

Naturaleza del sedimento

Pérdida de suelos

Temario:

Aspectos físicos

Pérdida de suelos

Aspectos químicos

Posición relativa de los sedimentos

Aspectos biológicos

Modelos de arrastre de sedimentos

Objetivo 2: Entender la naturaleza de los sedimentos, para establecer medidas de control de los mismos

Textura de un suelo: es la proporción relativa de los diferentes componentes minerales del suelo: arena (partículas cuyo tamaño está comprendido entre 2 y 0,05 mm), limo (entre 0,05 y 0,002 mm), y fracción fina (inferior a 0,002 mm) llamada comúnmente arcilla aunque contenga también otros minerales (López, et.al., 2002).

Aspectos físicos de los sedimentos (Peck, et.al. 1983)

Naturaleza física de los sedimentos: el estado físico nos habla acerca de la forma en que encontraremos las partículas de sedimentos, después de un tiempo de transporte. Las partículas se pueden encontrar en estado sólido, líquido o hasta gaseoso. En estado sólido podemos nombrar las partículas que sedimentan o se mantienen en suspensión, las cuales dependen de su peso, estructura molecular y electrostática. En estado líquido, encontramos aquellas partículas que por su composición química, tienen oportunidad de disolverse cuando entran en contacto con el agua, a una granulometría también particular que permite la disolución. En estado gaseoso, las partículas que reaccionan con elementos o compuestos presentes en el agua, de los cuales los productos o subproductos de la reacción son gases. Igualmente, algunos gases pueden disolverse en líquidos.

Tamaño de las partículas de sedimentos: la propiedad más importante de los granos en los suelos de grano grueso es su distribución granulométrica o por tamaños. El tamaño de las partículas permite clasificarlas en rangos de tamaños, tal y como se vio en la clasificación de la ASTM referida en el Capítulo del Objetivo 1. Otra clasificación tomada de Marsh (1991) se muestra en la siguiente tabla:

Escala estándar de tamaños de partículas de suelo		
	Clasificación	Tamaño relativo (mm)
	Grava	> 2
	Muy gruesa	2 – 1
	Gruesa	1 – 0,5
Arena	Media	0,5 – 0,25
	Fina	0,25 – 0,1
	Muy fina	0,1 – 0,05
	Limo	0,05 – 0,002
	Arcilla	< 0,002

Fuente: Marsh, 1991.

También Casanova (1996), muestra una tabla que se ve a continuación con otros sistemas de clasificación de tamaños de partículas más usados en las ciencias del suelo:

Sistema de clasificación de tamaño de partículas más usadas

<i>Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)</i>			<i>Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS)</i>		
Diámetro mm		Denominación	Diámetro mm		Denominación
> 2.0		Fragmentos Gruesos	> 2.0		Fragmentos Gruesos
2.00	0.05	ARENA	2.00		ARENA
2.00	1.00	Muy gruesa			
1.00	0.50	Gruesa	2.00	0.20	Gruesa
0.50	0.25	Media			
0.25	0.10	Fina	0.20	0.02	Fina
0.10	0.05	Muy fina			
0.05	0.002	LIMO	0.02	0.002	LIMO
< 0.002		ARCILLA	< 0.002		ARCILLA

Fuente: Casanova, 1996.

Se considera además, que las partículas mayores que los tamaños de grava son llamados «Cantos rodados».

Forma y redondez de las partículas de sedimentos: la forma de las partículas que componen el suelo determina el grado de disgregación y transporte que han sufrido los granos. Mientras más redondeados sus cantos, mayor transporte y por tanto más lejos se encuentra la fuente que le dio origen. Peck, et.al. (1983), clasifican a las partículas grandes de la siguiente manera: redondeadas, subredondeadas, angulares y subangulares.

Estructura de los suelos: los suelos pueden tener estructura primaria y estructura secundaria. La estructura primaria se refiere a la forma en que están dispuestos los granos en un suelo. Esta disposición se forma usualmente durante el proceso de sedimentación. La estructura primaria puede describirse como simple, floculada o dispersa. En la estructura simple, cada grano toca varios de sus vecinos, de manera que el conjunto es estable aunque no hubiera fuerzas de adherencia en los puntos de contacto entre granos. El acomodo puede ser compacto o suelto, y las propiedades del conjunto se ven afectadas por la compacidad.

