).



Figura 7. Indizi di passati eventi di colata detritica su un conoide alluvionale: superficie irregolare, presenza di massi sparsi, depositi di forma lobata (Val di Sole, Trentino Occidentale).



Figura 8. Vecchi depositi di colata detritica (argini laterali) riconoscibili all'interno di un popolamento forestale (conoide del Torrente Moscardo, Friuli).

I torrenti ed i conoidi alluvionali non interessati da colate detritiche, ma solo da piene con trasporto solido, si caratterizzano per l'assenza di depositi tipici delle colate detritiche, e per la presenza di depositi dalla superficie relativamente regolare, poveri di matrice fine e nei quali è talvolta riconoscibile l'alternanza di strati di diverse caratteristiche tessiturali.

Un altro carattere distintivo è dato dal fatto che la separazione fra i depositi di colata detritica e le superfici non interessate dai processi di deposizione tende ad essere netta e ben definita (figura 4), mentre nel caso dei depositi associati a piene idriche si osserva una maggiore gradualità nel passaggio fra la zona interessata dai depositi e le aree esterne agli stessi (figura 9). Nelle parti esterne dei depositi dovuti a piene idriche si osserva frequentemente la presenza di solo materiale fine, indicativa di una segregazione legata alle caratteristiche granulometriche dei sedimenti. Ciò non si riscontra nei depositi delle colate detritiche, salvo il caso in cui siano intervenuti processi di rimaneggiamento dei depositi da parte di correnti a minor concentrazione solida. I canali modellati unicamente da piene idriche con trasporto solido presentano, inoltre, un rapporto fra profondità e larghezza inferiore a quello dei canali interessati da colate detritiche.



Figura 9 - Depositi di piena con trasporto solido (Val Racines, Bolzano).

L'analisi morfometrica può contribuire al riconoscimento della tipologia dei processi torrentizi per mezzo di semplici indici di acclività dei bacini idrografici e dei conoidi alluvionali. Uno dei primi contributi in questo ambito deriva da uno studio condotto da Jackson et al. (1987) in un settore delle Montagne Rocciose Canadesi. Questi autori, sulla base di evidenze morfologiche e sedimentologiche, hanno suddiviso un campione di conoidi alluvionali in due classi: “*fluvial*” e “*debris flow*”, ovvero, rispettivamente, conoidi da trasporto solido e da colata detritica. Alla classificazione dei processi torrentizi dominanti si è accompagnata la caratterizzazione morfometrica dei bacini idrografici e dei conoidi, con la determinazione della pendenza media del conoide e dell'indice di Melton del bacino.

L'indice di Melton (*Mel*, m/m) è dato da:

$$Mel = \frac{(H_{max} - H_{min}) / 1000}{A^{0.5}} \quad (3)$$

dove sono:

H_{max} : altitudine massima nel bacino (m);

H_{min} : altitudine minima nel bacino, corrispondente alla quota dell'apice del conoide (m);

A: area del bacino (km²).

I conoidi alluvionali appartenenti alle due classi ricadono in aree distinte in uno scattergramma che pone in relazione le due variabili: i bacini da colata detritica presentano solitamente superficie minore e/o rilievo più accentuato di quelli da trasporto solido, ciò che si riflette in valori più elevati dell'indice di Melton, ed edificano conoidi più pendenti.

Studi di impostazione simile sono stati condotti in bacini delle Alpi Orientali Italiane (Marchi et al., 1993) (figura 10) e delle Alpi Francesi (Marchi e Brochot, 2000). Nei bacini delle Alpi Europee è stata considerata una classe intermedia fra i conoidi da colata detritica e quelli da trasporto solido: i conoidi di tipo misto, alla cui edificazione contribuiscono entrambi i processi. Nei bacini delle Alpi Orientali Italiane si è proceduto anche ad una validazione del metodo, utilizzando informazioni bibliografiche e dati storici d'archivio relativi a bacini non utilizzati nello sviluppo del metodo stesso (Marchi et al., 1993). I dati storici, riportanti informazioni sulla tipologia dei processi torrentizi in occasione di eventi di forte intensità, sono risultati in buon accordo con le valutazioni che emergono dal grafico di figura 10.

Utilizzando il campione già impiegato da Marchi et al. (1993), ed ampliandolo con altri bacini della stessa regione geografica, D'Agostino (1996) ha proposto l'espressione analitica di una linea utilizzabile per discriminare i conoidi da trasporto solido da quelli soggetti a colata detritica, comprendendo in quest'ultima classe anche i conoidi di tipo misto. Risultano potenzialmente interessati da colate detritiche i bacini ed i conoidi caratterizzati da valori dell'indice di Melton e della pendenza del conoide S_f (°) che soddisfano la disequazione:

$$S_f > 7 - 14 \cdot Mel \quad (4)$$

Negli anni più recenti, le ricerche di De Scally e Owens (2004) in Nuova Zelanda e Wilford et al. (2004) in British Columbia (Canada) hanno confermato la validità del numero di Melton come indice in grado di concorrere al riconoscimento della tipologia dei fenomeni torrentizi.

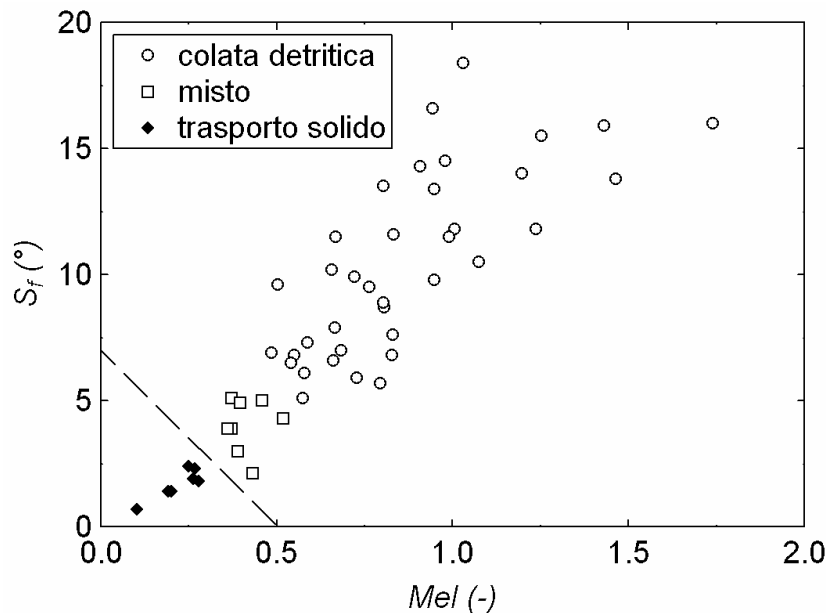


Figura 10 - Relazione fra indice di Melton del bacino e pendenza del conoide alluvionale in bacini delle Alpi Orientali Italiane. La linea tratteggiata corrisponde all'equazione $S_f = 7 - 14 \cdot Mel$, che discrimina i conoidi da trasporto solido da quelli da colata detritica o di tipo misto.

Si sottolinea che l'approccio morfometrico al riconoscimento della tipologia dei processi torrentizi fornisce indicazioni di prima approssimazione e deve essere utilizzato congiuntamente agli altri metodi citati in precedenza (analisi di dati storici ed osservazioni di campagna). Il riconoscimento della tipologia dei processi torrentizi su base morfometrica si rivela inadeguato in situazioni particolari, fra le quali si ricordano le due seguenti, già indicate da Jackson et al. (1987) e Marchi et al. (1993).

- In alcuni torrenti, che presentano valori elevati dell'indice di Melton, si osservano tratti d'alveo a bassa pendenza, specialmente nella parte inferiore dell'asta torrentizia. Questo porta alla parziale deposizione del materiale solido proveniente da monte, che giunge al conoide in forma di trasporto solido al fondo, anziché di colata detritica.
- Bacini di ampie dimensioni (numero di Melton basso) possono essere interessati da colate detritiche che, generatesi in un sottobacino, giungono fino al conoide alluvionale. Ciò può avvenire quando un tributario con propensione alla formazione di colate detritiche confluisce nell'asta principale in prossimità dell'apice del conoide.

