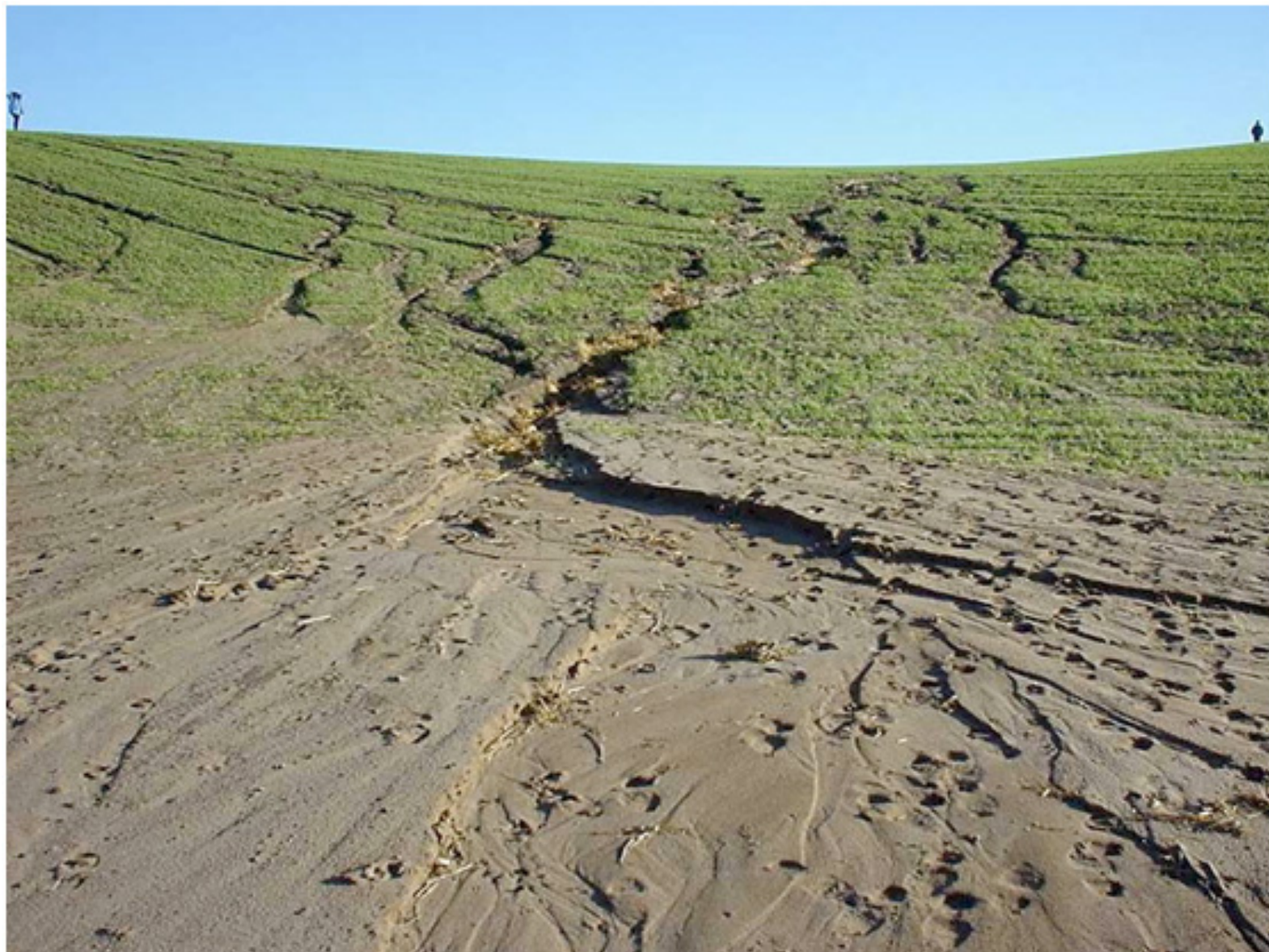


Correzione dei torrenti

erosione e produzione di sedimento

Giancarlo Dalla Fontana
Università di Padova

A.A. 2013/2014



Erosione

L'erosione è il fenomeno che determina la perdita di suolo dai terreni acclivi.

L'erosione è un fenomeno naturale che ha un forte impatto di natura ambientale, economica e sociale.

L'erosione è un fenomeno che può essere *mitigato* (non eliminato) da azioni antropiche di tipo conservativo e può essere *favorito* o *accelerato* da azioni antropiche di natura non conservativa.

L'effetto globale dell'erosione dei rilievi fa sì che, in tempi molto lunghi, le terre emerse vengano livellate fino a tendere al livello del mare: ad esempio, in un periodo di 7000-9000 anni, l'area drenata dal Mississippi perde in media 30 cm d'altezza. In opposizione a questa tendenza allo spianamento, la dinamica della crosta terrestre e i fenomeni vulcanici continuano a edificare rilievi.

Tipi di Erosione

Si riconoscono, in natura, varie forme di erosione tra cui:

- Esarazione Glaciale
- Deflazione Eolica
- **Erosione Idrica**

Versante o Campo	Erosione inter-Rill	Erosione da impatto
		Erosione laminare
	Erosione Rill per incisione	
	Erosione Gully per “burronamento”	
Rete Idrografica	Widening & Degradation	(fenomeni torrentizi)

Erosione idrica

Erosione laminare (sheet):

erosione diffusa su ampie aree per azione del deflusso superficiale.



Erosione idrica



Erosione per rigagnoli (rill):

asportazione del suolo ad opera di acqua di ruscellamento incanalata lungo direttrici privilegiate lungo il versante.

Si formano dei solchi che normalmente sono cancellabili con le normali operazioni di aratura.



