

Conseguenze dell'uso del territorio sul regime idrologico dei bacini montani

RIASSUNTO

L'eliminazione della copertura vegetale e il rimaneggiamento della morfologia dei versanti arrecano severi disturbi ai bacini montani.

L'argomento, già trattato in precedenza sulla rivista con il titolo «Effetti idrologici nell'attività primaria in montagna» (Colpi & Fattorelli, 1982) viene qui ripreso ed ampliato, prendendo in considerazione le conseguenze idrologiche di attività diverse dal semplice utilizzo delle risorse vegetali, quali la costruzione di strade sui versanti e lo sfruttamento turistico della montagna (attività edilizia ed infrastrutture sportive).

Se ne esamina l'impatto sui deflussi e sulla produzione di sedimento nei bacini.

I dati discussi sono ricavati dalla letteratura mondiale, che è generosa di spunti: forse non sempre trasferibile alle condizioni del nostro territorio, resta comunque un sicuro riferimento.

Il rapporto pioggia-deflusso, rappresentando la sintesi del ciclo idrologico a livello di bacino idrografico, ne costituisce elemento caratteristico ed individuale. La sua conoscenza risulta quindi di fondamentale importanza per il gestore delle risorse ambientali.

Determinante nei confronti del tipo, dell'entità, della prontezza delle risposte di un bacino agli eventi meteorici resta il suo «potere serbatoio», cioè la capacità di immagazzinamento d'acqua da parte del suolo. Il ruolo dei terreni nell'idrologia di un versante è dunque fondamentale quello di «volano», di «condensatore» idrico, riserva e sorgente di acqua al tempo stesso.

I suoli dotati di buona possibilità di im-

magazzinamento sono infatti in grado di «assorbire» le punte di precipitazione e cedere in ritardo l'acqua ai collettori come deflusso di base. Viceversa, «se i suoli di un dato bacino hanno modeste capacità di detenzione idrica, allora i massimi deflussi tendono ad essere elevati, come pure i deflussi minimi tendono ad essere bassi» (Fredriksen & Harr, 1979).

In un bacino montano, dove l'idrologia del versante diviene predominante su quella del collettore, il ciclo dell'acqua viene generalmente interferito da una presenza caratteristica, quella del bosco, che vi partecipa in modo sostanziale.

A livello della copertura vegetale, sede di fotosintesi e fondamento di sussistenza dei sistemi ecologici, ciclo energetico e ciclo dell'acqua si incontrano e interagiscono.

L'energia solare, fondamentale per la fissazione del carbonio nelle piante verdi, è «anche la forza traente per la quale enormi quantità d'acqua sono trasferite dal suolo attraverso le piante evaporate nell'atmosfera come acqua traspirata» (Pierce & Keller, 1980).

Se infatti dell'energia solare che giunge al bosco solo il 2% circa è utilizzato ai fini della fotosintesi (Gosz & al., 1978), le rimanenti disponibilità si distribuiscono parimenti nel riscaldamento dell'ambiente e nel processo di evapotraspirazione.

L'acqua coinvolta nel processo di traspirazione, unitamente a quella evaporata in seguito ad intercettazione da parte della copertura vegetale, la cui importanza quantitativa è stata proprio di recente riva-

lutata (Pearce & Rowe, 1979; Monteith, 1980; Stewart, 1977), viene in tal modo precocemente restituita all'atmosfera senza risolversi in deflusso incanalato, e costituisce così una perdita di notevole entità per l'intero ciclo idrologico.

Il bosco è dunque una «pompa» dotata di notevole capacità traente che consuma acqua per i suoi bisogni vitali, in misura più o meno spinta a seconda della sua statura, del suo grado di scabrezza, della potenza del suo apparato radicale, della sua vitalità, delle condizioni climatiche ed energetiche dell'ambiente.

Inoltre, i suoli a bosco sono generalmente dotati delle migliori caratteristiche strutturali e quindi di elevata capacità di infiltrazione e di buone possibilità di ritenzione idrica al tempo stesso; sono dunque delle «spugne» pronte ed efficienti, tanto più che, per lo meno nella stagione vegetativa, il continuo consumo d'acqua da parte del soprassuolo vegetale li mantiene costantemente in condizioni di deficit, rendendoli sempre pronti ad ulteriore assorbimento di fronte agli eventi meteorici.

Il deflusso che un versante boscato fornisce al collettore sarà dunque prima di tutto ridotto di entità rispetto all'acqua di pioggia — perché parte di questa viene restituita all'atmosfera per evapotraspirazione, senza giungere al torrente —, e sarà poi un deflusso «di base» ceduto con maggiore regolarità e con un certo ritardo, per essere stato prima di tutto «acqua del suolo» ed aver seguito le più lente vie ipodermiche in buona parte del suo cammino verso il fondovalle.

Con questi meccanismi si spiega dunque la nota capacità della foresta di moderare gli estremi di portata, attenuando i picchi di piena (gli idrogrammi di piena rilevabili nei bacini forestali assumono la caratteristica forma più attenuata e più allungata nel tempo) e, viceversa, alimentando i deflussi di base in assenza di precipitazioni.

Come è dunque prevedibile, l'eliminazione della copertura vegetale comporta sempre effetti evidenti sui deflussi — aumento del deflusso totale annuo e delle ondate di piena — spesso accompagnati da

manifesti incrementi dei tassi erosivi.

L'argomento è stato già ampiamente discusso in un precedente articolo su questa rivista (Colpi & Fattorelli, 1982), che si proponeva di puntualizzare le attuali conoscenze sulle ripercussioni sul regime delle acque delle attività di sfruttamento boschivo ed agropastorale.

Il presente, rifacendosi a quello, lo intende completare, esaminando i problemi idrologici connessi ad attività diverse che possono interessare i territori montani, disturbandone i processi naturali con impatti ben più gravi del semplice sfruttamento del manto vegetale.

Se infatti l'esercizio della selvicoltura ed in genere l'utilizzazione della copertura verde può considerarsi — nella misura in cui i sistemi naturali conservano il sufficiente grado di resistenza — un processo irreversibile, non altrettanto può dirsi per l'insediamento di strutture destinate ad inserirsi nell'ambiente come perturbazioni stabili, infliggendo così modifiche irreversibili alle condizioni originarie.

Ci si riferisce qui alla presenza di strade sui versanti — in buona parte ancora legate all'attività forestale, ma non certo solo a questa — ed in genere agli aspetti connessi allo sfruttamento turistico dei territori montani, dei quali due preoccupano maggiormente l'idrologo, e cioè la creazione di piste da sci e — soprattutto — la costruzione di centri residenziali (la «urbanizzazione» dei bacini).

Ciò che segue, lungi dal voler essere una rassegna completa sull'argomento, è tratto da esperienze riportate nella letteratura recente su questi problemi: se anche non sempre le situazioni riferite sono trasferibili alle nostre, si spera che la loro conoscenza possa costituire un valido punto di riferimento per il tecnico che si trovi ad affrontare tali fenomeni.

Le strade

La presenza di una strada di versante è, per un bacino forestale, forse l'elemento perturbatore più frequente. Si tratta in realtà secondo molti autori del tipo di di-

sturbo più severo e duraturo che può conseguire l'intervento dell'uomo nel bosco.

L'effetto è generalmente duplice: ne risente l'andamento dei deflussi, e ne risente, in modo ancor più accentuato, la resa in sedimenti.

L'azione di disturbo sulle acque consiste in una vera e propria alterazione delle naturali vie di drenaggio del bacino. La mancata infiltrazione nel suolo dell'acqua di pioggia che, cadendo sul piano stradale, vi trova una superficie parzialmente o totalmente impermeabile, origina quasi di regola deflussi superficiali, che trovano anzi nel tracciato stradale una via preferenziale di scorrimento.

Così è pure per le eventuali acque di superficie che, scendendo dai pendii sovrastanti, sono raccolte e convogliate dal piano stradale, e anch'esse accelerate verso il canale.

La stessa sorte subiscono — effetto questo non sempre manifesto, ma forse il più insidioso della presenza di una rete viaria — i deflussi ipodermici intercettati dagli sterri stradali, e ivi convertiti in acque superficiali.

Tutti questi deflussi, sia che scorrano selvaggiamente sul letto di strada, sia che siano raccolti da tombini e canalette contribuiscono per cammini assai più rapidi alla portata del collettore, conferendo alla rete viaria la funzione di sistema drenante di veloce ed affrettata evacuazione.

Il fenomeno più grave consiste proprio nella intercettazione delle acque ipodermiche e nella conversione di queste in acque superficiali: ciò infatti implica la trasformazione di deflussi di per sé lenti e non pericolosi in acque selvagge, responsabili tipicamente di forme impennate degli idrogrammi⁽¹⁾ e di elevate torbità nel canale.

Del problema si è occupato con particolare attenzione Megahan (1972), indagando il fenomeno nei monti dell'Idaho; come pure altri autori (Borroughs & al., 1972) ai confini tra Idaho e Montana, ponendo particolare attenzione allo smaltimento delle acque di disgelo, che sui pendii permeabili di quelle zone seguono in buona parte vie ipodermiche.