E' opportuno ricordare che, al pari di altri metodi di tipo empirico, il riconoscimento del tipo di processi torrentizi su base morfometrica non può essere applicato senza adeguate verifiche al di fuori delle regioni dove è stato sviluppato. In particolare, mentre sembra dare generalmente buoni risultati in regioni montuose a clima umido delle medie latitudini, non si è dimostrato valido per i bacini torrentizi della Calabria, appartenenti ad un diverso ambiente morfoclimatico (Parise e Calcaterra, 2000)

VARIABILITÀ SPAZIALE E TEMPORALE DEI PROCESSI

I processi torrentizi mostrano un'accentuata variabilità sia dal punto di vista spaziale, sia nelle loro articolazioni temporali.

In uno stesso bacino è possibile riconoscere tratti della rete idrografica nei quali le colate detritiche rappresentano il processo di trasporto dominante ed altri interessati unicamente da piene idriche con trasporto solido. In termini generali, la predominanza dei due processi è controllata dai relativi rapporti fra pendenza locale ed estensione dell'area presente a monte (figura 11).

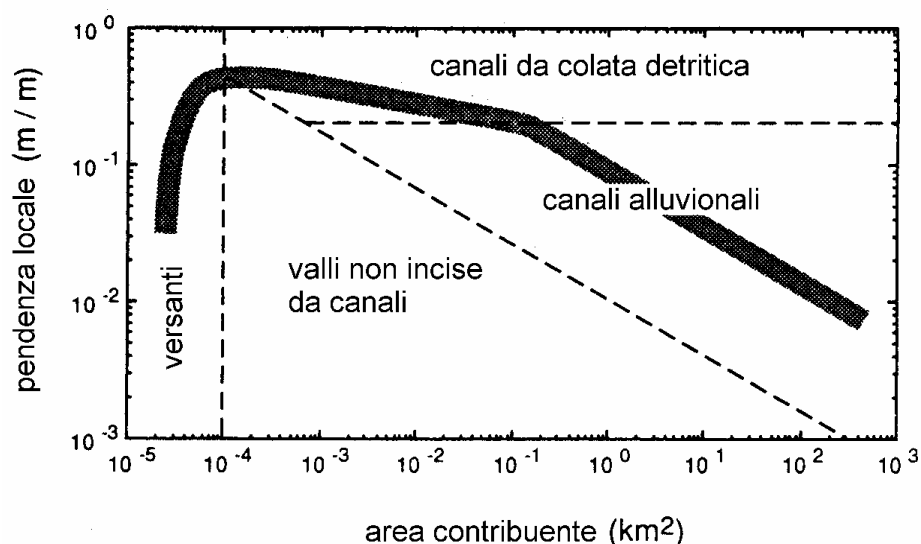


Figura 11 - Illustrazione schematica delle relazioni fra area contribuyente e pendenza locale in relazione al passaggio dai versanti alla rete idrografica ed al tipo di collettore (canali da colata detritica ed alluvionali). L'andamento della linea che segna il passaggio fra le diverse parti del grafico può variare a seconda delle condizioni del bacino (Da Montgomery e Fofoula-Georgiou, 1993).

Le concrete condizioni morfologiche dei bacini possono talvolta modificare la successione, da monte a valle, dei tratti di rete idrografica delineata nella figura 11. Valga di esempio, a questo proposito, il caso del Rio Dona (Val di Fassa, Trentino Orientale), interessato da una colata detritica il 9 luglio 1989. Nella parte superiore del bacino, dove è presente una valle sospesa a bassa pendenza, il torrente è stato percorso da una piena idrica con modesto trasporto solido. La colata detritica si è innescata più a valle, in un tratto a maggiore pendenza, interessato da fenomeni di instabilità spondale e da un'intensa erosione dell'alveo, ed è proseguita fino al conoide alluvionale, sul quale ha depositato circa 17000 m³ di materiale solido (figura 12).

Nelle parti della rete idrografica interessate da colate detritiche, queste spesso non costituiscono l'unico processo di trasporto di sedimento. Infatti, in uno stesso canale possono verificarsi piene idriche e colate detritiche, nonché, ovviamente, fenomeni di caratteristiche intermedie. Inoltre, i diversi processi possono avvenire nel corso di uno stesso evento. Riguardo a quest'ultimo aspetto, si ricorda come l'onda principale di una colata detritica sia spesso preceduta da una pulsazione (*precursory surge*) a concentrazione solida nettamente minore, e che una progressiva diminuzione della concentrazione si verifica nella fase di esaurimento del fenomeno (figura 13).

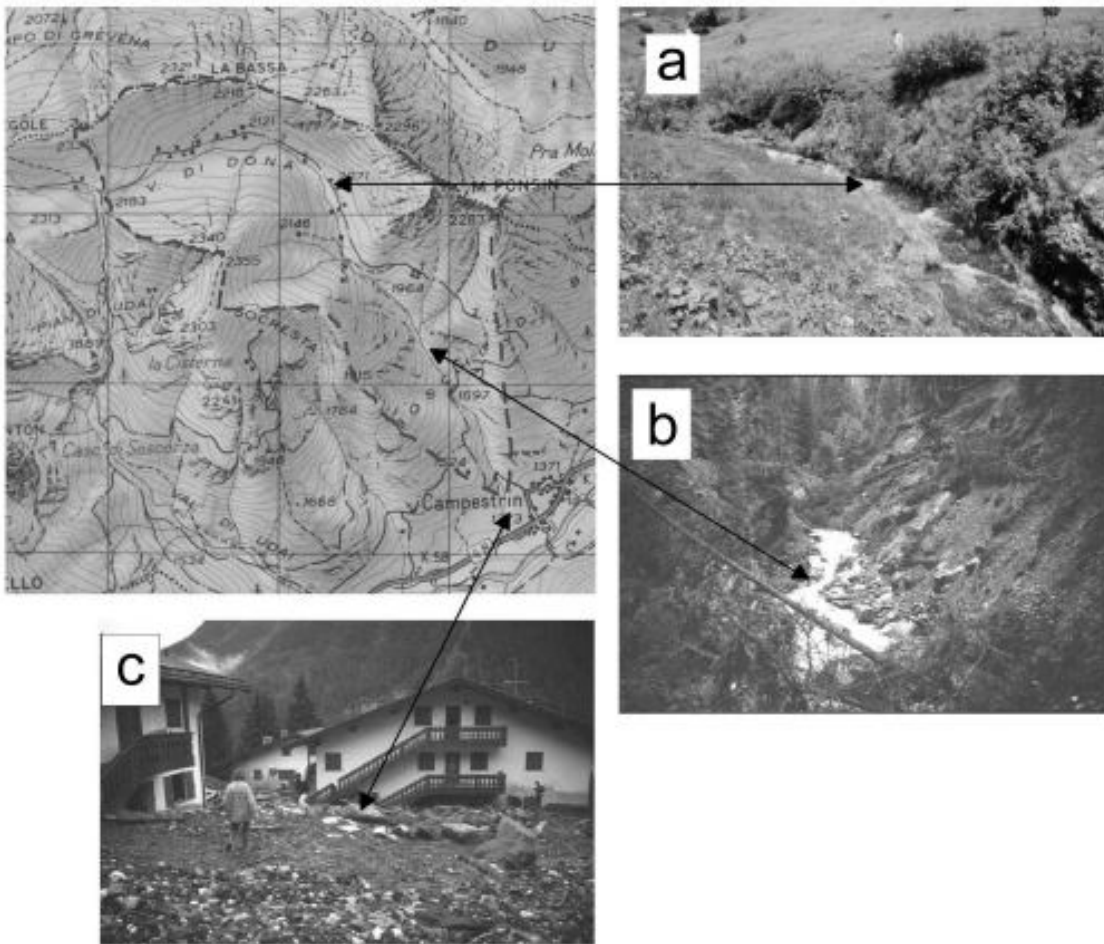


Figura 12. Bacino del Rio Dona, evento del 9 luglio 1989: a) parte superiore del torrente: bassa pendenza - piena idrica; b) parte intermedia: forti pendenze, instabilità spondale ed erosione d'alveo - colata detritica; c) depositi di colata detritica sul conoide.