Erosione idrica

Formazione di un **gully**: Si tratta di erosione dovuta al deflusso concentrato in solchi profondi, con pareti sub-verticali. I solchi si sviluppano progressivamente in lunghezza, larghezza e profondità a seguito della concomitanza di fattori sfavorevoli. Non sono rimovibili con le normali operazioni agricole



Erosione idrica

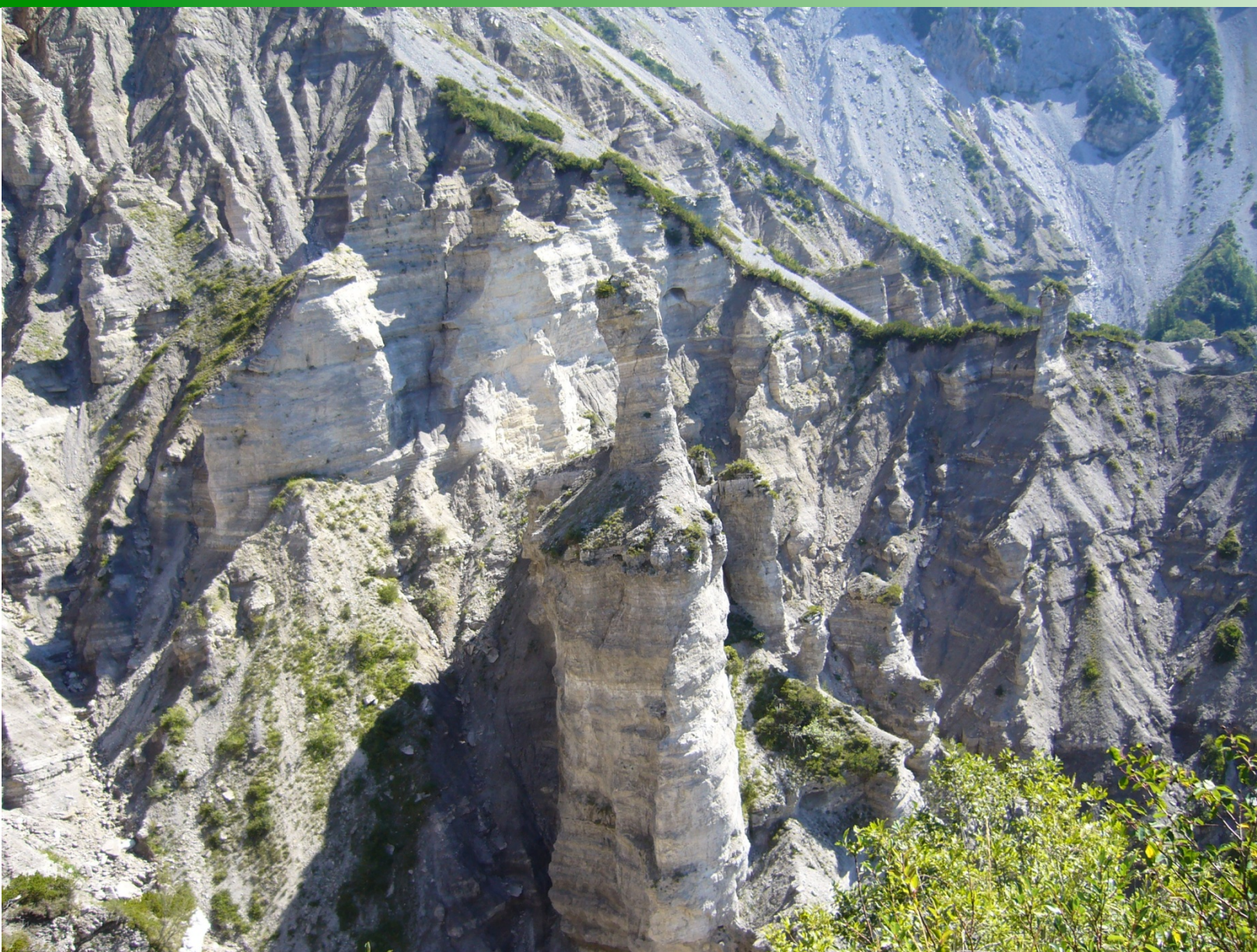


Erosione torrentizia in alveo:

si verifica nei corsi d'acqua ad opera della corrente idrica, essa può riguardare sia l'incisione del fondo, che l'erosione delle sponde con conseguente crollo e allargamento dell'alveo.



Erosione idrica



Monte Cucco – Arta (UD) – Campanili del Lander - esempio di erosione parossistica

Erosione idrica



Monte Cucco – Arta (UD) – esempio di erosione parossistica

Erosione idrica



Tramonti di Sopra (PN) – un micro-gully innescato su una strada di recente costruzione

Fattori che influenzano la Perdita di Suolo

Precipitazione		
Deflusso superficiale		
Erodibilità dei suoli	Tessitura	Sostanza organica
	Struttura	Permeabilità
M o r f o l o g i a superficiale	Pendenza	
	Lunghezza del piano di scorrimento	
Copertura vegetale		
Pratiche colturali e sistematorie		

Equazione universale della perdita di suolo (USLE)

EROSIVITA'		ERODIBILITA'		
Pioggia	Caratteristiche Fisiche (suolo e morfologia)	Gestione del Territorio		
Energia		Lavorazioni e Sistemazioni	Colture e uso del suolo	
R	K	LS	P	C

$$W = R \cdot K \cdot LS \cdot P \cdot C$$

W	Perdita di suolo annua	t ha ⁻¹
R	Indice di erosività climatica	MJ ha ⁻¹ mm h ⁻¹
K	Erodibilità del suolo	t ha ⁻¹ ha MJ ⁻¹ h mm ⁻¹
L,S	Fattori topografici	adimensionali
P	Fattore di pratica colturale-sistematoria	adimensionale
C	Fattore di uso del suolo	adimensionale

Equazione universale della perdita di suolo (USLE)

L'USLE è ampiamente ed universalmente utilizzata per il calcolo della Perdita di Suolo su porzioni di versante.

