UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTOS CURRICULARES DE INGENIERIA FORESTAL E INGENIERIA AMBIENTAL

VALORACION APROPIADA DE LA PERMEABILIDAD DEL SUELO, CUALIDAD IMPORTANTE EN LA DETERMINACION DE LA EROSIONABILIDAD DEL TERRITORIO
(ENSAYO TÉCNICO)

HENRY ZUÑIGA PALMA I.F M.Sc.

GRUPO DE APOYO

Sánchez Heliodoro
Figueroa Alberto
Zúñiga Pier Paolo
Ochoa Johanna

BOGOTA 2010

-Resumen

De las cualidades físicas del suelo que se tienen en cuenta para en el ordenamiento ambiental de un territorio, es quizás la permeabilidad una de las relevantes, por su participación en los posibles procesos de pèrdida de la capa arable de un terreno de una región.

Pero en el cálculo del factor de permeabilidad k del perfíl del suelo, no es usual emplear la fórmula de Darcy en su estimación, procedimiento que por el contrario como se registra en este documento, es el más apropiado porque tiene en cuenta conjuntamente los flujos verticales y horizontales del agua que se percola en el suelo, destacándose que los subsuperficiales son los de mayor valor y evacuan importantes cantidades del fluido líquido del terreno.

1- Apertura

En la delimitación de usos y áreas de amenazas y riesgos naturales en el territorio, es importante tener en cuenta la posibilidad de la pérdida de la capa arable del suelo, posibilidad en tales términos entendida como **erosionabilidad** de la tierra.

Empero, la erosionabilidad del terreno es resultado a su vez de interrelacionar factores químicos y físicos del suelo, tales como la textura, la materia orgánica, la estructura y **la permeabilidad,** señalándose a esta última como una cualidad, la cual puede ser estimada por procedimientos cuantitativos y cualitativos.

En términos prácticos para la organización territorial municipal y en áreas donde no se requiere información puntual para construcción de obras civiles de gran tamaño, los métodos cualitativos también son apropiados para determinar la erosionabilidad de la tierra, ya sea mediante la utilización de fórmulas paramétricas o el empleo del nomograma de Wischmeier, procedimientos en los cuales es imprescindible el cálculo de **la permeabilidad** del suelo.

En las áreas protegidas que obligatoriamente se deben tener en cuenta al organizar espacialmente un municipio, la zonas frágiles o vulnerables y los espacios físicos que ofrecen algunos bienes y servicios ambientales, son componentes de suma importancia a tener en cuenta.

Las precitadas áreas a proteger, técnicamente se incluyen en las áreas estratégicas portantes protectoras, en las cuales posteriormente es del caso identificar y delimitar zonas de alta y muy alta erosionabilidad, que luego se califican por su fragilidad como espacios a proteger para el control de la erosión.

Al tenor de lo anotado, si **la permeabilidad** es determinante fundamental en la pérdida de la capa arable del suelo, técnicamente se vuelve una obligación valorarla apropiadamente, motivo por el cual es primordial abordarla con la significancia que se merece.

La posibilidad de que un predio o lugar se erosione, se determina mediante el proceso de apreciación del Factor de Erosionabilidad del terreno (componente a su vez de la Ecuación Universal de la Erosión o de Pérdida del Suelo), conocido también como el Factor K de erosionabilidad del suelo.

Para el cálculo del factor K de erosionabilidad del suelo, además de sistemas de cálculo compuestos por gráficos o tablas individuales correlacionadas (nomogramas), existen fórmulas de regresión basadas en factores físico químicos del solum, técnicas de ponderación en las cuales es imprescindible a su vez la valoración de **la permeabilidad,** la cual es por lo general cuantificada mediante el triángulo textural para determinar clases de permeabilidad (Ramírez, 2010). Pero la mencionada **permeabilidad** también se puede valorar técnica y científicamente mediante la aplicación de la ley de Darcy (Seoánez, 1997) y así luego ser utilizada en los nomogramas o ecuaciones que sean del caso.

2- Desarrollo Temático.