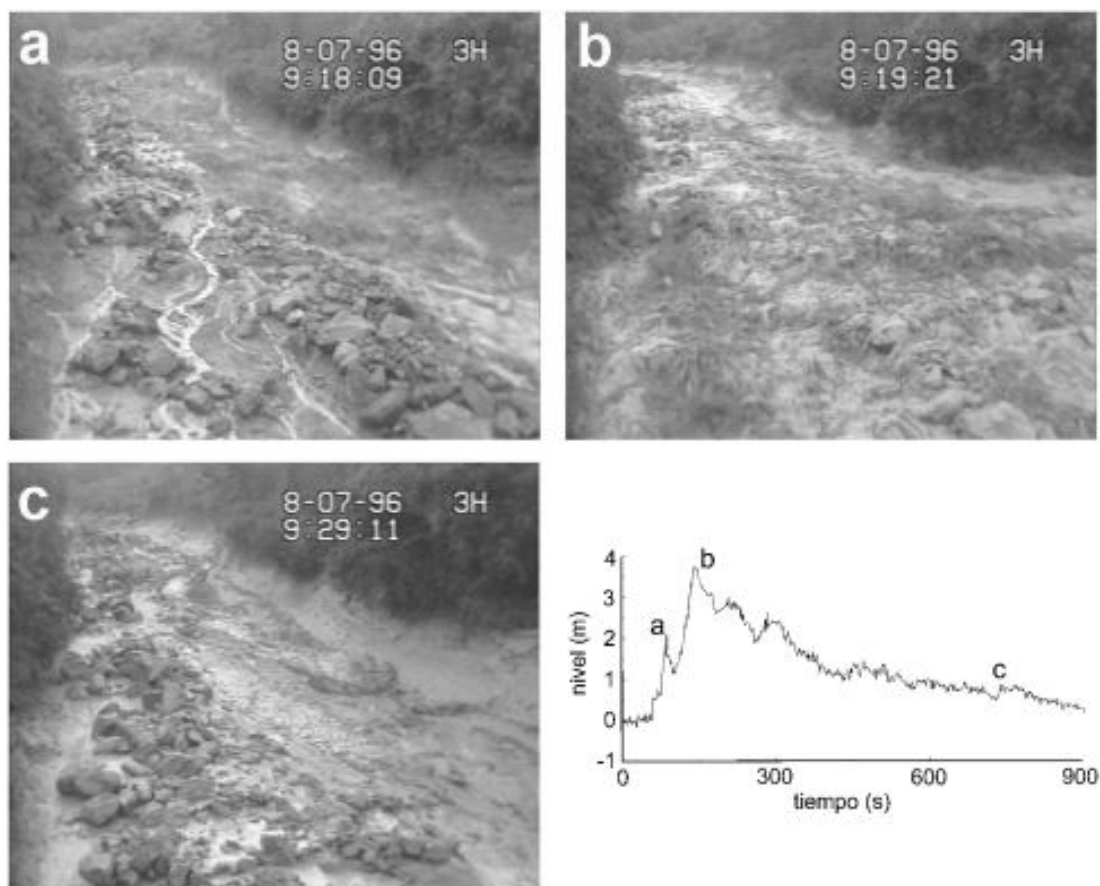


Figura 13 - Differenti fasi di un evento di colata detritica nel torrente Moscardo: a) onda iniziale con forti turbolenze: piena idrica con abbondante trasporto solido; b) fase di picco della colata detritica: passaggio di una densa miscela con presenza di massi di grandi dimensioni, turbolenze attenuate; c) fase finale, concentrazione solida relativamente bassa; si osserva il passaggio di un'onda secondaria.

I diversi processi attraverso cui si esplica la dinamica del sedimento nei corsi d'acqua montani a forte pendenza condizionano l'assetto morfologico degli alvei. Molti torrenti, nei quali la dinamica del sedimento è associata al trasporto di fondo ed in sospensione, sono caratterizzati dalla presenza di forme di fondo ben definite e correlabili alla pendenza locale, alla larghezza del canale e alle granulometrie dominanti. Un esempio è dato dalle morfologie a gradinata (*step-pool*), frequenti nei torrenti montani, le quali rappresentano una condizione di equilibrio stabile ed assicurano un'efficace dissipazione del carico cinetico della corrente.

Al contrario, i torrenti interessati da colate detritiche solitamente non presentano forme di fondo chiaramente riconoscibili. Nelle zone di deposito, i forti apporti detritici da monte sono in grado di sommergere le forme di fondo eventualmente presenti, mentre nei tratti della rete idrografica a pendenza più elevata la massiva mobilizzazione dei sedimenti presenti e l'erosione provocata dal passaggio delle colate detritiche determinano la distruzione dell'assetto morfologico dell'alveo. Non mancano casi in cui l'erosione dell'alveo porta alla completa asportazione della copertura detritica presente prima dell'evento, facendo affiorare il substrato roccioso.

Forme di fondo relativamente stabili possono svilupparsi nei torrenti interessati da colate detritiche se, fra due successivi eventi, si verificano, con sufficiente frequenza ed intensità, piene idriche con trasporto solido in grado di modificare l'assetto caotico e non strutturato che l'alveo presenta dopo il passaggio di una colata.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Questa nota ha brevemente delineato la complessità della tipologia dei processi torrentizi che interessano i rami minori della rete idrografica, con particolare riguardo ai bacini alpini.

La fondamentale distinzione fra piene con trasporto solido e colate detritiche appare rilevante sia in vista della determinazione della pericolosità dei processi torrentizi, sia per comprendere le interazioni fra i fenomeni che hanno luogo nelle varie parti della rete idrografica.

Il riconoscimento tipologico dei processi torrentizi può basarsi su diversi metodi: la consultazione di documenti storici d'archivio, l'analisi di evidenze geomorfologiche e sedimentologiche di campagna, l'impiego di indici morfometrici. Un approccio integrato appare raccomandabile per pervenire ad una valutazione comprensiva ed affidabile, che consenta di superare i limiti intrinseci ai singoli metodi.

BIBLIOGRAFIA

- Aulitzky H. (1982), Preliminary two-fold classification of torrents, *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt*, 144, 243-256.
- Bonicelli G. (1928), La sistemazione dei "Rivoli Bianchi" di Tolmezzo, *Annali dei Lavori Pubblici*, 66, 23-32.
- Caldart F. (1955), Il Torrente Gavon nell'Agordino e la sua sistemazione, *Monti e Boschi*, 6 (5), 207-216.
- Cerato M. (1999), Contributi per una storia delle sistemazioni idrauliche e forestali in Valsugana, Provincia Autonoma di Trento, Azienda Speciale di Sistemazione Montana.
- Costa J. E. (1984), Physical Geomorphology of Debris Flows, In: J. E. Costa, Fleisher P. J., eds., *Developments and Applications of Geomorphology*, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 268-317.
- Costa J. E. (1988), Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows, In: V. R. Baker, R. C. Kochel, P. C. Patton, eds., *Flood Geomorphology*, J. Wiley & Sons, New York, 113-122.
- D'Agostino V. (1996), Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale, In: *Scritti dedicati a Giovanni Tournon*. Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Associazione Idrotecnica Italiana, 111-123.
- Deganutti A. M., Arattano M., Marchi L. (2000), Debris flows in the Moscardo Torrent (Eastern Italian Alps), Video VHS, durata 8'.
- De Scally F. A., Owens I. F. (2004), Morphometric control and geomorphic response on fans in the Southern Alps, New Zealand, *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (3), 311-322.
- Jackson L. E., Kostaschuck R. A., MacDonald G. M. (1987), Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains, *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology*, 7, 115-124.
- Johnson, A. M., Rodine, J. R. (1984), Debris flow, In: Brunnsden, D. and Prior, D. B., eds., *Slope Instability*, John Wiley & Sons, New York, 257-361.
- Lenzi M. A., D'Agostino V., Billi P. (1999), Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon. Part I: Analysis of bedload records, conditions and thresholds of bedload entrainment, *Catena* 36 (3), 171-190.
- Marchi L., Pasuto A., Tecca P. R. (1993), Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 37 (4), 447-458.
- Marchi L., Brochot S., (2000), Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises : morphométrie et processus de transport solide torrentiel, *Revue de Géographie Alpine*, 88 (3), 23-38.
- Marchi L., Arattano M., Deganutti A. M. (2002), Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps), *Geomorphology*, 46 (1/2), 1-17.
- Marinelli G. (1898), Guida della Carnia, In: *Guida del Friuli*, vol. 3, Società Alpina Friulana, Udine.
- Montgomery D. R., Foufoula-Georgiou E. (1993), Channel network source representation using digital elevation models, *Water Resources Research*, 29 (12), 3925-3934.