Los tipos principales de estructuras secundarias los forman las grietas, juntas, superficies de resbalamiento y concreciones. Las grietas y juntas se forman comúnmente como resultado de la desecación, algunas veces después de la deposición del material.

Pérdida de suelos, Formas de cálculo: a finales de los años cuarenta se empezaron a estudiar una serie de modelos de erosión encaminados a predecir, estimar y cuantificar las pérdidas de suelo, debidas a la erosión superficial, que se produce en una zona determinada. Como fruto de estas investigaciones, es la «Ecuación Universal de Pérdida de Suelo» de Wischmeier y Smith, 1958.

La ecuación es la siguiente:

$$A = 2,24 * R * K * L * S * C * P$$

siendo:

A: pérdida media anual de suelo (t / ha);

R: factor de lluvia;

K: factor de erosionabilidad del suelo;

L: factor de longitud del declive del talud;

S: factor de pendiente del talud;

C: factor de cubierta vegetal y uso del suelo;

P: factor de control de la erosión.

El factor de lluvia «R», define como el producto de dos características de la lluvia: la energía cinética «E» y la intensidad máxima durante 30 minutos «I₃₀». El valor de «R» puede estimarse para un chubasco mediante la ecuación:

$$R = \frac{[\sum (1.213 + 0.89 * \log_{10} * I_j) * (I_j * T_j)] * I_{30}}{173.6}$$

donde:

I_j: intensidad de precipitación para un incremento de intensidad (mm / h);

T_j: período del incremento del chubasco (h);

I₃₀: intensidad máxima de precipitación en 30 minutos;

j: incremento del chubasco;

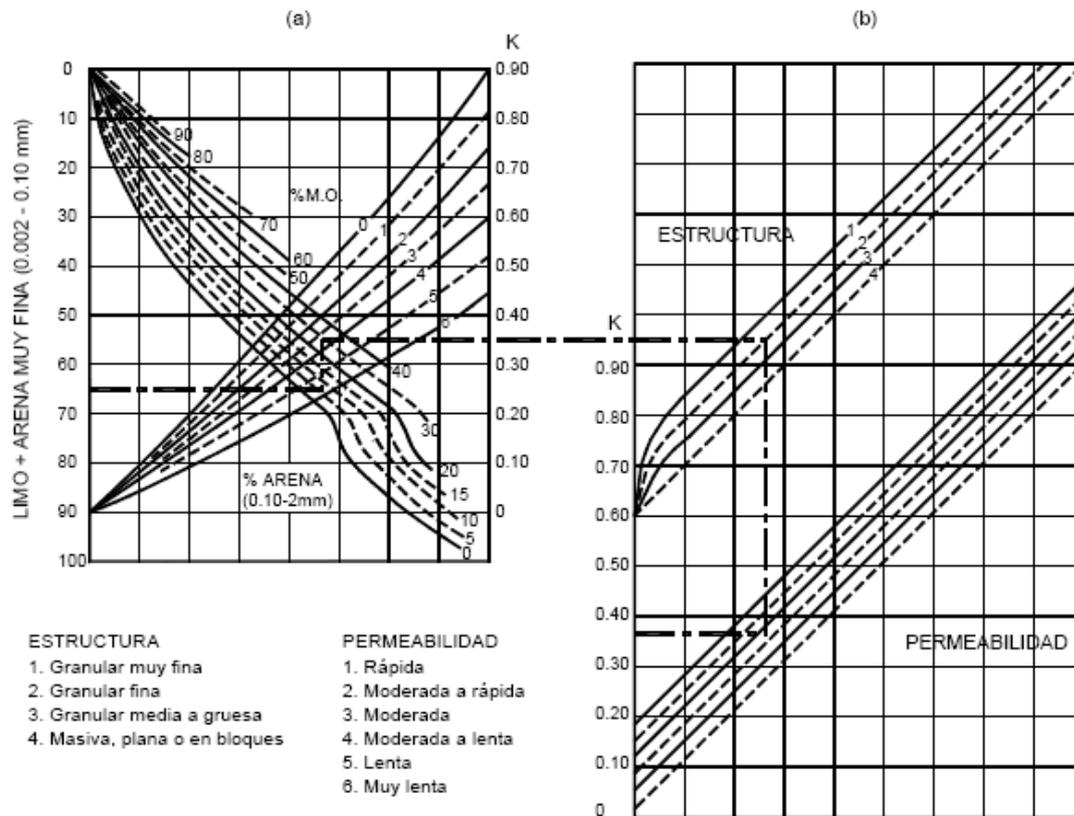
n: número de incrementos del chubasco.