Características del tema

La permeabilidad es cualificada con términos de rápida, moderada a rápida, moderada, baja o moderada, baja y muy baja o identificada con los valores de 1,2,3,4,5 y 6, asumiendo en este caso, que la cifra menor relaciona suelos permeables y la mayor, suelos de muy baja permeabilidad. De todas maneras, son expresiones de alta relatividad que infiere para cálculos acertados, altos conocimientos en edafología y particularmente en interpretaciones de perfiles de suelos.

Lo anterior, toda vez que se necesita no solo interpretar adecuadamente los datos reportados por estudios edáficos o trabajos de campo, sino además contar con experticia en la utilización de tablas escalares, para luego convertir aquella información propia de los diferentes horizontes del perfil, en la debida valoración de la capacidad del suelo para permitir el paso de los fluidos, por el espesor de sus horizontes o por todo el perfil del mismo solum.

Así las cosas, es necesario estudiar formas diferentes pero sencillas de carácter empírico, que permitan una comprensible y confiable valoración de **la permeabilidad** del suelo, para ser aplicada en la determinación de la erosionabilidad del terreno.

Sinopsis

Para Morgan (1.986) citado por MMA (1,996) y Seoánez, (1997), la ecuación Universal de la Pérdida de Suelo se expresa de la forma que sigue:

$$A: R.K.L.S.C.P$$

A: pérdida media anual de suelo en T/Ha.año.

R: factor de lluvia.

K: factor de erosionabilidad del suelo.

L: factor de longitud de pendiente.

S: factor de inclinación de la pendiente.

C: factor de ordenación de cultivos.

P: factor de control de la erosión mediante prácticas de cultivo

Erosionabilidad según Zúñiga (2.008) es la pérdida de la capa arable del suelo; se expresa en t/ha/año y los rangos 0,1 – 0.89, 0.90 – 1.13, 1.14 – 1.53 y > 1.5, se refieren en su orden a baja, media, alta y muy alta erosionabilidad de un terreno.

El factor de erosionabilidad del suelo K, se refiere a la influencia de los atributos químicos y físicos del suelo en la pérdida del mismo, por la infiltración de aguas lluvias, la permeabilidad, la capacidad de retención de agua, resistencia a la dispersión por agentes

externos, resistencia a la abrasión eólica, al aplastamiento y a fuerzas que puedan transportar sus partículas. (MMA ,1.996.).

Una ecuación citada por MMA (1.996) para estimar el **factor K de erosionabilidad** del suelo se expresa de la siguiente manera:

$$100\ k: 10^{-4}.\ 2{,}71\ M\ (12 - a) + 4{,}2\ (b - 2) + 3{,}23\ (c - 3)$$

M: (100 - % arcilla){% (limo + arena final)}

A: % de materia orgánica.

b: Estructura del suelo así. 1, gránulo muy fino y grumo muy fini (< 1mm); 2, gránulo fino y grumo fino (1. 2 mm.); 3, gránulo y grumo medio (2 – 5 mm); y gránulo grueso (5 – 10 mm.); 4, gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso (> 10 mm)

c: permeabilidad, de la siguiente forma. 1, rápida a muy rápida; 2, medianamente rápida; 3 moderada; 4, moderadamente lenta; 5, lenta; 6, muy lenta.

Otros autores (Gutiérrez, 2004 y Ramírez, 2010), emplean la siguiente ecuación para determinar **el factor K de erosionabilidad**:

$$100\,K = 1{,}292\left[2{,}1\times 10^{-4}(M)^{1{,}14}\times(12 - \%MO) + 3{,}25(b-2) + 2{,}5(c-3)\right]$$

Donde:

M: (% de limo + % de arena) x (100-% de arcilla)

b: número correspondiente a la estructura del suelo

c: número por clase de permeabilidad del perfil del suelo

MO: % de materia orgánica

Otra forma para calcular el **factor de K erosionabilidad** del suelo es la propuesta por Wischmeier mediante el elaborado nomograma de su nombre (MMA, 1.996).

De otro lado, **la permeabilidad** del suelo se define como su capacidad para dejar fluir o transmitir, agua o aire a través de su espesor. De acuerdo con lo anterior, esta cualidad depende de su textura, estructura, grado de compactación, contenido de materia orgánica, porosidad, etc. (Zuñiga, 2010).

