

## CAPÍTULO 8

### EROSIÓN DE SUELOS

#### 8.1. Erosión.

La erosión del suelo es la remoción del material superficial por acción del viento o del agua. El proceso se presenta gracias a la presencia del agua en las formas: pluvial (lluvias) o de escorrentía (escurrimiento), que en contacto con el suelo (las primeras con impacto y las segundas con fuerzas tractivas), vencen la resistencia de las partículas (Fricción o cohesión) del suelo generándose el proceso de erosión.

Muchos proyectos de ingeniería exigen la remoción de la vegetación y excavaciones de suelo generando problemas ambientales en laderas y cursos de agua por la producción e incorporación de sedimentos a las corrientes que alteran los ecosistemas naturales y generan gran cantidad de problemas por sedimentación.

La erosión edáfica es un proceso normal del desarrollo del paisaje, pero solamente en algunas partes del mundo domina otros procesos de denudamiento. Los otros procesos principales de remoción de sedimentos son los movimientos en masa y los procesos de transporte en masa, y cada uno de ellos es dominante en ambientes adecuados.

La mayor parte de nuestros actuales conocimientos sobre los mecanismos de erosión y sus tasas correspondientes se basan en el trabajo del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. El enfoque del SCS siempre ha sido pragmático, y sus predicciones en cuanto a tasas de erosión se han concentrado en torno al desarrollo y extensión de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS). Los puntos tanto fuertes como débiles de la EUPS se hallan en la estimación de la erosión como producto de una serie de términos como precipitación pluvial, grado y longitud de la pendiente, así como factores edáficos y agrológicos.

Los protagonistas principales de la erosión son: el impacto de las gotas de lluvia que genera el desprendimiento por salpicadura, compacta el suelo, reduciendo la infiltración y aumentando la escorrentía; la capacidad hidráulica del flujo superficial sobre una pendiente capas de acarrear los sedimentos. Pero la comprensión del fenómeno se fundamenta en una separación entre la hidrología y la hidráulica, y en las propiedades del suelo que son importantes para cada una de ellas: las propiedades hidrológicas del suelo determinan la tasa de infiltración y de esta manera se fija la parte de la precipitación pluvial que contribuye al flujo superficial. Las propiedades hidráulicas del suelo determinan la resistencia del suelo al transporte por el flujo o por las gotas de lluvia.

La erosión de suelos, la pérdida de suelos y la acumulación de sedimentos son términos que tienen distintos significados en la tecnología de la erosión de suelos: la erosión de suelos es la cantidad bruta de suelo retirado por la acción dispersante de las gotas de lluvia y por la escorrentía. La pérdida de suelo es el suelo desprendido de una pendiente determinada. La producción de sedimentos es el volumen de suelo depositado en un punto que está bajo evaluación.

**8.2 Erosión hídrica.** Es la erosión por agua lluvia y abarca la erosión provocada por el impacto de las gotas sobre el suelo desnudo, como también la acción hidráulica que arranca y transporta las partículas de suelo por el escurrimiento en laderas y taludes.

a. Saltación pluvial. El impacto de las gotas de lluvia en el suelo desprovisto de vegetación y expuesto, ocasiona el desalojo y arrastre del suelo fino. El impacto compacta el suelo disminuyendo la permeabilidad e incrementando la escorrentía.

b. Escorrimento superficial difuso. Comprende la erosión laminar sobre laderas desprovistas de vegetación y afectadas por la saltación pluvial, que estimulan el escurrimiento del agua arrastrando finos. El escurrimiento difuso ocurre cuando la velocidad del agua es menor de  $30 \text{ cm x seg}^{-1}$ .

c. Escorrimento superficial concentrado. Produce dos formas, los surcos de erosión (canales bien definidos y pequeños), y las cárcavas, que son canales o zanjones de mayor magnitud. Cuando el flujo se hace turbulento, la energía del agua es suficiente para labrar canales paralelos o anastomados, llamados surcos. Más profundos y anchos que los surcos son las cárcavas, por las que circula agua durante y poco después de los aguaceros.

El proceso se da en cuatro etapas: 1. Entallamiento del canal. 2. Erosión remontante desde la base. 3. Cicatrización. 4. Estabilización.

d. Escorrimento subsuperficial. Las aguas infiltradas ocasionan la tubificación y el sifonamiento del suelo, formando cavidades, en donde la fuerza de infiltración ha superado la resistencia del suelo.

Aspectos relacionados con la erosión hídrica que deben considerarse:

1. Las geoformas denudativas creadas por la erosión.
2. Los fenómenos dinámicos asociados al transporte de masas.
3. La sedimentación y la colmatación de las vaguadas de los cauces.

