

Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale

Corso di

SISTEMAZIONE DEI BACINI IDROGRAFICI

Prof. Ing. Mario Fugazza

Appunti alle lezioni

AA 2010-2011

L'EROSIONE DEL SUOLO

INDICE

1. GENERALITÀ E PROBLEMATICHE.....	3
2. BILANCIO DI MASSA	5
3. MATERIALE ORGANICO.....	6
4. CENNI SULLA MECCANICA DELL'EROSIONE.....	7
Distacco.....	7
Trasporto	8
5. LA MODELLAZIONE DELL'EROSIONE	10
6. I MODELLI EMPIRICI.....	11
6.1 L'EQUAZIONE UNIVERSALE DELL'EROSIONE DEL SUOLO (U.S.L.E.)	12
6.1.1 <i>Il fattore di erosività della pioggia R</i>	12
6.1.1.1 Energia cinetica di uno scroscio	12
6.1.1.2 Energia cinetica totale di un intero evento piovoso	13
6.1.1.3 Calcolo dell'indice R.....	13
6.1.2 <i>Il fattore di erodibilità del suolo K</i>	14
6.1.3 <i>I fattori di lunghezza L e di pendenza S</i>	15
6.1.4 <i>Il fattore di coltivazione C</i>	16
6.1.5 <i>Il fattore di pratica colturale o antierosiva P</i>	17
Terrazzamento.....	17
Coltivazione lungo le linee di livello	18
Coltivazione a strisce interrotte.....	18
7. MODELLI FISICAMENTE BASATI.....	19
WEPP (Water Erosion Prediction Project).....	20
EUROSEM (European Soil Erosion Model).....	21
8. OBIETTIVO DELLA RICERCA SULL'EROSIONE DEI SUOLI	21
8.1 LIVELLI TEMPORALI DI INTERVENTO	21
8.2 LIVELLI DI IDENTIFICAZIONE SPAZIALE	22
9. VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI EROSIONE.....	23
10. STRATEGIE PER LA CONSERVAZIONE DEL SUOLO	25
Scala nazionale.....	25
Scala regionale	26
11. DIMENSIONAMENTO DEI TERRAZZI.....	26
12. REGIMAZIONE DELLE ACQUE SUPERFICIALI	29

EROSIONE DEL SUOLO

1. GENERALITÀ E PROBLEMATICHE

L'erosione del suolo consiste nel fenomeno di asportazione del materiale che costituisce lo strato superficiale del terreno da parte dell'acqua e del vento attraverso azioni meccaniche e chimiche.

Dal punto di vista scientifico e tecnico viene fatta una ulteriore distinzione a livello di scala spaziale: al concetto di *erosione del suolo* (soil erosion) appena definito si aggiunge quello di *perdita di suolo* (soil loss) e di *produzione di sedimento* (sediment yield). Si parla di erosione quando si fa propriamente riferimento al fenomeno locale di distacco e movimento del materiale (microscala), di perdita di suolo se ci si riferisce alla quantità totale di materiale asportata da un campo, da un pendio o da un versante (mesoscala), di produzione di sedimento quando si considera la quantità di materiale che passa attraverso la sezione di chiusura di un bacino (macroscala).

L'erosione del suolo è solo uno dei fenomeni fisici che comportano la modifica del paesaggio terrestre; gli altri sono i *movimenti di massa* (frane) ed il processo di *soluzione* in acqua. In generale, in ogni contesto fisico, uno di questi fenomeni prevale sugli altri.

Ragionando a livello spaziale sufficientemente vasto (bacino) i movimenti di massa (frane di diverso tipo) sono prevalenti quando la pendenza dei versanti è grande. Se le caratteristiche dei terreni costituenti lo consentono in questi casi il paesaggio evolve naturalmente, mediante movimenti di massa anche notevoli, verso una situazione di "equilibrio" cui corrisponde, in genere, una pendenza inferiore a quella iniziale, che è quella di stabilità dei versanti. Il fenomeno dipende sostanzialmente dalle condizioni climatiche, dal regime delle acque superficiali e sotterranee, dalle caratteristiche delle rocce e dalla copertura del terreno.

Durante questo stadio i fenomeni di erosione e di soluzione, pur essendo presenti, sono di molti ordini di grandezza inferiori e possono essere trascurati.

Quando il paesaggio è evoluto verso una situazione di stabilità dei versanti, allora i fenomeni di erosione e soluzione cominciano a diventare non più trascurabili.

Tra i due solitamente è il primo (erosione) a prevalere. Solo nel caso di situazioni molto particolari (clima umido con piogge prolungate e di bassa intensità associate a terreni molto permeabili) prevale il fenomeno di soluzione rispetto all'erosione. Ad esempio in certe regioni dell'Inghilterra, dove nel suolo è presente una forte componente gessosa, l'impoverimento del suolo dovuto alla soluzione può arrivare a valori di 10÷100 \square m/anno. L'esistenza di questo fenomeno che comporta il dissolvimento delle particelle più fini in acqua fino al raggiungimento di una condizione di quasi-equilibrio saturo è comunque *fondamentale per la trasformazione della roccia madre (bedrock) in terreno con caratteristiche tali da essere utilizzabile per l'agricoltura.*

Solitamente l'esistenza di condizioni atte a favorire la soluzione del suolo riduce il fenomeno erosivo e vice-versa. L'azione erosiva dell'acqua è prodotta sia dallo scorrimento superficiale (runoff), sia dall'impatto delle gocce sul terreno (rainsplash). Il fenomeno di soluzione è invece legato alla presenza di acqua nel sottosuolo, sia dal punto di vista della quantità e della durata di tale permanenza, che dal punto di vista della possibilità di movimento ipodermico o profondo. Tutte le caratteristiche del terreno (tessitura e struttura, utilizzo, copertura etc.) che favoriscono queste situazioni riducono lo scorrimento superficiale e quindi l'erosione.

L'erosione del suolo dovuta al vento è prodotta dall'azione tangenziale esercitata dall'aria in movimento sul terreno. Quest'azione dipende in maniera molto più accentuata che nel caso dell'acqua dalle caratteristiche del terreno e dalle condizioni in cui si trova la sua superficie. La presenza di una "scabrezza" intesa sia in senso più stretto a livello di superficie (microscala), sia in senso più generale (ostacoli di varie dimensioni come case, alberi, cespugli, etc.), riduce di molto quest'azione e quindi i fenomeni erosivi. Di conseguenza i terreni più facilmente soggetti a questo tipo di erosione sono i terreni poco coesivi con scarsa copertura (terreni desertici, pianure alluvionali, coste). In terreni di questo tipo sono stati misurati fenomeni erosivi da vento fino a 1 mm/anno)

Un fenomeno simile, dovuto ad una scorretta gestione agricola del suolo si verificò negli U.S.A. nella zona denominata "Dustbowl" che comprende l'area geografica corrispondente alla regione compresa tra Texas, Kansas, Oklahoma, Colorado e Nuovo Messico.

Più precisamente con il termine **Dust Bowl** (in inglese: *conca di polvere*) si indica una serie di tempeste di sabbia che colpirono gli Stati Uniti centrali e il Canada tra il 1931 e il 1939, causate da decenni di tecniche agricole inappropriate e dalla mancanza di rotazione delle colture. Il terreno fertile delle Grandi Pianure era esposto ad arature profonde che finivano per distruggere l'erba che ne assicurava l'idratazione. Durante la siccità, il suolo si seccò diventando polvere, e venne soffiato via verso est, principalmente in grandi nuvole nere. Talvolta queste nuvole di polvere oscuravano il cielo fino a Chicago, e gran parte della terra rimossa si perse completamente nell'Oceano Atlantico. Questo disastro ecologico causò un esodo da Texas, Kansas, Oklahoma, e dalle grandi pi-

anure circostanti, con oltre mezzo milione di americani che restarono senza casa. Molti migrarono ad ovest in cerca di lavoro.



Immagini delle tempeste di polvere e dei danni causati dalla cattiva gestione dei terreni nella Dustbowl

Tutti gli studi sull'erosione hanno evidenziato come l'effetto della copertura del terreno, usualmente sotto forma di vegetazione, sia di primaria importanza nella determinazione del fenomeno erosivo.

In condizioni "naturali" (senza utilizzazione agricola), l'aumento di piovosità fa passare gradualmente, se le condizioni lo consentono, da una situazione caratterizzata da scarsa o assente vegetazione (deserto) allo stato di folta copertura vegetale (foresta). Questo fenomeno si riflette sull'effetto erosivo dovuta all'azione dell'acqua. Inizialmente, quando la copertura vegetale è scarsa, l'aumento di piovosità produce un aumento di erosione conseguente all'aumento dello scorrimento superficiale, non sufficientemente controllato dalla copertura vegetale. A partire da un certo valore (mediamente 350 mm/a) ulteriori aumenti di piovosità fanno sì che la crescita vegetale, favorendo l'infiltrazione nel terreno e la ritenzione in superficie ed aumentando la scabrezza, produca una progressiva diminuzione dello scorrimento superficiale e del connesso fenomeno erosivo. Alla fine si raggiunge la situazione di copertura massima (foresta) per cui l'aumento di piovosità produce ancora un aumento di erosione.

Se si considera una condizione (teorica) di copertura vegetale omogenea (prato, cespuglio, foresta) si osserva sempre un aumento di erosione con la piovosità. Tutto questo è illustrato, in modo qualitativo, nella Fig. 1, sia per l'erosione dovuta all'acqua che per l'erosione dovuta al vento.

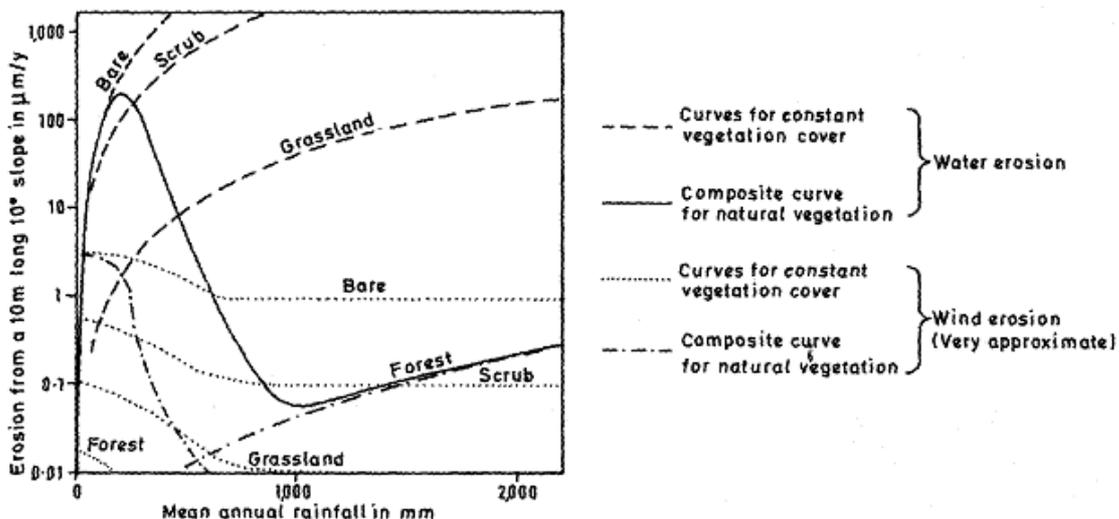


Fig. 1: erosione prodotta da acqua e vento in funzione della copertura vegetale e dell'altezza di pioggia (da Soil Erosion - edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan - J. Wiley & Sons)

Da quanto sopra detto si deduce che ogni intervento che modifichi la copertura vegetale (ad esempio a scopo agricolo) produce un aumento nel rischio di erosione, soprattutto se effettuato durante periodi ad alta pio-

vosità. Nei climi semiaridi il fenomeno erosivo mostra una dipendenza molto maggiore dalle variazioni climatiche che non nei climi umidi. Un esempio di valori annui di erosione (t/ha) è riportato nella Tab. 1. I dati sono provenienti da diverse fonti e si riferiscono a situazioni molto diverse per condizioni climatiche e copertura vegetale o utilizzazione del terreno.

Quello che si può notare è che, in tutti i casi, l'erosione aumenta passando dalla condizione naturale (massimo sviluppo vegetativo) all'assenza di vegetazione. Questo fatto è molto più rilevante là dove la copertura vegetale naturale può assicurare il livello massimo di protezione (foresta pluviale), come nell'Africa Occidentale, mentre è più limitata dove la copertura prevalente è costituita da savana o prateria (Etiopia).

Stato Condizione suolo	naturale	coltivato	senza vegetazione
Cina	0.1 – 2	150 – 200	280 – 360
U.S.A.	0.03 – 3	5 – 170	4 – 9
Australia	0.0 – 64	0.1 – 150	44 – 87
Costa d'Avorio (Africa)	0.03 – 0.2	0.1 – 90	10 – 750
Nigeria (Africa)	0.5 – 1	0.1 – 35	3 – 150
India	0.5 – 5	0.3 – 40	10 – 185
Etiopia (Africa)	1 – 5	8 – 42	5 – 70
Belgio (Europa)	0.1 – 0.5	3 – 30	7 – 82
Gran Bretagna (Europa)	0.1 – 0.5	0.1 – 20	10 – 200

Tab. 1: valori di erosione annua [t ha^{-1}] in alcune parti del mondo
(da Soil Erosion & Conservation, R.P.C. Morgan – Longman)

2. BILANCIO DI MASSA

L'erosione del terreno è un fenomeno da controllare non soltanto perché produce un appiattimento del paesaggio in tempi geologici (un'erosione di un mm all'anno spiana in un milione di anni una montagna di 1000 m), quanto perché il fenomeno erosivo riduce localmente lo spessore di suolo coltivabile, che può contenere le sostanze organiche, l'acqua, i sali minerali e le particelle più fini. Nel giro di poche generazioni, un terreno fertile può essere avviato alla desertificazione.