Si se calcula «R» como producto de las dos variables citadas, los valores de «E» pueden estimarse con una tabla donde están tabulados los valores, conociendo la intensidad de precipitación en una hora.

El factor de erosionabilidad «K» varía entre 0,3 y 0,7 y depende de las propiedades del suelo, especialmente del contenido en materia orgánica, la textura, la estructura y la permeabilidad. El cálculo de «K» puede hacerse a partir del nomograma de Wischmeier.

El siguiente ábaco es para la determinación gráfica del índice de erosionabilidad «K»:

**Objetivo 2: Entender la naturaleza de los sedimentos.
Pérdida de suelos. Arrastre de sedimentos.**



Fuente: Suárez (2001)

El factor de longitud de declive de talud «L» y es de pendiente de talud «S» se suelen evaluar conjuntamente y se denomina factor topográfico «LS». Estos dos factores afectan a la capacidad de la escorrentía para desprender y transportar los materiales del suelo al aumentar la velocidad y por consiguiente, al potencial erosivo del agua. El valor de «LS» puede estimarse con la expresión:

$$LS = \left[x / 22.13 \right]^m (0.065 + 0.045 * S + 0.0065 * S^2)$$

donde:

x: longitud de declive del talud (m);

m: 0,5 si la pendiente es $\geq 5 \%$;

0,4 si la pendiente es $< 5 \%$ y $> 3 \%$;

0,3 si la pendiente es $\leq 3 \%$ y $\geq 1 \%$;

0,2 si la pendiente es $< 1 \%$.

S: pendiente del talud (%).

Hay gráficos preparados y tabulados para calcular «LS».

**Objetivo 2: Entender la naturaleza de los sedimentos.
Pérdida de suelos. Arrastre de sedimentos.**

El factor «C» de cobertura vegetal y uso del suelo incluye los efectos interrelacionados del tipo de cubierta vegetal, la secuencia de la misma en el caso de cultivos, la distribución de la precipitación, etc. En los terrenos recuperados en minería, cuando los «suelos» son depositados sobre los estériles, no existe inicialmente ninguna protección vegetal y el factor «C» es igual a 1. Sin embargo, con la aplicación de un mulch se puede reducir inmediatamente su valor hasta niveles aceptables. Los valores de «C» obtenidos con el mulch se encuentran tabulados en un gráfico y una tabla que muestra los diferentes tipos de cubierta existentes.

Valores de «C» para cobertura vegetal

Tipo y altura de la cobertura	Porcentaje de cubrimiento del suelo					
	Coeficiente C					
	0	20	40	60	80	95-100
Cobertura de pastos bajos	.45	.20	.10	.042	.013	.003
Cobertura de pastos y hierbas (0.5m).	.36	.17	.09	.038	.012	.003
Arbustos (2m)	.40	.18	.09	.040	.013	.003
Árboles (4m)	.42	.19	.10	.041	.013	.003

Fuente: Suárez (2001)

Valores de «C» para bosques

% de área cubierta	Tipo de ordenación	
	Coeficiente C	
	Sin pastoreo	Con pastoreo
100 - 75	0.001	0.003 - 0.0011
75 - 40	0.002 - 0.003	0.01 - 0.03
40 - 20	0.003 - 0.009	0.03 - 0.09

Fuente: Suárez (2001)

El factor de prácticas de conservación «P» refleja la efectividad de medidas protectoras, tales como el establecimiento de terrazas o bermas, diques o canales para la desviación de las aguas, entre otros. Si tales obras no se realizan el factor «P» tendrá un valor de 1. La siguiente tabla recoge los valores de este factor en función de la pendiente de los taludes cuando se dispone de terrazas o diques de desvío.

Pendiente del talud (%)	Valor de «P»
1 - 2	0,12
3 - 8	0,10
9 - 12	0,12
13 - 16	0,14
17 - 20	0,16
21 - 25	0,18

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990).

Sugerencia: consulte el material de Control de la erosión y obras de desagüe, páginas 287 – 390.