**8.2.1 Valoración del efecto de la erosión hídrica:** Usamos:

$$Q_R = K(E)^\alpha \quad (8.1)$$

donde  $Q_R$  es la erosión por lluvia,  $K$  un coeficiente de proporcionalidad,  $E$  la energía cinética de la lluvia y  $\alpha$  una constante que depende del tipo de suelo (baja en arcillas y alta en arenas).

$$A = RK (LS) CP \quad (8.2)$$

donde  $R = EI_{30} \quad (8.3)$

La ecuación (8.2) muestra los factores más importantes para el control de la erosión.  $A$ : Es el promedio de pérdidas de suelo en Ton por Ha.  $R = EI_{30}$  es el factor de lluvia, expresado como el producto de la energía de una lluvia, con la intensidad  $I_{30}$ , de 30 minutos.  $K$ : Es el factor de erodabilidad del suelo (función del tipo de suelo).  $LS$ : Es la longitud de la pendiente y magnitud de la misma, lo que depende de la topografía del terreno.  $C$ : Factor de uso del suelo (suelo árido = 1; praderas = 0,1; bosque, selva = 0,01)

**8.3 Erosión fluvial.** Es la erosión que se presenta en los cursos de agua (quebradas y ríos). La fuerza tractiva del agua vence la resistencia de los materiales, produciéndose procesos de socavación lateral y de fondo. Los procesos movilizan además de arcillas y limos, otros materiales como arenas, gravas, cantos y bloques, en las formas de acarreo e disolución, suspensión y acarreo de fondo. Los volúmenes movilizados por erosión fluvial son altos, en cauces erosionados.

**8.3.1 Los torrentes** son corrientes de agua de régimen ocasional, el drenaje y las laderas son de pendientes fuertes, pueden acarrear gran volúmenes de material, en épocas de lluvias. Los procesos dominantes son la profundización de cauce, que detona deslizamientos de las laderas inestables.

Los torrentes son laboratorios naturales para estudiar la erosión y se dividen en tres partes:

- Cuenca de recepción, donde predomina la excavación.
- Canal de desagüe, donde se presenta erosión y acumulación de suelos.

- Cono de deyección, donde se forma un “abanico” por acumulación.

El torrente permite plantear la mayor proporción de problemas de erosión fluvial y escoger los mecanismos de trabajo de las corrientes de agua: Carga de materiales, su transporte y sedimentación.

Las aguas, discurriendo por las irregularidades del relieve, modifican los lechos de los cauces y los aproximan al perfil de equilibrio.

TIPO	ACCIÓN	EFFECTOS
<b>EROSIÓN POR LLUVIA:</b> La acción de las aguas lluvias, con la contribución de otros agentes climáticos, sobre la superficie del interfluvio.  <b>NOTA:</b> Las crestas del interfluvio son laderas (naturales) y taludes (construidos)	<b>Saltación pluvial:</b> Desalojo y dispersión por gotas de lluvia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Impacto de la gota de agua.</li> <li>● Reducción de la capa de infiltración.</li> <li>● Destrucción de los poros y de las fisuras del suelo expuesto</li> </ul>
	<b>ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DIFUSO</b>	
	<b>Erosión laminar:</b> Arrastre uniforme de capas de suelo a muy corta distancia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Escurrimiento de suelos limosos y arenosos.</li> <li>● Es fuente importante de sedimentos.</li> </ul>
	<b>ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL CONCENTRADO</b>	
	<b>Surcos de erosión:</b> El escurrimiento concentrado forma pequeños canales paralelos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Destrucción de taludes y laderas.</li> <li>● Alto aporte de sedimentos.</li> <li>● Los canales se borran con perfilado y labranza.</li> </ul>
	<b>Cárcavas:</b> Son zanjones profundos y de gran tamaño, por lo tanto son difíciles de controlar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Acentuar el relieve promoviendo otras formas de inestabilidad.</li> <li>● Fuente importante de sedimentos.</li> <li>● Corrección de alto costo.</li> </ul>
<b>EROSIÓN INTERNA:</b> Por flujo subterráneo.	<b>ESCURRIMIENTO SUBSUPERFICIAL</b>	
	<b>Tubificación y cavernas:</b> Debilitamiento interno.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Puede originar manantiales, cárcavas y hundimientos.</li> </ul>
<b>EROSIÓN FLUVIAL</b>	<b>Socavación de fondo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Profundiza el fondo de los cauces naturales</li> </ul>
	<b>Socavación lateral</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Elimina el soporte de laderas.</li> </ul>
	<b>Descarga torrencial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Efectos devastadores en las márgenes del cauce.</li> </ul>

**Tabla 8.1** Proceso de erosión hídrica y su contribución a la inestabilidad

#### 8.4 Remoción en masa

El término abarca un conjunto de procesos debidos a la transportación directa de materiales, por la acción de la gravedad, sin que medie un agente de transporte (hielo, agua, viento).