Inoltre il materiale eroso viene trasportato a valle e riduce, di conseguenza, la capacità di portata dei corsi d'acqua aumentando i rischi di inondazione. La sedimentazione del materiale in terra i canali irrigui e riduce l'efficienza e la durata in servizio dei serbatoi. Non ultimo danno è quello legato al fatto che il materiale eroso è spesso ricco di sostanze chimiche (fertilizzanti, insetticidi o altro) provenienti dalle pratiche agricole, le quali tendono a distribuirsi sul territorio e a concentrarsi nei corsi d'acqua.

In pratica la formazione di suolo fertile dalla disgregazione della roccia madre è un fenomeno che può mantenersi in equilibrio, con uno spessore di suolo costante nel tempo (variabile localmente in dipendenza delle condizioni locali), se si realizza una corretta distribuzione della dimensione del materiale che costituisce la matrice fisica di sostegno alla vegetazione: questo materiale deve variare da quello più grossolano, che può essere asportato dall'erosione superficiale, a quello più fine che può essere allontanato in soluzione.

Dal punto di vista del bilancio di massa, se si fa riferimento a quantità annue, tutto questo si traduce nelle relazioni:

$$(1) \quad R = E + S$$

$$(2) \quad E = p_s R$$

ove R è la roccia madre che si disgrega e va a costituire, con la parte E asportabile dall'erosione e con la parte S più fine, che può essere allontanata in soluzione, lo spessore di suolo.

La prima equazione è l'equazione di bilancio di massa: *tutta la roccia madre che si disgrega alimenta l'erosione superficiale e la soluzione*. La seconda equazione è la cosiddetta *equazione di interfaccia*, che stabilisce, come condizione per la formazione e il rinnovamento del suolo (e quindi di conservazione del suo spessore in presenza di erosione) che il fenomeno erosivo deve avvenire con la stessa velocità con cui si disgrega la roccia madre, una volta che sia definito il valore di p_s , cioè la percentuale in peso di roccia disgregata che va a costituire il suolo erodibile.

La presenza di una quantità di materiale S che può andare in soluzione è essenziale, se si vuole che lo strato superiore di terreno (suolo) abbia caratteristiche meccaniche tali da poter essere coltivabile. Si vede che, per

assegnato valore di R, se $S=0$ si ottiene $p_s=1$ ed $E=R$. Questo significa che la disgregazione della roccia madre produce una matrice fisica costituita da particelle di dimensioni tali che nessuna di esse può essere asportata per soluzione. In questa condizione lo strato superiore di terreno ha caratteristiche meccaniche che non consentono una sufficiente crescita vegetale e tanto meno la coltivazione; si tratta inoltre di situazioni in cui il terreno è facilmente soggetto all'erosione a causa della scarsa o mancante copertura vegetale. Il valore di p_s deve quindi essere inferiore ad 1: usualmente, perché dalla disgregazione della roccia madre si produca uno spessore di suolo coltivabile, il valore massimo accettato per p_s è 0.8.

Dalle due relazioni sopra scritte si possono ricavare le seguenti:

$$(3) \quad E = S \frac{p_s}{1 - p_s}$$

$$(4) \quad p_s = \frac{E}{E+S}$$

Dalla prima relazione, nota S e per assegnato valore di p_s (cioè per caratteristiche meccaniche del suolo definite) è possibile ricavare il valore massimo di erosione annua E per unità di superficie ($\text{t}\cdot\text{ma}^{-1}$), tollerabile perché il suolo conservi le stesse caratteristiche (cioè, per esempio, resti coltivabile). Si può facilmente verificare che, quanto più grande è S (forte disgregazione della roccia madre), tanto maggiore è il valore di E.

Dalla seconda relazione è possibile prevedere, noto il valore di S, quale sarà l'effetto che comporta sulle caratteristiche del suolo (cioè sul valore di p_s) l'esistenza di una definita quantità di erosione annua E, conseguente, per esempio, al tipo di coltivazioni e di utilizzazione del terreno in atto.

3. MATERIALE ORGANICO

Un fenomeno strettamente collegato all'erosione nel processo di desertificazione è il progressivo esaurimento delle sostanze organiche e degli elementi nutrienti contenuti nel terreno ed utilizzati dalla piante. La presenza di materiale organico, così come una giusta disgregazione del terreno (si è detto $p_s \leq 0.8$) è necessaria perché le sostanze minerali ed organiche e l'acqua abbiano a disposizione una matrice fisica adatta a che lo scambio con la pianta attraverso l'apparato radicale possa avvenire. Inoltre le sostanze organiche, insieme con l'argilla, esercitano un'azione aggregante sulla struttura del terreno, aumentano la capacità d'infiltrazione e riducono lo scorrimento superficiale.

Dato che le sostanze organiche sono localizzate nella parte superiore del terreno, l'erosione comporta, di per sé, una diminuzione del contenuto organico del suolo. Ma è soprattutto la riduzione della copertura vegetale che produce la perdita di materiale organico, perché è da questa che essa proviene. L'utilizzazione del terreno per il pascolo, la produzione agricola eccessiva, l'utilizzazione del legname per il riscaldamento, per la cucina o per altri scopi possono rompere l'equilibrio che esiste, in ogni condizione climatica, tra la quantità di biomassa vivente su un terreno (essenzialmente di tipo vegetale) e la quantità annua di pioggia, ed innescare un processo che, per accelerazione naturale, porta nel giro di pochi anni alla condizione di terreno completamente spoglio. Questo meccanismo è particolarmente rapido ed ha effetti enormemente distruttivi nei climi semiaridi. Nella Fig.2 si mostra, in modo qualitativo, come esistano, per ogni valore di piovosità annua (in mm di pioggia) e a parità di altre condizioni, due valori ben distinti di biomassa (in tonnellate per ettaro) corrispondenti alla "condizione di equilibrio", cioè alla utilizzazione ottimale della risorsa disponibile nel terreno per la produzione di sostanza organica, che può essere (mediamente) mantenuta nel tempo.

I

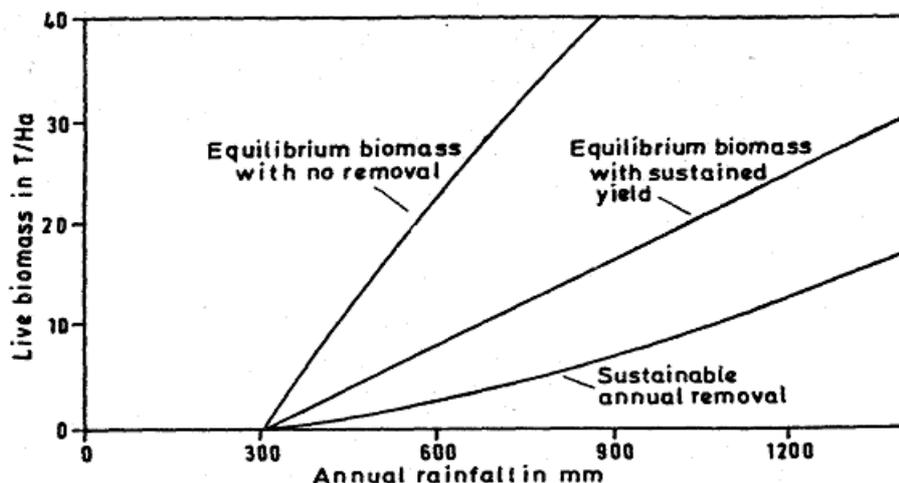


Fig. 2: quantità di biomassa presente sul terreno in funzione della pioggia annua (da Soil Erosion - edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan, J. Wiley & Sons)

I due valori corrispondono a situazioni ben distinte. La prima è quella di un terreno dal quale non ci sia rimozione della copertura vegetale, la seconda è quella di un terreno dal quale annualmente si prelevi una certa quantità di vegetazione. Come si vede dalla figura nel secondo caso il valore di “equilibrio” è nettamente inferiore al primo caso. Nella figura è indicata anche la quantità annua di vegetazione asportabile senza che si inneschi il depauperamento irreversibile del suolo (si rompa la condizione di equilibrio). Come si vede la differenza tra i due valori di biomassa (a pari piovosità) è sempre maggiore della quantità annua di copertura vegetale asportabile. Se si scende a valori al di sotto di quelli della curva di equilibrio inferiore, si innesca il procedimento di desertificazione di cui si è detto sopra.

Questo avviene, per esempio, se una parte di territorio è utilizzato per il pascolo ed il numero di animali mantenuto su di esso è eccessivo: anno dopo anno bisognerà spostare e allargare l'area a pascolo fino ad utilizzare completamente il terreno disponibile, che verrà progressivamente spogliato e che andrà, inevitabilmente, verso la desertificazione. Questo fatto è avvenuto in molti paesi del terzo mondo ove, ad una diminuzione di piovosità annua, conseguente al cambiamento del clima, non ha fatto seguito, da parte degli utilizzatori del terreno, una corrispondente diminuzione dello sfruttamento del territorio, per il pascolo o per altri scopi.

4. CENNI SULLA MECCANICA DELL'EROSIONE

Il fenomeno fisico dell'erosione consiste di due fasi, la prima di *distacco* dal suolo del materiale, la seconda di *trasporto* dello stesso. I due processi sono dovuti all'azione dell'acqua e del vento. Quando l'energia disponibile per il trasporto non è più sufficiente interviene una terza fase, complementare, che è quella di *deposito*.

Consideriamo soltanto l'erosione dovuta alla pioggia (che è quella più comune nei climi umido temperati).

Distacco

L'azione esercitata dall'impatto della pioggia è la causa principale del distacco, mentre contribuisce solo minimamente al trasporto. La pioggia che colpisce il terreno possiede una quantità di moto che può provocare direttamente il distacco delle particelle spostandole anche di qualche centimetro (in quantità inversamente proporzionale alla coesività del suolo) o che comunque, ne indebolisce la struttura rendendo più facile il distacco da parte delle piogge successive. La componente del vettore quantità di moto parallela al terreno viene completamente trasferita alla superficie del terreno, mentre solo una piccola parte della componente normale al terreno viene trasmessa: la rimanente parte viene dissipata nell'effetto di “rimbalzo” dovuto all'elasticità dell'urto. La componente normale dà conto dell'effetto di compattazione del suolo, che si osserva nei primi mm di spessore (da 0.1 a 3 mm) mentre la componente tangenziale è la responsabile dell'effetto di dispersione laterale delle particelle (prevalentemente verso valle). Considerando l'energia cinetica richiesta per il distacco di una determinata massa di sedimento in seguito all'impatto delle gocce, si nota che esiste una relazione tra granulometria e energia necessaria al distacco. Misure sperimentali hanno mostrato che l'energia cinetica specifica (Jm^{-2}) necessaria per distaccare un kg di sedimento dal terreno assume il valore minimo se il terreno è costituito da particelle con granulometria compresa tra 0.06 e 0.25 mm. Per particelle di diametro inferiore aumenta la resistenza dovuta alle forze di superficie di legame chimico (soprattutto in presenza di argilla); per i diametri superiori la resistenza è dovuta essenzialmente alle forze di massa. I suoli più vulnerabili sono quindi quelli limosi, limoso-sabbiosi e le sabbie fini. A seconda dello spessore dello strato d'acqua che può ricoprire il terreno si possono avere effetti di protezione o di incremento dell'erosione dovuto all'impatto delle gocce. Per piccoli spessori (molto più piccoli del diametro delle gocce) si ha un effetto di amplificazione dell'azione delle gocce, causato dalla turbolenza che l'impatto impartisce all'acqua. All'aumentare dello spessore dell'acqua, viene raggiunta una profondità “critica”, oltre la quale l'erosione decresce in modo esponenziale, perché la maggior parte dell'energia viene dissipata nell'acqua e non provoca effetti sulla superficie del suolo. Esperimenti di laboratorio mostrano che la profondità critica può variare approssimativamente dal diametro della goccia ad $1/5$, $1/3$ di tale diametro in funzione della natura del suolo. La quantità di particelle distaccate dall'effetto di impatto delle gocce ed i parametri energetici caratteristici dell'evento piovoso, possono essere legati attraverso relazioni sperimentali. Considerando l'intensità di pioggia I (mmh^{-1}) e la pendenza locale S^1 (mm^{-1}) la quantità D (mmh^{-1}) di terreno distaccato può essere espresso con le relazioni:

¹ Il fattore S si riferisce alla pendenza locale del terreno, intesa entro una distanza equivalente a pochi diametri di goccia dal punto dell'impatto. Per questa ragione le relazioni seguenti hanno valore puramente teorico sperimentale.

$$(5) \quad D \propto I^a S^c$$

in cui il valore dell'esponente a è prossimo a 2 per molti tipi di terreno e c può variare tra 0.2 e 0.3. Una relazione proposta per a è la seguente:

$$(6) \quad a = 2 - (0.01 \times \% \text{argilla})$$

Un'altra relazione sperimentale fa comparire l'energia cinetica KE (Jm^{-2}) invece dell'intensità di pioggia:

$$(7) \quad D \propto KE^b S^c e^{-d/h}$$

ove il valore medio di b è circa 1 (può variare da 0.8 per terreni sabbiosi a 1.8 per terreni argillosi), d è mediamente uguale a 2 (può variare tra 0.9 e 3.1) ed h (mm) rappresenta la profondità dell'acqua accumulata sul suolo.

Un altro effetto importante è quello legato alla presenza del vento, che aumenta l'energia cinetica delle gocce in caduta, dando loro anche una velocità orizzontale; il risultato è che, a parità di intensità di pioggia, il fenomeno di distacco può essere incrementato da 1.5 a 3 volte.

I processi climatici (caldo-freddo) e le lavorazioni meccaniche legate alla coltivazione svolgono anch'essi un effetto di indebolimento della struttura del terreno e contribuiscono al distacco.

Trasporto

Per quanto riguarda gli agenti fisici di trasporto si deve distinguere tra quelli che agiscono in modo distribuito e che producono la rimozione di uno spessore di materiale in modo quasi uniforme su un'area di dimensioni anche notevoli e quelli che concentrano la loro azione in "canali" con caratteristiche diverse, e quindi agiscono su aree limitate in larghezza ma che si possono estendere notevolmente in lunghezza.

Del primo gruppo fanno parte l'impatto della pioggia, lo scorrimento superficiale quando avviene sotto forma di moto piano (sheet flow) caratterizzato da un tirante molto piccolo rispetto alle altre due dimensioni, e l'azione del vento. Questi agenti sono in grado di muovere o di trascinare soltanto le particelle più fini inglobandole.