Aspectos químicos

Sólidos (Romero, 1999)

Incluye toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos:

- **Sólidos totales:** se define como sólido la materia que permanece como residuo después de evaporación y secado a 103°C. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto (sólidos suspendidos).
- **Sólidos disueltos:** o residuo filtrante, son determinados directamente o por diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos.
- **Sólidos suspendidos:** o residuos no filtrable o material no disuelto, son determinados por filtración a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol de Gooch previamente pesado. El crisol con su contenido se seca a 103 – 105°C; el incremento de peso, sobre el peso inicial, representa el contenido de sólido suspendidos o residuo no filtrable.
- **Sólidos volátiles y sólidos fijos:** en aguas residuales y lodos, se acostumbra hacer esta determinación con el fin de obtener una medida de la cantidad de materia orgánica presente. El contenido de sólidos volátiles se interpreta en función de materia orgánica, la cual no es exacta pues la pérdida de peso puede incluir también descomposición o volatilización de ciertas sales minerales.
- **Sólidos sedimentables:** la denominación se aplica a los sólidos en suspensión que se sedimentarán, bajo condiciones tranquilas, por acción de la gravedad. Los procedimientos usados en la determinación del contenido de sólidos son métodos gravimétricos y como tales requieren la determinación del peso de crisoles o de cápsulas con o sin residuos. La determinación de sólidos sedimentables es básica para establecer la necesidad del diseño de tanques de sedimentación como unidades de tratamiento y para controlar su eficiencia.

Hierro en la composición química de los sedimentos

El hierro crea problemas en los suministros de agua. En general estos problemas son más comunes en aguas subterráneas; en algunos casos también en aguas superficiales provenientes de algunos ríos y embalses.

El hierro existe en suelos y minerales principalmente como óxido férrico insoluble y sulfuro de hierro, FeS₂, pirita. En algunas áreas se presenta también como carbonato ferroso, siderita, la cual es poco soluble.

Los hechos que indican que el hierro entra en solución en el agua, mediante cambios producidos en las condiciones ambientales por acción biológica, son las siguientes:

1. Aguas subterráneas que contienen cantidades apreciables de hierro, carecen siempre de oxígeno diluido y poseen un contenido alto de CO₂. El hierro está presente como Fe⁺⁺.

2. Se conoce que el Fe^{3+} son las únicas formas estables del hierro en aguas que contengan oxígeno. Por ello estas formas pueden ser reducidas, a las formas solubles Fe^{2+} , solamente bajo condiciones reductoras anaerobias.

De conformidad con lo anterior, el hierro insoluble es reducido a sus formas solubles en condiciones anaerobias, es decir que, el desarrollo de condiciones anaerobias es esencial para que el hierro se disuelva en cantidades apreciables en los suministros de agua.

Las aguas con hierro al ser expuestas al aire, por acción del oxígeno, se hacen turbias e inaceptables estáticamente debido a la oxidación del hierro, en Fe^{+++} , los cuales forman precipitados coloidales. La tasa de oxidación es lenta y por ello el hierro soluble puede persistir por algún tiempo en aguas aireadas; esto es generalmente válidas para el hierro cuando el pH es menor de 6.

Conocer las propiedades químicas y físicas de los suelos resulta de importancia, porque nos permite predecir las reacciones químicas que pueden ocurrir en el suelo, bajo ciertas condiciones, el cual tiene repercusiones en las propiedades físicas de los mismos.

Minerales del suelo: primarios y secundarios

Un mineral es un elemento químico o un compuesto inorgánico que ocurre en forma natural y que es el resultado de procesos inorgánicos y orgánicos. Es importante conocer cuales son, porque de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, doce son provenientes de los minerales del suelo. Entonces, la productividad de los suelos depende en cierta forma de la liberación de esos elementos químicos para su aprovechamiento por las plantas, por lo que es importante conocer la cantidad y tipos de minerales presentes en un suelo (Casanova, 1996).

De acuerdo a su origen, los minerales se pueden clasificar en primarios y secundarios. Los «minerales primarios» se forman a temperaturas y/o presiones más altas a las que normalmente se encuentran en la superficie de la tierra. Los «minerales secundarios» se forman bajo las condiciones de temperatura y presión que generalmente se encuentran en la superficie de la tierra y a través de la meteorización de minerales ya existentes. El resultado de este proceso no sólo determina la formación de los minerales secundarios, sino que frecuentemente hace que algunos elementos sean llevados a la solución en el suelo y parte de ellos pueden ser lavados (...), y servir como fuente de nutrimentos para las plantas. También estos elementos pueden recombinarse para formar otros minerales secundarios.