*Il trasporto solido di fondo e le colate detritiche:
fenomenologia ed effetti sull'assetto dei corsi d'acqua a forte pendenza*

- O'Brien J. S. (2003), FLO-2D user manual, version 2003.06, Nutrioso, Arizona.
- Parise M., Calcaterra D. (2000), Debris-flow related fans in weathered crystalline rocks, and the potential hazard in Calabria, Italy, In: G.F. Wieczorek and N.D. Naeser, eds., Debris-flow Hazards Mitigation - Mechanics, Prediction, and Assessment, Balkema, Rotterdam, 203-211.
- Pierson T. C., Costa J. E. (1987), A rheologic classification of subaerial sediment - water flows, Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 7, 1-12.
- Wilford D. J., Sakals M. E., Innes J. L., Sidle R. C., Bergerud W.A. (2004), Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics, Landslides 1 (1), 61-66.

**IL CONTROLLO DEI TORRENTI PER MEZZO DELLE OPERE DI
SISTEMAZIONE MONTANA: LA RICERCA DI UN COMPROMESSO
FRA LA TUTELA DELLA NATURALITÀ E GLI OBIETTIVI DI
PROTEZIONE**

Mario CERATO

Servizio Sistemazione Montana, Provincia Autonoma di Trento

GLI OBIETTIVI DEGLI INTERVENTI DI SISTEMAZIONE

Quando ci si accinge ad elaborare un progetto di sistemazione di un qualsiasi corso d'acqua normalmente si dà per scontato che gli scopi per i quali il progetto viene elaborato siano chiari: vale comunque la pena di ripassarli, rivederli ed abbinarli ad un insieme di altre considerazioni al fine di giungere ad un'idea progettuale corretta.

Seguendo un percorso proposto da W. Kettl (1994), si propone uno schema (figura 1), adattato alle condizioni dei corsi d'acqua montani. In particolare, ci si riferisce ad un processo che viene seguito nella Provincia Autonoma di Trento, dove lo strumento pianificazione di settore è costituito da specifici *Piani degli interventi di sistemazione idraulico-forestale* (PISIF) e dove il Servizio Sistemazione montana provvede alla progettazione ed alla successiva realizzazione delle opere in economia diretta.

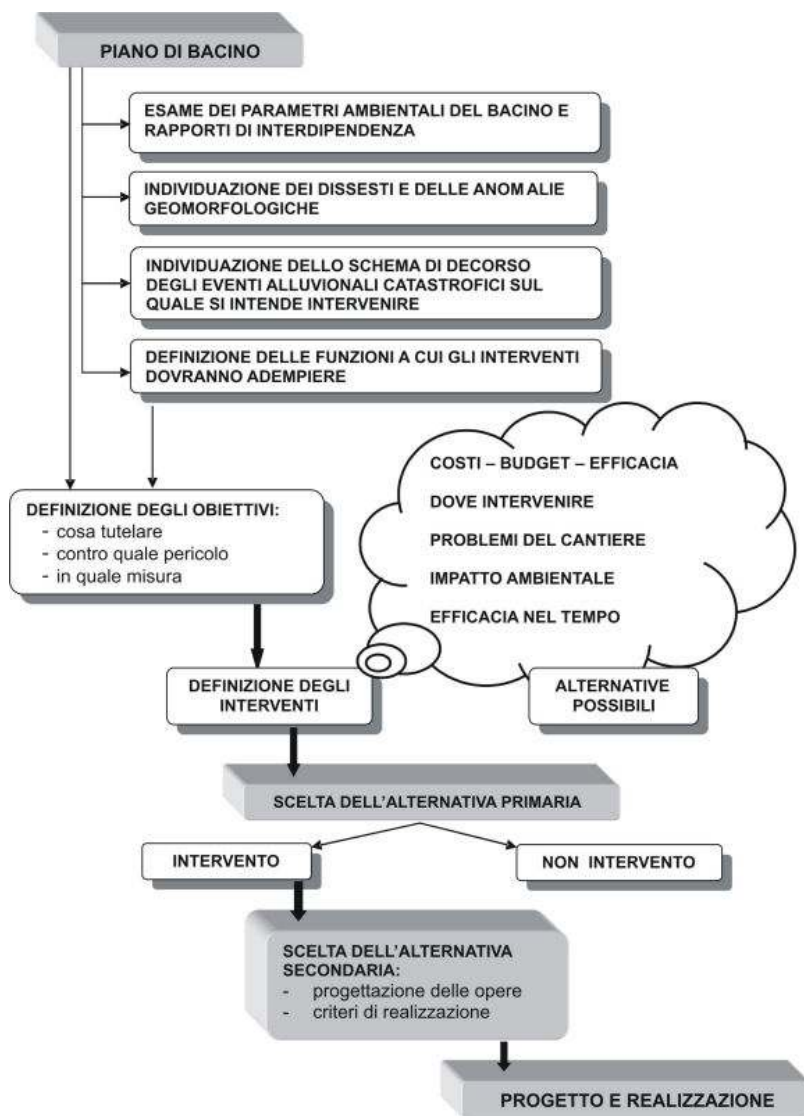


Figura 1. Schema metodologico per la programmazione e la progettazione degli interventi di sistemazione.

Negli elementi di valutazione proposti dallo schema si ritrovano i parametri della *sostenibilità*: nelle regioni montane gli effetti negativi delle alluvioni possono essere efficacemente mitigati attraverso una strategia di difesa che tenga conto delle seguenti esigenze, come esplicitato dalle direttive in materia di *Protezione contro le piene dei corsi d'acqua* emanati dall'Ufficio federale delle

acque e della geologia della Confederazione Elvetica nel 2001:

Esigenze sociali	⇒	sicurezza della popolazione
Esigenze ecologiche	⇒	protezione dell'ambiente
Esigenze economiche	⇒	contenimento dei costi della sicurezza

L'equilibrio tra queste esigenze rappresenta la *sostenibilità del sistema di difesa idrogeologica*. La sicurezza può essere raggiunta attraverso un approccio integrato, che si realizza mediante:

- l'ottimizzazione di misure di protezione strutturali come le opere di sistemazione e la manutenzione degli alvei (mantenimento degli spazi di deposito e laminazione, controllo della vegetazione in alveo, ecc.)
- misure non strutturali come i modelli previsionali, la mappatura del rischio, i sistemi di previsione ed allarme.

Quindi, in fase di progettazione degli interventi, l'attenzione alle esigenze di sicurezza idrogeologica va accompagnata da un'analisi della situazione ambientale e dalla ricerca di soluzioni ambientalmente compatibili.

FIUMI E TORRENTI: DUE IDENTITÀ SIMILI O DISTINTE?