Megahan, impostando con molta accuratezza la sua sperimentazione, giunge a risultati molto significativi: il deflusso ipodermico intercettato — che nel corso della ricerca viene mantenuto distinto dal deflusso superficiale sulla rete stradale, grazie a particolari accorgimenti — si dimostra quantitativamente preoccupante. L'acqua ipodermica «catturata» durante l'annata idrologica 71 dai 94.5 m di strada sotto osservazione misura complessivamente 2730 m³. Il che vuol dire che, rispetto al volume di deflusso superficiale originato dalla caduta diretta delle acque meteoriche sul piano stradale — stimando che costituisca il 75% di queste (1016 mm di pioggia annua, su 491 m² di strada), cioè 374 m³ —, il volume di acqua ipodermica intercettata appare 7.3 volte superiore.

A risultati quantitativamente paragonabili giungono gli altri Autori citati: nella località da essi studiata, le acque di scioglimento delle nevi provenienti da vie ipodermiche e superficiali e convogliate sul corpo stradale, misurano complessivamente in 11 giorni 185 m³ per ogni miglio di strada. Con ciò, in un mese di disgelo un miglio di strada posizionata nelle zone inferiori del bacino può raccogliere — secondo gli autori — 382 m³ di acqua.

Naturalmente, più a valle rispetto alle linee di cresta è posizionata la strada, più essa si dimostra pericolosa, in quanto maggiore è l'area di bacino sottesa, e ben più ingenti i deflussi che è in grado di raccogliere.

Azione subdola delle strade, questa, non sempre manifesta, anche perché limitata a determinate situazioni — quali il disgelo o una pioggia pesante, quando grandi volumi di acqua vengono ceduti al suolo —, ma che sempre accusa le sue deleterie conseguenze, che se tipicamente consistono nell'incremento del volume di «quick-flow», si risolvono oltretutto spesso in una sensibile accentuazione dei fenomeni erosivi.

È del resto proprio la produzione di sedimenti la conseguenza più nota e più temuta della costruzione di strade in montagna.

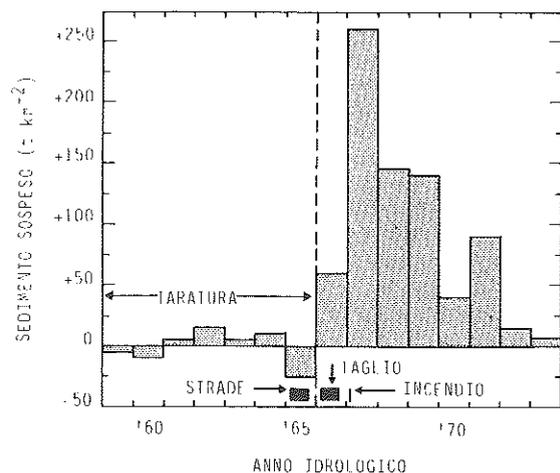


Figura 1 - Incrementi di deflusso torbido annuo dopo la costruzione di strade e l'esbosco in un bacino dell'Oregon che accusa soltanto erosione superficiale: il fenomeno si attenua col tempo (da Beschta, 1978).

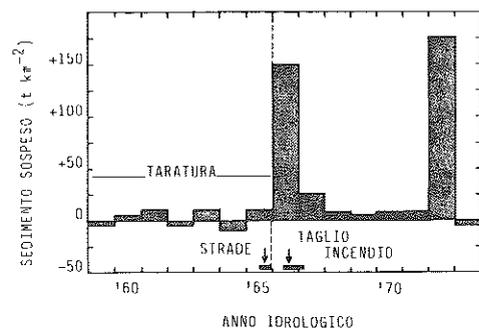


Figura 2 - Incrementi di deflusso torbido annuo dopo la costruzione di strade e l'esbosco in un altro bacino dell'Oregon, dove qualche anno dopo il disturbo, ormai estinti i fenomeni di erosione superficiale, si assiste ad una serie di eventi franosi (da Beschta, 1978).

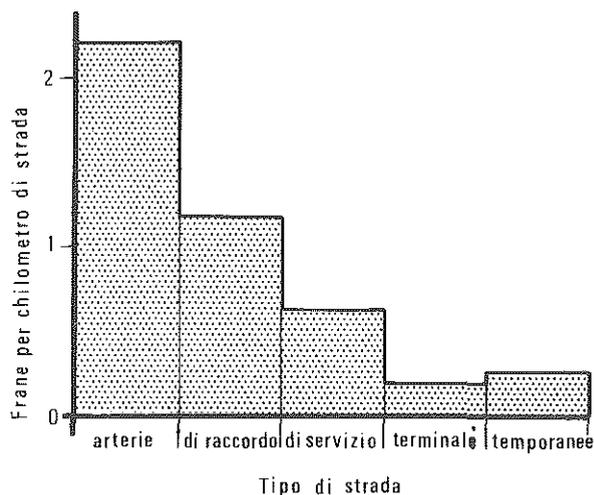


Figura 3 - Densità delle frane in base al tipo di strada forestale (Middle Fork Payette River, Idaho) (da Megahan, 1979).

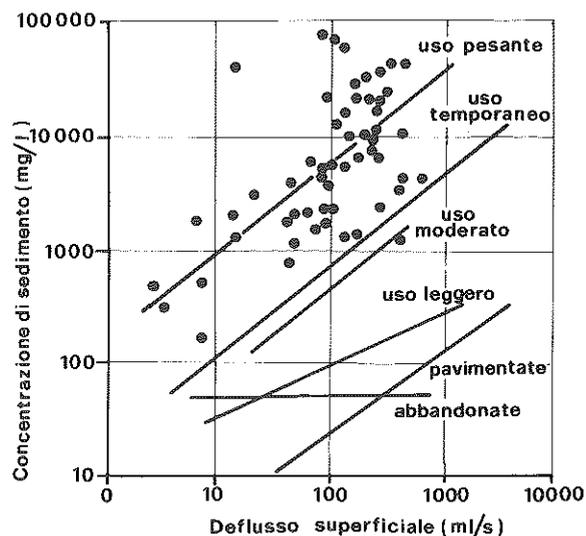


Figura 4 - Relazione tra deflusso superficiale e concentrazione di sedimento per 6 tipi di strada. (I punti indicano i dati non perequati per le strade ad uso pesante, per evidenziare lo scarto) (da Reid & al., 1981).

Così ne riassume bene Megahan (1977) le cause fondamentali: a) la rimozione o la riduzione della copertura protettiva; b) la distruzione o il deterioramento della struttura naturale e della fertilità del suolo; c) l'aumento delle pendenze con la costruzione di scarpate di sterro e di riporto; d) la diminuzione dell'infiltrazione in parte della superficie stradale; e) l'intercettazione del deflusso ipodermico da parte dello sterro stradale; f) il decremento della resistenza al taglio dei terreni, l'aumento dello sforzo di taglio su sterri e riporti, o ambedue le cose contemporaneamente; g) la concentrazione dei deflussi ivi generati o intercettati.

La presenza di materiale sciolto messo a nudo su pendenze critiche su cui spesso convergono le acque selvagge è in effetti causa facile e prevedibile di erosione superficiale. Così pure, la creazione di scarpate di sterro e di riporto, dove si concentrano le acque di drenaggio alterando il gioco di forze e pesi sul versante, è frequente motivo di cedimenti e crolli, fino a veri e propri franamenti di massa.

L'utilizzazione del legame in montagna, del resto, comporta quasi sempre la necessità di una adeguata rete di servizio. Il riconoscimento che la gran parte del sedimento prodotto durante le operazioni forestali sia in realtà da imputare proprio alla presenza di vie di accesso trova concordi moltissimi autori: delle esperienze che lo testimoniano si è già ampiamente riferito (Colpi & Fattorelli, 1982). Non mancano nuove conferme: in una loro recente pubblicazione che espone i risultati di un'indagine condotta dal 1936 all'80 sugli effetti idrologici dell'attività forestale in un grosso bacino dell'Oregon occidentale, Lyons & Beschta (1983) denunciano come dal 59 al 72 gli eventi associati a strade si siano dimostrati 27 volte più frequenti rispetto alle aree boscate indisturbate.

Si ricorda che l'effetto erosivo di massa è di gran lunga il più preoccupante: oltre infatti a coinvolgere volumi di terra molto più ingenti, i fenomeni di erosione profonda non sembrano destinati ad attenuarsi col passare degli anni, a differenza delle

produzioni superficiali di sedimento che vanno caratteristicamente estinguendosi nel tempo, con il riaffermarsi della vegetazione sulle scarpate o comunque con l'acquisizione da parte del suolo di una nuova stabilità naturale (fig. 1)

Le frane possono invece verificarsi con qualche anno di ritardo, comportando inattesi, ingenti ritorni di trasporto solido ai collettori (fig. 2).

La presenza di una strada di versante in montagna qualunque sia la sua destinazione d'uso — è dunque un considerevole fattore di disturbo.

La relativa pericolosità delle diverse categorie di strade è stata anch'essa oggetto di indagine.

A questo proposito, Anderson (1974), dopo accurata indagine statistica, giunge alle seguenti conclusioni: ai fini della produzione di sedimento, sarebbero più deleterie le strade secondarie in terra, che incrementerebbero i tassi di erosione del 53% in più rispetto alle autostrade a grande viabilità, responsabili queste ultime di incrementi del 13%.