- totalmente sperimentale
- non può essere applicata dove non siano disponibili, per lo specifico contesto, dati sperimentali dai quali derivare i valori dei parametri.
- manca la possibilità di prendere in considerazione alcune variabili, quali la scabrezza superficiale o il livello di produzione di biomassa (particolarmente importanti in contesti extra-agricoli).

Equazione universale della perdita di suolo (USLE)

Per la definizione dei vari fattori dell'equazione è stato necessario stabilire una situazione di riferimento che è convenzionalmente quella di un campo piano, inclinato del 9%, con pendice lunga 22,1m, completamente privo di vegetazione e continuamente arato a rittochino.

La condizione di campo privo di vegetazione e continuamente arato a rittochino fu scelta per un duplice motivo:

- 1) Nessun sistema di colture è comune a tutte le aree agricole
- 2) La perdita di suolo per qualunque altra condizione del campo sarebbe stata influenzata dagli effetti, residui e attuali, delle pratiche colturali e delle lavorazioni del terreno che variano da una località ad un'altra.



Hugh Hammond Bennet vicino a una parcella sperimentale

Equazione universale della perdita di suolo (USLE)



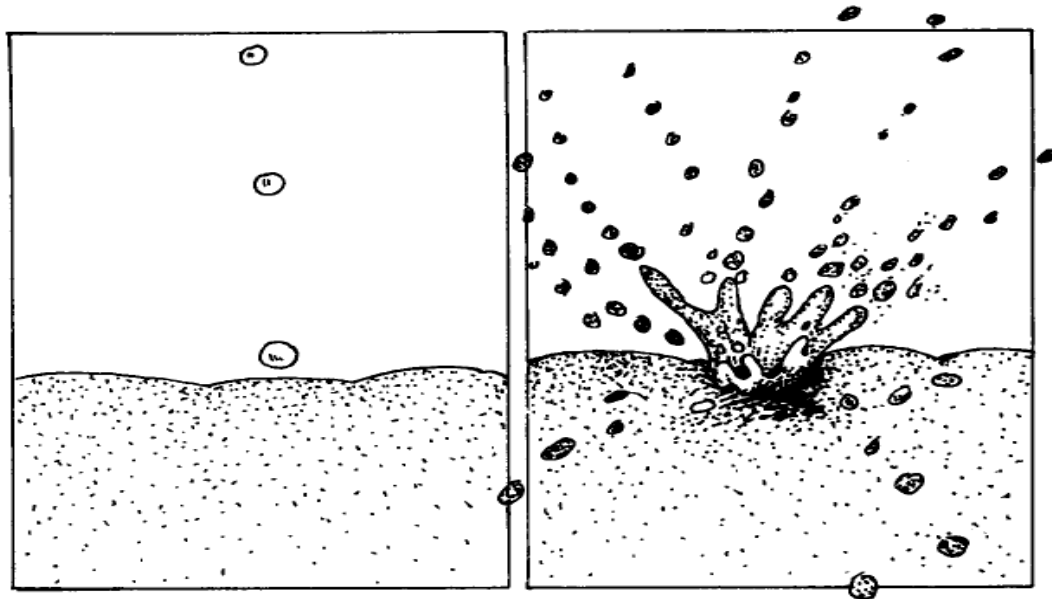
Parcelle sperimentali. Larghezza 12 ft (3.65 m), lunghezza 72.6 ft (22.1 m), pendenza 9%.

USLE – R - indice di erosività climatica

Definisce il peso dell'aggressività del clima.

Caratteristiche più importanti:

- **intensità** (quanto forte piove): influenza la percentuale di acqua non infiltrata che produce overland flow
- **altezza** (quanto piove): influenza la quantità di acqua che scorre in superficie
- **energia cinetica** delle gocce: influenza la consistenza dello *splash*.



USLE – R - indice di erosività climatica

Il fattore di aggressività della pioggia è una misura dell'energia della pioggia quale agente erosivo. Per ciascun evento è dato dal prodotto dell'energia cinetica per la massima intensità in 30'.

Varia dimensionalmente da 10 a 500 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹.

$$R = \sum_{j=1}^n (E \cdot I_{30})_j$$

n	Numero di eventi piovosi nell'anno	y⁻¹
E	Energia cinetica totale dell'evento	MJ ha⁻¹
I₃₀	Intensità massima in 30'	mm h⁻¹



Calcolo di [n] - numero di eventi piovosi all'anno

Si considerano solo eventi piovosi di almeno 13 mm totali ($P \geq 13\text{mm}$) o che comprendano un intervallo di 15' con almeno 6 mm ($P_{15} \geq 6\text{mm}$).

All'interno di un singolo evento vi possono essere intervalli non piovosi non più lunghi di sei ore. Quando l'intervallo non piovoso supera le sei ore si considerano due eventi distinti.



Calcolo di [E] – energia della precipitazione

Nell'ambito di un singolo evento si identificano [p] periodi di intensità costante

$$E = \sum_{k=1}^p e_k h_k$$

$$e = 0.119 + 0.0873 \log_{10}(i_k)$$
$$e_{\max} = 0.283 \quad (\text{per } i_k > 76 \text{ mm h}^{-1})$$

h	Altezza di pioggia	mm
e	Energia unitaria	MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹
i	Intensità di pioggia	mm h ⁻¹

La formulazione proposta dalla RUSLE2 per il calcolo di “e” ha il pregio di tendere asintoticamente a 0.290

$$e = 0.29 \left[1 - 0.72 e^{(-0.082 i_k)} \right]$$



procedure semplificate per la **stima di [R]**

equazione monomia valida per la Sicilia (Foster, poi D'Asaro): $EI_{30} = ah^{1.54}$
“a” è un coefficiente di adattamento a variabilità spaziale e stagionale