Spesso si assiste ad analisi o discussioni che riguardano le tecniche da impiegare per controllare le portate dei corsi d'acqua senza alcuna distinzione in merito alle caratteristiche idrauliche e morfologiche degli stessi. In verità sembra quasi fuori ruolo dissertare su quanto possono differire i dinamismi idrologici ed idraulici di corsi d'acqua che sono originati da piccoli e ripidi bacini (figura 2) o da bacini di grandi dimensioni, oppure delle belle e tranquille rogge di fondovalle (figura 3).



Figura 2. Torrente Cismon a valle di S. Martino di Castrozza: intervento di consolidamento al piede di una frana su un tratto d'alveo molto ripido.



Figura 3. Rio Vena (Levico Terme), intervento di ripristino della sezione di deflusso in una bellissima rogga di fondovalle alimentata da risorgive.

È anche vero che, dal punto di vista ambientale, ed in particolare dell'ambiente circostante ai corsi d'acqua, queste differenze si attenuano, mentre subentrano altre variabili come per es. la quota e l'esposizione e quindi il clima.

Ma dovendo discutere sul metodo per ricercare un possibile punto di equilibrio fra sicurezza idraulica e tutela della naturalità, si ritiene importante precisare che quando si tratta di sistemazioni di corsi d'acqua montani (torrenti) ci si confronta con valori piuttosto elevati delle pendenze e del trasporto solido, mentre, quando ci si riferisce ai fiumi, normalmente le pendenze ed il trasporto solido sono molto contenuti.

Al di là di inevitabili schematizzazioni, quando si pensa ad interventi di sistemazione bisogna confrontarsi con le singole e specifiche situazioni per le quali le variabili in gioco sono sempre tali da richiedere la ricerca di soluzioni *personalizzate*, cioè adattate ed adeguate ai singoli casi, difficilmente riconducibili a schemi precostituiti (Kettl, 1994). Certamente una delle critiche che si possono fare alle sistemazioni del passato, ma purtroppo spesso anche del presente, è l'eccessiva standardizzazione e quindi la banalizzazione delle soluzioni adottate.

SICUREZZA IDRAULICA: IL CAMBIAMENTO TECNICO E STRATEGICO

Da un'analisi sommaria dell'evoluzione delle conoscenze in materia di sistemazione idraulico-forestale si deduce che questa scienza ha avuto dei progressi in periodi storici ben precisi, con dei salti molto evidenti (Cerato, 1999).

In particolare in Trentino si individuano dei periodi storici definiti ai quali corrisponde una altrettanto ben definita tipologia di opere.

Ma a questi sviluppi repentini delle conoscenze con cadenze temporali piuttosto lunghe, si sono sostituite negli ultimi anni modalità di evoluzione completamente diverse: improvvisamente sono subentrati dei fattori che hanno radicalmente trascinato in un tumultuoso cambiamento questo particolare ambito di attività.

Senza pretesa di completezza e di corretta successione temporale, elenco alcuni di questi fattori che recentemente hanno determinato delle significative innovazioni:

- la meccanizzazione dei lavori e particolari condizioni economiche hanno favorito, a partire dagli anni '70, le capacità produttive anche in questo settore;
- contemporaneamente, e quindi in un certo senso in contrapposizione con il punto precedente, si è via via maturata la consapevolezza della necessità della tutela ambientale;
- questa consapevolezza ha attraversato fasi di spiccata immaturità, ma poi è cresciuta e maturata sotto l'aspetto delle conoscenze, ma anche attraverso un'evoluzione della legislazione - in particolare con la legge del 18 maggio 1989, n.183: *Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo* - che con la costituzione delle Autorità di Bacino, ha individuato nuove forme organizzative;
- anche grazie alle potenzialità offerte dall'evoluzione dei prodotti informatici, che consentono il trattamento di grandi masse di dati, si sono rapidamente sviluppate nuove conoscenze in materia di analisi territoriale (GIS), dell'idrologia, della modellazione numerica dei fenomeni fisici, del calcolo statico delle opere, ecc.;
- l'aumento dei centri di ricerca a livello universitario e una nuova didattica hanno portato nelle strutture operative una nuova generazione di tecnici con una preparazione meno tradizionale ed in grado di influenzare positivamente anche una parte di tecnici, già operanti, delle generazioni precedenti;
- laddove questa contaminazione generazionale ha positivamente funzionato, l'abbinamento fra esperienza e teoria ha portato ad una rapida trasformazione nei modi di operare ed a sfruttare il cambiamento come opportunità e fattore di miglioramento.

GLI INTERVENTI DI SISTEMAZIONE MONTANA A BASSO IMPATTO

È necessaria una premessa: le opere di sistemazione montana vengono progettate e dimensionate per contrastare portate di piena liquide e solide. Le portate prese a riferimento hanno tempi di ritorno piuttosto elevati (30 – 200 anni), proporzionati all'importanza del rischio² da contrastare. Le opere sono destinate a svolgere appieno la loro funzione solo raramente, mentre il loro impatto ambientale è una costante, che viene attenuata solo marginalmente dal trascorrere del tempo (Armanini, 1991).

Vi è poi un altro aspetto che va esplicitato: gli interventi di sistemazione idraulica hanno sempre un impatto negativo sull'ecosistema del corso d'acqua. In relazione al tipo di progetto questi impatti possono essere transitori (fase di esecuzione) e definitivi (modifiche in negativo permanenti).

Risulta quindi molto importante equilibrare gli interventi sistematori caratterizzandoli in relazione alla loro finalità ed alla loro importanza economica, ma anche sotto l'aspetto dei loro impatti ambientali (Zolin, 1995).

² Il *rischio idraulico* a cui è esposto un territorio può essere determinato e quantificato come il prodotto di tre fattori: la pericolosità, l'entità degli elementi a rischio e la loro vulnerabilità. Il *rischio idraulico* è quindi la grandezza che mette in relazione la pericolosità, il danno potenziale e la vulnerabilità.

Ciò che si intende proporre è un concetto che si può esemplificare in questo modo: vi sono condizioni di libertà e di responsabilità molto diverse per il progettista nel progettare un intervento di sistemazione all'interno del bacino, in un tratto del corso d'acqua distante dalle aree urbanizzate, con le sole finalità di limitare all'origine il trasporto solido, rispetto a dover progettare un intervento mirato a proteggere direttamente un abitato. Certamente nel primo caso il grado di libertà è elevato, poiché è relativamente ridotta la responsabilità del funzionamento al meglio della sistemazione, mentre nel secondo le opere di sistemazione devono avere un grado di efficienza garantito per portate di piena con tempi di ritorno molto elevati (200-300 anni). Normalmente nel primo caso lo spazio a disposizione è limitato solo da fattori fisici e morfologici (figura 4), mentre nel secondo caso ci si confronta con alvei confinati da urbanizzazioni più o meno spinte e con un alto/altissimo valore economico delle aree di pertinenza del corso d'acqua (figura 5).



Figura 4. Torrente Maso: intervento di consolidamento in massi a secco con criteri di ricostruzione morfologica.



Figura 5. Rio S. Pellegrino a Moena: alveo confinato all'interno di aree densamente urbanizzate.

Non sono poi rari i casi in cui si tratta di eseguire interventi su sistemazioni già esistenti con interventi integrativi, rifacimenti o manutenzioni straordinarie. Spesso queste sono occasioni preziose per eseguire ristrutturazioni che portano ad un miglioramento della compatibilità ambientale e quindi delle condizioni ecologiche del corso d'acqua. (figure 6 e 7).



Figure 6 e 7 Val Canali – Trentino orientale: intervento di riqualificazione ambientale nel Parco Naturale Paneveggio e Pale di S. Martino con mascheramento completo di due briglie tradizionali in calcestruzzo, fortemente danneggiate, mediante una struttura in massi cementati posizionati con criteri di ricostruzione morfologica.