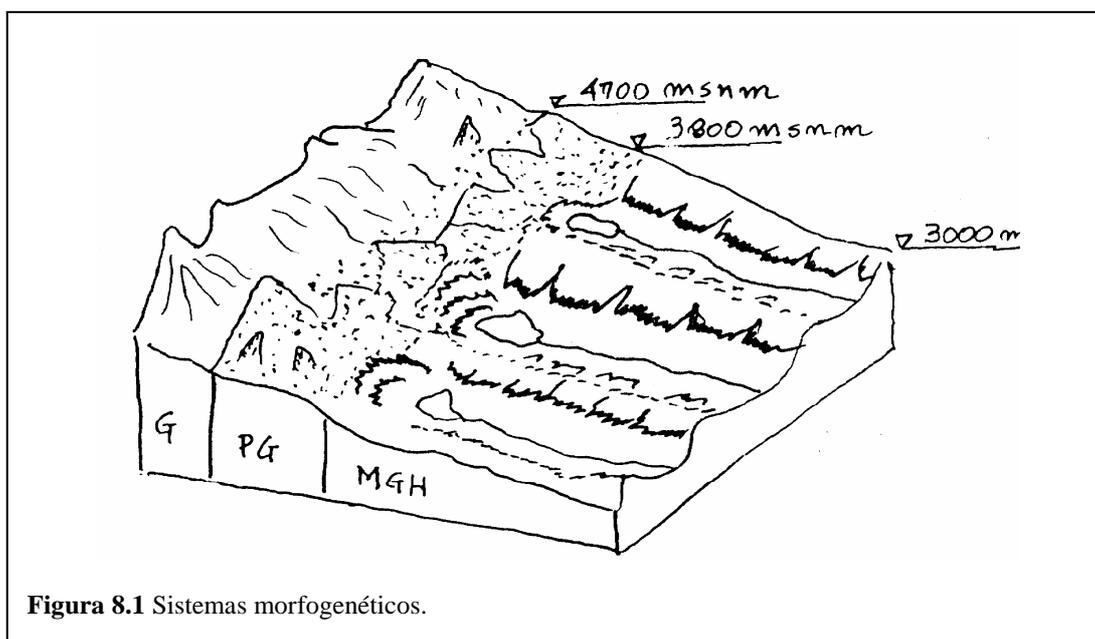
a. Desplazamiento en masa. Es la movilización descendente del material, en estado plástico o elástico, del interfluvio hacia la vaguada y en forma rápida o lenta. Estos fenómenos son del dominio de la Mecánica de Suelos.

b. Transporte en masa. Son movimientos de rápidos a muy rápidos de mezclas viscosas de agua y materiales térreos, que avanzan a lo largo de los cauces o sobre las depresiones del terreno y valles de salida de las corrientes. El flujo viscoso se puede originar a partir de masas desplazadas y su estudio es del dominio de la Mecánica de los fluidos.

### 8.5 Montañas altas en Colombia e inestabilidad (A. Florez)

Nuestras altas montañas presentan diferencia geomorfológica que es función de condiciones bioclimáticas ligadas al escalonamiento de altitudes.

Existen tres sistemas morfogenéticos ligados al frío actual y pasado, cuyos pisos resultantes son: Glaciar (G), periglaciar (PG) y de modelado glaciar heredado anteholoceno (MGH), ver figura 8.1.



A. PISO GLACIAR (G): Sobre 4700 metros sobre el nivel del mar, tenemos “glaciares de montaña”, que son masas de hielo en movimiento. En Colombia, la neoglaciación terminó hace 11500 años; en período histórico se han deglaciado el Cumbal, Chiles, Pan de Azucar, Puracé, Santa Rosa, Quindio y Cisne y los actuales relictos que suman menos de 100 Km<sup>2</sup>, son Huila, Tolima, Santa Isabel, Ruiz y las Sierras Nevadas de Chita, Santa Marta y Güicán.

Hoy retroceden y pierden espesor los nevados, las grietas glaciares aumentan y esta dinámica implica aportes de agua rápida y arrastres de sedimentos a los pisos inferiores, como también modificación de la frontera entre pisos, que va en ascenso, por inestabilidad del sistema.

B. PISO PERIGLACIAR (PG): Entre 3800m y 4700 m sobre el nivel del mar está la faja amortiguadora de los glaciares, pero este piso no necesariamente exige la presencia de un glaciar, aunque sí las condiciones de altitud y latitud para los procesos de frío y alternancia diaria o estacional del ciclo hielo – fusión. La ausencia de cobertura vegetal y de suelo es casi total, excepto en los niveles inferiores.

Los procesos son: Escurrimiento difuso y concentrado (por hielo – deshielo); reptación por hielo de exhudación, transportes eólicos (defloción); gelifracción de rocas, descamación de rocas, coladas de barro por fusión de nieve y colmatación de lagunas con sedimentos.

El sistema morfogénico evidencia inestabilidad (migración).

C. PISO DEL MODELADO ANTEHOLOCENO (MGH) En la gran glaciación, los hielos modelaron hasta los 3000 metros sobre el nivel del mar en Colombia, creando circos, valles en U y cubetas de sobreexcavación, y dejando morrenas y depósitos fluvio-glaciares. Hoy, estos modelados cuentan con cobertura vegetal buena y suelos orgánicos espesos. El piso comprende al páramo y parte del bosque alto – andino.

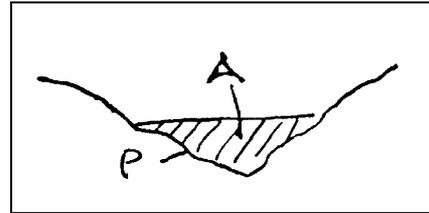
El modelado es abundante en cubetas de socavación glaciaria (hoy como lagunas o pantanos). Es el piso vital para las cuencas hidrográficas primarias. El sistema es muy estable hoy y sólo presenta procesos menores, como sufocación en formaciones superficiales porosas, soliflucción en suelos muy húmedos, disección por escurrimiento superficial y moderada reptación.