Per quanto riguarda poi la posizione delle strade nell'ambito del bacino, le più pericolose sarebbero secondo l'Autore quelle site a valle lungo i corsi d'acqua, dato il diretto apporto del materiale di scarpata al torrente, mentre la localizzazione meno rischiosa sarebbe quella di cresta. Sulla pericolosità delle giaciture di mezza costa a proposito dell'intercettazione dei deflussi e delle implicazioni di instabilità del corpo stradale si è già detto sopra.

Non mancano opinioni diverse.

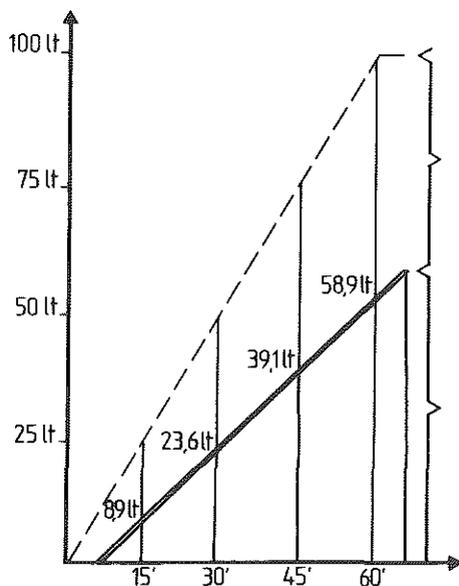
Megahan et al. (1978), in un'indagine sugli eventi di frana nelle Northern Rocky Mountains, individuando la notevole responsabilità della presenza di strade montane e distinguono queste nelle classi seguenti: 1) arterie; 2) strade di raccordo; 3) strade di servizio; 4) strade terminali; 5) strade temporanee. Esse, caratterizzate da velocità di transito decrescenti, richiedono standard di progettazione diversi, implicando in particolare movimenti di terra via via più contenuti, al diminuire delle previste velocità di percorrenza: infatti, più è

elevata la velocità presunta per i veicoli, più deve essere curata l'ampiezza della carreggiata e la dolcezza di curve e pendenze.

La casistica raccolta dagli autori attribuisce alle prime il maggior numero di eventi di frana (2.2 frane per Km di strade), progressivamente ridotti invece sulle strade il cui disegno meglio si adatta alla naturale morfologia del territorio (fig. 3).

Reid e i suoi collaboratori, a loro volta (Reid & al. 1981) individuano una stretta correlazione tra la produzione di sedimento dalle superfici stradali — specie se si tratta di strade di ghiaia — e l'entità d'uso e il tipo di carico cui esse sono soggette.

Distinguendo le rotabili in 6 categorie — strade di uso pesante (più di 4 autocarri al giorno), di uso pesante ma temporaneo, di uso moderato (meno di 4 autocarri al giorno), di uso leggero (solo veicoli leggeri), strade pavimentate, strade abbandonate dopo il primo anno di servizio —, la relazione sedimento-deflusso misurata presso le canalette laterali di scarico si mostra in effetti significativamente decrescente nell'ordine dalla prima all'ultima categoria (fig. 4).



Le piste da sci

L'impatto della presenza delle piste da sci sui bacini montani costituisce un argomento di attualità e di notevole interesse, seppur ancora bisognoso di attenzione e ricerca.

Si accennerà brevemente in questa sede ai parametri idrologici coinvolti in tale forma di disturbo, e alle risposte che facilmente ne conseguono a livello di bacino.

L'aspetto forse più evidente è che una pista da sci accumula una maggior quantità di neve rispetto al bosco, a scapito del quale viene spesso costruita, modificando in tal modo la condizione originaria del versante.

Questo si verifica:

- 1) per effetto della deposizione da parte del vento, fenomeno che si accentua sulle aree scoperte a ridosso del bosco in seguito alla riduzione di velocità che il vento stesso subisce incontrando la barriera arborea;
- 2) per mancata intercettazione da parte delle chiome, che rappresenta invece una voce notevole nei boschi montani,

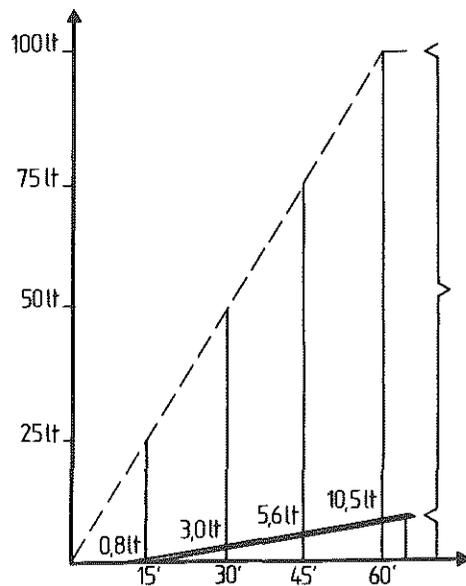


Figura 5 - Andamento nel tempo del deflusso superficiale e dell'infiltrazione in bosco e su pista da sci, per un volume d'acqua (100 l/m²/ora) versato artificialmente (da Stauder, 1974).

specie nelle abetine e nelle peccete: con ciò, allo scoperto la neve può realizzare altezze del 30% superiori rispetto al suolo forestale;

- 3) perché a volte la neve è portata artificialmente dall'uomo stesso sulle piste ai fini di rendere possibile o più agevole la pratica dello sci.

Un ulteriore aspetto è connesso con il disgelo sulle piste da sci, che contrariamente a quanto accade per altre forme di apertura del bosco (tagliate, zone incendiate, pascoli, ecc.) generalmente viene ritardato.

Questo per un insieme di motivi:

- a) ancora, perché la neve è depositata in strati più abbondanti;
- b) perché spesso il tracciato è appositamente scelto nelle zone più a Nord o comunque più ombreggiate per prolungarne il più possibile lo sfruttamento a fini sportivi;
- c) perché lo strato nevoso è stato compresso dal passaggio degli sciatori e dall'uso dei battipista, e questo normalmente provoca uno scioglimento più lento (Hogan, 1972).

Un altro complesso di fattori spiega invece la diminuita infiltrabilità che presenta una fascia di terreno adibita a pista da sci rispetto alle condizioni a bosco: essi sono da ricercarsi nel diverso comportamento idrologico di un suolo a prato⁽²⁾ rispetto ad un suolo forestale.

I valori assai più contenuti dei tassi di evapotraspirazione (a volte sono bassi gli stessi valori di evaporazione del suolo, data l'impossibilità di risalita dell'acqua capillare per l'eccessivo inaridimento dello strato di suolo più superficiale) e le profondità ben più modeste dello strato poroso sondato dalle radici, si risolvono in capacità di immagazzinamento idrico del suolo assai più limitata.

Spesso, poi, l'infiltrabilità è anche compromessa dall'azione battente della pioggia sul terreno, non più protetto dalla copertura di chiome arboree ed arbustive.

A tutto ciò consegue immancabilmente il verificarsi di deflussi superficiali che, as-

sai rari in bosco, non lo sono invece sulle piste.

Si ricorda, a tal proposito, l'esperimento condotto da Stauder (1974) che confronta le capacità di infiltrazione misurate su una pista di sci di recente costruzione e su una adiacente area a bosco, nello Zillertal.

La pista, ottenuta su terreni argillosi su base di gneiss granitici, era stata immediatamente e con pieno successo inerbita col sistema nero-verde, usando seme accuratamente selezionato.

Le prove di infiltrazione consistevano nel misurare le quantità di acqua di scorrimento superficiale e quindi quelle ad esse complementari di acqua infiltrata, versando 100 litri in un'ora su una superficie campione di 1 m², in ambedue le aree poste a confronto.

Il suolo forestale mostrò di poter assorbire 89,1 (100-10,9) mm d'acqua; il terreno a prato della pista invece assorbì solo 39 (100-61,0) mm, provocando con ciò un deflusso superficiale che stava rispetto a quello in foresta in un rapporto di 6:1⁽³⁾ (fig. 5).