En las siguientes tablas se muestran los principales minerales primarios y secundarios en los suelos, según Casanova (1996):

Principales minerales primarios y su composición química	
<i>Mineral</i>	<i>Composición química</i>
Cuarzo	SiO ₂
Silicatos no Ferromagnésicos	
Feldespatos	
Ortoclasas	KAlSi ₃ O ₈ (ortosa y microclino)
Plagioclasas	NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈ (albita) (anortita)
Mica	
Moscovita	AlSi ₃ O ₁₀ Al ₂ (OH) ₂ K
Silicatos Ferromagnésicos	
Mica	
Biotita	AlSi ₃ O ₁₀ (Mg,Fe) ₃ (OH) ₂ K
Clorita	(Mg, Fe, Al) ₃ (OH) ₆ (Mg, Fe, Al) ₃ (Al _x Si _{4-x})O ₁₀ (OH) ₂
Anfíboles	
Tremolita	Ca ₂ Mg ₅ (OH, F) ₂ (Si ₄ O ₁₁) ₂
Hornblenda	(Na, Ca, Mg, Fe) ₂₋₃ (Mg, Fe) ₅₋₇ (Al _{2-x} Si _{6+x})O ₂₂ (OH) ₂
Piroxenos	
Peridotos	(Ca, Mg, Fe) ₂ Si ₂ O ₆
Olivino	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄

Fuente: Casanova, 1996.

Principales minerales secundarios y su composición química	
<i>Mineral</i>	<i>Composición química</i>
Arcilla	
Caolinita	Al ₂ (OH) ₄ (Si ₂ O ₅)
Montmorillonita	(Al _{2-n} , Mg _n)(Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ (Ca ₆ (H ₂ O)) _{n/2}
Illita	K(OH) ₂ Al ₂ (Si ₃ AlO ₁₀)
Óxidos de hierro	
Hematita	Fe ₂ O ₃
Goethita	FeO(OH)
Óxidos de aluminio	
Gibbsita	Al(OH) ₃
Carbonatos	
Calcita	CaCO ₃
Magnesita	MgCO ₃
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
Siderita	FeCO ₃
Sulfatos y sulfuros	
Yeso	CaSO ₄ *2H ₂ O
Pirita	FeS ₂
Fosfatos	
Apatito	Ca ₅ (F, Cl, OH)(PO ₄) ₃

Fuente: Casanova, 1996.

Aspectos biológicos

La importancia para los Ingenieros de Minas de conocer los aspectos biológicos de los suelos, suele estar en la necesidad de reforestar con éxito los sitios de disposición final de estériles y en algunos casos de desechos, provenientes de la actividad minera. La siguiente sección trata de dar una visión global de algunos de los aspectos, que se deben de tener en consideración en caso de planificación de restauración con reforestación.

Sustratos. Elementos esenciales para las plantas, formas químicas y mecanismos de absorción

Para definir los criterios de esencialidad de los nutrientes, Casanova (1996), nos explica que los más utilizados fueron:

1. La planta no completa su ciclo de vida sin la presencia del nutriente esencial.
2. Se requiere a ese elemento directamente en la nutrición de la planta.
3. Ningún otro elemento puede sustituirlo en sus funciones.
4. Un nutriente es considerado esencial cuando éste cumple una función en el metabolismo de la planta.

De los 113¹ elementos descritos en la Tabla Periódica sólo 17 son considerados esenciales para el crecimiento de las plantas. La siguiente tabla resume los macro y micro nutrientes, la fórmula química, función general que ellos desempeñan y cual es su fuente más importante.

Elementos esenciales para las plantas			
<i>Macroelementos</i>	<i>Forma usada</i>	<i>Función general</i>	<i>Fuente</i>
C	CO ₂	Elementos	Aire
H	H ₂ O	Estructurales	y
O	CO ₂	Principales	agua
N	NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	Elementos	
P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	Estructurales	Suelo
S	SO ₄ ²⁻	Accesorios	
K	K ⁺	Elementos	
Ca	Ca ²⁺	Metabólicos	Suelo
Mg	Mg ²⁺		
<i>Microelementos</i>	<i>Forma usada</i>	<i>Función general</i>	<i>Fuente</i>
Fe	Fe ²⁺ , Fe ³⁺		
Mn	Mn ²⁺		
Zn	Zn ²⁺	Elementos	
Cu	Cu ²⁺	Metabólicos	
B	H ₂ BO ₃ , B ₄ O ₇ ²⁻	(Activadores,	
Mo	MoO ₄ ²⁻	Catalizadores, Transportadores)	Suelo

¹ El autor nombra 104 elementos.