La dinámica descrita, es referida a condiciones exclusivamente naturales, pero la acción antrópica de las últimas décadas ha llevado a este escenario las quemadas, la deforestación y las actividades agropecuarias. El suelo, así, está expuesto a la erosión y pierde capacidad de infiltración (factores que repercuten en el ecosistema general).

### 8.6 Dinámica fluvial

La velocidad de una corriente fluvial, viene dada por:

$$v = C\sqrt{RI} \quad (8.1) \quad \text{siendo} \quad R = \frac{A}{P} \quad (8.2)$$



donde C = coeficiente de rugosidad del lecho, R el radio hidráulico (que es el cociente A/P) e I la pendiente (CHEZY – EYTELWEIN).

También puedo expresar el área de la sección en función del caudal Q y llevar el resultado de (2) a (1), para obtener

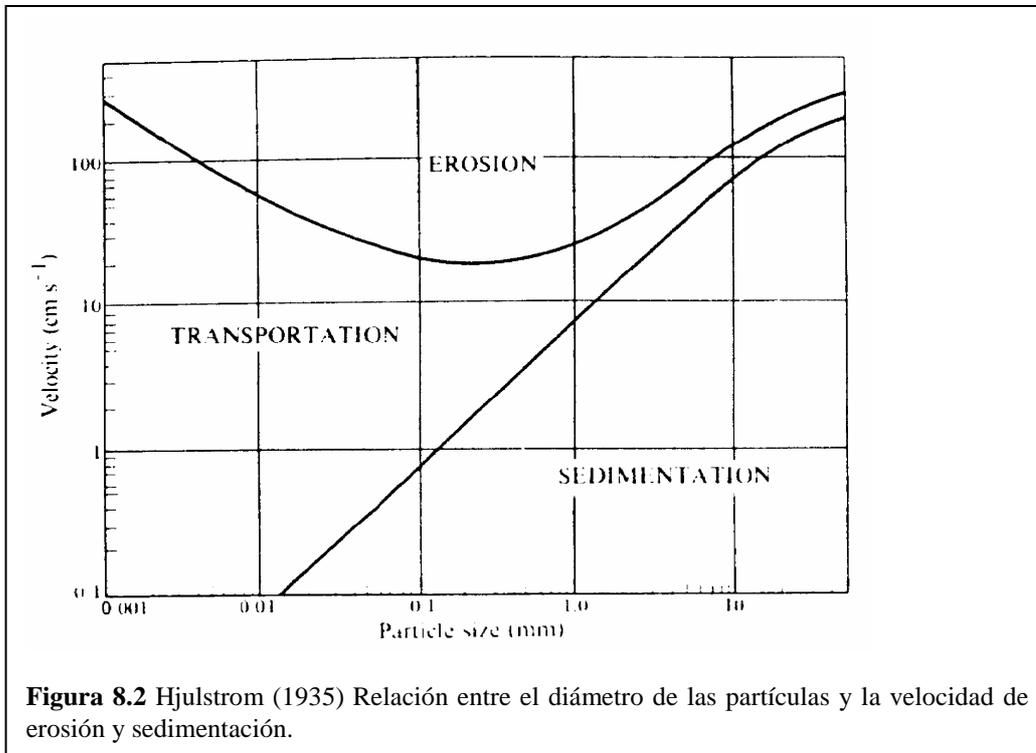
$$v = C\sqrt{\frac{Q}{v*P}} I \quad (8.3) \quad \left(\text{aquí se hizo } R = \frac{\left(\frac{Q}{v}\right)}{P}\right)$$

Transformando (3) para despejar v

$$v = \sqrt[3]{\frac{C^2 * Q * A}{P}} \quad (8.4) \quad \left(C = \frac{1}{n}; n = \text{coeficiente de Manning}\right)$$

Con (8.4) queda claro que la velocidad de la corriente no es constante en toda la sección inundada.

La velocidad media de la corriente es tan solo  $\frac{6}{10}$  a  $\frac{8}{10}$  de la velocidad máxima, la que no necesariamente está en el centro del río sino que oscila pasando de una a otra orilla, y en la vertical se sumerge algo.



### 8.7 Hidrotecnia y cuenca

El fenómeno torrencial supone caudales sólidos, crecidas violentas y repentinas. La carga de la corriente viaja en suspensión y como acarreo. La carga de acarreo proviene de la erosión en el cauce; la carga de suspensión proviene de la erosión en las laderas (laminar).

Pero el cauce genera acarreos de acuerdo al caudal y el caudal depende del estado de la cuenca. Ambos fenómenos van paralelos: Presencia de acarreos y erosión de cauces, y erosión y degradación de la cuenca receptora.

Las obras de ingeniería hidráulica usadas en la corrección del fenómeno torrencial, no puede dejar de lado la restauración de la cuenca, y la clave está en que la escorrentía se debe a la incapacidad del suelo para infiltrar agua. El descontrol hídrico trae como consecuencia el secamiento de los ríos en verano y crecientes severas en invierno.