Del secondo gruppo fanno parte tutte le correnti canalizzate (dimensione prevalente nella direzione del moto). Queste vanno dai rigagnoli (rills) di piccole dimensioni, che hanno spesso carattere temporaneo e possono essere facilmente eliminate dagli eventi naturali o dalla lavorazione del terreno, a quelle di dimensioni più grandi a carattere permanente, come le gole erosive (gullies), i torrenti e i fiumi.

Se si considera il fenomeno erosivo dovuto all'azione dell'acqua su di un versante si può notare che nella parte alta, al di sotto della cima del rilievo, per una certa distanza non si ha praticamente trasporto.

Infatti lo scorrimento superficiale, che si manifesta soltanto dopo che il terreno è stato saturato (o per un'intensità di pioggia superiore alla velocità d'infiltrazione del terreno) e dopo che sono state riempite le depressioni superficiali, diventa erosivo soltanto ad una certa distanza dall'inizio del pendio. E' necessario infatti che la portata raggiunga un livello di soglia che dipende dalla pendenza del terreno e dalla copertura vegetale. Siccome queste non sono mai uniformi è praticamente impossibile che si verifichi un vero moto piano, ma il moto ha *solo mediamente* le caratteristiche di un moto piano. Di conseguenza anche il fenomeno erosivo sarà solo mediamente uniforme e si potranno verificare una successione di zone di erosione e di zone di deposito. Il fenomeno resta comunque un fenomeno distribuito.

Il passaggio dall'erosione distribuita all'erosione incanalata avviene quando la velocità media di scorrimento superficiale eccede la velocità critica di attrito necessaria perché l'erosione non sia più selettiva per quanto riguarda la dimensione delle particelle, cosicché sia le particelle più fini, sia quelle di maggior dimensione, possono essere inglobate e trascinate via dalla corrente. In questo modo vengono scavate le incisioni nel terreno.

La formazione delle piccole canalizzazioni (rills) è quindi legata ad una "distanza critica" che dipende dalla pendenza del terreno, dalla sua natura e dalle condizioni in cui si trova la superficie. Infatti la presenza di componenti trasversali nel moto piano, dovuti all'irregolarità del terreno, ed il progressivo aumento del numero di Reynolds (turbolenza) e del numero di Froude conseguente all'aumento di portata che si verifica procedendo verso valle, fa sì che ad una certa distanza dall'inizio dello scorrimento superficiale la corrente tenda a concentrarsi, aumentando la sua azione erosiva. Il fenomeno della canalizzazione si estende poi da valle verso monte.

La gola erosiva (gully) è un'incisione permanente di pendenza notevole e piuttosto instabile (si può modificare notevolmente durante gli eventi piovosi) interessata dalla corrente soltanto durante le piogge (se si escludono piccoli apporti dalla falda). Le gole erosive si possono formare sia come sviluppo dell'erosione incanalata (rills), sia direttamente, se le pendenze sono notevoli, in conseguenza di una variazione dell'afflusso meteorico o

della copertura vegetale. Rispetto ai corsi d'acqua "stabili" che presentano, da monte a valle, un profilo concavo verso l'alto con una graduale diminuzione della pendenza, le gole erosive sono caratterizzate da un profilo longitudinale che presenta una successione di tratti a forte e debole pendenza con brusche variazioni: non è raro incontrare brevi tratti in contropendenza. La larghezza delle gole erosive è normalmente piccola rispetto alla profondità. Sono caratterizzate da un forte trasporto solido associato a erosione locale (prevalente nella parte di monte a maggiore pendenza) e la loro instabilità sia trasversale che longitudinale rende difficile il loro studio. La presenza di gole erosive è sempre associata ad un processo di erosione accelerata e quindi ad instabilità dei versanti.



Esempio di erosione superficiale distribuita (sheet erosion)



Esempio di erosione superficiale incanalata (rill erosion)



Esempio di gole erosive (gully erosion)

Se si considera il fenomeno erosivo a livello di meso-scala e di macro-scala si può affermare che la maggior parte del materiale proviene da erosione incanalata (rill e gully erosion).

In generale si ammette che il distacco $T(x,t)$ sia proporzionale alla differenza tra lo sforzo tangenziale applicato $\tau(x,t)$, che dipende dalle caratteristiche della corrente e del contorno secondo la relazione ben nota $\tau=\gamma RS$, ove γ è il peso specifico dell'acqua, R il raggio idraulico (coincidente col tirante nel caso di moto piano) e S la pendenza motrice, e la resistenza critica al taglio τ_{crit} , funzione delle caratteristiche del materiale potenzialmente asportabile. Qualitativamente si può scrivere:

$$\begin{aligned} (8) \quad T(x,t) &= C(x,t)[\tau(x,t) - \tau_{crit}(x,t)] \quad \text{se } \tau > \tau_{crit} \\ (9) \quad T(x,t) &= 0 \quad \text{se } \tau < \tau_{crit} \end{aligned}$$

Nella (8) C è un coefficiente di proporzionalità che tiene conto dell'erodibilità del suolo; x è la coordinata spaziale che individua la posizione lungo il pendio e t è il tempo.

In generale la grandezza del fenomeno erosivo dipende sia dalla quantità di materiale reso disponibile dal distacco, che dalla capacità di trasporto degli agenti fisici erosivi. Quando prevale la capacità di trasporto (il materiale disponibile è inferiore a quanto potrebbe essere trasportato) si dice che l'erosione è limitata dal distacco. Nel caso contrario essa è limitata dal trasporto ed interviene il fenomeno del deposito.

5. LA MODELLAZIONE DELL'EROSIONE

La maggior parte delle conoscenze attuali sul fenomeno dell'erosione proviene dal lavoro, iniziato negli anni 30, dal Servizio di Conservazione del Suolo (S.C.S) degli U.S.A., che, negli anni compresi tra il 1920 e 1930, ha dovuto affrontare gravissimi problemi di erosione connessi all'utilizzazione agricola del terreno in alcune zone del paese. In conseguenza l'impostazione generale e le prime ricerche furono mirate alla determinazione di metodologie pratiche che potessero essere utilizzate per la pianificazione dell'uso agricolo del suolo. Per questa ragione i primi studiosi rivolsero la loro attenzione alla comprensione dei fenomeni fisici che influiscono e partecipano all'erosione e alla identificazione delle grandezze ed dei parametri in gioco. Contemporaneamente venivano effettuate un grande numero di misure, classificazioni e correlazioni, facendo riferimento sia a casi reali sia a situazioni tipo ricreate in laboratorio sul "modulo standard" (standard plot) che è un piano inclinato con pendenza costante del 9%, lungo 22.13 m (72 piedi) e largo 1.83 m (6 piedi).

Le prime relazioni proposte furono essenzialmente di tipo euristico e fortemente legate alle condizioni locali. Successe così che, se l'effetto di alcuni parametri, che entrano in gioco nel complesso fenomeno dell'erosione, erano localmente poco significativi le relazioni proposte ad interpretare il fenomeno non ne tenevano conto.

Ad esempio di questo fatto si riporta una delle prime formule proposta da Zingg nel 1940:

$$(10) \quad E = CS^m L^{n-1}$$

in cui E è la perdita di suolo per unità di area da un pendio di larghezza unitaria, C è una costante di taratura, S è la pendenza del pendio e L è la lunghezza (proiezione orizzontale) del pendio (libero percorso di scorrimento). Per m e n Zingg propose i valori di 1.4 e 1.6. In questo caso nella costante C sono compresi gli effetti legati all'erosività della pioggia, all'erodibilità del suolo, alla copertura vegetale e alle pratiche colturali.

L'influenza diretta delle caratteristiche della pioggia sull'erosione fu introdotta per la prima volta da Musgrave nel 1947. Gli studi da lui fatti analizzando molti dati relativi a diverse stazioni di misura degli U.S.A. (stati centrali e orientali) lo portarono a ipotizzare la dipendenza dell'erosione dalla massima altezza di pioggia di durata pari a 30 minuti elevata ad 1.75, dalla pendenza del suolo S e dalla lunghezza del libero percorso L elevati rispettivamente a 1.35 e a 0.35. Musgrave introdusse anche la dipendenza diretta dalla copertura vegetale e dall'erodibilità del suolo. L'equazione proposta da Musgrave era la seguente:

$$(11) \quad E = (0.00527) I R S^{1.35} L^{0.35} P_{30}^{1.75} \quad \text{ove:}$$

E è la perdita di suolo per erosione in mma^{-1} ;
 I è l'erodibilità del suolo (riferita al modulo standard);
 R è il fattore di copertura vegetale;
 S è la pendenza del tratto soggetto all'erosione in %;
 L è la lunghezza del tratto soggetto all'erosione in m;

P_{30} è la massima altezza di pioggia di 30 minuti in mm.

La maggior conoscenza del fenomeno e, soprattutto, l'aumento delle misure disponibili relative a situazioni molto differenti ed a località situate in diverse parti del mondo, ha portato a proporre molte formule pratiche tuttora in uso di cui la più famosa è la "Equazione universale per l'erosione del suolo" (Universal Soil Loss Equation: USLE). Tutte le relazioni sopraelencate (Zingg, Musgrave, USLE) ed altre simili sono esempi di *modelli empirici*, che costituiscono un primo traguardo nella ricerca della modellazione dei fenomeni erosivi, e consentono di far fronte egregiamente alle esigenze pratiche. La conoscenza della meccanica dell'erosione nei suoi vari momenti (distacco, produzione e trasporto del sedimento), è oggi notevolmente migliorata ed attualmente il grado di conoscenza raggiunto, associato al sempre crescente numero di misure sperimentali (essenziali per validare i modelli), consente la modellazione matematica dell'erosione del suolo in tutta la sua complessità. Questi modelli più complessi sono i *modelli fisicamente basati*.

6. I MODELLI EMPIRICI

Come già accennato si tratta di modelli che consistono in relazioni tra le grandezze fisiche che intervengono a definire il fenomeno. Queste relazioni sono ricavate su base statistica, utilizzando tutta una serie di misure sperimentali. Sono classificabili in modelli di tipo black-box, grey-box e white-box.

- Black-box: compaiono esplicitamente solo le due variabili di ingresso ed uscita senza che sia rappresentata in alcun modo la complessità del fenomeno fisico;
- Grey-box: sono rappresentati solo alcuni aspetti del reale fenomeno fisico e compaiono più variabili;
- White-box: sono noti e rappresentati (anche se in modo empirico) tutti i dettagli del fenomeno.

I modelli più semplici (black-box) sono, per esempio, del tipo:

$$(12) \quad Q_s = aQ^b,$$

utilizzabili per quantizzare il trasporto solido nei corsi d'acqua, ove Q_s è la portata solida e Q la portata liquida. I valori da assegnare ai coefficienti a e b sono ricavati interpolando misure di portata solida e liquida (relative alla stessa sezione) in numerose stazioni di misura. Il coefficiente a dà conto della grandezza del fenomeno erosivo (erosione per unità di portata liquida). La semplicità di questi modelli è però fortemente limitata nell'uso dal fatto che i coefficienti variano stagionalmente con il regime di portata e, per i singoli eventi di piena, tra le due fasi di salita e di recessione riscontrabili nell'idrogramma.

Altri modelli più complessi (tipo grey-box) fanno riferimento all'aggressività della pioggia, definita dal rapporto p^2/P ove p è la maggior altezza di pioggia mensile nell'anno e P il totale di pioggia annua, entrambe in mm, e ad altri parametri che intervengono nel fenomeno erosivo. Fournier (1960) ha trovato una forte correlazione tra la produzione di sedimento di un bacino, misurabile alla sezione di chiusura, e il rapporto p^2/P e alcune caratteristiche morfologiche del bacino.

Dall'analisi delle misure relative a 78 bacini Fournier ha proposto la seguente relazione:

$$(13) \quad \log(Q_s) = 2.65 \log(p^2/P) + 0.46 \log(H)\tan(S) - 1.56$$

ove Q_s è la produzione di sedimento annua in gm^{-2} , H è l'altitudine media del bacino in m e S la pendenza media del bacino in gradi. Questa relazione, che viene spesso considerata di validità generale, è comunque limitata nell'uso se si considerano valori di ingresso (p^2/P , H e S) molto al di fuori del campo dei valori di taratura. Lo stesso Fournier ha infatti proposto relazioni alternative più semplici (tipo black box) valide per specifiche condizioni di H e S (tipologia del bacino) e per specifiche condizioni climatiche. Le relazioni, in cui Q_s è la produzione di sedimento in tkm^{-2o-1} , sono le seguenti:

$$(14) \quad Q_s = 6.14 p^2/P - 49.78$$

valida per bacini con rilievi dolci (pendenza dell'asta principale $< 1/100$) e $p^2/P \leq 20$;

$$(15) \quad Q_s = 27.12 p^2/P - 475.40$$

valida per bacini con rilievi dolci (pendenza dell'asta principale $< 1/100$) e $p^2/P > 20$;

$$(16) \quad Q_s = 52.49 p^2/P - 513.20$$

valida per bacini con rilievi elevati (pendenza dell'asta principale $>1/100$) e $P > 600$ mm;

$$(17) \quad Q_s = 91.78 p^2/P - 737.62$$

valida per bacini con rilievi elevati (pendenza dell'asta principale $>1/100$) e $200 \leq P \leq 600$ mm.

Il metodo proposto da Fournier non è applicabile per quei bacini per cui $P < 200$ mm.

6.1 L'equazione universale dell'erosione del suolo (U.S.L.E.)

E' l'equazione più ampiamente utilizzata negli USA da chi si occupa di conservazione del suolo. Si scrive:

$$(18) \quad E = R K L S C P$$

E = quantità di terreno erosa (dimensionale)

R = fattore di erosività della pioggia (dimensionale)

K = fattore di erodibilità del suolo (dimensionale)

L = fattore di lunghezza (adimensionale)

S = fattore di pendenza (adimensionale)

C = fattore di coltivazione (adimensionale)

P = fattore di pratica colturale e/o antierosiva (adimensionale).