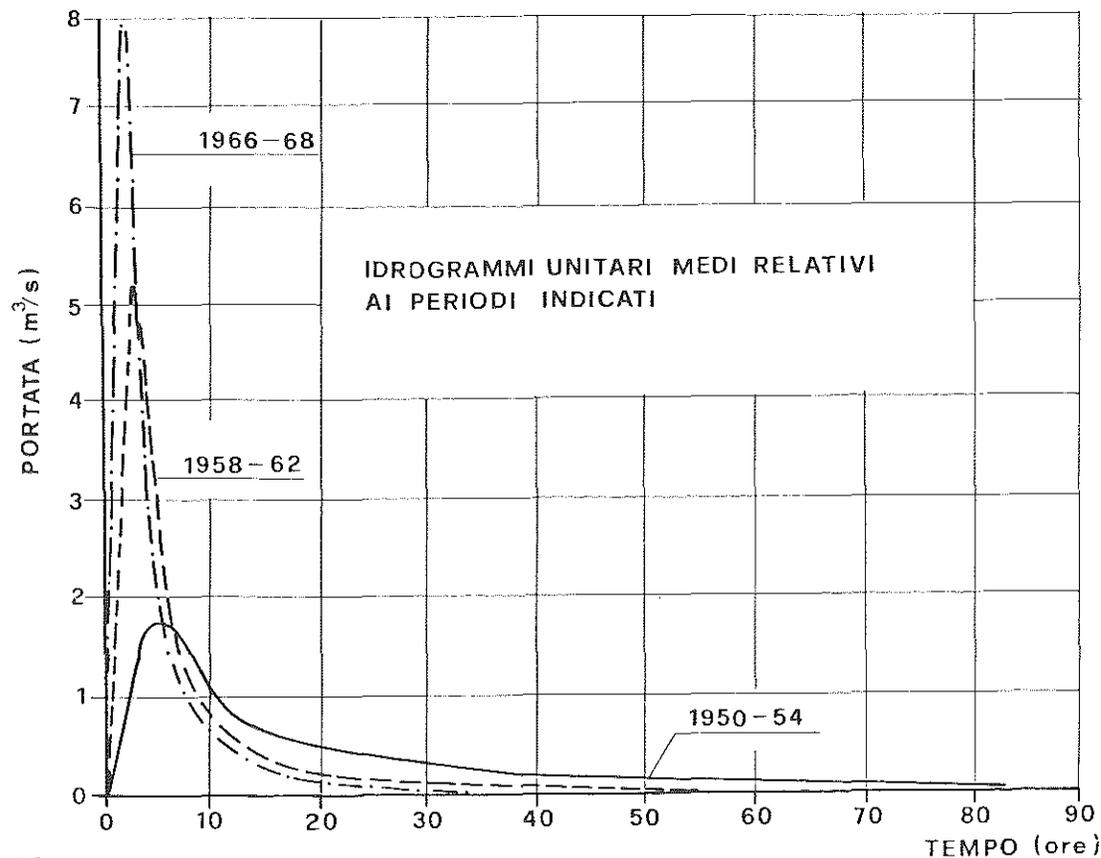
La differenza è realmente notevole, e tanto più preoccupante quando si pensi che tali prove sono state condotte sulla pista dopo la perfetta riuscita del rinverdimento. Situazioni ben più allarmanti sono da aspettarsi nel caso di tracciati malamente o per nulla inerbiti.

Di ciò va naturalmente tenuto conto ai fini di un'accurata progettazione dei sistemi di drenaggio.

Da quanto esposto finora è facile dedurre che la presenza di un bacino di strutture sportive di tal genere si ripercuoterà essenzialmente sul comportamento dei deflussi.

Saranno in particolare da attendersi riduzioni nei tempi di corrivazione, per il più rapido apporto al collettore delle acque di scorrimento superficiale rispetto alle più lente acque di percolazione profonda, che sono invece il tipico contributo di bacini di drenaggio a bosco indisturbato.

L'effetto del maggiore accumulo di neve e del ritardo nei tempi di disgelo può invece influenzare gli idrogrammi primaverili:



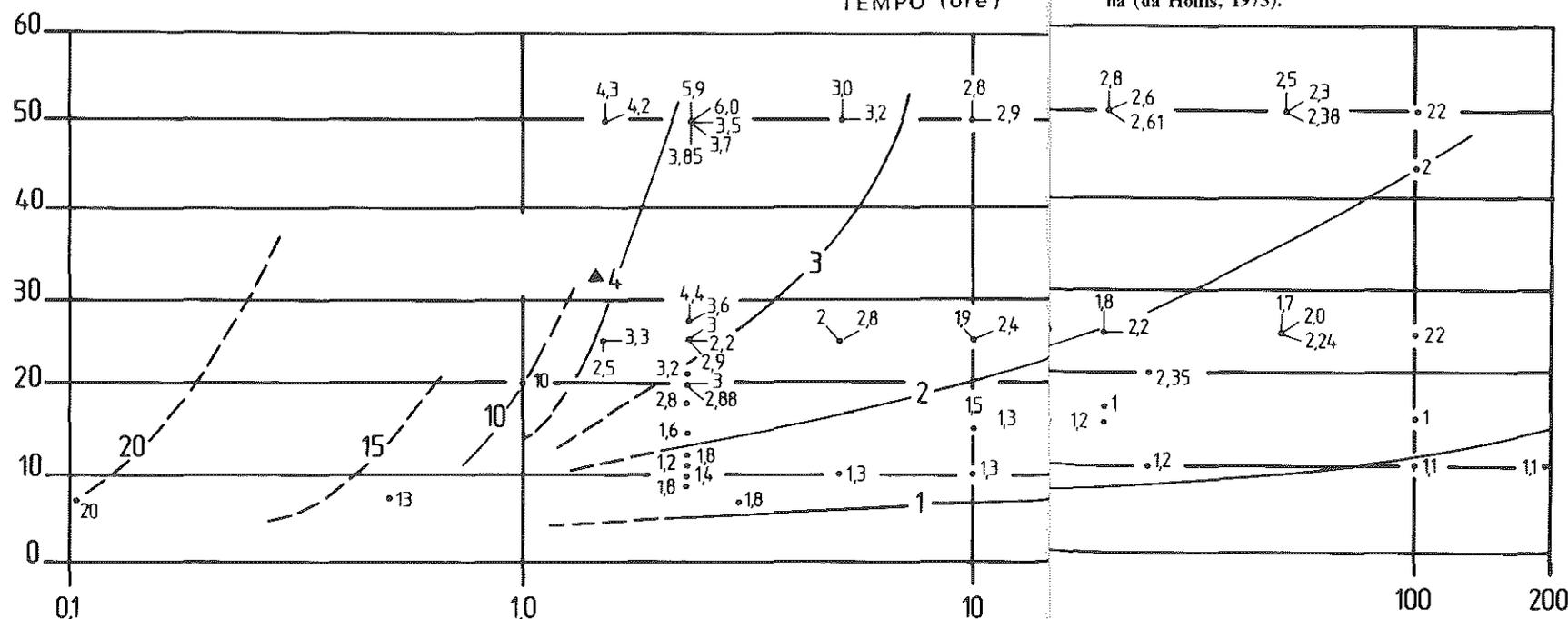
la maggiore o minore pericolosità di tale fenomeno dipenderà essenzialmente dalla posizione delle piste nell'ambito del bacino, in relazione cioè all'effetto di sincronizzazione o di sfasamento nel tempo degli apporti di deflusso.

Più contenute sembrerebbero secondo alcuni Autori (4) le conseguenze sulla produzione di sedimento, questo perché la copertura erbacea, conserva una buona efficacia nel controllo dell'erosione superficiale.

Naturalmente questo vale quando per la realizzazione di una pista sia previsto unicamente il taglio del bosco o al massimo un leggero livellamento della superficie. Nel caso invece in cui siano richiesti veri e propri sbancamenti o comunque notevoli movimenti di terra, l'entità del trasporto solido misurabile nel torrente può ragionevolmente essere paragonata a quella conseguente alla costruzione di strade.

Figura 6 - Variazione dell'idrogramma unitario medio nel bacino Canon's Brook (Essex, Gran Bretagna) in seguito ad urbanizzazione progressiva (da Hollis, 1974a).

Figura 7 - Effetto dell'urbanizzazione sulle portate di piena (da Hollis, 1975).



La costruzione di centri abitati: l'urbanizzazione dei bacini

Effetti sui deflussi

La variazione delle risposte idrologiche in seguito allo sviluppo di un'area urbana entro i confini di un bacino di drenaggio può costituire uno degli impatti antropici più incisivi sul ciclo naturale dell'acqua.

Una zona urbanizzata impone all'ambiente condizioni drasticamente mutate, e modifica alla base i parametri idrologici fondamentali.

Processi quali: l'intercettazione, l'evapotraspirazione, l'infiltrazione, da cui dipendono a loro volta da una parte il ravvenamento delle falde e dall'altra, viceversa, l'avverarsi del deflusso superficiale, vengono radicalmente compromessi.

All'intercettazione e all'evapotraspirazione delle piogge da parte della copertura vegetale si sostituiscono le ben più limitate intercettazioni ed evaporazioni da tetti, piazze e strade, a suoli naturali dotati di buone capacità di infiltrazione e di immagazzinamento idrico subentrano superfici impermeabili e generalmente dotate di scarsa «ruvidità», quindi assolutamente inadatte a trattenere con qualsiasi meccanismo sufficienti quantità d'acqua (Lull & Sopper, 1969).

In sostanza, l'urbanizzazione modifica alla base il meccanismo pioggia-deflusso.

Come primo risultato, una maggior quantità di precipitazione si convertirà rapidamente in portata, con un sensibile aumento del deflusso superficiale.

Uno studio condotto in Africa orientale (Dagg & Pratt, 1962) ha messo in luce che, se in un'area forestale di 12.5 ha. solo l'1% degli apporti idrici atmosferici contribuivano al deflusso diretto, in un'adiacente zona urbanizzata di equivalenti dimensioni questo ammontava al 36% dell'acqua di pioggia.

Woolridge (1967) parla di deflussi triplicati in seguito all'urbanizzazione di un piccolo bacino forestale presso Seattle, nello stato di Washington.

Così, confrontando per un decennio i

valori di portata in bacini urbani e in bacini a destinazione rurale, James (1965) trova nei primi valori 2.29 volte più elevati.

È importante far notare che la presenza di aree impermeabili non solo tende ad aumentare i volumi d'acqua destinati al collettore, ma ne modifica sostanzialmente la distribuzione nel tempo: il deflusso su queste inizierà quasi immediatamente, laddove invece, sulle originali superfici permeabili, una buona parte di pioggia inizialmente andava perduta per infiltrazione e percolazione, prima che si inneschiasse il fenomeno di apporto di acqua al collettore: il che vuol dire che la risposta alla pioggia di un bacino così modificato sarà ben più rapida.