L'equazione può essere ulteriormente affinata introducendo, se disponibile, I_{30} :

$$EI_{30} = 0.117hI_{30}^{1.19}$$

equazione correlativa del tipo di quella proposta da Wishmeier:

$$R = a + b \cdot h_a \cdot I_{1,2} \cdot I_{24,2}$$

a, b	Coefficienti a stima regionalizzata	
h_a	Pioggia media annua	mm
$i_{1,2}$	Intensità di pioggia di durata 1 ora e TR di 2 anni	mmh ⁻¹
$I_{24,2}$	Intensità di pioggia di durata 24 ore e TR di 2 anni	mmh ⁻¹

USLE – K – erodibilità del suolo

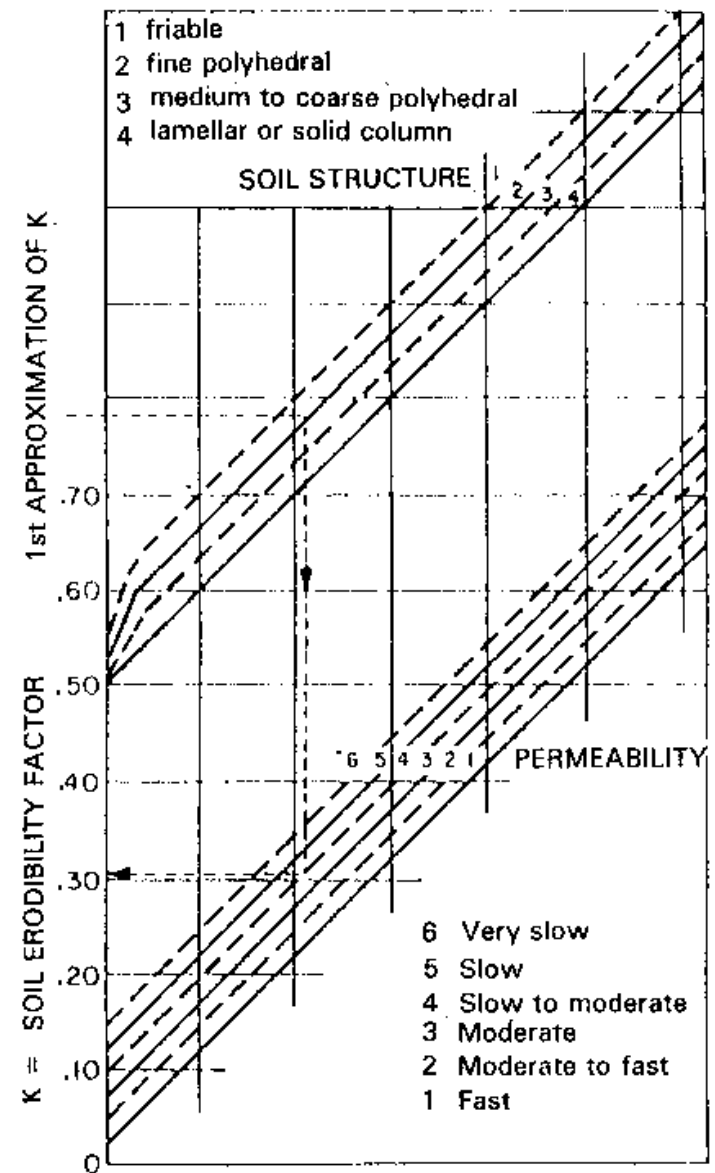
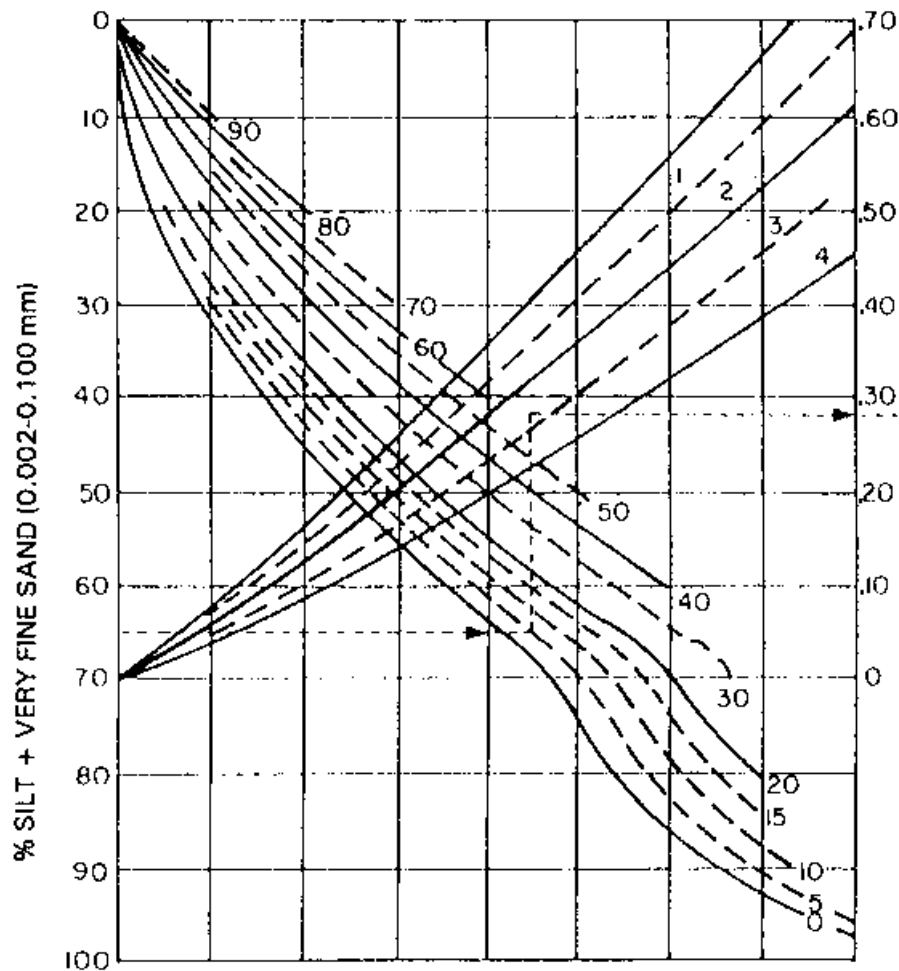
L'erodibilità del suolo rappresenta l'erodibilità intrinseca di un suolo, ovvero la perdita di suolo (t ha^{-1}) per unità di $[R]$, su una particella tipo (lunghezza 22.1 m, pendenza 9%) mantenuta a maggese (incolto) e lavorata periodicamente per controllare le malerbe e rompere la crosta superficiale del suolo.