#### 8.7.1 Restauración biológica de la cuenca.

Corrección torrencial y control hidrológico en las laderas son acciones complementarias; ambas apuntan a la estimulación de la vegetación y al control del agua. Mayor infiltración y tiempo de concentración de aguas sugiere acciones de conservación, mejora e implantación de cubiertas arbóreas. La reforestación se hace prioritaria con distancias de siembra y especies que estimulen el sotobosque para lograr un sistema eficiente en la intercepción de agua.

Se requieren masas mezcladas e irregulares de estratos arbustivos y herbáceos nativos para el equilibrio ecológico natural, que se logra solo recuperando y restableciendo las cadenas bióticas.

Las cubiertas herbáceas permanentes productoras, sólo para pendientes abajo del 35%, si el suelo lo admite, por su extensión, régimen, clase y estado.

### 8.7.2 Hidrotécnia y cauce.

La corrección torrencial está orientada a controlar procesos en el lecho y las márgenes.

El dinamismo torrencial aparece ligado a la tensión tractiva  $\tau$ , que arranca y transporta acarreos, dada por:

$$\tau = \gamma_w R I \quad (8.5)$$

donde  $\gamma_w$  es el peso específico de la corriente, R el radio hidráulico e I la pendiente o gradiente hidráulico (línea de energía).

A esa tensión  $\tau$  se oponen los materiales con su peso, inercia, fricción, etc., generando una resistencia dada por la tensión crítica  $\tau_c$ :

$$\tau_c = K(\gamma_s - \gamma_w)d_{50} \quad (8.6)$$

donde K es un coeficiente que se determina experimentalmente y  $\gamma_s$  el peso específico de los materiales acarreados ( $\gamma_s - \gamma_w$ ) es  $\gamma'$ .

La calificación del estado torrencial se hará en secciones homogéneas, comparando  $\tau$  con  $\tau_c$ , es decir, tensión tractiva Vs tensión crítica del contorno. Además  $\gamma_w > 1$  (con materiales en suspensión).

### 8.7.3 Control vertical y pendiente de compensación $I_c$

Cuando  $\tau > \tau_c$ , los lechos descienden y los macizos adyacentes se desestabilizan. Así, las obras transversales ofrecen soluciones simples y eficaces. Estas obras forman diques de consolidación, a modo de presas. Sea R el radio hidráulico y n el coeficiente de rugosidad ( $1/C$ )

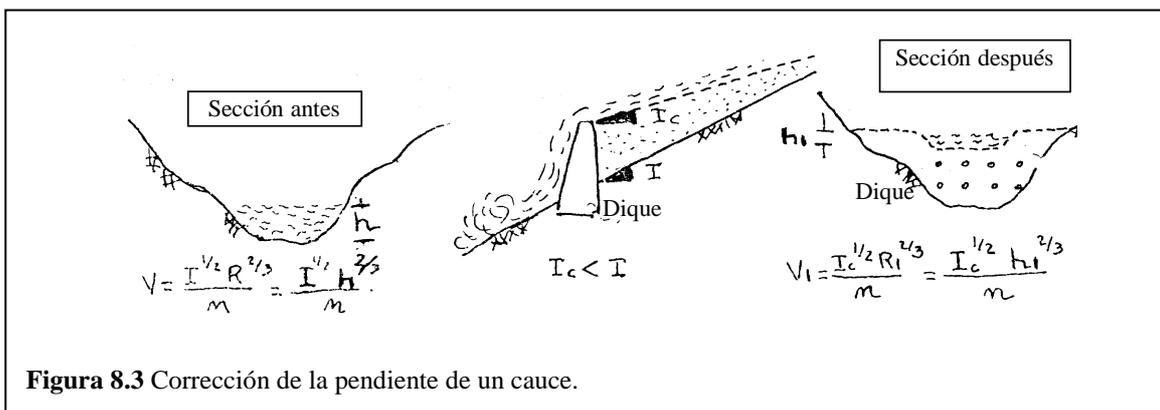
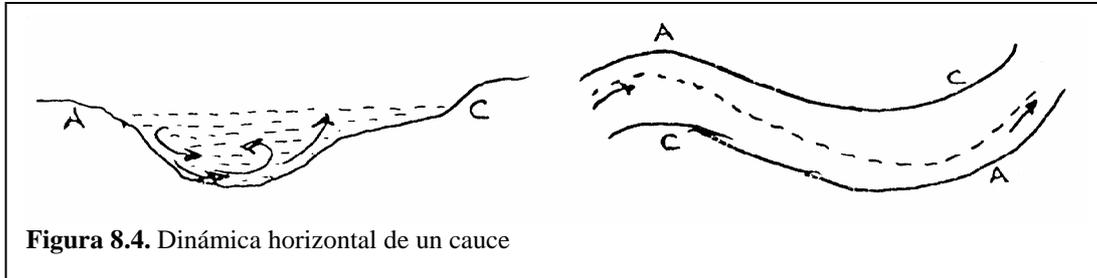


Figura 8.3 Corrección de la pendiente de un cauce.

### 8.7.4 Control horizontal

La rectificación del eje hidráulico procede cuando caudales circundantes con tensiones tractivas que superan las tensiones resistentes del contorno.

El fenómeno de erosión y sedimentación es normal en cuerpos de agua con un régimen fluvial o semifluvial, y se presenta en tramos donde la fuerza centrífuga que tiene el agua, en las curvas sobreexcava la superficie libre externa de las curvas del cauce.