Ciò è ulteriormente accentuato dal perfezionamento dei sistemi di drenaggio (tombini, fognature, canalizzazioni, rettificazione degli alvei, ecc.) che sempre accompagnano lo sviluppo di un'area urbana e che accelerano notevolmente il convogliamento delle acque a valle.

Così, a causa dell'impermeabilizzazione del suolo e dell'aumento di efficienza idraulica delle canalizzazioni, viene modificato sostanzialmente, a seguito di uno specifico evento di pioggia, quel parametro fondamentale che è il tempo di ritardo — ovvero la distanza intercorrente nel tempo tra il baricentro del pluviogramma e il baricentro dell'idrogramma.

Delle variazioni del tempo di ritardo in seguito alla espansione delle aree urbane si occupa ad esempio lo studio di Carter (1961) che evidenzia come, a parità di «basin ratio» («rapporto di bacino» espresso come quoziente tra la lunghezza del collettore principale e la radice della pendenza media del bacino), il tempo di ritardo decresca proporzionalmente al grado di urbanizzazione e di sviluppo di canalizzazioni artificiali.

L'effetto combinato dell'aumentato volume di deflusso e del ridotto tempo di smaltimento delle acque è un aumento dei picchi di piena (Packman, 1979; Kibler & al., 1981), che è forse l'effetto più vistoso del processo di urbanizzazione.

Il fenomeno si riflette nelle modificazio-

ni di forma subite degli idrogrammi, che diventano più appuntiti, con picchi più elevati e tempi di concentrazione e di esaurimento più ridotti.

Un significativo esempio di come possa cambiare un idrogramma unitario è dato in fig. 6, che illustra le conseguenze della progressiva urbanizzazione che dal 1953 al 1968 ha interessato il bacino di Canon's Brook, nell'Essex, in Gran Bretagna.

Le stesse tendenze all'exasperazione dei picchi mostrano gli idrogrammi che accompagnano l'avanzante sviluppo in un piccolo bacino silvo-rurale neozelandese (Wairan Creek, North Shore, Auckland Williams, 1976).

La letteratura abbonda di conferme sull'incremento dei valori di piena.

Studi nel Texas e nel Michigan (Van Sickle, 1962-63, Espey & al., 1965) indicano picchi maggiori da 2 a 5 volte in bacini urbanizzati rispetto a bacini rurali.

Waanen (1961) ricorda che le piene nelle aree soggette a sviluppo edilizio in New Jersey, Michigan, Pennsylvania e Virginia realizzano valori da 3 a 4 volte rispetto alle zone ancora indisturbate.

Così in Giappone, l'urbanizzazione di un bacino a Nord di Tokyo ha triplicato i valori al colmo (Kinosita & Sonda, 1967).

Naturalmente, la tendenza all'aumento delle portate implica come conseguenza un aumento di frequenza delle piene. Vale a dire, se a parità di tempo di ritorno aumentano i valori al colmo, allo stesso modo a parità di valore del picco ne aumenta la frequenza.

Ovvero, come affermano Bost & al. (1980), «l'urbanizzazione di solito aumenta contemporaneamente la frequenza e le dimensioni degli eventi di piena».

Si badi però che se tale fenomeno è spiccato nel caso di piccole e medie portate, ciò non è altrettanto vero per i deflussi di notevole entità: al diminuire della frequenza di un evento, ovvero al crescere della sua entità, l'effetto della presenza di aree urbane va attenuandosi (Hollis, 1974); all'aumentare delle dimensioni delle piogge, infatti, l'importanza dei processi di inter-

cezzazione e di infiltrazione si va riducendo.

Si aggiunga a ciò (Packmann, 1979) che nel caso di piogge eccezionalmente intense le strutture di drenaggio di un'area urbana possono diminuire notevolmente la loro efficienza, e lo scarico risultarne rallentato.

Riassuntivo è il grafico di Hollis (1975) (fig. 7), costruito in base ai risultati ottenuti in numerose esperienze da autori diversi: in esso è evidente da una parte la tendenza all'aumento delle portate al crescere dell'area impermeabile, dall'altra l'attenuazione di tale fenomeno all'allungarsi dei tempi di ritorno.

Le linee a tratto continuo tentano l'interpolazione dei dati, che pure non sempre risulta facile, a causa della deviazione di alcuni valori, spiegabile essenzialmente nelle differenze geomorfologiche e vegetazionali dei bacini esaminati, così come dalla diversa ubicazione delle aree urbane nell'ambito di questi: fattore, questo, molto importante, soprattutto nel caso — che è poi in genere quello dei bacini montani interessati da attività turistica — di bacini solo parzialmente edificati.

Infatti, fermo restando che l'area costruita fornirà deflussi aumentati ed accelerati, le conseguenze sulle portate del collettore principale saranno diverse se queste contribuiranno ad una sincronizzazione con le portate delle altre aree del bacino, o viceversa ad uno sfasamento nel tempo.

Altri aspetti sono da tener presente in relazione all'importanza della localizzazione dei centri abitati nell'ambito di bacini parzialmente urbanizzati. Taylor e Roth (1979), infatti, esaminando il comportamento idrologico di un piccolo bacino di drenaggio nell'Ontario meridionale, interessato in parte dalla presenza di aree edificate, riscontrarono che se l'attività edilizia non sembrava influenzare in modo determinante le risposte agli eventi di pioggia estivi ed autunnali, ben diversa si dimostrava la sensibilità del sistema ai deflussi da disgelo, accrescendo in tal caso le portate di 3-4 volte.

Il fenomeno riscontrato può essere spiegato in base alla teoria dell'area variabile

di contributo al deflusso superficiale (Hewlett & Hibbert, 1965): infatti, se la fascia satura di apporto dei deflussi tipicamente disposta lungo la rete dei collettori, che era la tipica fonte delle acque di portata nel caso degli scrosci estivi, non giungeva a toccare il centro residenziale, non altrettanto accadeva nel caso delle acque di scioglimento delle nevi, alle quali tutta la superficie del bacino, area abitata compresa, contribuiva allo stesso modo.

In sostanza, come puntualizzano gli autori, «il contrasto stagionale tra gli effetti dimostrati dallo sviluppo parziale di un'area abitata sulle risposte in deflusso diretto era perciò motivato dalle differenze stagionali nel grado di partecipazione delle superfici edificate alla zona di contributo dei deflussi nell'ambito del bacino di drenaggio».

Effetti sulla produzione di sedimento

Le numerose rilevazioni che confermano l'accentuazione dei fenomeni erosivi quale conseguenza dello sviluppo di aree urbane trovano facile spiegazione.

L'attività edilizia prevede infatti l'uso di bulldozer e scavatori, che asportano, smuovono, accumulano e scaricano considerevoli quantità di terra. Spesso, poi, le superfici di suolo così rimaneggiate restano nude ed esposte agli eventi meteorici per diversi mesi.

Ne deriva una ricca e facile fonte di materiale per il trasporto solido, e le concentrazioni di sedimento nelle acque dei collettori possono così giungere a valori estremi, fin anche a 60.000 ppm.

Nell'Oregon Branch, ad esempio, vicino a Cockeyville, nel Maryland, i valori di torbidità rilevati a valle di una zona urbanizzata ad indirizzo industriale raggiungevano le 30.000 ppm, mentre a monte di questa si misuravano solo 1500 ppm (Wolman & Schick, 1967).

Così per la Nuova Zelanda, Williams (1976) ricorda che un campione d'acqua raccolto dalle acque di drenaggio di una zona residenziale rivelò una concentrazione