$[K]$ varia dimensionalmente da poco più di zero a circa $0.10 [\text{t ha}^{-1} (\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1})^{-1}]$ (ovvero t ha^{-1} per unità di $[R]$).

Fattori che influenzano l'erodibilità:

- granulometria
- struttura
- capacità di trattenuta idrica
- permeabilità e velocità di infiltrazione superficiale

USLE – K – erodibilità del suolo



Esempio: 27.2% di argilla, 65% di limo e sabbia fine, 5% di sabbia e 2.8% di sostanza organica. Si parte dal 65 % di limo e sabbia fine, si prosegue con il 5% di sabbia, 2.8% di sostanza organica, struttura granulare fine (2) e permeabilità da bassa a moderata (4). Il risultato, *in unità anglosassoni*, è $k=0.31$ ovvero $k=0.041$ *in unità metriche*.



Il valore di $[k]$ che si ottiene dal nomogramma illustrato è in unità anglosassoni e va corretto per le unità metriche $[t\ ha^{-1}\ (MJ\ ha^{-1}\ mm\ h^{-1})^{-1}]$:

$$K_{SI} = 0.1318 K_{USA}$$

Unità USA	Sistema Internazionale
ton acro ⁻¹ [(100 ton ft) acro ⁻¹ inch h ⁻¹] ⁻¹	t ha ⁻¹ (MJ ha ⁻¹ mm h ⁻¹) ⁻¹
t ha ⁻¹ (MJ ha ⁻¹ mm h ⁻¹) ⁻¹ = 0.1318 ton acro ⁻¹ [(100 ton ft) acro ⁻¹ inch h ⁻¹] ⁻¹	

1 ton = 1016.047 kg_f = 9957.26 N

1 ft = 0.3048 m

1 inch = 25.4 mm

1 acro = 4046.87 m² = 0.40469 ha



In alternativa al nomogramma è possibile utilizzare una **relazione analitica** (metrica):

$$K = 0.001318 \cdot \left[0.00021 T_s^{1.14} (12 - S_o) + 3.25 (S_t - 2) + 2.5 (P_e - 3) \right]$$

Ts	(%limo + %sabbia fine)(100 - %argilla)	
So	% di Sostanza organica	
St	Classe di struttura	
Pe	Classe di permeabilità	

Esistono varie **tabelle** che forniscono stime semplificate di [K] in funzione della classe di tessitura e del contenuto di sostanza organica.

USLE – K – erodibilità del suolo



K [t ha ⁻¹ (MJ ha ⁻¹ mm h ⁻¹) ⁻¹]	Contenuto di sostanza organica			sabbia	limo	argilla
Classe di tessitura	< 2%	Medio	> 2%	%	%	%
sabbioso	0.0040	0.0026	0.0013	90	6	4
franco sabbioso	0.0066	0.0053	0.0053	82	12	6
franco sabbioso grossolano	---	0.0092	0.0092			
sabbioso fine	0.0119	0.0105	0.0079			
franco sabbioso fine	0.0198	0.0145	0.0119			
franco sabbioso	0.0184	0.0171	0.0158	65	25	10
argilloso pesante	0.0250	0.0224	0.0198			
franco sabbioso fine	0.0290	0.0237	0.0224			
franco argillo sabbioso	---	0.0263	0.0263	60	13	27
argilloso	0.0316	0.0290	0.0277	20	20	60
argilloso limoso	0.0356	0.0342	0.0342	6	47	47
franco argilloso	0.0435	0.0395	0.0369	33	33	34
franco	0.0448	0.0395	0.0342	41	41	18
franco argilloso limoso	0.0461	0.0421	0.0395	10	56	34
franco sabbioso molto fine	0.0540	0.0461	0.0435			
franco limoso	0.0540	0.0500	0.0487	20	65	15
franco sabbioso molto fine	0.0579	0.0514	0.0329			
sabbioso molto fine	0.0606	0.0566	0.0487			

USLE – L,S – fattori topografici

La topografia, e soprattutto la **pendenza** e la **lunghezza del versante**, influisce sulla perdita di suolo. I fattori topografici sono adimensionali e marcano le differenze tra il versante in oggetto e la parcella standard (22.1m – 9%) per la quale valgono entrambi 1.0.

$$L = \left(\frac{l}{22.1} \right)^m$$

$$S = 0.065 + 0.0454s + 0.0065s^2 \quad S = 0.065 + 4.56\sin\alpha + 65.41(\sin\alpha)^2$$

l	lunghezza libera della pendice (tra l'inizio del deflusso e la confluenza o il cambio di pendenza)		m
m			
	0.2	$s < 1\%$	
	0.3	$1\% < s < 3\%$	
	0.4	$3\% < s < 5\%$	
	0.5	$S > 5\%$	
s	pendenza della pendice (standard 9%)		%
α	inclinazione della pendice (standard 5°08'34")		°

USLE – C – fattore di copertura o uso del suolo

L'erosione si manifesta quando il suolo viene lasciato privo di **copertura** ed esposto all'impatto delle gocce di pioggia e al deflusso superficiale. La copertura vegetale riduce considerevolmente la perdita di suolo. Un importante fattore di controllo è costituito dalle **pratiche agronomiche** legate alla copertura vegetale, quali la rotazione colturale, le lavorazioni di tipo conservativo, la presenza di materiale organico in superficie.