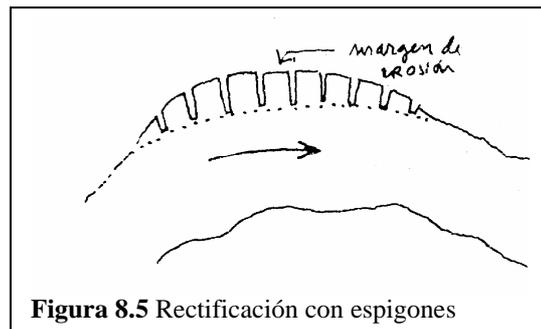


**Figura 8.4.** Dinámica horizontal de un cauce

El proceso no logra equilibrar las tensiones totalmente, en razón a que el fenómeno de erosión y sedimentación hace inestables los meandros y obliga a la ejecución de obras longitudinales para el control horizontal de la tensión tractiva sobre las márgenes. Sólo en casos limitados proceden las obras transversales para fijar el lecho.

La protección de márgenes puede conseguirse con barreras continuas resistentes a la erosión, como muros rígidos (hormigón, mampostería hidráulica), muros flexibles (mampostería gavionada), revestimiento con materiales de mayor diámetro que los del lecho o mediante plantaciones y recubrimientos vegetales.

Los espigones transversales, también, por que generan espacios de sedimentación donde antes la corriente erosionaba, aunque debe considerarse el incremento de la velocidad de la corriente global por reducción de la sección útil del cauce, e incremento del radio hidráulico  $R$ . El centro del cauce queda amenazado de erosión.

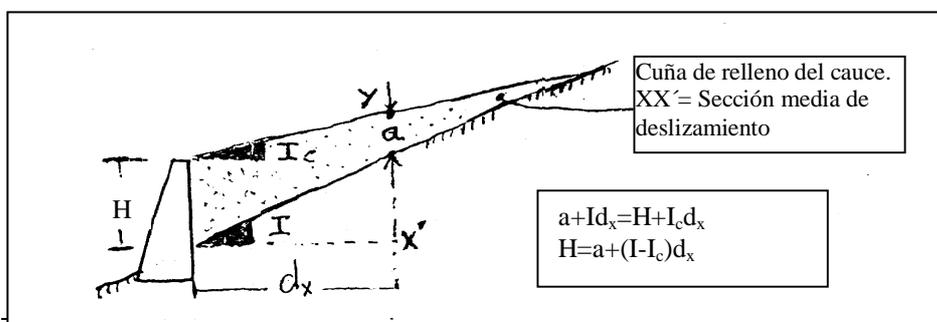


**Figura 8.5** Rectificación con espigones

### 8.7.5 Emplazamiento de obras

Diques de retención. Se emplazan aguas arriba de la zona de daños, aprovechando gargantas estrechas de la vaguada, o en ensanchamientos, para construir trampas de sedimentos.

Diques de consolidación. Para consolidar las laderas marginales se construyen diques emplazados de tal manera que en la sección transversal media del deslizamiento, la altura de la cuña de relleno,  $a$ , sea suficiente para contener la ladera.

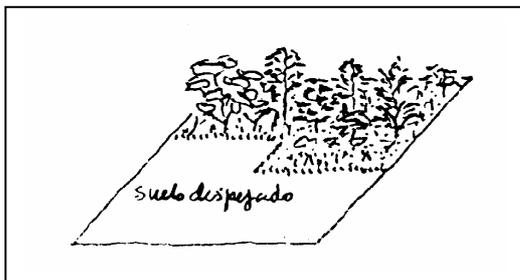


Dique de retención: Su altura compromete las terrazas cultivadas.

Dique de contención: Su altura colabora a estabilizar una ladera, gracias a la cuña sedimentada.

Espigones. Su longitud  $L_T$  es  $h \leq L_T \leq B/4$ . Si se le da empotramiento en la margen =  $0,25 L_T$ . El ángulo con el eje del río  $70^\circ - 90^\circ$ . Su separación depende del  $L_T$  del primero, del ángulo con la orilla de aguas abajo. En curvas,  $S_p \leq 8L_T$  y en rectas  $S_p \leq 6 L_T$  (medida económica); pero también  $5,1L_T \leq S_p \leq 6,3L_T$ . Si el riesgo es alto  $S_p = 4 L_T$ . Deben tener pendiente hacia el río entre 5% - 25% y profundidad suficiente para prevenir su socavación.