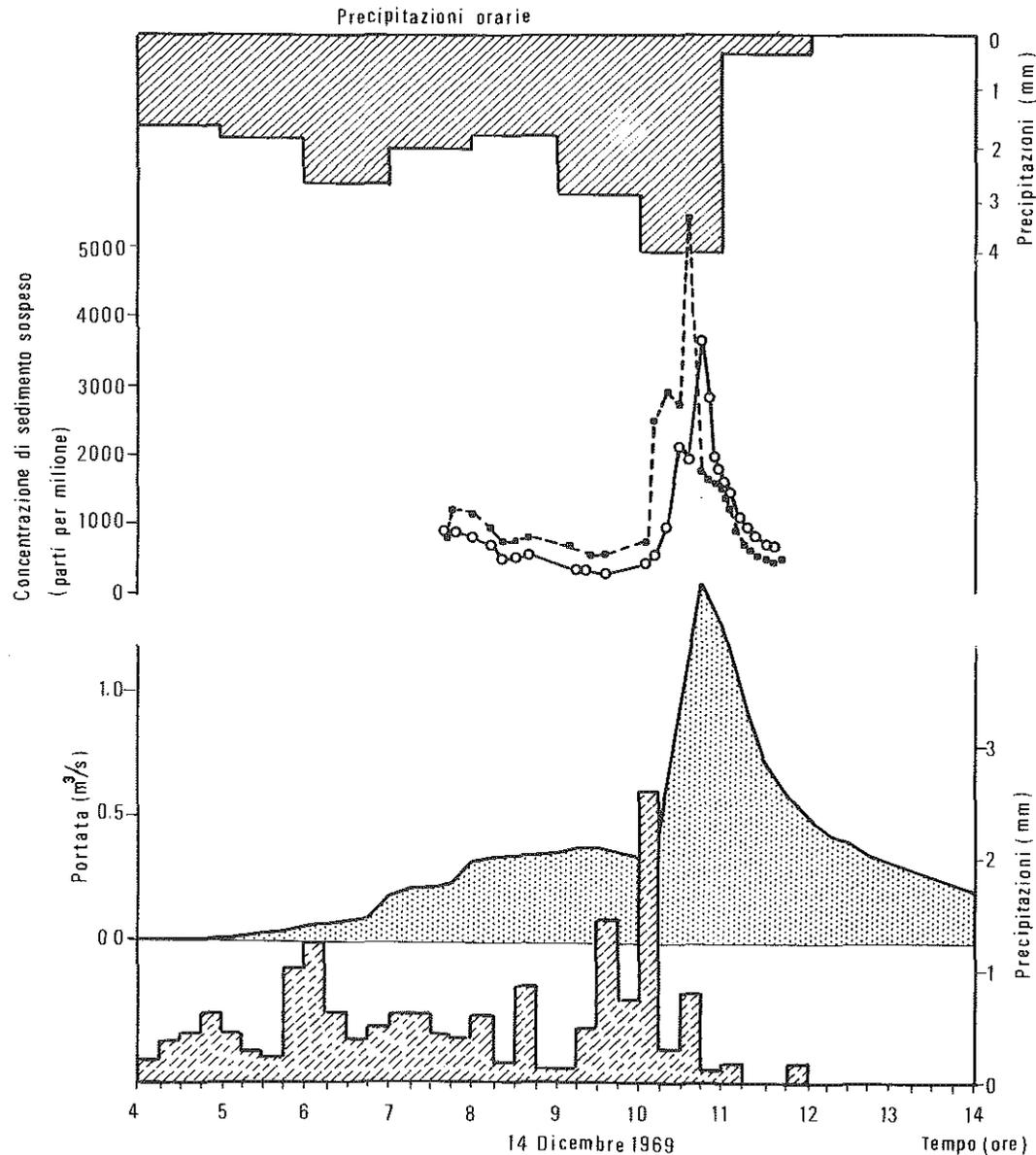


Figura 8 - Precipitazioni orarie e portate liquide e solide in un bacino del Devon (■ = stazione Z; ○ = stazione X; cfr. testo) (da Walling & Gregory, 1970).

ne di sedimento di 59.000 mg/l, che realizzava il record mai registrato fino a quel momento nell'intero Paese.

Ad esempio di come il fenomeno sia avvertibile su scala ridotta anche in aree ristrette si riporta la fig. 8: essa illustra gli

andamenti della pioggia, delle portate liquide e torbide misurati in seguito ad uno specifico evento meteorico presso il Mincinglake Stream, ai margini di Exeter (Devon, Gran Bretagna).

I campionamenti di sedimento sospeso eseguiti in corrispondenza dell'apporto di acque da una zona più intensamente sfruttata a fini edilizi (Z) e da una solo parzialmente avviata allo sviluppo urbano (X) ac-

cusano nella prima concentrazioni 1.5 volte più elevate e risposte più rapide (Walling & Gregory, 1970).

Tali fenomeni, se sono spiccatissimi durante lo svolgersi dei lavori di costruzione, registrando i picchi di concentrazione di sedimento proprio in corrispondenza del periodo più spinto di attività edilizia, tendono però in genere a decrescere quando questa sia conclusa; evidentemente, allo stabilizzarsi delle nuove superfici, vanno calando le fonti di materiale solido disponibile.

Bisogna ricordare però che la tendenza generale all'aumento delle portate innescate dal processo di urbanizzazione gioca pure un ruolo fondamentale nell'aumento delle rese in sedimento.

Il fatto che vada crescendo la frequenza degli eventi di piena — e che siano proprio questi i primi responsabili del trasporto solido — non può non riflettersi in maggiori produzioni di sedimento (fig. 9).

Si aggiunga poi il fatto che gli accresciuti valori di portata costringono i corsi d'acqua ad «aggiustare» le loro capacità alle nuove quantità di deflusso, provocando così produzioni di nuovo materiale solido per l'erosione di letto e sponde.

A volte, poi, (Dawdy, 1967) è proprio il deposito di fondo che proviene dalle aree in costruzione e che si accumula sul fondo del canale a costringere il corso d'acqua — che si vede così diminuire la sezione liquida — alla più facile erosione delle scarpate laterali.

Se dunque l'effetto della rimozione e dell'espansione del terreno nudo con il cessare dell'attività di costruzione (5) va comprensibilmente estinguendosi nel tempo, non è questo il caso delle conseguenze degli aumentati deflussi (Dawdy, 1967; Williams, 1976), dato che i meccanismi di «disturbo» sulle risposte idriche di un bacino persistono con la presenza delle aree impermeabili e delle canalizzazioni urbane.

Per l'esame dei dati sulla produzione di sedimento derivante da aree urbane in espansione ed il confronto con quella registrata da aree rurali e boscate, si rimanda alla fig. 10, che sintetizza da esperienze di-

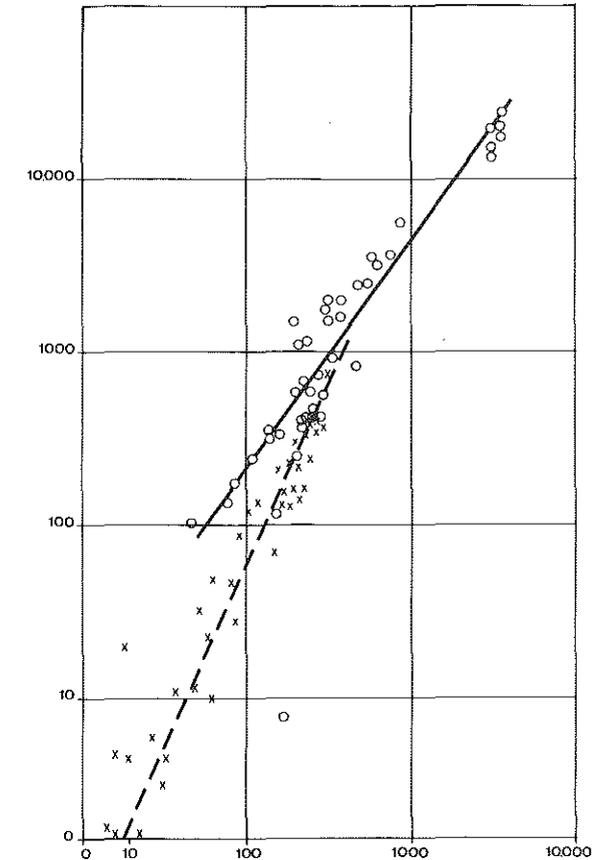


Figura 9 - Relazione tra portata e resa in sedimento per un'area urbanizzata e per un'area rurale (da Leopold, 1968).

verse la relazione tra produzione di sedimento, area di drenaggio ed attività edilizia. Il contrasto è evidente: se per le aree verdi le rese annue realizzano di media 70-175 ton/Km², mostrando valori addirittura trascurabili nei bacini boscati (5 ton/Km²), le produzioni di materiale solido nelle zone soggette ad intenso uso antropico del territorio accusano invece livelli spiccatamente più elevati, dalle 350 alle 50.000 ton/Km².

La figura evidenzia inoltre come all'aumentare dell'area di drenaggio i ritmi di sedimentazione vadano progressivamente calando: ciò è del resto comprensibile, quando si pensi che in realtà nei bacini molto estesi non è mai sottoposta a costru-

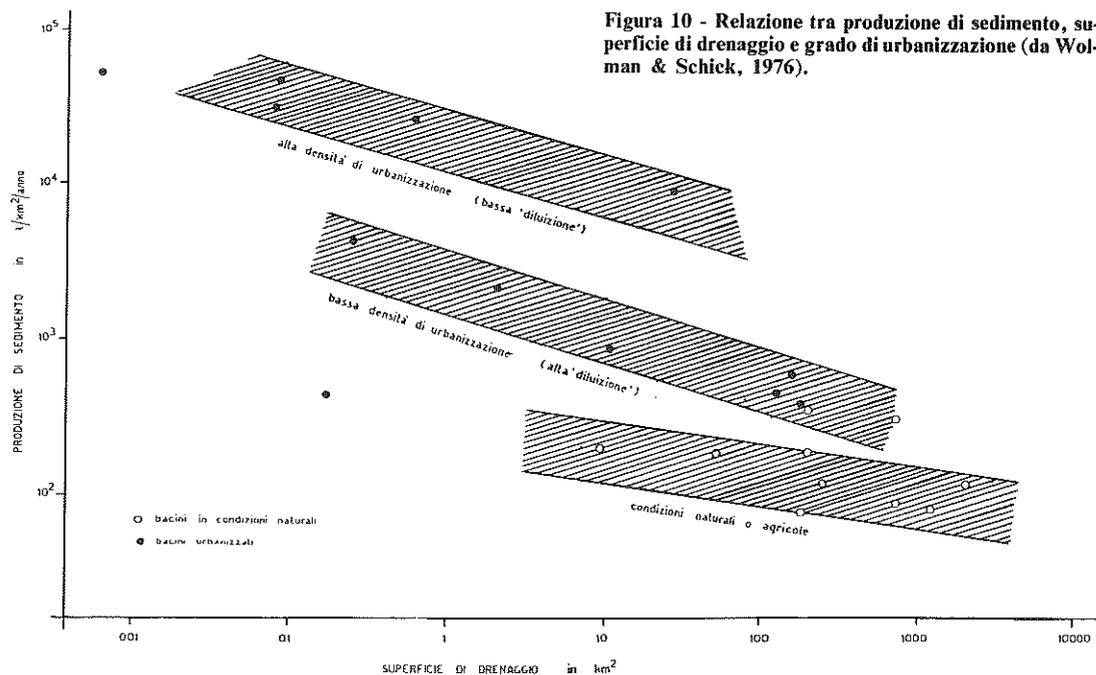


Figura 10 - Relazione tra produzione di sedimento, superficie di drenaggio e grado di urbanizzazione (da Wolman & Schick, 1976).