Según Seoánez (1.997) la permeabilidad es la capacidad que exhibe un suelo de permitir el paso de un fluido a través de él y sus valores se calculan mediante la ley de Darcy.

Vélez (2004) precisa que "**la permeabilidad** es la capacidad del medio para permitir el flujo de agua bajo el efecto de un gradiente hidráulico (diferencia de potencial hidrostático) por unidad de longitud.

Cuantitativamente, **la permeabilidad** se mide en términos de la velocidad del paso de agua a suelo saturado de humedad en una unidad de tiempo, bajo condiciones hidráulicas y de temperatura específicas. (Seoánez 1,997).

Para MMA 1,996, **el coeficiente de permeabilidad (k)** corresponde a la velocidad de descargas de un fluido que se filtra a través de una sección de suelo unidad bajo un gradiente unidad:

$$k = D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)} C$$

k = Coeficiente de permeabilidad.

D_s = Diámetro efectivo de las partículas

γ = Peso específico

μ = Viscosidad del fluido

e = Relación de vacíos (porosidad)

C= Factor de forma

Valores reportados para k en m/s, encontramos los siguientes: $10.^{1}$ a 10^{-4} para suelos permeables del tipo grava pura, arena pura, grava gruesa y media, grava y arena y algunas arena – arcilla – limos; 10^{-5} a 10^{-9} para suelos semipermeables de los tipos arenas muy puras, limos y arenas – arcillas – limos y; valores de 10^{-10} a 10^{-11} o mayores para suelos impermeables correspondientes a arcillas. (Vélez 2.004).

Por otro lado, Granullo (1995) citado por MMA, 1.996 cuantifica **la permeabilidad** según los coeficientes de capacidad de cementación y coeficiente de impermeabilidad en la siguiente ecuación

$$C.C.G = \frac{\%A - 4\%MO}{\%TF}$$

$$C.I.L = \frac{\%L.TF}{10^{4}}$$

A = Arcilla

MO = Materia orgánica

L = Limo

TF = Tierra fina

Para el cálculo del factor K de erosionabilidad, Seoánez (1997) establece:

$$k = k_0 \frac{\gamma}{\mu}$$

k = Coeficiente de permeabilidad

k_0 = Coeficiente de permeabilidad intrínseca, específica o geométrica

γ = Peso específico de fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido.

Pero el coeficiente de permeabilidad intrínseca, específica o geométrica (k_o), depende a su vez de las características del medio poroso, en especial del tamaño de los granos, su forma y disposición. Para Hazen citado por Vélez (2.004), $k_o = Cd_{10}$, asumiendo que C es un coeficiente de forma sin dimensiones y d_{10} el parámetro granulométrico conocido como diámetro eficaz.

El precitado coeficiente de permeabilidad intrínseca (k_o) según Vélez Op. cit., se expresa en unidades de Darcy, en unidades de Meinzer o en cm^2. En cm^2 Wikipedia menciona los siguientes valores de k_o: 10^{-3} a 10^{-6} para suelos permeables del tipo grava continua o redondeada y algunas arenas continuas o mixtas; 10^{-7} a 10^{-11} para suelos semipermeables de los tipos arenas mixtas (algunas), arenas finas, lodos, limos, turbas y algunos estratos arcillosos y valores de 10^{-12} a 10^{-15} o mayores para suelos impermeables correspondientes a algunos estratos arcillosos y a arcillas expansivas.

En la determinación de **la permeabilidad** se debe tener en cuenta que ésta también depende del grado de anisotropía del terreno y por ello en terrenos estratificados es prioritario

considerar una permeabilidad vertical (k_v) y una permeabilidad horizontal (k_h), acotando que la permeabilidad horizontal siempre es mayor que la vertical (Seoánez, 1.997)

$$k_h = \frac{\sum k_i b_i}{\sum b_i} \qquad k_v = \frac{\sum b_i}{\sum b_i / k_i}$$

Donde:

k_h = Permeabilidad horizontal

k_v = Permeabilidad vertical

k_i = Permeabilidad de cada capa o estrato

B_i = Espesor de capa o estrato

Permeabilidades horizontal y vertical que se articulan en la expresión:

$$k = \sqrt{k_h} k_v$$

Según Malagón (1976) la permeabilidad es muy importante en las aplicaciones para obras de ingeniería tales como: construcción de tanques sépticos, depósitos de aguas negras, excavaciones poco profundas, rellenos sanitarios, vías carreteables, irrigaciones, drenajes para cultivos, diques y terraplenes, embalses, etc.