La formula USLE vale a livello locale (mesoscala) e su lunghi periodi: non può essere usata per stimare il prodotto di sedimento da un bacino o la perdita di suolo relativa ad un singolo evento. E' stata provata su terreni con pendenze non superiori al 16% e quindi estrapolazioni a valori superiori devono essere confermati da misure sperimentali. Può essere utilizzata per verifica (dalla situazione esistente ricavare E) o per progetto (trovare C e P che riducano E a valori accettabili).

Che la USLE sia un modello di tipo empirico è evidente nel fatto che un meccanismo complicato come l'erosione del suolo (somma di tanti fenomeni non lineari) non può essere rappresentato da un semplice prodotto. Si tratta comunque di un modello tipo white box, in quanto in esso compaiono esplicitamente tutte le grandezze (cause) che partecipano fisicamente a produrre l'erosione (effetto). La formula è stata messa a punto per gli U.S.A.; la sua utilizzazione in aree esterne dà solo risultati molto approssimati.

La quantità E è espresso nella stessa unità di misura del prodotto KR. K è l'erodibilità del suolo *per unità di erosività della pioggia* (si può chiamare erodibilità specifica). E è misurata in $t \times ha^{-1}$ nel Sistema Internazionale o metrico (S.I.) mentre è misurata in $tons^1 \times acre^{-1}$ nel Sistema Americano (U.S.).

6.1.1 Il fattore di erosività della pioggia R

E' solitamente definito come combinazione di due caratteristiche della pioggia: KE_t , energia cinetica totale della pioggia e I_{30} , massima intensità dello scroscio di 30 minuti. Il *prodotto* di queste grandezze dà conto dell'effetto combinato dell'impatto delle gocce e della turbolenza (introdotta nello scorrimento superficiale) sul trasporto delle particelle solide. Non mancano comunque, per la valutazione di R, proposte alternative.

6.1.1.1 Energia cinetica di uno scroscio

Sono stati proposti diversi modelli interpretativi del fenomeno. Nelle relazioni che compaiono di seguito l'intensità di pioggia I è in mmh^{-1} e l'energia cinetica KE specifica (per unità di pioggia caduta) è in $Jm^{-2}mm^{-1}$. Quasi tutti i modelli rappresentano KE con una relazione del tipo

$$(19) \quad KE_j = a + b \times \log_{10} I_j ;$$

¹ si considera la ton anglosassone di 2000 lbs corrispondente a 0.907 t metriche (1000 kg); l'acro corrisponde a 0.4047 ha; ne consegue che $1 t \times ha^{-1} = 0.446 tons \times acre^{-1}$

ove j è l'indice dello scroscio. I coefficienti a e b hanno valori differenti in quanto ricavati da osservazioni e misure effettuate in ambienti differenti

Autori	a	b	zona
Laws e Parsons, Wischmeier e Smith	11.87	8.73	USA
Mason e Ramandham, Carte, Houze et al.	8.95	8.44	USA
Zanchi e Torri	9.81	11.25	Italia
Onaga, Shirai e Yoshinaga	9.81	10.6	Giappone

Si differenzia come forma il modello di Hudson (1965), proposto per le piogge tropicali e tarato da dati relativi allo Zimbabwe:

$$(20) \quad KE_j = 29.8 - 127.5/I_j;$$

6.1.1.2 Energia cinetica totale di un intero evento piovoso

Per una evento piovoso composto di n scrosci ($j=1, \dots, n$) di intensità I_j (mmh^{-1}) e durata T_j (h) si ottiene per l'energia cinetica totale:

$$(21) \quad KE_t = \sum_{j=1}^n KE_j I_j T_j \quad \text{Jm}^{-2}$$

Un metodo alternativo proposto da Hudson (1965) per la stima di KE_t consiste nel considerare all'interno della pioggia solo il contributo degli scrosci con intensità maggiore di 25 mmh^{-1} . Si definisce una grandezza chiamata $KE>25$:

$$(22) \quad KE>25 = KE_t = \sum_{j=1}^n KE_j I_j T_j \quad \text{Jm}^{-2} \quad \text{con } I_j > 25 \text{ mmh}^{-1}$$

L'ipotesi di Hudson è basata su misure effettuate in climi tropicali (Africa) in località ove le piogge di debole intensità producono poca erosione. Una proposta simile ed alternativa è quella di Morgan (1980) che ha proposto la soglia di 10 mmh^{-1} per estendere il metodo anche ai climi temperati. Si definisce la grandezza $KE>10$:

$$(23) \quad KE>10 = KE_t = \sum_{j=1}^n KE_j I_j T_j \quad \text{Jm}^{-2} \quad \text{con } I_j > 10 \text{ mmh}^{-1}$$

6.1.1.3 Calcolo dell'indice R

E' stato dimostrato da Wischmeier, mediante una serie di analisi regressive su dati sperimentali rilevati sul campo e sul modulo standard, che esiste una alta correlazione tra la quantità di suolo eroso e il prodotto della energia cinetica totale KE_t per la massima intensità dello scroscio di durata 30 minuti. In base a questa osservazione R viene usualmente definito (Wischmeier e Smith) come:

$$(24) \quad R = KE_t I_{30} \quad \text{Jm}^{-2} \text{mmh}^{-1}$$

Gli studi hanno mostrato che la dimensione delle gocce non continua ad aumentare con l'intensità di pioggia. Di conseguenza il limite superiore per KE_j (da usare nel calcolo di KE_t) è, secondo Wischmeier e Smith, di 28.3 Jm^{-2} quando l'intensità corrispondente I_j è $\geq 76.2 \text{ mm/ora}$ (3 inh^{-1}). Una limitazione analoga viene proposta anche per I_{30} , il cui valore limite superiore, da usare nella (24) è 63.5 mmh^{-1} (2.5 inh^{-1}).

E' necessario dire, a questo punto, come il valore di R viene *quantizzato in unità erosive per la sua utilizzazione pratica all'interno della U.S.L.E.* Nella formulazione originale di Wischmeier nel Sistema Americano (U.S.) ove KE_t è in $\text{foot-tons} \times \text{acre}^{-1}$ e I_{30} in $\text{in} \times \text{h}^{-1}$, R è dato *in unità erosive* dalla relazione $R = KE_t \times I_{30} / 100$. Nel Sistema Internazionale (S.I.) dove KE_t è in $\text{J} \times \text{m}^{-2}$ e I_{30} è in $\text{mm} \times \text{h}^{-1}$ il valore dell'indice R è espresso *in unità erosive* dalla relazione $R = KE_t \times I_{30} / 1000$. Si passa dalle American Units (A.U.) alle Unità Metriche (U.M.) multi-

plicando il valore di R in A.U. per 1.73¹: $R_{UM} = 1.73 R_{AU}$. La divisione per 100 e 1000 è puramente convenzionale (per non dover trattare numeri troppo grandi).

A causa della non sempre facile reperibilità di misure continue di pioggia, dalle quali sia possibile ricavare R con il metodo sopra esposto, è a volte necessario stimare il valore di R in modo più semplice. Riportiamo di seguito alcune formule utilizzate allo scopo. *E' importante osservare che esse hanno, in buona sostanza, validità spazialmente limitata in quanto ricavate mediante correlazioni su dati sperimentali locali.*

Un metodo alternativo proposto da Morgan per la stima di R consiste nel porre $R = KE > 25$ in Jm^{-2} calcolato con la (24). In questo caso non entra in gioco la massima intensità dello scroscio di 30 minuti che è, molto spesso, una quantità difficile da conoscere. Il valore dato dalla (24) deve essere diviso per mille per trasformarlo in U.M.:

$$(25) \quad R = KE > 25 / 1000 \quad U.M.$$

Un altro metodo proposto per l'Africa Occidentale è quello di utilizzare come *indice R* il prodotto $0.5 \times P$, ove P è la media dell'altezza totale di pioggia annua in mm. *Il valore trovato è direttamente in A.U.* Questo metodo è stato proposto da Roose elaborando dati della Costa d'Avorio e del Burkina Faso. Passando alle U.M.:

$$(26) \quad R = 1.73 \times 0.5 \times P \quad U.M.$$

Per la Penisola Malese Morgan ha proposto come indice di energia totale media annua la quantità:

$$(27) \quad E_{v_a} = 9.28 \times P - 8838.15,$$

con P (mm) valor medio del totale di pioggia annua. L'indice R diventa allora:

$$(28) \quad R = E_{v_a} \times I_{30} / 1000 \quad U.M.$$

con $I_{30} = 75 \text{ mmh}^{-1}$ (valore a cui l'energia cinetica dello scroscio raggiunge il valore massimo) se non si è in grado di stimare I_{30} a partire dai dati, oppure il limite per I_{30} di Wischmeier pari a 63.5 mmh^{-1} .

6.1.2 Il fattore di erodibilità del suolo K

Il fattore K di erodibilità del suolo dà conto della facilità con cui esso può essere eroso. Il valore di K dipende dalle caratteristiche del suolo, cioè, in definitiva, dalla tessitura, dalla struttura, dai componenti e dal valore dei parametri idraulici che definiscono i rapporti acqua-terreno.

Misure dirette del fattore di erodibilità del suolo sono state fatte per 23 tipi di suolo negli USA, per i quali il valore di K risulta ben definito. Tutti i valori ricavati sono relativi a un fattore di erosività unitario ($R=1$) ed a condizioni di terreno spoglio senza pratiche antierosive. Sono inoltre riferite, per quanto riguarda la lunghezza di libero scorrimento e la pendenza, al modulo standard.

In conseguenza della difficoltà di effettuare sempre misure dirette è stato fatto uno studio più generale che ha portato a descrivere K usando 15 proprietà del suolo e le loro interazioni. A questo si è arrivati attraverso una regressione multipla su 24 termini. Eliminando i termini meno significativi è stato possibile descrivere al meglio K in funzione delle caratteristiche del suolo. I risultati di questi studi sono reperibili in letteratura.

Per semplificare ulteriormente il calcolo è infine stato proposto un nomogramma (Fig. 3) con il quale è possibile ricavare K dalla conoscenza del valore di 5 soli parametri che identificano il suolo. Essi sono:

- 1) percentuale di limo e sabbia fine ($d \leq 0.1 \text{ mm}$);
- 2) percentuale di sabbia ($0.1 \leq d \leq 2.0 \text{ mm}$);
- 3) percentuale di materiale organico (O.M.);
- 4) struttura;
- 5) permeabilità.

I valori di K ricavati utilizzando il nomogramma sono soggetti agli errori insiti nel metodo di stima, a maggior ragione se è necessario estrapolare (per esempio se il contenuto di materia organica è superiore al 4%).

Ricordiamo che il valore di K così trovato è valido sia nel sistema di misura internazionale che in quello americano. Il prodotto KR sarà in $t \times ha^{-1}$ se R è in U.M. mentre è in $tons \times acre^{-1}$ se R è in A.U.

¹ ricordiamo che 1 ton = 907 kg = 907 x 9.8 N, 1 foot = 0.305 m, 1 acre = 4047 m², 1 inch = 0.254 m; la costante per passare da un sistema all'altro è quindi 0.173..., che diventa 1.73 se in un caso si divide per 100 (AU) e nell'altro per 1000 (U.M.).

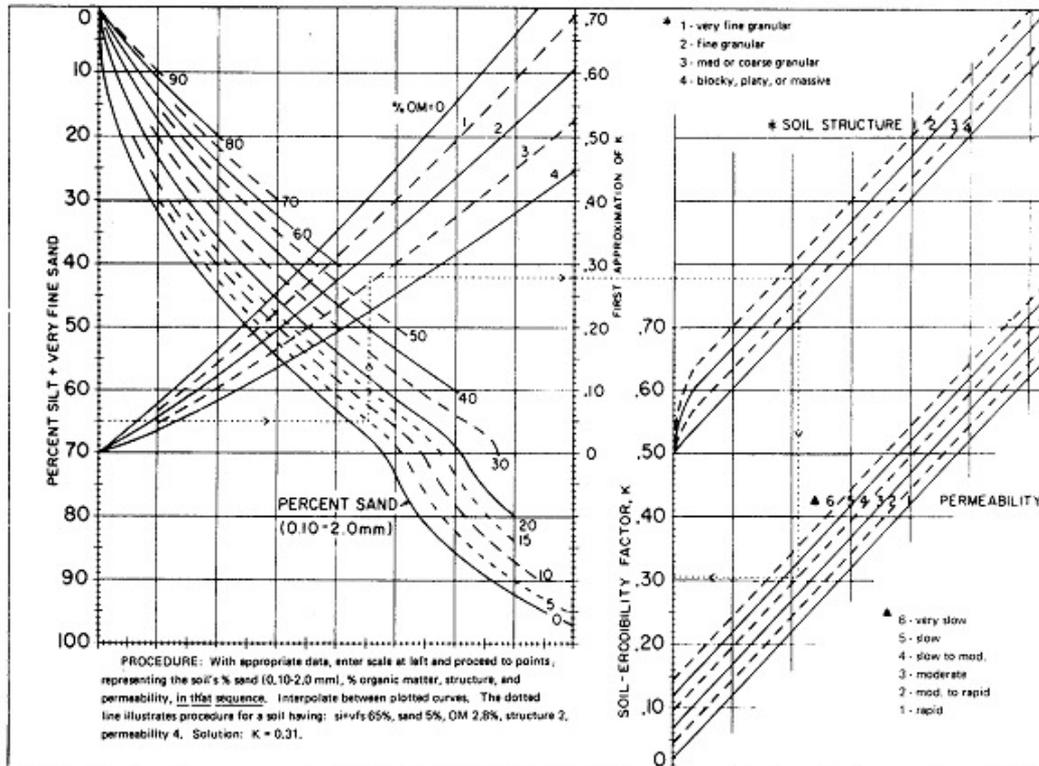


Fig. 3: Nomogramma per la determinazione del fattore K di erodibilità del suolo (ARS,1975)
 (da Soil Erosion edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan – J. Wiley & Sons)

6.1.3 I fattori di lunghezza L e di pendenza S

Questi due fattori sono spesso valutati come un singolo fattore LS. Essi sono ricavati facendo riferimento ad un tratto di terreno di pendenza costante s (%) e di lunghezza x (m). Quest'ultima è definita come la distanza lungo il pendio, misurata dal punto di inizio dello scorrimento superficiale, a quello in cui inizia il deposito di materiale eroso.