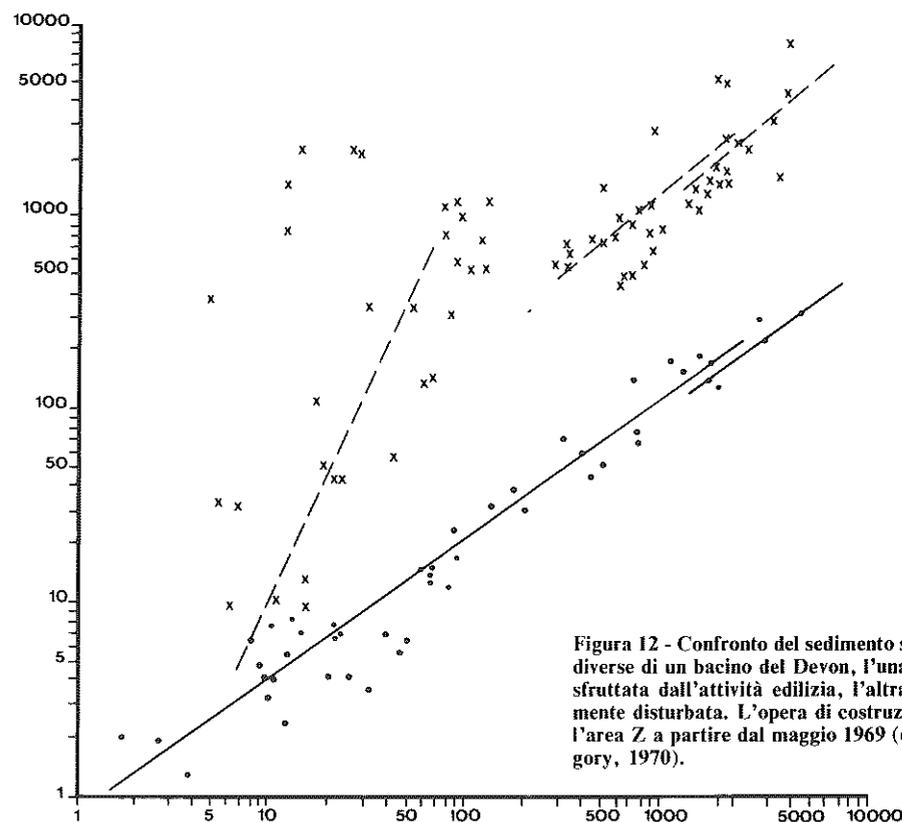


Figura 12 - Confronto del sedimento sospeso da due aree diverse di un bacino del Devon, l'una (Z) intensamente sfruttata dall'attività edilizia, l'altra (X) solo parzialmente disturbata. L'opera di costruzione ha interessato l'area Z a partire dal maggio 1969 (da Walling & Gregory, 1970).

zione l'intera superficie, mentre l'estensione relativa dell'area edificata aumenta notevolmente nei bacini di dimensioni più contenute.

Così, la minor produzione di sedimento per Km² nel caso di aree di drenaggio di maggiori estensioni non sarebbe che un effetto di «diluizione» dell'impatto della presenza di aree urbanizzate.

Molto interessante è quanto apparso dagli studi sul sedimento condotti da Walling e Gregory (1970) in due bacini nel Devon, in Gran Bretagna.

Si osservi la fig. 11: essa esprime la relazione tra i dati di torbida accusati a monte (B) e a valle (A) di un'area interessata da attività costruttiva in un piccolo bacino (Withycombe Brook) presso Exmouth. Subito appare come la distribuzione dei punti non possa essere conformata ad una singola linea retta.

Infatti, se in effetti per portare di media intensità i valori di A si mostrano ben più elevati che in B, nel caso delle magre (punti perequati dalla linea tratteggiata) le concentrazioni di sedimento sospeso non appaiono visibilmente diverse nelle due località. Inoltre, per i più elevati valori di portata, le quote di torbida tra A e B tornano pure a riavvicinarsi.

Il fenomeno si spiegherebbe, anche in tal caso, appellandosi alla teoria dell'area variabile di contributo ai deflussi superficiali: se infatti nei periodi di magra la fonte del sedimento restano letto e sponde del torrente, per B come per A, a mano a mano che aumenta l'entità delle piene e quindi l'area di apporto dei deflussi, viene ad essere interessata anche la zona abitata; e allora le concentrazioni di sedimento rilevate in A sono da 2 fino ad 11 volte superiori rispetto a quelle in B. Crescendo però, all'aumentare dei valori di pioggia, l'estensione dell'area che contribuisce al deflusso, la fascia edificata diviene piccola parte dell'intera superficie di apporto, cosicché la sua presenza diviene meno rilevante.

Lo stesso fenomeno è avvertibile in fig. 12 (relativa agli studi condotti nella seconda località di Devon), che esprime la relazione tra sedimenti sospesi provenienti da

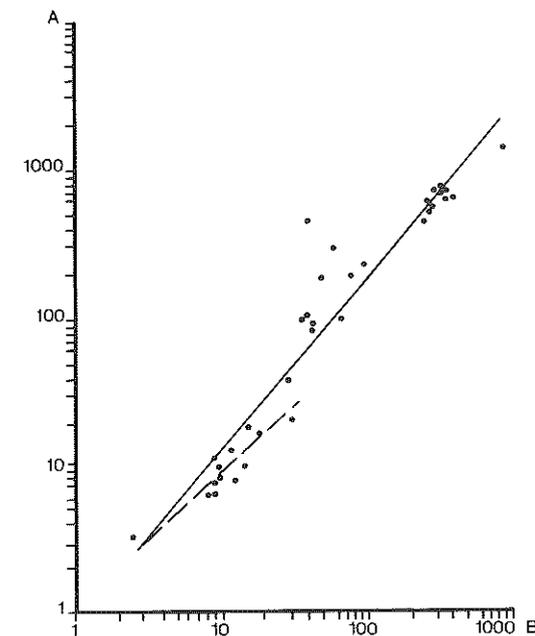


Figura 11 - Dati di torbida a monte (B) e a valle (A) di un'area edificata nel bacino Withycombe Brook (Devon) al crescere delle portate liquide (da Walling & Gregory, 1970).

due aree adiacenti, affluenti allo stesso bacino, il già ricordato Mincinglake Stream, presso Exeter: di esse, una (X) solo parzialmente edificata, l'altra (Z) più intensamente sfruttata dall'attività costruttiva.

Anche qui, i valori di concentrazione di sedimento in sospensione per condizioni interessate o meno dal disturbo urbano, sono molto simili durante le magre, realizzano gli incrementi massimi in Z per le portate di medio livello, e gli incrementi relativamente più bassi all'estendersi dell'entità delle piogge e delle superfici di contributo ai deflussi.

Così, come affermano gli autori, «il concetto dell'area variabile di apporto del deflusso, sviluppato nell'interpretazione delle portate in un bacino, si applica ugualmente bene all'interpretazione delle rese in sedimento sospeso».

Nel concludere l'argomento relativo alla qualità delle acque, si vuole accennare ad un problema che può in effetti sorgere al progredire dell'occupazione antropica dei

bacini montani, e che è connesso con l'uso regolare di sostanze saline utilizzate per ritardare la formazione di croste gelate sulle superfici stradali.

Cherkauer (1975), indagando sugli effetti dello sviluppo urbano in due piccoli bacini del Wisconsin, trovò che il 30% circa del materiale trasportato in soluzione nelle acque di drenaggio era costituito da cloruro di sodio, quando questo rappresentava solo il 2% delle sostanze disciolte nei torrenti provenienti da bacini rurali.

Le ripercussioni che questo fenomeno può esercitare sulla biologia delle acque a valle meriterebbero in effetti di essere oggetto di maggiore attenzione.

(1) Si badi però che non sempre l'accelerato convogliamento delle acque al collettore comporta un'accentuazione dei picchi di piena. A volte l'effetto può essere anche l'inverso. Come variano l'andamento delle portate in una data sezione a valle dipende infatti dall'azione di sincronizzazione o viceversa di sfasamento nel tempo dell'apporto di acque dalle diverse porzioni di bacino, che un tale evento di disturbo può comportare (Megahan, 1972, 1979).

(2) Quand'anche di prato si tratti, e non di brullo suolo nudo, dando cioè per scontato che si sia proceduto ad inerbimento e che questo sia ben riuscito.