Análisis

Se da por aceptado en términos empíricos que una textura del suelo, es prácticamente impermeable para diámetros de granos menores a 0.01mm, en consecuencia, solo deberían considerarse en los estudios de **la permeabilidad** los limos, las arenas y las gravas, excluyendo las arcillas por el tamaño de sus partículas.

Por lo anterior no es extraño encontrar que Wischmeier en su nomograma, organice su gráfico considerando el valor de la suma de limos mas arenas muy finas, al iniciar los cálculos del factor de erosionabilidad, pero en la realidad y con mayor razón en suelos estratificados en donde es observable la anisotropía del terreno, algunas arcillas y mezclas variadas de arenas con arcillas y con limos y que aparecen en los horizontes del suelo, han reportado en laboratorio grados de mala permeabilidad pero que no se pueden calificar de impermeables.

Consecuente con lo anotado y conociendo que nuestros suelos en el medio natural están conformados por arcillas y mezclas diferentes de estas con arenas y limos, obliga a que las arcillas y sus diferentes mezclas si se deben tener en cuenta para el cálculo del factor de erosionabilidad y en consecuencia pueden ser incorporadas en las ecuaciones de regresión para la ponderación de dicha cualidad de un terreno.

De igual forma, al cualificar la permeabilidad de un horizonte del suelo y señalar su correspondiente asignación numérica, no solo aparece la subjetividad de la persona encargada de determinar la cualificación, sino que además se asume en primer lugar, que todos los horizontes del perfil del suelo son sujeto de erosionabilidad en igualdad de condiciones cuando el terreno es sometido a usos diferentes y en segundo lugar, se admite erróneamente que aquellos poca interrelación tienen entre sí, aún cuando provengan del mismo origen y se encuentren en el mismo perfil. No obstante tal apreciación, por lo general **la permeabilidad** de los horizontes de un perfil del suelo**,** se determinan mediante la aplicación del triangulo textural para determinar clases de permeabilidad (Ramírez, 2010)

Pero al tenor de todo lo antes anotado, es válido preguntarse lo siguiente:

- Si la erosionabilidad del suelo se refiere a la pérdida de la capa arable de un terreno, en términos prácticos vale la pena calcular el factor K de erosionabilidad de horizontes de un suelo, cuando en un mediano o inmediato futuro no se vislumbra que lleguen hacer parte de la zona cultivable de un territorio?
- Una vez calculado los valores de los factores K de erosionabilidad de distintos horizontes de un perfil del suelo, el valor del factor K de erosionabilidad de todo el perfil del suelo, es el valor promedio de los horizontes de dicho perfíl?
- Teniendo en cuenta la definición de erosionabilidad de un terreno, es apropiado calcular el aludido factor de erosionabilidad de la tierra, efectuando valoraciones para el primer horizonte pero considerando la permeabilidad no solo de dicho horizonte sino de todo el perfil?

Síntesis

En el proceso de percolación de agua en el suelo, el agua infiltrada inicialmente hace parte del agua vadósica del terreno, considerándose los flujos horizontales como aguas subsuperficiales y los flujos descendentes verticales como aguas gravitacionales que fluyen a abastecer los cuerpos freáticos, si las condiciones naturales de la tierra así lo permiten.

Además, en la franja no saturada de agua las fuerzas capilares y las tensiones originadas por la zona radicular de las plantas, propician movimientos ascendentes y descendentes de agua, configurando con ello un complejo suelo – agua – aire, que de manera integral se debe interpretar a través de la permeabilidad de todo el perfil del suelo.