Le relazioni proposte sono state ricavate da prove fatte sul modulo standard. Per L si propone la relazione:

$$(29) \quad L = \left(\frac{x}{22.13} \right)^m$$

con m dato da:

- $m=0.5$ per $s \leq 5\%$
- $m=0.4$ per $3\% \leq s < 5\%$
- $m=0.3$ per $1\% \leq s < 3\%$
- $m=0.2$ per $s < 1\%$

Per S si propone la relazione:

$$(30) \quad S = \frac{0.43 + 0.3s + 0.04s^2}{6.613}$$

In Fig. 4 è riportato un grafico per la determinazione diretta del fattore LS.

Per pendii con pendenza variabile è necessario suddividere l'intero tratto di lunghezza x_t in n tratti con pendenza costante. A questo punto il fattore LS per l'intero tratto può essere calcolato con la relazione:

$$(31) \quad SL = \frac{\sum_{j=1}^n (S_j x_j^{m+1} - S_{j-1} x_{j-1}^{m+1})}{x_c 22.13^m}$$

con:

x_j = distanza dall'inizio del pendio alla fine del tratto j^{mo} in m;
 x_{j-1} = distanza dall'inizio del pendio all'inizio del tratto j^{mo} in m;
 S_j = il valore di S per il tratto j^{mo} calcolato con la (30).

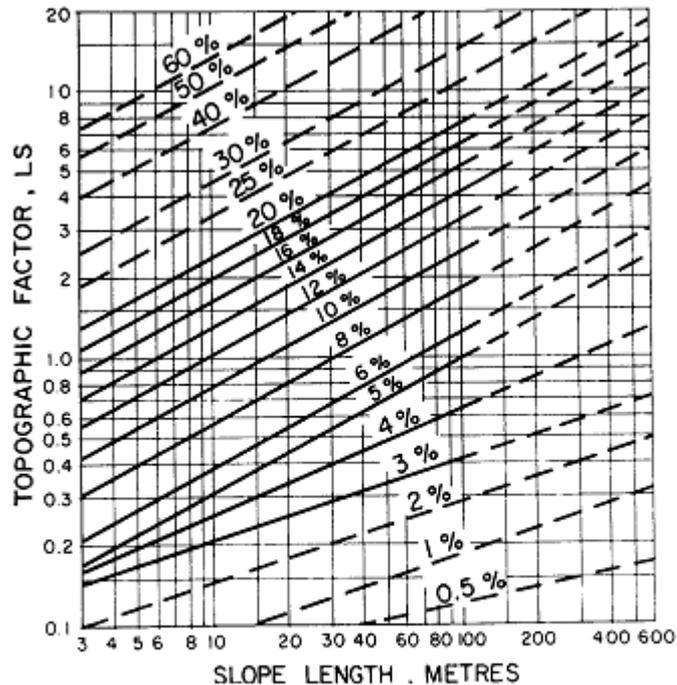


Fig. 4: Nomogramma per la determinazione del fattore LS
 (da Soil Erosion edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan - J. Wiley & Sons)

6.1.4 Il fattore di coltivazione C

Il fattore di coltivazione C è definito come il rapporto tra la quantità annua di suolo eroso da un terreno, su cui viene effettuata una specifica coltura, e la quantità annua di suolo eroso (a parità di tutte le altre condizioni) dalla stesso terreno su cui non viene effettuato alcuna coltura ($C = 1$).

Una gran quantità di misure sperimentali effettuate soprattutto negli U.S.A. ha consentito di ricavare tabelle molto specifiche per l'applicazione con la U.S.L.E.

Poiché la perdita di suolo varia durante l'anno con il prodotto dell'erosività R della pioggia per il fattore C, e la copertura del terreno è legata allo stadio di crescita delle piante o di coltivazione, numerosi studi sono stati fatti in proposito per quanto riguarda la realtà agricola degli U.S.A. (pratiche e calendari colturali): l'anno è stato diviso in periodi, per ognuno dei quali sono stati distinti i differenti stadi di crescita delle colture o di lavorazione agricola. Per ciascuna di queste realtà agro-culturali sono stati raccolti moltissimi dati dal S.C.S., che hanno consentito di allestire tabelle accurate, usando le quali è possibile ricavare, per un ben definito calendario colturale compreso fra quelli considerati, l'andamento di C durante l'anno. A questo punto, se si conosce come varia durante l'anno il fattore R nel sito considerato, è possibile calcolare la quantità $C \times R$ sull'intero periodo come somma di contributi parziali distribuiti:

$$(32) \quad C \times R = \sum_{i=1}^n C_i \times R_i$$

Queste metodologie non sono però appropriate per situazioni esterne agli U.S.A., ove le pratiche rotazionali ed agricole in genere sono diverse. E' quindi conveniente, in questi casi, fare riferimento per C a valore medi annui come quelli riportati in Tab. 2 per alcuni tipi di coltura.

Tipo di coltivazione	Valore medio annuo di C
Foresta o macchia densa con sottobosco	0.001
Savana o prateria in buone condizioni	0.01
Savana o prateria intensamente usata a pascolo	0.1
Mais, sorgo o miglio, alta produttività, bassa produttività	0.5-0.90 0.02-0.1
Cotone	0.4-0.7
Prato	0.01-0.025
Fagioli di soia	0.2-0.5
Riso	0.1-0.2
Grano	0.1-0.4
Patate: a franapoggio, a rittochino	0.1-0.5
Canna da zucchero	0.13-0.4

Tab. 2: valore medio annuo del fattore C per alcuni tipi di coltivazione
(da Soil Erosion & Conservation, R.P.C. Morgan – Longman)

6.1.5 Il fattore di pratica colturale o antierosiva P

Il fattore di pratica colturale o antierosiva P è definito come il rapporto tra la quantità annua di suolo eroso da un terreno su cui è effettuato un tipo ben definito di coltura (di solito ci si riferisce al prato) con una certa pratica colturale e la quantità annua di suolo eroso (a parità di tutte le altre condizioni) dalla stesso terreno con la stessa coltura effettuata con la pratica colturale "up and down hill" (lavorazione nella direzione di massima pendenza) per la quale P=1.

Le pratiche colturali antierosione contemplate nell'U.S.L.E. sono:

- *il terrazzamento* (terracing);
- *la coltivazione secondo le linee di livello* (contouring);
- *la coltivazione a strisce interrotte* (strip cropping);

Terrazzamento

Consiste nel realizzare attraverso il pendio dei terrapieni (terrazzi) con la funzione di interrompere il libero percorso di scorrimento superficiale (riducendo così in pratica la lunghezza del pendio), di intercettare il deflusso e di deviarlo incanalandolo verso percorsi alternativi a quello naturale (fossi) protetti dall'erosione. I terrazzi sono di diverso tipo e di essi si parlerà più avanti.



Esempi di terrazzamento (terracing)

La coltivazione lungo le linee di livello

Consiste nell'effettuare le lavorazioni del terreno non nella direzione di massima pendenza ma seguendo le linee di livello. L'effetto è quello di ridurre lo scorrimento superficiale ed è maggiore se associato alla pratica di coltivazione a strisce interrotte e alternate



Esempi di coltivazione lungo le linee di livello (counturing cropping)

La coltivazione a strisce alternate

Consiste nell'alternare le coltivazioni, disponendo strisce successive di colture a cui corrispondono differenti situazioni di copertura del terreno. Per esempio alternare strisce di mais (classicamente piantato in file regolari) a strisce di prato o di leguminose. La maggior erosione si verifica sulla parte coltivata a mais, meno protetta contro l'azione dell'acqua, ma il materiale eroso viene trattenuto sulle strisce a maggior copertura vegetale (prato).



Esempi di coltivazione a strisce alternate (strip cropping)

Un'altra pratica culturale che riduce l'erosione del suolo e la rotazione delle coltivazioni, che alterna, secondo calendari culturali opportunamente predisposti, coltivazioni più favorevoli all'erosione ad altre meno favorevoli. Il valore di P, per ciascuna di queste pratiche culturali, dipende anche dalla pendenza media del terreno come è illustrato nella Tab. 3.

Pendenza del terreno %	Contouring	Contouring & Strip cropping	Terrazzamento
1-2	0.6	0.3	0.12
3-8	0.5	0.25	0.10
9-12	0.6	0.3	0.12
13-16	0.7	0.35	0.14
17-20	0.8	0.4	0.16
21-25	0.9	0.45	0.18

Tab.3: valore del fattore P per alcune pratiche culturali antierosive in funzione della pendenza del terreno.

(da Soil Erosion, edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan – J. Wiley & Sons)

7. MODELLI FISICAMENTE BASATI

I modelli fisicamente basati sono stati proposti ed utilizzati per stimare la distribuzione spaziale sulla superficie del terreno dello scorrimento superficiale e del flusso di sedimento conseguente ai fenomeni erosivi durante eventi piovosi. I modelli empirici non consentono questo tipo di calcolo, ma sono in grado di stimare, solitamente su base annua, solamente i valori totali di deflusso e di perdita di suolo in un certo periodo di tempo.

I modelli fisicamente basati si appoggiano sulle leggi di conservazione della massa e dell'energia (o della quantità di moto). Il fenomeno erosivo compare nell'equazione di continuità, in forma differenziale, scritta per un breve tratto di canale o di pendio (sistema). La differenza tra la quantità di materiale entrato e uscito (tenuto anche conto del possibile flusso laterale) produce l'erosione o il deposito all'interno del sistema. L'equazione di continuità per l'erosione incanalata (rill erosion) è del tipo:

$$(33) \quad \frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial (QC)}{\partial x} = S(x,t) + Q_s(x,t)$$

ove A (m²) è l'area della sezione della corrente, C è la concentrazione di sedimento (0 ≤ C ≤ 1), Q (m³s⁻¹) è la portata liquida, S e Q_s sono le portate solide per unità di lunghezza (m²s⁻¹) dovute all'erosione e all'apporto laterale (positivo o negativo). Per l'erosione distribuita (interrill erosion) l'equazione, scritta per unità di larghezza, è del tipo:

$$(34) \quad \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = q_s(x,t)$$

ove z è la quota assoluta del suolo (m), s (m^2s^{-1}) è la portata solida per unità di lunghezza e q_s (ms^{-1}) è l'apporto solido laterale per unità di lunghezza. I termini S e s sono funzioni che dipendono dai parametri caratteristici del moto e del sistema; Q_s e q_s sono solitamente condizioni al contorno note.

La prima proposta di modello fisicamente basato può essere fatta risalire a Meyer e Wischmeyer (1969). Il modello proposto calcola, con relazioni semplici, la quantità complessiva (D_t) di materiale staccato dal suolo dall'impatto delle gocce (D_r) e dallo scorrimento superficiale (D_f), insieme con la capacità totale di trasporto (T_t) dovuta ai due fenomeni (T_r e T_f). Dal confronto dei due termini D_t e T_t il modello stabilisce l'erosione effettiva, definendo altresì se essa è limitata dal distacco o dal trasporto. Le equazioni utilizzate nel modello sono le seguenti:

$$(35) \quad D_r = k_1 AI^2$$

$$(36) \quad D_f = k_2 AS^{2/3} Q_w^{2/3}$$

$$(37) \quad T_r = k_3 SI$$

$$(38) \quad T_f = k_4 S^{5/3} Q_w^{5/3}$$

Ove A è l'area della superficie interessata dal fenomeno, I è l'intensità della pioggia, S è la pendenza del suolo ($S = \sin \alpha$ □ □ α è l'angolo con l'orizzontale) e Q_w è lo scorrimento superficiale. I coefficienti k_j , che entrano nella definizione dei vari fenomeni fisici, sono legati alla situazione ambientale ed il loro valore deve essere ricavato in base a misure ed osservazioni.

Uno sviluppo del modello di Meyer e Wischmeyer può essere considerato il modello ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation) proposto da Beasley, Huggins e Monke (1980) per simulare il comportamento idrologico e l'erosione in piccoli bacini ad uso agricolo durante e immediatamente dopo gli eventi piovosi.

Negli anni successivi, grazie anche alla crescita della base dati disponibile, sono stati proposti molti altri modelli, di cui i principali ancora in fase di sviluppo.

Uno dei modelli più utilizzati è il WEPP

WEPP (Water Erosion Prediction Project)

WEPP è un modello progettato e sviluppato sulla base delle più recenti conoscenze nel campo dell'idrologia e dell'erosione dei suoli allo scopo di sostituire (negli U.S.A.) la USLE nella stima dell'erosione legata all'uso agricolo del suolo, fornendo uno strumento utilizzabile con facilità da parte di Organizzazioni, Enti o privati che si occupano di conservazione e di pianificazione ambientale (Nearing et al. 1989). Si tratta dunque di un vero e proprio progetto su scala nazionale e, per questa ragione, nello sviluppo di WEPP sono interessati l'USDA, il NSERL (National Soil Erosion Research Laboratory), l'ARS (Agricultural Research Service) e la Purdue University (Lafayette, In., U.S.A.).

Attualmente il pacchetto WEPP consiste di tre modelli implementati su PC consistenti in un modello per i versanti, uno per i bacini ed un modello a griglia.

Il modello per i versanti (profile version) consente la stima della quantità di materiale staccato e depositato lungo un versante e la perdita complessiva di suolo dal sistema. Può essere applicato ad aree non superiori ai 260 ha. Il modello per i bacini e il modello a griglia (watershed and grid version) estende ai piccoli bacini le potenzialità del modello per i versanti e può tenere conto della presenza di gole erosive.

Tutti i modelli operano in funzione delle condizioni climatiche, delle caratteristiche del suolo, della topografia, dell'utilizzazione del terreno e delle pratiche gestionali e conservative su di esso attuate. I modelli sono progettati per una simulazione continua su una serie di anni, ma possono trattare anche un evento singolo.