Si badi però che non sono facili le condizioni di vita per la cotica che costituisce il fondo di una pista di sci: infatti l'azione tagliente delle lamine degli sci sui tratti di usura e sulle chiazze gelate, la compressione dello strato nevoso che impedisce la naturale protezione termica costituita da un manto soffice ed aereato e crea invece condizioni di pericolosa asfissia, il ritardo del disgelo laddove — alle elevate altitudini — la naturale brevità del periodo vegetativo è già di per sé fattore limitante, finiscono col compromettere la vitalità e la qualità dei vegetali erbacei. Si ricorda che sulle conseguenze dell'esercizio dello sci sulla cotica erbosa è compeso da poco, su questa rivista, un articolo di Cumer (1983).

(3) Valori leggermente inferiori hanno manifestato analoghe esperienze condotte invece su terreni calcarei.

(4) Non è questo però il parere di tutti: Ofner (1981) mette in guardia sulle conseguenze erosive della costruzione di piste, ritenendo che esse possano assumere — soprattutto nei bacini di piccole dimensioni — proporzioni assai preoccupanti.

(5) È anche vero però che difficilmente lo sviluppo di un'area urbana può considerarsi definitivamente concluso, in quanto resta in realtà un fatto dinamico e comporta sempre il mantenimento di un certo livello di attività edilizia (Dawdy, 1967).

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON H. W., 1974 - *Sediment deposition in reservoirs associated with rural roads, forest fires, and catchment attributes.* «Influence de l'Homme sur l'Hydrologie entre le Cycle Hydrologique et l'Environnement Physique» Paris Symp. Proceed., IAHS 113.
- BESCHTA R. L., 1978 - *Long-term Patterns of Sediment Production Following Road Construction and Logging in the Oregon Coast Range.* Water Res. Res., 14 (6).
- BORRHOUGH S. E., HARSDEN M. A., HAUPT H. F., 1972 - *Volume of snowmelt intercepted logging roads.* Journ. Inw. Drain Div., Proceed. Am. Soc. Civ. Eng., 98 (124).
- BOST R. C., BEDIET P. B., ROWE P. G., 1980 - *Effect of urbanization on alternate flood control strategies.* Water Res. Bull., 16 (4).
- CARTER R. W., 1961 - *Magnitude and frequency of floods in suburban areas.* U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 424-B.
- CHEKKAUER D. S., 1975 - *The hydrologic response of small watersheds to suburban development: observation and modeling.* «Urbanization and Water Quality Control» Symp. Proceed., W. Whipple ed., Am. Wat. Res. Ass., Minneapolis, 23.
- COLPI C., FATTORELLI S., 1982 - *Effetti idrologici dell'attività preturistica in montagna.* Dendronatura, 3 (1).
- CUMER A., 1983 - *Apicoltura ed esercizio dello sci.* Dendronatura, 4 (2).
- DAGG M., PRATT M. A. C., 1962 - *Relation of stormflow to incident rainfall.* E. Afr. Agr. For. Journ., 27.
- DAWDY D. R., 1967 - *Knowledge of sedimentation in urban environments.* Journ. of the Hydrotechnical Div., Proceed. Am. Soc. Civ. Eng., 93 (16).
- ESPEY W. H., MORGAN C. W., MASCH F. D., 1965 - *A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed.* UNIV. TEXAS Dep. Civ. Eng. Tech. Rep. HYD 07-6301, CRWR-2.
- FREDRIKSEN R. L., HARR R. D., 1979 - *Soil Vegetation and Watershed Management of the Douglas Fir Region.* In: «Forest Soil of the Douglas Fir Region», P. E. Hellman, H. W. Anderson, D. M. Baumgartner ed., Washington State Univ. Coop. Ext.
- GOSZ J. R., HOLMES R. T., LIKENS G. E., BORMANN F. H., 1978 - *Il flusso di energia nell'ecosistema di una foresta.* Le Scienze, XX, 117.
- HEWLETT J. D., HIBBERT A. R., 1965 - *Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas.* Int. Symp. on Forest Hydrology Proceed., W. E. Sopper, H. W. Lull ed., Pergamon Press, New York.
- HOGAN A. W., 1972 - *Snowmelt delay by over-snow travel.* Water Res. Res., 8 (1).
- HOLLIS G. E., 1974a - *River Management and Urban Flooding.* In: «Conservation in Practice», A. Warren, F. B. Goldsmith ed., 13, Wiley, London.
- HOLLIS G. E., 1974b - *The effects of urbanization on floods in the Connon's Brook, Harlow, Essex.* In: «Fluvial processes in instrumented watersheds», Inst. Brit. Geogr. Spec. Public., 6.
- HOLLIS G. E., 1975 - *The Effects of Urbanization on Floods of Different Recurrence Interval.* Water Res. Res., 11 (3).
- JAMES L. D., 1965 - *Using a digital computer to estimate the effects of urban development on flood peaks.* Water Res. Res., 1 (2).
- KIBLER D. F., FROELICH D. C., ARON G., 1981 - *Analyzing urbanization impacts on Pennsylvania floods peaks.* Water Res. Bull., 17 (2).
- KINOSHITA T., SONDA T., 1967 - *Change of runoff due to urbanization.* Int. Symp. on floods and their computations, UNESCO, Leiria.
- LEOPOLD L. B., 1968 - *Hydrology for urban land-planning. A guidebook on the hydrologic effects on urban land use.* U.S. Geol. Surv. Water. Supply Paper, 1591-C.
- LULL H. W., SOPHER W. E., 1969 - *Hydrologic effects from urbanization of forested watersheds in the Northeast.* USDA For. Serv. Res. Paper, NE-146.
- LYONS J. K., BESCHTA R. L., 1983 - *Land Use, Floods, and Channel Changes.* Upper Middle Fork Willamette River, Oregon (1939-1969). Water Res. Res., 19 (2).
- MEGAHAN W. F., 1972 - *Subsurface flow interception by a logging road in Mountains of Central Idaho.* Nat. Symp. on Watersheds in Transition, Am. Water Res. Ass., Ft. Collins, Colorado.
- MEGAHAN W. F., 1977 - *Reducing erosional impacts of roads.* In: «Guidelines for watershed management», FAO Cona. Guide, Roma.
- MEGAHAN W. F., 1979 - *Effects of forest practices on runoff and erosion.* Corsi di cultura in Ecologia, Ist. di Ecol. e Selvic., Univ. di Padova.
- MEGAHAN W. F., DAY N. F., BLISS T. M., 1978 - *Landslide occurrence in the Western and Central Northern Rocky Mountain Physiographic Province of Idaho.* In: «Forest soils and land uses, Fifth North. Am. For. Soils. Conf., Ft. Collins, Colorado.
- MONTEITH J. L., 1980 - *The development and extension of Penman's evaporation formula.* In: «Applications of Soil Physics», D. Hillel ed., Academic Press, New York.
- OFNER O., 1981 - *Veränderung der Abflussverhältnisse durch den Pistenbau.* Wildbach und Lawinenverbau, Wörgl, I.a.
- PACKMAN J. C., 1979 - *The effect of urbanization on flood magnitude and frequency.* In: «Man's impact on the hydrological cycle in the United Kingdom», G. E. Hollis ed., Geo. Abs. Ltd., Univ. of East Anglia, Norwich.
- PEARCE A. J., ROWE L. K., 1979 - *Forest Management Effects on Interception, Evaporation and Water Yield.* Journ. of Hydrology, N. Z., 18 (2).
- PIERCE R. S., KELLER H. M., 1980 - *Forest land use impacts on upstream water sources.* In: «Land use impacts on lake and reservoir ecosystems» Symp. Proceed., Warsaw, Duncan & Krocka ed., Wien.
- REID L. M., DUNNE T., CEDERHOLM C. J., 1981 - *Application of sediment budget studies to the evaluation of logging road impact.* Journ. of Hydrology, N. Z., 20 (1).
- STAUDER S., 1974 - *Die Beeinflussung des Wasserhaushaltes im Walde durch Schlagschneefabriken.* Allgem. Forstz. 83 (7).
- TAYLOR C. H., ROTH D. M., 1979 - *Effects of suburban construction on runoff contributing areas in a small Southern Ontario drainage basin.* Hydrol. Sci. Bull., 24 (3).
- VAN SICKLE D., 1962-3 - *The effects of urban development on storm runoff.* The Texas Engineer, 32 (1-3).
- WAANEN A. O., 1961 - *Hydrological effects of urban growth.* Some characteristics of urban runoff. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 424-C.
- WALLING D. E., GREGORY K. J., 1970 - *The measurement of the effects of building construction on drainage basin dynamics.* Journ. of Hydrology, Amsterdam, 11.
- WILLIAMS P. W., 1976 - *Impact of urbanization on the hydrology of Waianai Creek, North Shore, Auckland.* Journ. of Hydrology, N. Z., 15 (2).
- WOLMAN M. G., SCHICK A. P., 1967 - *Effects of Construction on Fluvial Sedimentation in Urban and Suburban Areas of Maryland.* Water Res. Res., 3 (2).
- WOOLDRIDGE D. D., 1967 - *Water transport in soils and streams.* In: «Transport Phenomena in Atmospheric and Ecological Systems», Amer. Soc. Mech. Eng. Proceed.