Conforme a lo antes escrito, técnicamente se debería valorar la erosionabilidad de un terreno, calculándola para cada uno de los horizontes del suelo y después promediando sus resultados, pero como se acotó anteriormente en este documento, solo el horizonte superior de un lugar cuando es sujeto a actividades productivas o de restauración, pueden sus partículas ser dispersadas, abrasadas, transportadas o aplastadas por factores climáticos, bióticos o instrumentos – herramientas de origen antrópico.

De tal manera, que para calcular la erosionabilidad de un terreno, es suficiente y apropiado considerar las características textura, materia orgánica y estructura del primer horizonte del suelo, pero **la permeabilidad** si debe ser calculada para todo el perfil empleando la fórmula de Darcy, incorporando luego su resultado en el nomograma de Wischmeier con los ajustes técnicos efectuados en el anexo de este ensayo o en las ecuaciones de regresión que sean utilizadas para ponderar la perdida posible de la capa arable del suelo.

Síntesis.

Los procedimientos cualitativos acá comentados, en el cálculo de la permeabilidad asumen el movimiento del agua percolada verticalmente y de forma descendente. De tal manera que al determinarse la erosionabilidad de un terreno, los valores así obtenidos pueden ser superiores a lo que sucede en la realidad, toda vez que los flujos horizontales del agua infiltrada también colaboran en la evacuación del agua caída en épocas y disminuyen la humedad de los horizontes superiores del suelo, volviéndolos menos susceptibles cuando se desecan a procesos de deterioro.

La cuantificación de la permeabilidad comúnmente por el triangulo de permeabilidad, es en cierta medida responsable de la subestimación de la ponderación de dicha característica

compleja, que aún cuando en algunos casos puede aparecer no significativa, si se debe tener en cuenta toda vez que su participación en la valoración de la erosionabilidad de un suelo, puede conducir a que terrenos que no son de alta amenaza y riesgo de erosionabilidad, sean calificados de conservación y/o protección, cuando las condiciones del ambiente así no lo ameritan.

Ilustramos a continuación en tres escenarios diferentes, el cálculo de la permeabilidad y la erosionabilidad de un suelo, localizado en la cuenca alta del Río Bogotá, en paisaje denominado planicie de inundación, con topografía plana y pendiente menor al 1% y características físicas - químicas que se registran en la tabla 1.

Tabla 1. Características físicas y químicas del suelo

HORIZONTES	**II A_{11}**	**III A_{12}**	**IVO_{2b}**
Profundidad cm.	0 – 50	50 – 70	70 – 126
% Arenas	11	17	46
% Limos	14	22	10
% Arcillas	75	61	44
Arenas finas (10% arenas)	1.1	1.7	4.6
% Materia orgánica	3.12	4.45	20.17
Estructura	Bloques	Masiva	Masiva

Fuente: IGAC, 1.980

PRIMER ESCENARIO

En este escenario se efectuaron los cálculos aplicando la fórmula de Wischmeier (1971) y se estimó el valor del factor de permeabilidad (k), mediante el triangulo textural (ver anexo 1) de USDA que se utiliza para tal efecto.

Así mismo, se determinó el valor del factor de permeabilidad (k) para cada horizonte del suelo y el valor del factor de erosionabilidad (K) correspondiente para cada uno de ellos. Posteriormente se obtuvo como valor del factor de erosionabilidad (K) para todo el perfil, el promedio de los valores de los factores de K de los horizontes considerados.

Veamos como:

Horizonte II A_{11}

$$100\,K = 10^{-4} \cdot 2{,}71 M^{1.14} (12 - a) + 4{,}20(b - 2) + 3{,}23(c - 3)$$

$$M = [(\%Limos + \%Arenas\ finas)(100 - \%Arcillas)]$$

$$M = [(14 + 1{,}1)(100 - 75)] = 377{,}5$$

$$100\,K = 10^{-4} \cdot 2{,}71(377{,}5)^{1.14} (12 - 3{,}12) + 4{,}20(3 - 2) + 3{,}23(6 - 3)$$

$$100\,K = 15{,}98$$

$$K = \frac{15{,}58}{100}$$

$$K = 0{,}156$$

Factor de erosionabilidad:

$$K = 0{,}156 \times 2{,}47 = 0{,}39 \text{ T/Ha/año}$$

Horizonte III A_{12}

$$100\,K = 10^{-4} \cdot 2{,}71 M^{1.14} (12 - a) + 4{,}20(b - 2) + 3{,}23(c - 3)$$

$$M = [(\%Limos + \%Arenas\ finas)(100 - \%Arcillas)]$$

$$M = [(22 + 1{,}7)(100 - 61)] = 924{,}3$$

$$100\,K = 10^{-4} \cdot 2{,}71(924{,}3)^{1.14} (12 - 4{,}45) + 4{,}20(4 - 2) + 3{,}23(6 - 3)$$

$$100\,K = 23{,}01$$

$$K = \frac{23{,}01}{100}$$

$$K = 0{,}230$$

Factor de erosionabilidad

$$K = 0{,}230 \times 2{,}47 = 0{,}57 \text{ T/Ha/año}$$

Horizonte IVO_{2b}

$$100\,K = 10^{-4} \cdot 2{,}71 M^{1.14} (12 - a) + 4{,}20(b - 2) + 3{,}23(c - 3)$$

$$M = [(\%Limos + \%Arenas\ finas)(100 - \%Arcillas)]$$

$$M = [(10 + 4{,}6)(100 - 44)] = 817{,}6$$

$$100\,K = 10^{-4} \cdot 2{,}71(817{,}6)^{1.14} (12 - 20{,}17) + 4{,}20(4 - 2) + 3{,}23(5 - 3)$$

$$100\,K = 10{,}23$$

$$K = \frac{10{,}23}{100}$$

$$K = 0{,}102$$

Factor de erosionabilidad

$$K = 0{,}102 \times 2{,}47 = 0{,}252 \text{ T/Ha/año}$$

Factor K para el perfil:

$$K = \frac{0{,}39 + 0{,}57 + 0{,}25}{3}$$

$$K = 0{,}40 \text{ T/Ha/año}$$

SEGUNDO ESCENARIO

Para el escenario en mención, se realizaron los cálculos empleando la fórmula utilizada por Gutierrez (2004) y Ramírez (2010) y se estimó el valor del factor de permeabilidad (k), mediante el triangulo textural de USDA arriba mencionado.

En el procedimiento, se determinó el valor del factor de permeabilidad (k) para cada horizonte del suelo y a partir de ellos, se cuantificó el valor promedio para todo el perfil. Acto seguido,

el valor anteriormente obtenido se incorporó en la formula de erosionabilidad para el primer horizonte del suelo, asumiendo de esta manera, que el valor así determinado corresponde al valor del factor de erosionabilidad (K) del terreno, toda vez que la posible perdida de la capa arable de un lugar, atañe al horizonte superficial del sitio y como se observa a continuación:

Horizonte II A_{11}

$$100\,K = 1{,}2928\left[2{,}1\times10^{-4}\,M^{1{,}14}\left(12-\%MO\right)+3{,}25\left(b-2\right)+2{,}5\left(c-3\right)\right]$$

$$M = \left[\left(\%Limos+\%Arenas\ finas\right)\left(100-\%Arcillas\right)\right]$$

$$M = \left[\left(14+1{,}1\right)\left(100-75\right)\right] = 377{,}5$$

$$100\,K = 1{,}2928\left[2{,}1\times10^{-4}\left(377{,}5\right)^{1{,}14}\left(12-3{,}12\right)+3{,}25\left(3-2\right)+2{,}5\left(5{,}6-3\right)\right]$$

$$100\,K = 14{,}67$$

$$K = \frac{14{,}67}{100}$$

$$K = 0{,}147$$

Factor de erosionabilidad:

$$K = 0{,}147\times2{,}47 = 0{,}362\ \text{T/Ha/año}$$

TERCER ESCENARIO

Se calculó el valor del factor de permeabilidad (k) a través de la fórmula de Darcy, el tipo de permeabilidad del suelo según texturas (tabla 2) y la calificación de la permeabilidad (tabla 3); luego se determinó el valor del factor de erosionabilidad K del perfil del suelo, empleando la fórmula utilizada por Gutiérrez (2004) y Ramírez (2010).

Tabla 2. Tipo de permeabilidad del suelo según texturas.