Per generare una serie di dati climatici relativi a precipitazione, temperatura, radiazione solare e velocità del vento per località degli U.S.A. (utilizzabili come ingresso a WEPP) si può utilizzare un ulteriore modello di nome CLIGEN (Climate Generator) (Nicks, 1985) fornito nel pacchetto.

WEPP è attualmente sottoposto ad un intensivo programma di prove e valutazione.

Un altro modello molto interessante, ma che è stato abbandonato per mancanza di finanziamenti era il modello EUROSEM

EUROSEM (European Soil Erosion Model)

EUROSEM è progettato per calcolare il trasporto, l'erosione e il deposito di sedimento sulla superficie del terreno in occasione di *un evento di pioggia*. Può essere applicato sia ad *estensioni limitate* (zone coltivate) che a *piccoli bacini* (Morgan, 1994; Morgan, Quinton e Rickson, 1994).

EUROSEM simula esplicitamente l'erosione distribuita (interrill) e incanalata (rill), includendo il trasferimento della fase acqua e del sedimento dalle aree tra le incisioni alle incisioni, tenendo contemporaneamente conto del deposito che può avvenire lungo il percorso. Per simulare l'effetto della copertura vegetale (naturale o da coltivazione) viene utilizzato un approccio fisicamente più realistico, in funzione dell'effetto drenante della copertura fogliare. Il modello tiene conto delle caratteristiche del suolo e delle pratiche di conservazione e coltivazione, nonché della topografia del sistema. Non è in grado di considerare la granulometria del sedimento.

Il modello EUROSEM è stato sottoposto ad una serie intensiva di prove nel Regno Unito, in Danimarca, Italia e Spagna. La sua implementazione è stata abbandonata perché si è ritenuto che il problema dell'erosione superficiale non abbia abbastanza importanza in Europa per essere ulteriormente finanziato.

8. OBIETTIVO DELLA RICERCA SULL'EROSIONE DEI SUOLI

L'obiettivo delle ricerche sull'erosione del suolo è quello definire opportune misure conservative la cui adozione possa ridurre, se non eliminare, i pericoli di eccessiva perdita di suolo e rilascio di sedimento. Pur essendo le tecniche di controllo ormai ben documentate, le basi per la loro scelta e progettazione rimangono fortemente empiriche e si basano sui risultati ottenuti dai tecnici agronomi in molti anni di pratica e sperimentazione. Lo stato attuale di conoscenza, che ha permesso la costruzione dei modelli interpretativi del fenomeno erosivo, è comunque un valido aiuto nel difficile compito di individuare criteri utilizzabili nella pratica per la conservazione del suolo.

Se si considera l'aspetto del fenomeno legato all'uso del suolo per l'agricoltura i criteri conservativi rincorrono l'obiettivo teorico di mantenere l'erosione ad un livello tale che la produzione di suolo e la sua asportazione siano bilanciati nel tempo. In pratica però *ci si accontenta di contenere l'erosione ad un livello che garantisca la fertilità del suolo a medio termine (25-30 anni) intervenendo con fertilizzanti per sostituire gli elementi nutrienti asportati col suolo dall'erosione.*

Con questo restano comunque dubbi sulla validità di un tale obiettivo in paesi dove la produzione di suolo è molto lenta (Europa continentale e Gran Bretagna) e soprattutto per quanto riguarda il problema connesso all'inquinamento di fiumi e laghi legato alla presenza di pesticidi e nutrienti nel materiale eroso. Gli interventi antierosivi sono definiti su diversi livelli spaziali e temporali.

8.1 Livelli temporali di intervento

Prima di specificare la quantità massima di suolo eroso che può essere considerato accettabile, è necessario definire quale sia l'evento erosivo da contrastare. *Solitamente la grandezza dell'evento è definita in termini di superamento di un valore di soglia ben definito.* In pratica si tratta di stabilire qual'è il valore della grandezza, responsabile dell'erosione, oltre la quale questa diventa significativa e non più tollerabile. Per il vento ad esempio si considera critica la velocità di 4 ms^{-1} ad 1 m di altezza sul livello del suolo. Per l'intensità di pioggia sono state proposte 6 mmh^{-1} per la Germania (Richter & Negendank) e di 10 mmh^{-1} per la Gran Bretagna (Morgan).

Questi valori di soglia sono comunque superati troppo frequentemente perché ci si basi su essi per formulare criteri protezionistici. Un approccio alternativo è dunque quello di considerare come critico quell'evento che provoca, effettivamente, un livello di erosione limite.

Anche con questo approccio le difficoltà restano notevoli. La prima riguarda la determinazione del tempo di ritorno dell'evento da considerare. Infatti un singolo evento con tempo di ritorno elevato, per esempio 100 anni, può produrre un'erosione molto maggiore e produrre danni molto maggiori ed estesi di 50 eventi con tempo di ritorno 5 anni. Eventi che hanno la stessa intensità erosiva (tha^{-1}) possono avere tempo di ritorno diverso se sono relativi a differenti processi erosivi (in quanto situati in ambienti differenti), e, per la stessa, a tempo di ritorno uguale possono corrispondere effetti diversi.

Non è dunque possibile definire un unico approccio per la scelta del tempo di ritorno dell'evento di pioggia, in base al quale definire le misure e le pratiche di controllo. *In definitiva la scelta è determinata dal costo di realizzazione degli interventi.* Per esempio la soluzione di compromesso adottata nelle *aree rurali* ove il pericolo

per le vite umane è molto basso, dove sarebbe poco realistico proteggere da eventi con tempo di ritorno di 100 anni perché troppo costoso, è quella di riferirsi per il dimensionamento delle opere (come drenaggi superficiali per la raccolta dell'eccesso di pioggia) ad eventi con *tempo di ritorno di 10 anni*.

Il riferimento ad eventi di pioggia singoli (evento estremo) è piuttosto difficile e porta comunque a restrizioni eccessive. Si fa dunque sempre riferimento al valore totale annuo di suolo eroso in tha^{-1} o kgm^{-2} ($\text{tha}^{-1} = 10 \times \text{kgm}^{-2}$), distinguendo in base alle caratteristiche del suolo ed alla scala spaziale.

Nella Tab. 6 sotto riportata sono indicati (in kgm^{-2}) alcuni valori suggeriti da diversi ricercatori per differenti situazioni.

Un valore di 1.1 kgm^{-2} è di norma ampiamente accettato come valore massimo annuo tollerabile. Questo valore tuttavia è un poco elevato se confrontato con molte misure relative a diverse parti del mondo. Per questa ragione spesso vengono adottati valori mediamente inferiori.

Per suoli sottili e debolmente formati si raccomanda un valore di 0.5 kgm^{-2} , che diventa 0.2 se i suoli sono molto erodibili. Per suoli profondi si propongono valori variabili da 0.2 a 1.1 kgm^{-2} in funzione della profondità delle radici (legata allo spessore del suolo).

Dove l'erosione è, per le caratteristiche naturali, molto elevata come in terreni montuosi con elevate precipitazioni, il valore tollerato è molto più elevato: fino a 2.5 kgm^{-2} .

Meso Scala (livello di campo o di versante)	$\text{Kgm}^{-2}\text{a}^{-1}$
Suoli fertili, profondi, di medio impasto: valori usati nel MidWest americano	0.6 - 1.1
Suoli sottili, altamente erodibili	0.2 - 0.5
Suoli di medio impasto molto profondi, derivati da depositi vulcanici (come in Kenya)	1.3 - 1.5
Suoli profondi : 0 - 25 cm.	0.2
25 - 50 cm	0.2 - 0.5
50 - 100 cm	0.5 - 0.7
100 - 150 cm	0.7 - 0.9
oltre 150 cm	1.1
Valori accettabili per aree fortemente erodibili, come montagne tropicali	2.5
Macro Scala (livello di bacino)	0.2
Micro scala (livello locale)	2.5

Tab. 6: Valori raccomandati di massima perdita annua di suolo tollerabile alle diverse scale spaziali
(da Soil Erosion, edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan – J. Wiley & Sons)

8.2 Livelli di identificazione spaziale

I problemi di erosione intervengono su scale molto diverse che vanno dal singolo sito, ove deve essere realizzata un'opera o un intervento, ad interi bacini di vaste dimensioni. I fattori che influenzano l'erosione variano con la dimensione dell'area interessata e di questo occorre tener conto quando si vogliono adottare misure di protezione. Per esempio da ricerche effettuate in Ohio è stato dimostrato che, mentre per bacini di dimensione inferiore a 0.01 km^2 i fattori che più influenzano la produzione totale di sedimento sono l'energia della pioggia e la copertura vegetale, per bacini superiori ai 15000 km^2 la produzione di sedimento non è correlata alla pioggia ma dipende essenzialmente dallo scorrimento superficiale. In generale, basandosi su molte ricerche relative ai diversi fenomeni fisici legati all'erosione, quali la concentrazione di sedimenti nei fiumi, l'impoverimento dei suoli sui versanti, la densità di drenaggio etc., sono stati determinati gli effetti di scala spaziale sui fattori che influenzano l'erosione. *In pratica, mentre alla macroscala è sostanzialmente il clima che gioca la massima importanza, a livello di mesoscala intervengono anche la litologia ed il rilievo e alla microscala la copertura vegetale ed il microclima.*

In effetti, anche se la maggior parte del materiale eroso dai versanti dei monti, dalle sponde dei corsi d'acqua e dalle incisioni del terreno arriva nel corso d'acqua principale, una parte più o meno grande si deposita lungo la strada, nei tratti a minor pendenza e nelle piane alluvionali, dove resta immagazzinato temporaneamente fino all'evento successivo. Per questa ragione la quantità di materiale eroso espressa per unità di area è maggiore per

piccole superfici e diminuisce quando l'area cresce. Per interpretare questo fenomeno è stata proposta una relazione che lega il sedimento prodotto (misurato nella sezione di chiusura del bacino) all'area drenata elevata a 0.8, ma questo tipo di relazione è suscettibile di correzioni locali, che dipendono dalla proporzione di materiale eroso che giunge nel corso d'acqua, quantità che diminuisce all'aumentare dell'area e al diminuire della pendenza media del bacino.

Di solito si tiene conto in modo globale dell'effetto dell'area scegliendo, come indicato in Tab 6, valori differenti per la massima perdita di suolo tollerabile a livello di macro, meso e microscala: si va da 0.2 (macro scala), a 1.1 (mesoscala) e 2.5 (microscala).

9. VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI EROSIONE

La valutazione del rischio di erosione è la base per la pianificazione degli interventi di protezione. Lo scopo è quello di individuare nell'area in esame le zone soggette allo stesso grado di rischio. Per far questo il primo passo è quello di definire degli *indicatori di rischio erosivo* ed una *metodologia di mappatura*.

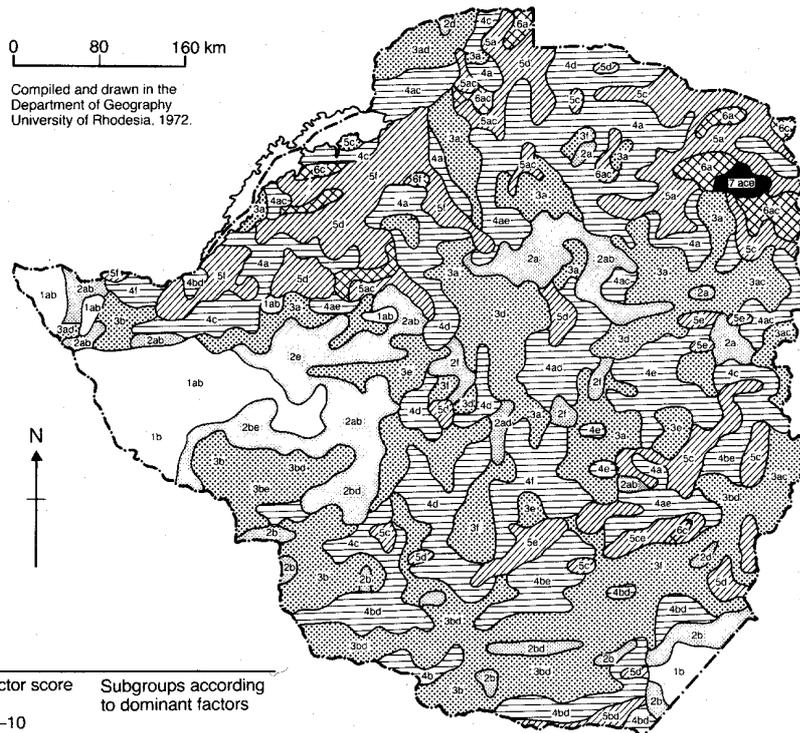
I primi indicatori utilizzati sono stati essenzialmente legati alla morfologia del territorio e quindi ricavabili da cartografia, aerofotogrammetria e sopralluoghi. Così Morgan (1974) utilizzò la *densità di drenaggio*, definita come la lunghezza della rete drenante per unità di area, e la *tessitura del drenaggio*, definita come il numero di corsi d'acqua del primo ordine (secondo la classificazione di Strahler) per unità di area. Quest'ultima è equivalente alla densità di sorgenti e quindi, in prima approssimazione, di gole erosive. Le due grandezze sono incorrelate tra di loro, ma danno conto dei due fenomeni che intervengono nell'erosione. La densità di drenaggio è associata al deflusso conseguente alle piogge moderate e di lunga durata e quindi in definitiva allo scorrimento superficiale, cioè all'erosione distribuita e al trasporto. La tessitura del drenaggio è associata alle piogge intense stagionali e quindi al distacco di materiale e all'erosione incanalata.

Altri indicatori come per esempio la produzione di sedimento in $\text{tha}^{-1}\text{a}^{-1}$, sono legati all'esistenza di misure, in questo caso di trasporto solido nei corsi d'acqua.

Indicatori di rischio erosivo di più difficile definizione ma maggior significatività sono il fattore di erosività R e di aggressività p^2/P della pioggia, definiti nei paragrafi precedenti. In questo caso il valore annuo dell'indice R , che tiene conto dell'andamento pluviometrico annuale, è legato al rischio di erosione dovuto all'impatto della pioggia, allo scorrimento superficiale ed al ruscellamento, mentre l'indice p^2/P , indicatore delle variazioni climatiche stagionali, è legato al rischio di erosione concentrata nelle gole erosive.