Cl Co ²	Cl ⁻ Co ²⁺
-----------------------	-------------------------------------

Fuente: Casanova, 1996.

Sugerencia: consulte el material de Aspectos Básicos de Química de Suelos, páginas 21 – 32.

Modelos de la Mecánica de Arrastre de Sedimentos

Las nociones teóricas que se exponen a continuación son los fundamentos acerca de modelos que explican el arrastre de sedimentos. Algunas de ellas se explican en la obra de Suárez (1993) y se esbozan de manera resumida en este curso.

Transporte de sedimentos

Las corrientes naturales de agua transportan materiales sólidos según diferentes mecanismos:

1. **Transporte en solución:** Al escurrir por la superficie de la cuenca e infiltrarse en las diferentes formaciones de suelos y rocas, las aguas de lluvia van disolviendo minerales tales como sal común, carbonato de calcio, yeso, etc., que luego son transportados en solución a lo largo de los torrentes y los ríos.
2. **Transporte en suspensión:** las partículas más finas de los suelos (arcillas, limos y arenas) pueden ser transportadas en suspensión por las corrientes fluviales y torrenciales. La tendencia de estos materiales a sedimentar es contrarrestada por la turbulencia, cuyas componentes oscilatorias dirigidas hacia arriba tiene la capacidad de levantar las partículas más finas y mantenerlas en suspensión en el agua. Según este mecanismo los sedimentos finos son transportados en el seno de la corriente, en un estado de flotación y agitación permanente, a pesar de tener un peso unitario mayor del doble que el del agua.
3. **Arrastre de fondo:** las partículas de mayor tamaño (arena gruesa, grava, cantos rodados, peñones) son transportadas por las corrientes como arrastre de fondo. La turbulencia no posee la energía suficiente como para levantar esas partículas y mantenerlas en suspensión, pero la fuerza cortante del flujo en el fondo es capaz de moverlas, haciéndolas rodar y saltar unas sobre otras, especialmente durante las crecientes.

La repartición del transporte de sólidos entre suspensión y arrastre de fondo depende básicamente del tamaño de las partículas y de las características del flujo. Las gravas y los cantos rodados pueden ser transportados en suspensión durante períodos breves, al ocurrir crecientes violentas de fuerte pendiente. Por el contrario, las arenas pueden ser transportadas por arrastre de fondo en ríos de llanura de baja pendiente.

² El Mo, Cl y Co son elementos que se encuentran en las plantas en forma de trazas.

Bibliografía del Objetivo 2

- MARSH, William (1991) "Landscape Planning Environmental Applications". Segunda edición. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- PECK, HANSON y THORNBURN (1983) "Ingeniería de Cimentaciones". Segunda edición. Editorial Limusa. México.
- RODRÍGUEZ y AYALA (1990) "Manual de Diseño y Construcción de Presas". Instituto Tecnológico Geominero de España.
- ROMERO, Jairo (1999) "Calidad del Agua". Segunda edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Alfaomega Grupo Editor. México.
- PINILLA, Karlo (1999) "Alternativas para el Manejo y Disposición de Minerales No Conformes en el Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, Estado Bolívar. CVG Ferrominera Orinoco, CA". Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- CRESSER, KILLHAM & EDWARDS (1993) "Soil Chemistry and its applications". Primera edición. Cambridge environmental chemistry series. Impreso en University Press, Cambridge. Gran Bretaña.
- CASANOVA, Eduardo (1996) "Introducción a la Ciencia del Suelo". Segunda reimpresión de la Primera edición. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Universidad Central de Venezuela.
- SUÁREZ, Luis (1993) "Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos". Primera edición. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela.
- SUÁREZ, Jaime (2001) "Control de Erosión en Zonas Tropicales". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.
- LÓPEZ JIMENO, Carlos (2002) editor "Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes". Segunda edición. Madrid, España.
- BRAVO, Simón (2000) "Aspectos Básicos de Química de Suelos". Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora. Barinas, Venezuela.