In alcuni casi inoltre le vecchie sistemazioni sono state realizzate in aree fortemente degradate a causa dello sfruttamento eccessivo delle risorse agrosilvopastorali, conseguenza delle precarie condizioni economiche della popolazione. Nei casi in cui le sistemazioni hanno ottenuto il loro scopo

e le condizioni territoriali sono nettamente migliorate, a volte si può decidere di non intervenire anche in caso di degrado della sistemazione, oppure si può intervenire con criteri di estrema attenzione a ricreare condizioni di naturalità.

Le principali conoscenze ed i nuovi strumenti disponibili a supporto di una progettazione più attenta ai problemi di tutela dell'ecosistema del corso d'acqua sono:

le conoscenze sulle potenzialità, ma anche sui limiti dell'applicazione delle tecniche di ingegneria naturalistica (D'Agostino, 1996); si tratta di tecniche antiche, ma che hanno avuto una riscoperta ed un notevole miglioramento negli ultimi decenni;

- le conoscenze sulla morfologia dei corsi d'acqua consentono l'applicazione di tecniche di ricostruzione morfologica o comunque interventi che tengano conto delle caratteristiche geomorfologiche che il corso d'acqua assumerebbe in condizioni di naturalità (D'Agostino et al., 1997) (Lenzi et al., 2000);
- l'affidabilità delle portate di progetto e l'impiego di modelli matematici per le verifiche idrauliche permettono di progettare ex novo o di ristrutturare vecchie sistemazioni in modo da ottimizzare l'intervento sotto l'aspetto economico e funzionale, ottenendo normalmente anche la migliore soluzione possibile sotto l'aspetto ambientale;

Ricordo inoltre, quali fattori di primaria importanza per raggiungere buoni risultati, l'adeguatezza dei budget a disposizione per l'esecuzione dei lavori, l'utilizzo delle sempre crescenti potenzialità tecnico-operative dei mezzi per movimento terra e la meccanizzazione dei cantieri (Cerato, 2002).

BIBLIOGRAFIA

- Armanini A. (1991), *Le Opere di Difesa e Sistemazione Montana: sicurezza idraulica e impatto ambientale*. Dispensa del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Trento.
- Cerato M. (1999), *Contributi per una Storia delle sistemazioni idrauliche e forestali in Valsugana*, ed. Esperia, Trento.
- Cerato M. (2002), *Riqualificazione dei corsi d'acqua montani – Un intervento in Val Canali (Trentino orientale)*, Sherwood n.75.
- D'Agostino V. (1996), *La rinaturalizzazione dei torrenti montani - Quaderni del Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali*, Università di Padova.
- D'Agostino V., Cerato M., Da Re F., Lenzi M.A. (1997), *La sistemazione idraulica dei torrenti con briglie in massi*, Dendronatura, anno 18, n. 2.
- Direttive dell'Ufficio Federale delle Acque e della Geologia (2001), *Protezione contro le piene dei corsi d'acqua*, Berna.
- Kettl W. (1994), *Techniken der Wasser-und Gechiebebe-Wirtschaftung als Beitrag zur Stabilisierung von Ökosystemen, Wildbachverbauung & Ökologie*, 58. Jahrgang, Heft 126.
- Lenzi M. A., D'Agostino V., Sonda D. (2000), *Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti*, + CD rom - *Le morfologie d'alveo dei corsi d'acqua alpini*, ed. BIOS, Cosenza.
- Zolin G. (1995), *Impatto ambientale delle briglie filtranti*, L'Italia Forestale e Montana, n.3.

Relatori

- Dott. Antonio Andrich – Dottore Forestale, tecnico ARPAV. Si occupa di: sistemazioni territoriali, ingegneria naturalistica, idrometria dei corsi d'acqua. E-mail: toniandrich@libero.it
- Prof. Paolo Billi – Associato presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Ferrara. Campi di attività: morfologia e dinamica fluviale, sedimentologia, geologia applicata al rischio idrogeologico. E-mail: paolo.billi@unife.it
- Prof. Gian Battista Bischetti – Associato presso la Facoltà di Agraria dell'Università di Milano. Campi di attività: sistemazioni idraulico-forestali, tecniche di ingegneria naturalistica, idrologia agraria e forestale. E-mail: bischetti@unimi.it
- Prof. Marco Borga - Associato presso il Dipartimento TeSAF dell'Università di Padova. Campi di attività: idrologia forestale, pianificazione e gestione delle risorse idriche, tecniche di monitoraggio e previsione degli eventi alluvionali. E-mail: marco.borga@unipd.it
- Dott. Mario Cerato – Direttore del Servizio Sistemazione di Montana della Provincia Autonoma di Trento. Si occupa di sistemazioni idraulico-forestali e della pianificazione a scala provinciale dei relativi interventi, gestione delle situazioni di rischio idrogeologico. E-mail: mario.cerato@provincia.tn.it
- Prof. Giancarlo Dalla Fontana – Ordinario presso il Dipartimento TeSAF dell'Università di Padova. Campi di attività: idrologia forestale e nivale, tecniche GIS per l'analisi dei bacini idrografici, pianificazione e gestione delle risorse idriche. E-mail: giancarlo.dallafontana@unipd.it
- Prof. Vincenzo D'Agostino – Associato presso il Dipartimento TeSAF dell'Università di Padova. Campi di attività: sistemazioni idraulico-forestali, idraulica torrentizia e fluviale, fluviomorfologia, dinamica del trasporto solido e delle colate detritiche nei torrenti. E-mail: vincenzo.dagostino@unipd.it
- Prof. Paolo Paiero – Ordinario presso il Dipartimento TeSAF dell'Università di Padova. Campi di attività: botanica sistematica e forestale, ingegneria naturalistica. E-mail: paolo.paiero@unipd.it
- Dott. Lorenzo Marchi – Ricercatore CNR-IRPI – Padova. Si occupa di: colate detritiche, dinamica del sedimento nei bacini montani, monitoraggio dei fenomeni torrentizi. E-mail: lornezo.marchi@irpi.cnr.it
- Dott. Diego Sonda – Dottore Forestale, PhD in Gestione Ambientale dei bacini idrografici e tecniche di Rappresentazione del Territorio, Università di Padova. Libero professionista. Si occupa di: piani degli interventi di sistemazione idraulico-forestale, idrologia, rilievi topografici. E-mail: diego.sonda@libero.it
- Dott. Alessandro Vianello – Dottore Forestale, PhD in Gestione Ambientale dei bacini idrografici e tecniche di Rappresentazione del Territorio, Università di Padova. Si occupa di: morfologia dei corsi d'acqua a forte pendenza, tecniche di rilevamento idrometrico e granulometrico, fenomeni torrentizi. E-mail: alessandro.vianello@unipd.it
- Arch. Gianfranco Zolin Esperto del Servizio Urbanistica e tutela del paesaggio della Provincia Autonoma di Trento. E-mail: gianfranco.zolin@provincia.tn.it

Atti dei Corsi di Cultura in Ecologia

ATTI DEL XXI CORSO - 1984

- Marchesini L. Valutazione del grado di inquinamento da piombo tetraetile in un'area industriale: proposta di bonifica in funzione della destinazione.
- Brechtel L. Relazioni tra precipitazioni e foresta con riferimento alla qualità delle acque.
- Bagnaresi U. Problemi di forestazione nelle aree argillose dell'Appennino.
- Baggio P. Telerilevamento: metodo moderno d'analisi territoriale.
- Del Favero R. Popolamenti d'altaquota.

ATTI DEL XXII CORSO - 1985

- Papanek F. Teoria della gestione polifunzionale della foresta con riferimento specifico all'economia forestale - Theory of polyfunctional forest management.
- Paiero P. Criteri di tutela dell'ambiente montano: aspetti botanici.
- Del Favero R. Problemi di assestamento forestale in parchi naturali: un'esperienza nel Monte Baldo.
- Bagnaresi U., Rosini R. Esperienze di pianificazione dei parchi regionali e delle riserve naturali in Emilia Romagna.