Il ***fattore di uso del suolo*** viene determinato come rapporto tra la perdita di suolo con una data copertura rispetto al terreno nudo. Essendo spesso legato alla vegetazione il coefficiente varia stagionalmente, ne viene solitamente considerata la media annua.

USLE – C – fattore di copertura o uso del suolo

La copertura del suolo comprende tutto quanto è a contatto con la superficie del suolo, ad esempio frammenti di roccia, porzioni di vegetazione erbacea, residui vegetali, lettiera organica, letame, pacciamature e coperture artificiali per il controllo dell'erosione.

Effetti:

- rallenta il deflusso superficiale
- intercetta le gocce di pioggia e le gocce che cadono dalla chioma.

Si tratta probabilmente della variabile più importante della USLE dato che ha effetto sulla perdita di suolo più di quasi tutte le altre e, nello stesso tempo, modificare la copertura è il modo più semplice, facile ed universale per ridurre la perdita di suolo.

USLE – C – fattore di copertura o uso del suolo

Il fattore di uso del suolo viene spesso stimato con l'uso di tabelle:

Copertura forestale naturale	
Densità delle chiome (%)	Fattore C
20-40	0.0030 – 0.0090
40-70	0.0020 – 0.0040
70-100	0.0001 – 0.0010

Pratiche colturali		
	copertura	C
Discatura delle stoppie		0.08
Fresatura per semina cereali		0.12
Erpicatura e semina cereali	10%	0.12
Aratura per mais		0.22
Erpicatura e semina mais	10%	0.19
Sviluppo cereali	10-50%	0.11
Sviluppo mais	10-50%	0.17
Maturazione cereali	75%	0.07
Maturazione mais	75%	0.10
Stoppie di cereali dopo il taglio		0.02
Stoppie di mais dopo il taglio		0.14

Protezione artificiale di pendio		
	Quantità t/ha	C
paglia	2.5-5.0	0.20-0.06
Ghiaia (Φ 3-4 cm)	340-600	0.05-0.02
Scaglie di legno	18-63	0.08-0.02



Effetti della chioma delle piante arboree:

- **intercetta** le gocce di pioggia
- Sulle superfici fogliari l'acqua si riaggrega in gocce che cadono al suolo. L'erosività di queste gocce è direttamente correlata alla loro **energia di impatto**. Nell'equazione dell'energia cinetica, $E = \frac{1}{2}mv^2$, la massa è determinata dal diametro delle gocce e la velocità dall'altezza di caduta.

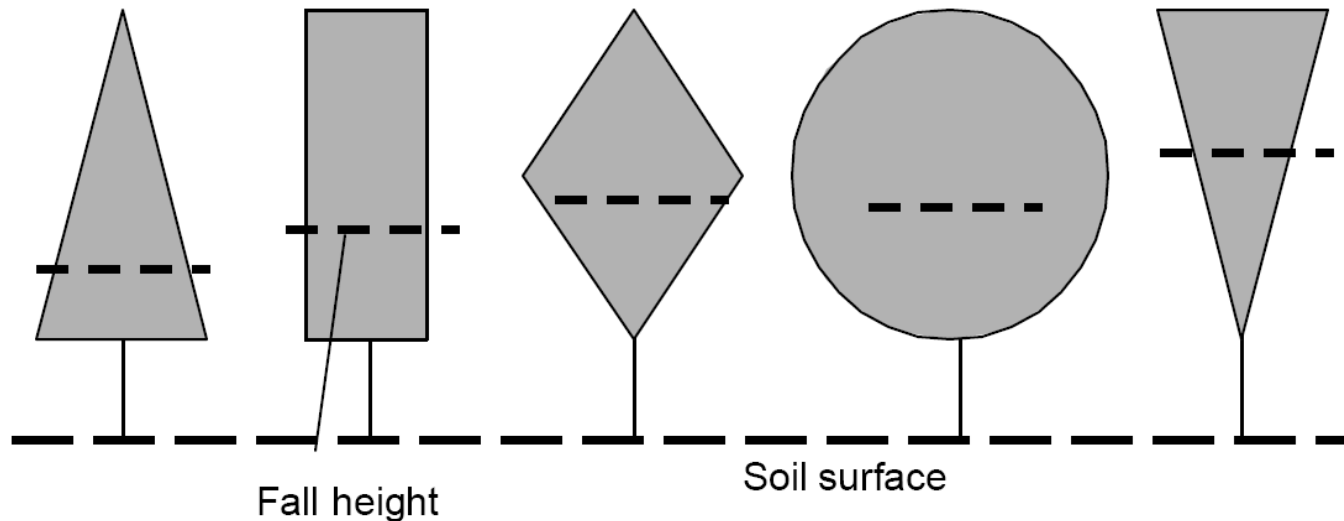
Al contrario delle gocce di pioggia, quelle che cadono dalla chioma sono tutte di **dimensioni** simili, con diametro intorno a 3.0 mm, significativamente più grandi delle gocce di pioggia (diametro medio 1.5 mm).

La **velocità di impatto** è invece, solitamente, molto inferiore a quella della pioggia, data la modesta altezza di caduta.

Dalla combinazione dei due opposti fattori si stima che solo quando la base della chioma si trovi ad oltre 10 m di altezza l'erosività delle gocce che cadono sia maggiore di quella delle gocce di pioggia.



L'altezza media di caduta delle gocce d'acqua intercettata dipende dall'altezza e dalla forma della chioma.



- ❖ stemflow: non contribuisce all'erosione da impatto.
- ❖ evaporazione direttamente dalla superficie delle foglie.
- ❖ la traspirazione riduce il contenuto idrico del suolo favorendo l'infiltrazione.

Un importante fattore di controllo dell'erosione è dato dalle **pratiche sistematorie conservative**

La maggior parte delle pratiche sistematorie ha effetto sull'erosione indirizzando il deflusso superficiale o riducendo la sua capacità di trasporto del materiale solido. Ciò frequentemente si traduce in processi di sedimentazione - deposizione e ridotta erosione.