Utilizzando gli indicatori di rischio sopra elencati (ed altri ancora qui non citati) è possibile produrre delle mappe di rischio; il punto più difficile è associare al valore assoluto dell'indicatore il valore del rischio, e questo può essere fatto soltanto sulla base di osservazioni e misure della grandezza dei fenomeni erosivi sul territorio e del loro impatto sull'ambiente.

Un altro metodo usato è il *metodo fattoriale* che definisce il rischio come somma del valore che assumono più fattori opportunamente definiti. Ad esempio Stocking & Elwell (1973) usarono come fattori l'erosività della pioggia, l'erodibilità del suolo, la pendenza del terreno, la copertura e l'utilizzazione del suolo (praticamente gli stessi parametri della USLE). Per ciascuno di questi parametri venne definito un valore da 1 a 5, ove il valore 1 era associato a basso rischio di erosione ed il valore 5 ad alto rischio. L'area considerata (Zimbabwe) venne divisa in unità di ugual superficie e per ciascuna di esse si assegnò un valore ai cinque fattori. La somma dei cinque valori definì un punteggio totale che, confrontato con un sistema di classificazione (scelto arbitrariamente) consentì di mappare la zona in base al rischio erosivo. In Fig. 5 si mostra il risultato del lavoro di Stocking & Elwell e le classificazione adottate per i parametri e per il rischio erosivo.



EROSION RISK

Major groups	Factor score	Subgroups according to dominant factors
1	Very low 9-10	
2	Low 11-12	a Erosivity
3	Below average 13-14	b Cover
4	Average 15-16	c Slope
5	Above average 17-18	d Erodibility
6	High 19-20	e Human occupation
7	Very high 21	f No dominant factor

Categories	Erosivity (J mm m ⁻² h ⁻¹)	Cover (mm of rainfall) and basal cover est. (%)	Slope (degrees)	Erodibility	Human occupation*
Low I	below 5000	above 1000 7-10	0-2	orthoferralitic regosols	Extensive large scale commercial ranching National Parks or Unreserved
Below average II	5000-7000	800-1000 5-8	2-4	paraferralitic	Large scale commercial farms
Average III	7000-9000	600-800 3-6	4-6	fersiallitic	Low density CLs (below 5 p.p.km ²) and SCCF
Above average IV	9000-11 000	400-600 1-4	6-8	siallitic vertisols lithosols	Moderately settled CLs (5-30 p.p.km ²)
High V	above 11 000	below 400 0-2	above 8	non-calcic hydromorphic sodic	Densely settled CLs (above 30 p.p.km ²)

(Notes: Cover, Erodibility and Human occupation are only tentative and cannot as yet be expressed on a firm quantitative basis)

*p.p.km² = persons per square kilometre CL = Communal Lands SCCF = Small Scale Commercial Farms

Erosion survey of Zimbabwe (after Stocking and Elwell 1973b).

Fig. 5: Esempio di utilizzazione del metodo fattoriale per la zonazione del rischio di erosione (da Soil Erosion & Conservation - R.P.C. Morgan, Longman)

10. STRATEGIE PER LA CONSERVAZIONE DEL SUOLO

Le misure conservative devono proteggere il suolo dall'azione prodotta sia dall'impatto delle gocce, sia dallo scorrimento superficiale. Quest'azione riguarda sia il distacco di materiale, sia il trasporto vero e proprio. L'effetto di protezione viene ottenuto con misure di carattere agronomico, gestionale e meccanico del suolo.

◆ Le misure di tipo agronomico:

consistono nell'effettuare sul terreno delle coltivazioni che producano una protezione diretta, aumentino la scabrezza, l'infiltrazione e la detenzione superficiale;

◆ Le misure di tipo gestionale del suolo:

consistono nel variare la composizione dello stesso con fertilizzanti naturali o artificiali ed anche la sua struttura con particolari operazioni agricole (epicatura, scasso profondo) che favoriscano la coltivazione riducendo lo scorrimento superficiale e la conseguente erosione;

◆ Le misure di tipo meccanico:

consistono nel realizzare sul terreno interventi e sistemazioni diverse che riducano l'azione erosiva dell'acqua.

La strategia più appropriata di conservazione segue questo percorso:

a) scelta del livello spaziale;

b) identificazione dei fattori che più influenzano l'erosione;

c) determinazione della massima perdita, tollerabile sia su base annua che per singolo evento con assegnato tempo di ritorno;

d) determinazione della miglior tecnica adottabile per intervenire sui fattori che provocano l'erosione controllandoli.

In Tabella 7 sono riportati i tipi di pratiche messe in atto per la conservazione del suolo. La lettera D sta per distacco, la lettera T per trasporto; n = effetto nullo, m = moderato, e = elevato.

Solitamente i migliori risultati si ottengono unendo misure di tipo agronomico agli interventi sul suolo.

Le strategie di conservazione del suolo sono presentate a diverse scale spaziali:

Scala nazionale

A questo livello la strategia consiste nell'identificare le zone ad alto rischio come base per formulare piani di intervento. Le metodologie sono del tipo indicato al Par. 9.

Pratica di conservazione	Controllo su					
	Impatto gocce		Scorrimento superficiale		Vento	
	D	T	D	T	D	T
Di tipo agronomico						
Copertura della superficie	e	e	e	e	e	e
Aumento scabrezza	n	n	e	e	e	e
Aumento immagazzinamento superficiale	m	m	e	e	n	n
Aumento dell'infiltrazione	n	n	m	e	n	n
Di tipo gestionale						
Fertilizzanti, letame	m	m	m	e	m	e
Scasso profondo, drenaggio	n	n	m	e	n	n
Di tipo meccanico						
Coltivazione lungo linee di livello	n	m	m	e	m	e
Terrazzamento	n	m	m	e	n	n
Schermatura	n	n	n	n	e	e
Canalizzazioni	n	n	m	e	n	n

Tab. 7: pratiche di conservazione del suolo

(da Soil Erosion, edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan – J. Wiley & Sons)

Scala regionale

A questo livello solitamente si procede in tre stadi:

1. valutazione e classificazione dei suoli;
2. scelta della loro possibile utilizzazione;
3. determinazione (in associazione al punto precedente) delle misure antierosive da adottare (agronomiche e meccaniche).

L'ultimo punto si propone di rendere minima l'energia disponibile per l'erosione che, a questa scala, è largamente funzione del clima e dell'andamento altimetrico del terreno. Le misure agronomiche (tipo di coltivazione) saranno dirette ad individuare una utilizzazione del suolo che riduca il deflusso diretto, mentre le misure di tipo meccanico saranno utilizzate per eliminare il rischio dovuto allo scorrimento superficiale incontrollato e quindi potenzialmente erosivo. In pratica si costruirà un sistema drenante artificiale che elimini questo pericolo, interrompendo i tratti di libero percorso per l'acqua con terrazzamenti. Nel caso che l'erosione sia dovuta al vento si dovrà intervenire realizzando barriere e scudi protettivi. Per quanto riguarda l'utilizzazione dei suoli, la strada solitamente seguita è quella di effettuare una classificazione degli stessi in base alla possibile utilizzazione agricola. L'ipotesi di partenza, dimostratasi valida, è che l'uso corretto del suolo sia il miglior metodo per combattere l'erosione. Negli U.S.A. ad esempio i suoli sono divisi in 8 classi: la classe I non richiede cure o limitazioni particolari, la classe VIII corrisponde a terreni che devono essere lasciati in condizioni naturali, solo le prime quattro classi possono tollerare pratiche di aratura.

Questa classificazione, come qualunque altra possibile, si propone soltanto di fornire i dati di base per la limitazione dell'uso del suolo e di fornire linee guida sulle pratiche di utilizzazione e di conservazione. Queste linee guida non vengono correlate direttamente ai processi di erosione che avvengono in una ben definita area né è possibile predire con certezza come le misure di conservazione agiscano effettivamente: è consigliabile che le implicazioni connesse a queste classificazioni ed alle loro conseguenze vengano seguite mediante rilievi topografici sul territorio e monitoraggio dell'erosione.

Il rilievo topografico tradizionale è di tipo "statico" indirizzato alla stesura di una cartografia specifica, in questo caso alla mappatura dei fenomeni erosivi in atto. La tendenza attuale in questo settore è indirizzata invece ad una mappatura di tipo cosiddetto dinamico, effettuata per esempio mediante una serie di fotografie aeree in tempi successivi. Questo consente di seguire l'evoluzione degli eventi erosivi, di osservare come essi vengano influenzati dagli interventi protettivi, di identificare i punti critici sui versanti, collegandoli alle caratteristiche del terreno. In definitiva questo tipo di sorveglianza consente di acquisire dati e conoscenze utilizzabili nella pratica e per lo sviluppo di modelli interpretativi dei fenomeni fisici.

11. DIMENSIONAMENTO DEI TERRAZZI

Dal punto di vista pratico, l'erosione dovuta all'azione dell'acqua è essenzialmente prodotta dallo scorrimento superficiale: l'effetto dell'impatto delle gocce è minimo.

È possibile definire una *lunghezza critica di scorrimento* (critical slope length) come quella lunghezza del versante, considerato come piano inclinato, in corrispondenza della quale lo scorrimento superficiale, che è di tipo Hortoniano, diventa erosivo. Se si mantiene la lunghezza di scorrimento libero inferiore alla critica non si verificheranno azioni erosive sostanziali. Il metodo più utilizzato allo scopo è quello di interrompere la pendenza con terrazzi: la scelta della distanza fra di essi richiede di calcolare la lunghezza critica.

Esistono metodi teorici fisicamente basati per la determinazione della lunghezza critica. Un metodo classico fa riferimento alla condizione di moto della lama d'acqua conseguente alla pioggia di progetto di intensità i con la presenza di infiltrazione, definita dalla velocità f . Se si considera una pendenza s , definita dall'angolo α con l'orizzontale ($s = \tan \alpha \approx \sin \alpha$) ed un tratto di lunghezza L , alla fine di questo tratto la portata (per unità di larghezza) sarà data da :

$$(39) \quad q = (i-f)L \cos \alpha = q' L \cos \alpha$$

Se si considera valida la relazione di Strickler per definire il moto sarà anche:

$$(40) \quad q = n^{-1} h^{5/3} s^{0.5}$$

essendo n l'indice di scabrezza di Manning e considerando il raggio idraulico uguale all'altezza h di scorrimento superficiale. Tenendo conto del fatto che è anche:

$$(41) \quad h = \left(\frac{v n}{s^{0.5}} \right)^{3/2}$$

sostituendo e considerando la velocità critica v_c si ricava la lunghezza critica L_c :

$$(42) \quad L_c = \frac{v^{5/2} n^{3/2}}{q' s^{3/4} \cos \alpha}$$

Il valore da assegnare all'indice n è indicato nella Tab. 8 per alcuni tipi di copertura del suolo.

L'inconveniente principale di questo tipo di approccio (ed anche di altri) sta nel fatto che solitamente si *considera come critica la velocità a cui inizia il fatto erosivo e non quella in corrispondenza della quale l'erosione è la massima tollerabile*. Questo comporta una distanza tra i terrazzi più piccola del necessario e la divisione del versante in unità coltivabili di dimensione più ridotte che a volte limitano l'efficienza delle operazioni agricole. D'altra parte non è facile definire la velocità di massima erosione tollerabile. Anche per questa ragione, nella pratica, il dimensionamento non viene fatto basandosi su formule teoriche come la (43), che possono comunque sempre essere utilizzate per controlli, ma su relazioni puramente empiriche che legano la distanza fra i terrazzi alla pendenza S del terreno.

Un esempio di tali formule è riportato nella Tab. 9 allegata. Si tratta di equazioni messe a punto da molti ricercatori in differenti condizioni climatiche e fisiche, in diverse parti del mondo. I simboli in tabella hanno il seguente significato:

- VI è la distanza verticale tra due terrazzi successivi;
- HI è la distanza orizzontale tra due terrazzi successivi;
- S è la pendenza (%).

Come si può osservare in nessuna di esse compare direttamente né lo scorrimento superficiale, né tanto meno l'erosione o meglio la perdita di suolo: in pratica le relazioni proposte hanno deboli collegamenti con i processi erosivi. E' consigliabile, per definire i valori di progetto, utilizzare tre o più formule ("regionalmente" analoghe) verificando che i risultati siano simili.