ATTI DEL XXIII CORSO - 1986

- Shugart H.H. Le dinamiche degli ecosistemi: illustrazione della teoria delle dinamiche forestali tramite l'uso di modelli di simulazione.
- Rapp M. Ciclo della sostanza organica, dell'acqua e delle sostanze nutritive.
- Dell'Agnola G. Evoluzione della sostanza organica al suolo con particolare riferimento al processo di umificazione.

ATTI DEL XXVI CORSO - 1989

- Piussi P. La rinnovazione della pecceta subalpina.
- Paci M. La rinnovazione naturale dell'abete bianco nella foresta di Vallombrosa.
- Valentini R. Foreste ed atmosfera.
- Scarascia Mugnozza G. Alberi forestali per un ambiente sottoposto a rapidi cambiamenti su scala globale: applicazioni della fisiologia ambientale per la selezione di cloni di *Populus* spp.
- Giordano E. Aspetti ecofisiologici della rinnovazione naturale.

ATTI DEL XXVII CORSO - 1990

- Barbieri F. Primi dati sulla presenza del lupo (*Canis lupus*) nell'Appennino settentrionale.
- Viola F., Cattaneo D. Un modello operativo per la pianificazione ecologica di particolari biotopi.
- Chemini C. Lo studio delle taxocenosi di artropodi nella valutazione naturalistica del territorio.
- Nicolini G., Avancini G.P., Zambelli F. Sistema automatico per lo studio bioetologico dell'orso bruno (*Ursus arctos* L.) del Trentino.
- Stergulc F. Anfibi e rettili di ecosistemi forestali e montani delle zone temperate.
- Masutti L. Zoocenosi ed ecosistemi montani.
- Andrighetto I. Il sistema foraggero-zootecnico a tutela dell'ambiente montano: alcune considerazioni sugli attuali orientamenti e sulle prospettive future.
- Ramanzin M. Considerazioni sull'allevamento di cervidi nelle zone montane.

ATTI DEL XXVIII CORSO - 1991

- Pasqualin M. Valutazione di Impatto Ambientale: aspetti normativi ed operativi nella pianificazione territoriale del Veneto.
- Sardone A. La V.I.A. in USA, in Europa ed in Italia. Lineamenti generali.
- Laniado E. Dalla pianificazione territoriale alla prassi di valutazione di impatto.
- Colorni A., Laniado E. Silvia: un sistema di supporto alle decisioni per la Valutazione di Impatto Ambientale.
- Saturnino A. La valutazione degli investimenti inerenti progetti pubblici di intervento nel campo ambientale.

ATTI DEL XXIX CORSO - 1992

- Publicati in "Il bacino attrezzato del Rio Cordon" Quaderni di Ricerca n. 13 Segreteria del Settore Primario, Dip.to Foreste Regione Veneto

ATTI DEL XXX CORSO - 1993 - Ecologia delle foreste d'alta quota

- Holtmeier F.K. The upper timberline: ecological and geographical aspects.

Turner H. Alpine microclimates: typology and examples.
 Wolf U. Suoli e processi pedogenetici negli ambienti forestali d'altitudine sulle Alpi.
 Masutti L. Faune di quote elevate e foreste altomontane.
 Roques A. Impacts of insects on natural regeneration of high altitude alpine forests.
 Motta R. Ungulati selvatici e foreste di montagna in Alta Valle di Susa.
 Havranek H. The significance of frost and frost-drought for the alpine timberline.
 Havranek H., Wieser G. Effects of long-term ozone fumigation on trees of *Picea abies* and *Larix decidua* in the filed.
 Anfodillo T., Casarin A. Variazioni stagionali nelle relazioni idriche di rametti di abete rosso lungo un gradiente altitudinale.
 Piusi P. Mixed *Pinus cembra* stands on the southern slope of the Eastern Alps.
 Dotta A., Motta R. Definizione del piano subalpino e dei limiti superiori del bosco e degli alberi in Alta Valle di Susa.
 Tessier L., Bellingard C. Dendrochronology at the upper forest limit.
 Nola P., Pastorelli C., Pirola A. Uno studio dendrocronologico del larice al limite superiore della vegetazione arborea in Valmalenco (Sondrio).

ATTI DEL XXXI CORSO - 1994 - Landscape Ecology - Ecologia del paesaggio

Naveh Z. Introduction to landscape ecology as a practical transdisciplinary science of landscape study, planning and management.
 Schaller J. Landscape ecology research and environmental management. Environment and GIS management of a National Park MAB-Project 6 Ecosystem Research Berchtesgaden.
 Schaller J. Landscape ecology research and environmental management. GIS for Shang Bai Shan Biosphere Reserve - Ne China - Cerp, co-operative ecological research program.
 Schaller J. Landscape ecology research and environmental management. Environmental impact assessment study for the planned Rhine-Main-Danube River Channel (Federal Republic of Germany).
 Gourov A.V. Territorial mosaic and the problem of boundaries (in case of secondary succession).
 Lucas O.W.R. Visual assessment of the landscape and its application of forest design.
 Anko B. Application of landscape ecology in forestry.
 Baggio P. Interazioni sistemiche territoriali: metodologie e approccio dell'analisi, interazione di modelli interattivi per una pianificazione territoriale.
 Farina A. L'abbandono rurale e suoi effetti sul paesaggio.

ATTI DEL XXXII CORSO - 1995 - Interazioni albero-ambiente: metodi e strumenti di misura

Martinkova M. General aspects of water relations
 Zipoli G. Strumenti e sensori per misure micrometeorologiche
 Brugnoli E., Scartazza A., Lauteri M. Effetto degli stress abiotici sulla fotosintesi
 Jones H.G., Atkinson C.J. Possible effects of climate change on trees
 Cermak J. Methods for studies of water transport in trees, especially the stem heat balance and scaling.
 Cermak J. Transpiration of trees - Variability, relation to structures, water balance and defense mechanisms.
 Fink S. Mineral nutrition of trees: analytical approaches, physiological significances and some applications to the problem of forest decline.
 Huttunen S. Effects of air pollutants on conifer needles.
 Valentini R. Dall'albero alla comunità: tecniche per la quantificazione delle risposte degli ecosistemi.
 Granier A. Measurement of tree and stand sapflow: temporal and spatial variations.

ATTI DEL XXXIII CORSO - 1996 - Tutela e controllo dei sistemi fluviali

Viola F., Zanella A. Vulnerabilità e presidio dei sistemi intorno all'acqua.
 Fattorelli S., Dalla Fontana G., Da Ros D. Valutazione e riduzione dei rischi da piena.
 Dalla Fontana G., Borga M. Lo studio probabilistico delle piogge intense per la previsione statistica del rischio idraulico.
 Lenzi M. A. Criteri di classificazione dei sistemi fluviali.
 Lasen C. Ecologia dei popolamenti vegetali ripari in area montana e subalpina.
 Paiero P. Il recupero naturalistico della vegetazione ripariale con particolare riguardo all'area pianiziale padana.
 Boso R. I piani di bacino attraverso il contributo della cultura ingegneristica e naturalistica.
 Saccardo I. La dimensione del minimo vitale. Criteri di stima idrologici ed idraulici.
 D'Agostino V. Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino orientale.
 Anselmo V. La manutenzione degli alvei.