**Ejercicio 8.1:** erosión por cambio de uso del suelo



Se tiene un claro despejado con tractor para un proyecto de construcción. a) Discuta sus problemas y expectativas de erosión. b) Valore los efectos del proyecto. c) Concluya.

$$A = RK (LS) CP = \text{EROSIÓN} \quad (1)$$

a) Discusión: Los factores R de lluvia y K de erodabilidad del suelo, no cambian por las adecuaciones específicas del lote que se desea construir. Entonces:

$$\text{EROSIÓN} = (LS) CP \quad (2)$$

En la parcela, las condiciones topográficas (LS), como el uso del suelo y las prácticas de conservación, sí se afectan. El movimiento de tierras con el tractor modifica la longitud e inclinación de las pendientes, y en general, el resultado es que el factor (LS) aumenta. Los cambios en la vegetación también son evaluables (en este caso C aumenta), y las condiciones de conservación P dependerán del diseño y concepción del proyecto.

b) Valoración del efecto erosivo: con base en (2) (para  $P = 1 = \text{constante}$ ):

Condición	Modificación prevista
(LS) Pendientes antes del modelado $5^\circ$	$5^\circ / 9^\circ \Rightarrow LS = 0,56$
(LS) Pendientes luego del modelado $12^\circ$	$12^\circ / 9^\circ \Rightarrow LS = 1,34$
C Antes de la tala	$C = 0,2$
C Después de la tala	$C = 1,0$

Aplicando (1) bajo los anteriores presupuestos ( $P = 1 = \text{constante}$ ):

EROSIÓN antes de la construcción:  $RK (0,56)(0,2) = 11,3 RK$

EROSIÓN después de la construcción:  $RK (1,34)(1,0) = 1,340 RK$

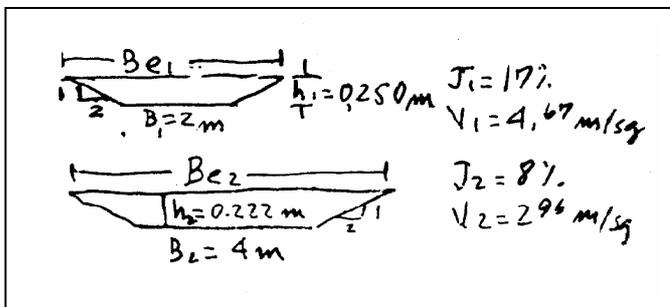
c) Conclusión: La erosión en el lugar se incrementará cerca de 12 veces. Se requiere, en consecuencia, incluir medidas para el control de la erosión, haciendo que  $P = 0,3 - 0,4$ , y logrando que el incremento de la erosión sea sólo de unas 4 veces.

Granulometría

Tamiz	W ret (gr)	% pasa
75	500	83,3
63	550	65,0
50	650	43,3
37,5	450	28,3
28	350	16,6
20	150	11,6
14	150	6,6
10	50	4,9
6,3	100	1,6
6,3	50	-----

**Ejercicio 8.2.** En un cauce erosionado se toman los siguientes datos: Peso unitario del fluido  $\gamma_f = 1,11$  TT/m<sup>3</sup>, altura de la lámina de agua  $h_f = 0,25$ m, pendiente del lecho  $J = 17\%$ , gravedad específica  $G_s = 2,65$ . Además la granulometría adjunta del material del lecho ( $W_T = 3000$ gr) con su geometría (subíndices y figura 1) y velocidad  $V_1$  de flujo. Si se hace la corrección con dique de consolidación y establecimiento de vegetación ( $\gamma_f = 1,00$  TT/m<sup>3</sup>) ampliando la sección del cauce (subíndices 2) y rebajando la pendiente al 8%.

Hallar las tensiones tractivas para  $d_{50}$  y críticas 1 y 2, y calculas las profundidades de socavación  $S_1$  y  $S_2$ . Analice los cambios hidrotécnicos.



Se tiene  $Q = 2,92$  m<sup>3</sup>/s y  $V_2 = 2,96$  m/s

Solución: a) De la granulometría  $d_{10} = 4$ mm,  $d_{30} = 28$ mm,  $d_{50} = 41$ mm,  $d_{60} = 45$ mm,  $C_U = 11,25$ ,  $C_C = 4,36$ .

El rango de interés granulométrico sea del  $T = 1 \frac{1}{2}$ ' al  $T = N^\circ 4$ .

De consideraciones hidráulicas se han

obtenido  $Q$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $K$ ,  $\mu$  y  $n$ .

- b) Cálculo de tensión tractiva  $\tau$  y tensión crítica  $\tau_c$  ( $K = 0,047$ )

$$\tau_1 = \gamma_{f1} * h_1 * J_1 = 1,10 * 0,250 * 0,17 = 0,05 \text{ TT/m}^2$$

$$\tau_2 = \gamma_{f2} * h_2 * J_2 = 1,00 * 0,222 * 0,08 = 0,02 \text{ TT/m}^2$$

$$\tau_{C1} = K(\gamma_S - \gamma_{f1})d_{50} = 0,047(2,65 - 1,10)0,041 = 0,0030 \text{ TT/m}^2$$

$$\tau_{C2} = K(\gamma_S - \gamma_{f2})d_{50} = 0,047(2,65 - 1,00) * 0,041 = 0,0032 \text{ TT/m}^2$$

- c) Cálculo del diámetro de equilibrio  $d_{150}$  y  $d_{250}$ . (La condición es  $\tau_c = \tau$ , Fórmulas 8.1 y 8.2)

$$\tau_{C1} = \tau_1 \Rightarrow d_{150} = \frac{\tau_{C1}}{K(\gamma_S - \gamma_{f1})} = \frac{0,05}{0,047(2,65 - 1,10)} = 0,68 \text{ m}$$

$$\tau_{C2} = \tau_2 \Rightarrow d_{250} = \frac{\tau_{C2}}{K(\gamma_S - \gamma_{f2})} = \frac{0,02}{0,047(2,65 - 1,00)} = 0,26 \text{ m}$$