Il ***fattore di pratica colturale e sistematoria*** viene determinato come rapporto tra la perdita di suolo con una data lavorazione/sistemazione del terreno e quella prodotta da una sistemazione a ritocchino, con lavorazioni lungo le linee di massima pendenza.

USLE – P – fattore di pratica culturale e sistematoria

Pendenza %	Girappoggio	Ciglioni	Terrazze
1-2	0.50	0.25	0.10
3-8	0.60	0.30	0.12
9-12	0.65	0.32	0.13
13-16	0.70	0.35	0.14
17-20	0.80	0.40	0.16
20-25	0.90	0.45	0.18

Evoluzione e ammodernamenti della USLE



MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) viene utilizzata per il calcolo della produzione di sedimento [S] su un singolo evento:

$$S = 11.8(Pe \cdot Qp)^{0.56} KLSCP$$

con [Pe] pioggia efficace o volume di deflusso e [Qp] portata massima.

La produzione di sedimento viene correlata all'erosione dall'indice di convogliamento:

$$W_{tot} = S / SDR$$

in cui W_{tot} comprende anche l'erosione gully e torrentizia.

A sua volta l'indice di convogliamento può essere stimato in funzione dell'area [A] del bacino e di due parametri [k] ed [n] a stima regionale:

$$SDR = kA^{-n}$$



RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation – versione 2)

Combina il meglio delle tecnologie predittive a base empirico-sperimentale con la descrizione fisica del processo.

Teorie per lo studio dei processi erosivi di distacco, trasporto e deposizione delle particelle di suolo a causa dell'impatto delle gocce di pioggia e del deflusso superficiale.

Equazione universale della perdita di suolo (USLE)

Pregi:

- semplice
- facile da interpretare
- validità operativa nelle zone ove il modello sia stato parametrizzato

Difetti

- la base sperimentale che la giustifica non sempre è sufficientemente rappresentativa
- necessita di taratura adatta

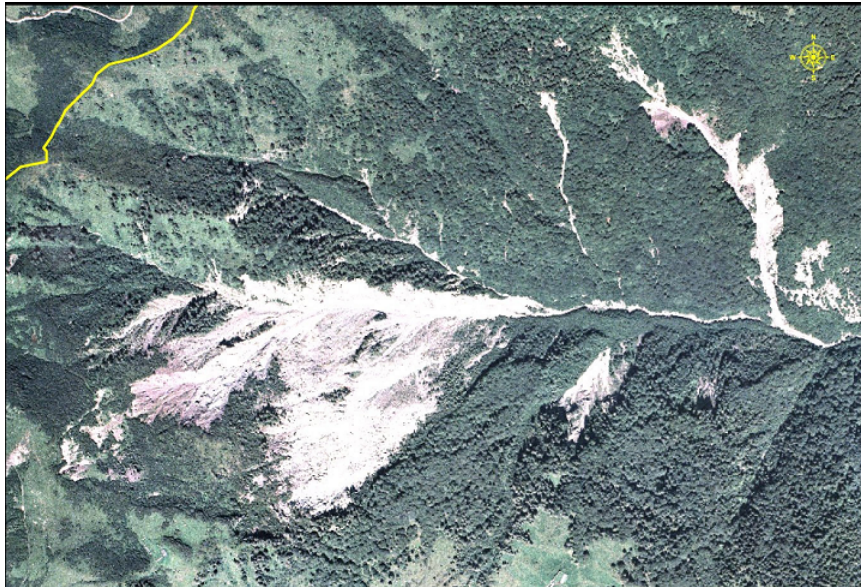
Erosione e sorgenti di sedimento

La formula USLE, anche nelle numerose varianti ed evoluzioni, non è in grado, per limiti di natura concettuale, di cogliere la dinamica dei processi erosivi nei bacini alpini. In tale contesto l'erosione, data la protezione fornita dalla copertura vegetale, non ha caratteristiche diffuse ma è circoscritta ad aree limitate dove per cause naturali (frane, eventi eccezionali) o antropiche (disboscamenti, infrastrutture viarie e turistiche, movimenti di terra, ecc.) la protezione vegetale sia venuta a mancare.

Queste aree, specie quando vengano a trovarsi in prossimità degli alvei, costituiscono superfici ad elevato coefficiente di resa solida, veri e propri depositi di materiale che viene mobilitato dall'erosione idrica nel corso degli eventi di piena. L'entità e l'ubicazione di queste aree in dissesto ha quindi una diretta influenza sull'effettiva entità del materiale trasportato

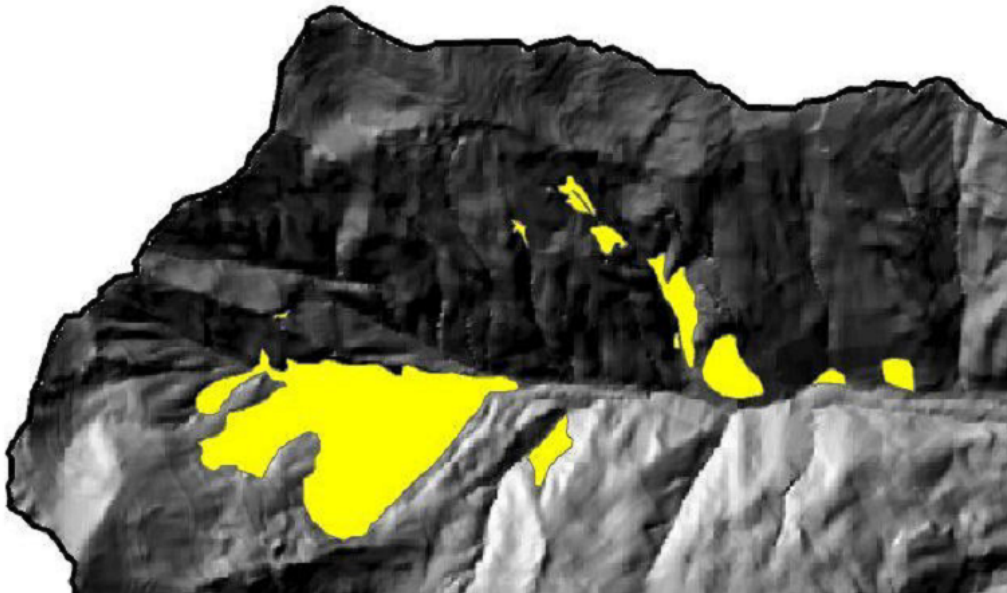
L'identificazione e la classificazione delle aree sorgenti di sedimento può effettuarsi mediante tecniche di fotointerpretazione, tuttavia essa richiede più spesso un rilievo diretto in campo. Il prodotto è una mappa delle aree sorgenti di sedimento presenti nel bacino