- ATTI DEL XXXIV CORSO - 1997 - Dendroecologia: una scienza per l'ambiente fra passato e futuro
Tessier L., Edouard J.L., Guibal F. Tree rings and climate (Dendroclimatology, Dendroecology) - The climatic signal in tree rings.
Nola P. L'analisi dendroecologica in formazioni forestali mesofile: il caso dei querceti planiziali.
Keller T., Guiot J., Tessier L. The artificial neural network: a new advance in response function calculation.
Nicault A., Tessier L. Intra-annual variations of cambial activity and ring structure.
Stockli V. Physical interactions between snow and trees: dendroecology as a valuable tool for their interpretation
Motta R. La dendroecologia come strumento per l'analisi dei danni provocati dagli ungulati selvatici alle foreste. Metodi di studio ed esempi di applicazione in ambiente alpino.
Morin H. Using dendroecology to investigate black spruce and balsam fir population dynamics in boreal zone of Quebec.
Pividori M. Tecniche dendroecologiche nell'analisi di boschi cedui e di nuova formazione.
Cherubini P. La dendroecologia nella ricostruzione della storia di due popolamenti subalpini di abete rosso nella Foresta di Paneveggio (Trentino).
Hugle C.E. Ricostruzione della storia recente di tre popolamenti di abete rosso (*Picea abies* Karst.) nella Foresta di Paneveggio.
Urbinati C., Carrer M. Ricerche dendroecologiche sui dinamismi spazio-temporali in larici-cembreti di "timberline" nelle Dolomiti orientali.
Urbinati C., Carrer M. Dendroecologia e analisi della struttura spaziale in una cenosi di "timberline" delle Dolomiti orientali.
Eckstein D. The city trees in Hamburg: study object for dendroecology over the twenty years.
- ATTI DEL XXXV CORSO - 1998 - La tipologia delle stazioni forestali - Esempio di ecologia applicata
A. Mancabelli, G. Sartori. Rocca madre e suoli del Trentino. Metodologia di rilievo e di studio integrato dell'ambiente e risvolti tassonomici.
M. S. Calabrese, S. Nardi, Sartori G., D. Pizzeghello, A. Zanella, G. Nicolini. Importanza dell'attività ormonosimile della sostanza umica per una classificazione funzionale degli humus forestali. Applicazione alle fagete ed abieteti trentini.
F. Festi, M. Odasso, G. Pignatti, F. Prosser, L. Sottovia. Suddivisione ecologica del territorio sulla base della distribuzione delle specie forestali. Applicazioni relative alle indagini delle tipologie forestali.
C. Lasen. Esempi di fitosociologia applicata alla tipologia delle stazioni forestali.
U. Bagnaresi, G. Fratello. Dinamica dei popolamenti forestali in strutture irregolari e disetanee.
R. Del Favero. Tipologie forestali: concetti, metodologia e applicazioni. Le esperienze nelle regioni Veneto e Friuli-Venezia Giulia.
G. P. Mondino. Presentazione dei tipi forestali del Piemonte.
A. Antonietti. Il metodo fitosociologico applicato alla tipologia delle stazioni forestali in Svizzera.
R.E. Rosselló. Tipi di stazioni forestali in Spagna. Stato dell'arte e prospettive.
M. Bartoli. Confronto tra le tipologie e gli habitat forestali. L'esempio dei Pirenei centrali.
G. Dumè. Il Gruppo di Lavoro sulla tipologia forestale in Francia: risultati e prospettive.
G. Bernetti. Presentazione della nuova tipologia forestale della Toscana.
A. Zanella. Intorno al concetto di "tipologia forestale". Aspettative e realtà.
C. De Siena, M. Tomasi, G. Nicolini. Gli humus forestali del Trentino.
R. Zampedri. Metodologie di interpolazione statistica per una rappresentazione del clima a livello regionale.
- ATTI DEL XXXVI CORSO - 1999 - La pianificazione e la gestione del verde urbano
T. Barefoed Randrup. Urban forestry research in Europe.
Z. Borzan, V. Kusan, R. Pernar. Scientific approach to understanding and treatment of amenity trees in urban forestry.
P. Semenzato, T. Urso. Il rilievo della vegetazione nei giardini storici.
E. Piutti, C. Pollini, R. Leonardelli, L. Pedrotti. La gestione delle alberature urbane: il caso di Trento.
P. Raimbault. Assessing and managing urban trees: from scientific concepts to field techniques.
G. Morelli, G. Poletti. Cenni teorici sulla valutazione della stabilità degli alberi.
L. Benvenuti. Modalità d'intervento e scelta delle tecnologie nella realizzazione delle opere a verde.
- ATTI DEL XXXVIII CORSO - 2001 - Monitoraggio ambientale: metodologie ed applicazioni
M. Ferretti. Ecosystem monitoring. From the integration between measurements to the integration between networks.
A. Benassi, G. Marson, F. Liguori, K. Lorenzet, P. Tieppo. Progetto di riqualificazione e ottimizzazione delle reti di monitoraggio della qualità dell'aria del Veneto.
S. Fonda-Umani. I sistemi di monitoraggio in aree marine costiere e relative problematiche.

- P. Nimis. Il biomonitoraggio della qualità dell'aria tramite licheni.
 G. Gerosa, A. Ballarin-Denti. Techniques of ozone monitoring in a mountai forest region: passive and continuous sampling, vertical and canopy profiles..
 A. Thimonier, M. Schimitt, P. Cherubini, N. Kräuchi. Monitoring the Swiss forest: building a research platform.
 R. Valentini. Metodologie di studio della produttività primaria di ecosistemi forestali.
 C. Urbinati, M. Carrer. L'analisi degli anelli legnosi come strumento per il monitoraggio climatico.
 W. Haeberli. Glacier and permafrost monitoring in cold mountain areas as part of global climate related observation.
 R. Caracciolo. Sistema nazionale di monitoraggio e controllo in campo ambientale.
 V. Carraro, T. Anfodillo, S. Rossi. I siti sperimentali di "Col de La Roa" e di "Cinque Torri".

ATTI DEL XXXIX CORSO - 2002 - Il fuoco in foresta: ecologia e applicazioni

Giovanni Bovio. La pianificazione antincendi boschivi

Marco Conedera, Marco Moretti, Willy Tinner. Storia ed ecologia degli incendi boschivi al sud delle Alpi della Svizzera

Thomas W. Swetnam. Fire and climate history in the Western Americas from tree rings

Domingos Xavier Viegas. Fire behaviour models: an overview

Louis Trabaud. Effects of fire on mediterranean plants and ecosystems

Pasi Puttonen. Use of prescribed fire in diversity oriented silviculture

Domingo Molina. Prescribed burning to allow for forest sustainability

Giancarlo Cesti. Tipologie e comportamenti particolari del fuoco: risvolti nelle operazioni di estinzione

Jesús San-Miguel-Ayanz. Methodologies for the evaluation of forest fire risk: from long-term (static) to dynamic indices

ATTI DEL XL CORSO - 2004 Reti ecologiche: una chiave per la conservazione e la gestione dei paesaggi frammentati - Ecological networks: a key to the conservation and management of fragmented landscapes

Rob Jongman, The concept of ecological networks: European approaches

Roberto Gambino, Reti ecologiche e territorio

Daniel Franco, Ecological networks: the state of the art from a landscape ecology perspective in the national framework

Ilse Storch, Wildlife species as indicators: a solution for maintaining "ecological networks" in fragmented landscapes?

Stefania Zorzi & Silvano Mattedi, Reti ecologiche e fauna selvatica: limiti alla dispersione e loro mitigazione

Duncan McCollin & Janet Jackson, Hedgerows as habitat corridors for forest herbs

Margherita Lucchin, Genetica nelle reti ecologiche: indici e indicatori per la stima della funzionalità

Tommaso Sitzia, La qualità dei corridoi ecologici arborei lineari: indici sintetici di valutazione delle siepi arboree nel paesaggio agrario

Giuseppe De Togni, Reti ecologiche e pianificazione urbanistica: problemi tecnici e amministrativi

Andrea Fiduccia, Luciano Fonti, Marina Funaro, Lucilia Gregari, Silvia Rapicetta, Stefano Remiero, Strutture di informazione geospaziale e processi di conoscenza per l'identificazione della connettività ecosistemica potenziale

Giustino Mezzalira, Progettazione esecutiva e conservazione dei corridoi ecologici arborei

Federico Correale Santacroce, Le reti ecologiche e la Legge Regionale del Veneto 13/2003: linee guida per la progettazione dei boschi di pianura