En la situación nueva (2) cantos de  $\phi > 26$  cm resultan estables. En la situación anterior (1) se movilizaban cantos mayores ( $\phi < 69$  cm)

- d) Oferta de la granulometría del cauce. (Diámetro medio,  $dm$ , en el rango sugerido de los cinco tamices)

$$\sum d_i = (14 + 20 + 28 + 37,5 + 50) = 149,5mm$$

$$\sum P_i = \frac{\sum W_i}{W_T} = \frac{(150 + 150 + 350 + 450 + 650)}{3000} = 58,3\%$$

$$dm = \frac{\sum d_1 * \sum P_i}{100} = \frac{149,5 * 58,3}{100} = 87,2mm$$

- e) Cálculo de socavación ( $S_i$ )  
Partimos del tirante  $H$ , que es la altura de la columna de agua más la socavación: ( $H = h + S$ )

$$H = \left[ \frac{\alpha * h^{1,667}}{0,68 \beta * dm^{0,28}} \right]^{1+X}$$

#### Condiciones iniciales

$$h_1 = 0,250m, B_{e1} = 3m, A_1 = 0,625m^2$$

$$Pm_1 = \frac{A_1}{B_{e1}} = \frac{0,625}{3} = 0,208m$$

$$\alpha_1 = \frac{Q}{Pm_1^{1,667} * B_{e1} * \mu} = \frac{2,95}{0,208^{1,667} * 3 * 1} = 13,47$$

$$H_1 = \left[ \frac{13,47 * 0,250^{1,667}}{0,68 * 1,00 * 87,2^{0,28}} \right]^{0,770} = 0,642m$$

$$S_1 = H_1 - h_1 = 0,642 - 0,250 = 0,392m$$

#### Condiciones finales

$$h_2 = 0,222m, B_{e2} = 4,89m, A_2 = 0,987m^2$$

$$Pm_2 = \frac{A_2}{B_{e2}} = \frac{0,987}{4,89} = 0,202m$$

$$\alpha_2 = \frac{2,95}{0,202^{1,667} * 4,89 * 1} = 8,679$$

$$H_2 = \left[ \frac{8,679 * 0,222^{1,667}}{0,68 * 1,00 * 87,2^{0,28}} \right]^{0,770} = 0,393m$$

$$S_2 = H_2 - h_2 = 0,393 - 0,222 = 0,171m$$

Interpolación para X:

$$X = f(Y)$$

$$\frac{(60 - 40)}{(0,29 - 0,30)} = \frac{18,3}{Y} \Rightarrow Y = 0,009$$

$$\therefore X = 0,298 \Rightarrow \frac{1}{1 + X} = 0,770$$

El valor de X es de tablas

Asumimos:  $\beta, \mu, n$

$\beta = 1,00$  = factor que depende de la probabilidad de Q

$\mu = 1,00$  = Coeficiente de contracción – sin obstáculos

$n = 0,035$ . Manning

$$Q = A * V = 2,95 m^3/s$$

$$\text{donde } V = \frac{1}{n} * h^{2/3} * J^{1/2}$$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{2,95}{0,625} = 4,72 m/s$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{2,95}{0,987} = 2,99 m/s$$

Resumen y análisis

	b	T	H	J	$\tau$	$\tau_c$	dm	S	V	Pm
SECCIÓN 1	2	3	0,250	17%	0,05	0,0030	87,2	0,392	4,72	3,12
SECCIÓN 2	4	4,89	0,222	8%	0,02	0,0032	87,2	0,171	2,09	4,99
$\Delta = \frac{F-i}{i} * 100$	+100	+63	-11,2	-59,2	-60	+6,7		-54	-36,6	+56,9

- Disminuye la velocidad porque aumenta el perímetro mojado Pm.
- Disminuye la pendiente J, se amplia B, aumenta  $\tau$  y disminuye h.
- Se controla la erosión porque disminuye  $\tau$  y aumenta  $\tau_c$ .
- La reducción de V y el aumento de Pm explican la menor socavación S.
- Las medidas de reforestación son para retirar los sólidos de la corriente.
- Con las variaciones en  $\tau$  y  $\tau_c$  el cauce toma una nueva configuración. El nuevo  $d_{50}$  de equilibrio es menor al dm que ofrece el cauce.
- La erosión del lecho compromete más rápidamente los finos, lo que trae como consecuencia el cambio del número de Manning.
- La profundidad para la cimentación del dique debe ser superior a  $H_2 = 0,392$  m para prevenir su socavación.
- Aguas abajo del dique, se observará un cauce sin finos, con una granulometría gruesa, porque el agua, que ha perdido carga de finos, los tomará aguas abajo del dique.
- Aguas arriba del dique, se observará un excedente de finos, en virtud a un proceso de sedimentación que irá progresando hacia aguas arriba, por el cambio de nivel de base de la corriente.
- El acorazamiento del cauce es el fenómeno con el cual responde la corriente, ya desprovista de finos, aguas abajo. Se trata de un cauce con un lecho de alta rugosidad.

Regresar a Contenido  
del libro M d S