Ramser (1917) generale	$VI(m) = 0.76S + 0.608$ per terreni erodibili $VI(m) = 0.1013S + 0.608$ per terreni poco erodibili
S.C.S. (U.S.A)	$VI(ft) = aS + b$ $a=0.3$ per gli stati del SUD e 0.6 per quelli del NORD b varia fra 1 e 2 in funzione del tipo di suolo
Zimbabwe	$VI(ft) = (S+f)/2$ f varia fra 3 e 6 in funzione della erodibilità del suolo
Sud Africa	$VI(ft) = (S/a)+b$ a varia da 1.5 per aree a bassa piovosità fino a 4 per quelle ad alta; b varia fra 1 e 3 in funzione del tipo di suolo
Kenya	$VI(m) = 0.3(S+2)/4$
Israele	$VI(m) = (S/10) + 2$
Algeria/Marocco	$VI(m) = (260S)^{-0.3}$ per terrazzi di sostegno con pendenze 10-25% $VI(m) = (64S)^{-0.5}$ per terrazzi coltivabili su pendenze >25%
Sheng	$VI(m) = (SxWb)/(100-U)$ per terrazzi di sostegno in climi umidi tropicali: Wb è la larghezza del terrazzo in m e U è la pendenza dell'alzata (scarpa) usualmente 1. o 0.75.
Cina	$VI(m) = Wb/(\cot S - \cot \square)$ \square è la pendenza dell'alzata (usualmente 70-75°)
Nuovo Galles del Sud	$HI(m) = KS^{0.5}$ ove K varia fra 1. e 1.4 in funzione del tipo di suolo

Tab. 9: formule per la spaziatura dei terrazzi

(da Soil Erosion, edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan – J. Wiley & Sons)

Copertura o uso del suolo	Valore dell'indice n (Manning)
Copertura erbacea (Bermuda grass) non fitta: variabile con l'altezza (da 50 mm a 600 mm)	0.015 – 0.2
Copertura fitta	0.3 – 0.48
Pascolo (range) allo stato naturale	0.1 – 0.3
Pascolo soggetto a tagli	0.02 – 0.24
Cereali	0.075 – 0.1
Cotone	0.07 – 0.09
Sorgo	0.04 – 0.11
Grano	0.1 – 0.3
Stoppie di grano secondo il residuo (da 2.5 a 10 tha ⁻¹)	0.05 – 0.25
Stoppie di granturco secondo il residuo (da 2.5 a 10 tha ⁻¹)	0.012 – 0.13
Terreno arato con residuo secondo il residuo (da 0.6 a 7.5 tha ⁻¹)	0.006 – 0.47
Terreno fresato o erpicato con residuo secondo il residuo (da 0.6 a 7.5 tha ⁻¹)	0.008 – 0.53
Terreno non coltivato secondo il residuo (da 0.6 a 7.5 tha ⁻¹)	0.03 – 0.47
Suolo senza vegetazione:	
scabrezza < 25 mm	0.01 – 0.03
scabrezza tra 25 e 50 mm	0.014 – 0.033
scabrezza tra 50 e 100 mm	0.023 – 0.038
scabrezza > 100 mm	0.045 – 0.049
Superficie rivestita (asfalto o cemento)	0.01 – 0.013
Superficie pavimentata	0.012 – 0.03

Tab. 8: valore dell'indice di scabrezza di Manning
(da Soil Erosion & Conservation ,R.P.C. Morgan – Longman)

I terrazzi possono essere distinti in tre categorie secondo la funzione che svolgono:

a) *terrazzi di diversione (diversion terraces)*: sono utilizzati per intercettare lo scorrimento superficiale e trasferire l'acqua verso appositi collettori, come fossi e canali inerbati, o altri tipi di scarichi (per esempio dreni intubati). Per questa ragione sono limitati da un arginello verso valle e sono costruiti in leggera pendenza. Quando sono abbastanza larghi (possono arrivare fino a 15 m) al loro interno è possibile ricavare una vera e propria *cunetta (terrace channel)*. Possono essere costruiti riportando suolo da entrambe le parti del pendio (tipo mango) o solo da monte (tipo Nichols) e possono essere larghi o stretti.

b) *terrazzi di trattenuta (detention terraces)*: sono utilizzati per intercettare e trattenere l'acqua che scorre sul versante. *Non hanno quindi pendenza scolante*. Per il resto costruttivamente sono simili ai terrazzi di diversione.

c) *terrazzi di sostegno (bench terraces)*: sono costituiti da una serie di ripiani (o mensole) e di alzate di sostegno; sono utilizzati per coltivare il terreno quando la pendenza è molto ripida. Le alzate sono spesso costituite da muretti di diverso tipo. I ripiani possono essere a livello con arginelli o con pendenza trasversale verso valle (outward) per consentire lo scolo diretto dell'acqua, una volta rallentata la sua corsa. Se è necessario trattenere l'acqua la pendenza trasversale è inversa (inward), verso monte. L'acqua raccolta, se non è trattenuta, viene deviata verso i collettori (impluvi) grazie ad una piccola pendenza nella direzione longitudinale: se il ripiano è abbastanza largo può esistere al suo interno una vera e propria cunetta (terrace channel).

Nella Fig. 6 sono rappresentate le diverse tipologie di terrazzi. Il tipo di terrazzo denominato “Fanya juu” è caratteristico del Kenya ed è realizzato scavando un fosso trasversale al pendio (lungo una linea di livello) e riportando il materiale a monte dello scavo a formare un argine.

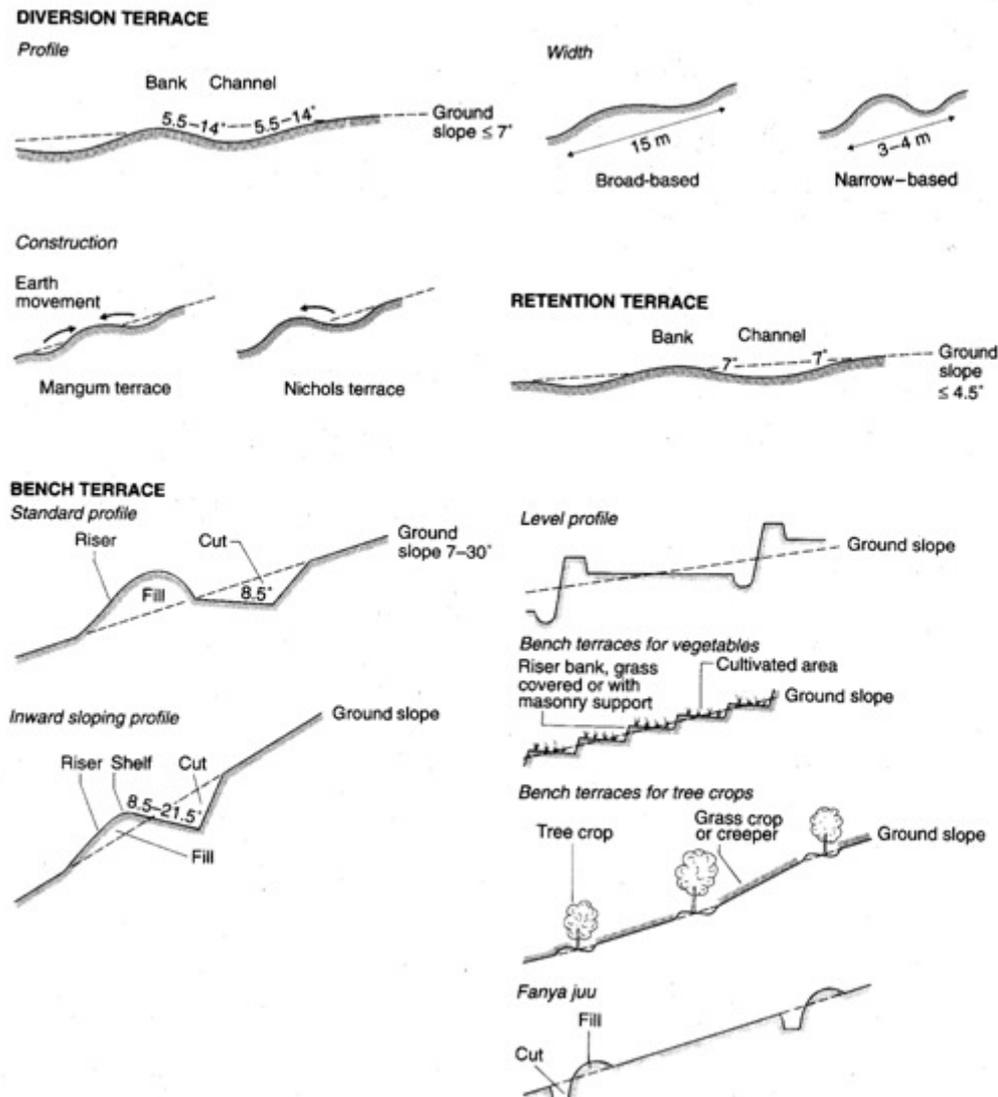


FIG. 6: TIPOLOGIA DEI TERRAZZI

12. REGIMAZIONE DELLE ACQUE SUPERFICIALI

Come già accennato al paragrafo precedente gli interventi meccanici di protezione (come il terrazzamento) sono quasi sempre inseriti in un contesto più generale di opere di regimazione delle acque superficiali, il cui scopo è quello di controllare lo scorrimento superficiale.

L'intervento di regimazione si concretizza in diversi tipi di canalizzazione (waterway): viene costruita una rete di raccolta e scolo artificiale che si inserisce nel terreno comprendendo ed ampliando quella esistente in natura.

Nel caso più generale l'intervento può comprendere *fossi di guardia* (diversion ditches, diversion channels), *fossi inerpati* (grass waterways), *cunette nei terrazzi* (terrace channels).

I *fossi di guardia* vengono costruiti in testa alla zona da proteggere ed hanno la funzione di intercettare lo scorrimento superficiale che proviene dai terreni posti a monte. In genere seguono le linee di livello e scaricano in diversi punti negli impluvi naturali o artificiali.

Le *cunette nei terrazzi* hanno la funzione di raccogliere le acque provenienti dai terreni compresi fra due terrazzi successivi. Sono ricavate nella parte verso monte del terrazzo e convogliano l'acqua verso gli impluvi sfruttando la pendenza data al terrazzo.

I *fossi inerbati* vengono ricavati nelle depressioni naturali, ove esiste già un impluvio; se ne aumenta eventualmente la sezione e si elimina la vegetazione di dimensione superiore al cespuglio dalle sponde, provvedendo ad effettuare un inerbamento del fondo e delle sponde a protezione dall'azione erosiva. Se la pendenza supera i 10-15° è necessario rivestire il fosso con pietrame o con calcestruzzo; in certi casi la pendenza può essere corretta introducendo dei salti o delle microbriglie.

Una tipica disposizione di opere per la regimazione delle acque superficiali è riportata in Fig. 7.

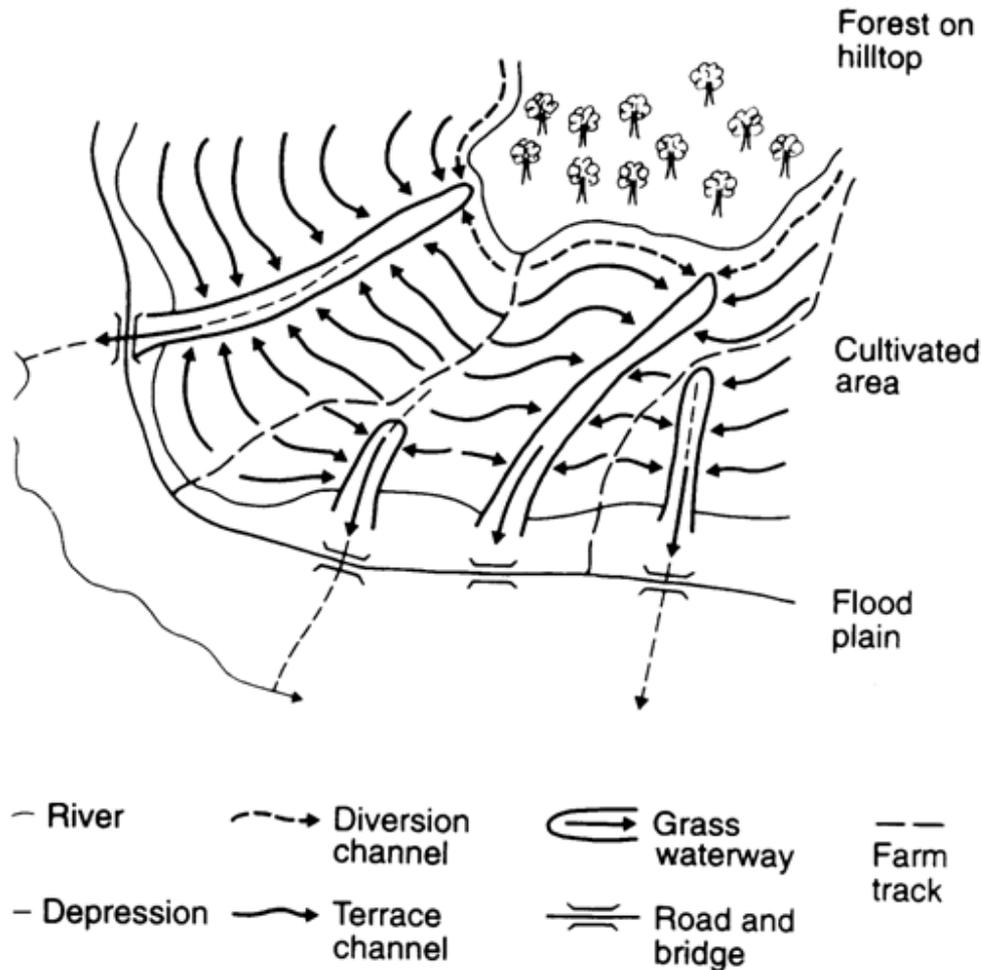


Fig. 7: interventi per la regimazione delle acque superficiali

Perché sia assicurata la solidità di tutto il sistema, che comprende canalizzazioni e terrazzamenti è buona cosa, nella costruzione dei terrazzi, seguire le raccomandazioni riportate nella Tab. 9 (Hudson, 1971), relativa alle dimensioni da assegnare, alle pendenze, ai tipi di terrazzo. Le dimensioni consigliate sono definite in modo da evitare, per esempio, un eccessivo appesantimento del terreno sul terrazzo, che potrebbe portare alla rottura ed alla sua successiva distruzione.



Esempi di sistemazione con terrazzi (a sx) e fossi inerbati (grass waterways)

Lunghezza	Normale	da 200 m (suoli sabbiosi) a 400 (suoli argillosi)
	Limite	da 400 m (suoli sabbiosi) a 450 (suoli argillosi)
Pendenza variabile:	da 0 a 100 m	1:1000
	da 100 a 200 m	1:500
	da 200 a 300 m	1:330
	oltre i 300 m	1:250
Pendenza costante	intera lunghezza	1:250
Pendenza del terreno su cui possono realizzarsi i diversi tipi di terrazzo	Terrazzi di diversione	utilizzabili su pendenze fino a 7°; con pendenza superiore i costi sono eccessivi e le dimensioni orizzontali troppo piccole per consentire un'efficace lavorazione meccanica del terreno
	Terrazzi di detenzione	utilizzabili per terreni con pendenza non superiore a 4.5 °
	Terrazzi di sostegno	convenienti soltanto per terreni con pendenza tra 7 ° e 30°.

Tab. 9: Criteri di progetto per i terrazzi
(da Soil Erosion, edited by M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan – J. Wiley & Sons)

TESTI CONSIGLIATI:

Soil Erosion & Conservation, R.P.C. Morgan, Longman Ed.

Soil Erosion edited by M.J.Kirkby & R.P.C. Morgan, Wiley Ed.