Erosione e sorgenti di sedimento



Individuazione delle aree sorgenti di sedimento mediante l'esame delle ortofoto

 aree sorgenti di sedimento



Quantità totale di sedimento [S] in uscita da un bacino idrografico, misurata in un punto preciso per un certo intervallo di tempo.

In sostanza rappresenta la quantità totale di materiale solido asportato dal bacino che arriva alla sezione di chiusura.

Alcuni valori di riferimento (t ha ⁻¹ y ⁻¹)		
Foreste	0.1	
Pascoli	1.0	
Coltivazioni	20.0	(1.0 – 40.0)
Disboscamenti	40.0	
Miniere/Cantieri	200.0	

Rapporto tra la produzione di sedimento del bacino (S) e l'erosione complessiva che in esso ha luogo (W_{tot}).

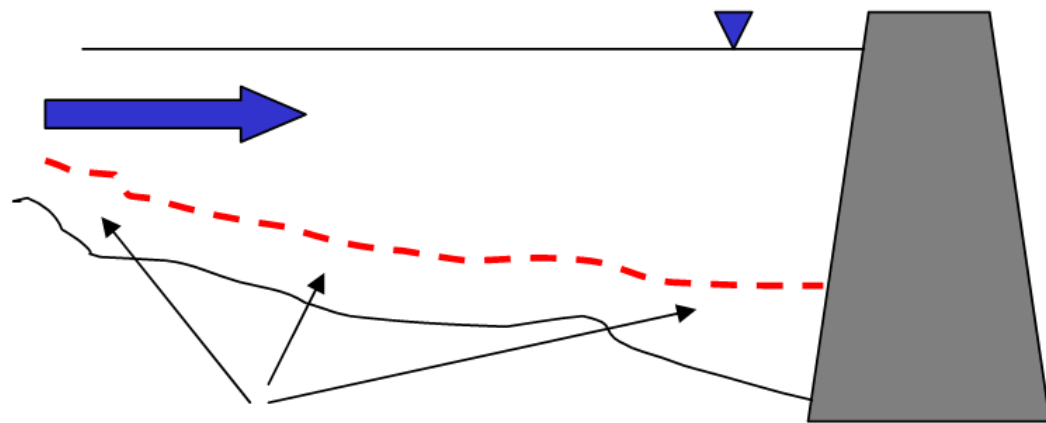
Normalmente una porzione del materiale solido mobilitato dai processi erosivi si sedimenta prima di giungere alla sezione di chiusura.

*Il coefficiente di resa solida (**SDR** – Soil Delivery Ratio) rappresenta la frazione di materiale eroso che giunge alla sezione di chiusura e può essere misurata come “produzione di sedimento”.*

Anche chiamato *Indice di Convogliamento*

$$SDR = \frac{S}{W_{tot}}$$

Interrimento di Laghi e Serbatoi



Riduzione di invaso

L'interrimento di laghi e serbatoi artificiali può fornire preziose indicazioni sulla produzione di sedimento dei bacini a monte degli invasi.

La riduzione di capacità di invaso del lago artificiale è dovuta all'accumularsi sul fondo dei sedimenti trasportati dalla corrente in arrivo da monte. La conseguente variazione della topografia del fondo può essere rilevata da una sequenza di misurazioni batimetriche. La differenza di volume tra un rilievo ed il successivo divisa per il numero di anni intercorsi e riferita alla superficie del bacino sotteso dall'invaso esprime, in $\text{m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ anno}^{-1}$, la produzione di sedimento media annua.

Interrimento di Laghi e Serbatoi

Produzione di sedimento in alcuni bacini alpini

Bacino (periodo di osservazione)	Area km^2	Produzione di sedimento media – $m^3 km^{-2} anno^{-1}$
Cellina a Barcis (1957-1972)	386	930
Boite a Vodo (1958-1974)	322	123
Cordevole ad Alleghe (1933-1984)	242	171
Mis a S. Giuliana (1963-1984)	107	2910
Noana alla diga (1959-1973)	31	1320
Senaiga alla diga (1955-1970)	70	424
Avisio a Stramentizzo (1956-1970) escluso il bacino sotteso dal serbatoio di Forte Buso	645	200
Sarca a Ponte Pià (1959-1969)	583	120

Interrimento di Laghi e Serbatoi

Interrimento del Lago di Alleghe		
Anno	Volume di invaso [m ³]	Produzione di sedimento media annua [m ³ Km ⁻² anno ⁻¹]
1895	6800000	
		223
1921	5400000	
		207
1923	5297868	
		126
1933	4993964	
		150
1969	3687000	
		387
1971	3500000	
		248
1973	3380000	
		154
1979	3156000	
		216
1984	2940876	
Fra il Dicembre 1979 e l'Agosto 1980, l'ENEL ha provveduto al dragaggio dal lago di 55000 m ³ di sedimento		

Da osservare nella tabella a fianco l'elevata produzione di sedimento degli anni compresi tra il 1969 e il 1973.

Una possibile spiegazione è da cercare nell'elevata disponibilità di sedimento facilmente mobilizzabile prodottosi con lo storico evento di piena del 1966