Permeabilidad relativa	**Permeabilidad**						**Semi-Permeable**						**Impermeable**			
Arena o grava no consolidad	Grava continua (o redondeada)			Arena continua o mixta					Arena fina, cieno, Looss, Loam							
Arcilla no consolidada y matéria orgánica							Turba			Estrato arcilloso			Arcilla expansiva			
Roca consolidada	Rocas muy fracturadas						Roca petrolífera				Piedra arenisca		Roca sedimentaria, dolomita		Granito	
k (cm^2)	0.001	0.0001		10^{-5}	10^{-6}		10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}		10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	10^{-15}
K (cm/seg)	10^{3}	10^{2}	10^{1}	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}			

Fuente: Adaptada de Vélez, 2004 y ajustada por el autor

Tabla 3. Calificación de la permeabilidad del suelo

Asignación	**Calificación**	**Permeabilidad**
1	Rápida	$> 10^{-1}$
2	Moderada a rápida	$1 \times 10^{-1} – 1 \times 10^{-2}$
3	Moderada	1×10^{-3}
4	Baja a moderada	1×10^{-4}
5	Baja	1×10^{-5}
6	Muy baja	1×10^{-6} - $< 1 \times 10^{-6}$

Fuente: Adaptada de MMA, 1996. Págs.: 230, 242, 243

Para lo anterior, se definió el valor del factor de permeabilidad (k) para todo el perfil del suelo, usando la fórmula de Darcy, la cual fue referenciada anteriormente en este documento. La cifra obtenida, se incluyó en la formula utilizada para cuantificar el valor del factor de erosionabilidad del primer horizonte del suelo, y así, en definitiva, establecer el valor del factor de erosionabilidad (K) del terreno, recordando que, es la parte superficial de un territorio la mas susceptible a la perdida de su capa arable. Situación que se ilustra de la siguiente forma:

$$K_m = \sqrt{k_h \cdot k_v}$$

$$k_h = \frac{\sum Kibi}{\sum bi} \qquad k_v = \frac{\sum bi}{\sum bi/ki}$$

$$k_h = \frac{5,6}{126} = 0,044 \qquad k_v = \frac{126}{50 \times 10^8} = 2,52 \times 10^{-8}$$

$$Km = \sqrt{\frac{5,6}{126} \cdot \frac{126}{50 \times 10^8}}$$

$$Km = 3,35 \times 10^{-5}$$

$$100K = 1{,}2928\left[2{,}1\times10^{-4}\, M^{1{,}14}\left(12-\%MO\right)+3{,}25\left(b-2\right)+2{,}5\left(c-3\right)\right]$$

$$M = \left[\left(\%Limos+\%Arenas\ finas\right)\left(100-\%Arcillas\right)\right]$$

$$M = \left[\left(14+1{,}1\right)\left(100-75\right)\right] = 377{,}5$$

$$100K = 1{,}2928\left[2{,}1\times10^{-4}\left(377{,}5\right)^{1{,}14}\left(12-3{,}10\right)+3{,}25\left(3-2\right)+2{,}5\left(5-3\right)\right]$$

$$100K = 12{,}76$$

$$K = \frac{12{,}76}{100}$$

$$K = 0{,}127$$

Factor de erosionabilidad:

$$K = 0{,}127\times 2{,}47 = 0{,}31 \text{ T/Ha/año}$$

3- Cierre.

En el tercer escenario el valor del factor de permeabilidad (k) igual a 3,35 x 10^{-5} cm/s, permitió calificar al suelo como de baja permeabilidad y asignación de 5, última cifra que al ser considerada en la fórmula para el cálculo del factor de erosionabilidad K, arrojó un valor de 0,31 T/Ha/año, determinando de esa manera que el suelo estudiado es a su vez de baja susceptibilidad a la erosión por encontrarse dentro del rango 0,01 – 0,89 T/Ha/año.

Ahora, si bien es cierto los valores hallados del factor de erosionabilidad K 0.4 T/Ha/año en el primer escenario y 0,36 T/Ha/año en el segundo escenario, se ubican en el rango 0.01 – 0.89 T/Ha/año que como ya se afirmó señala baja susceptibilidad a la erosión, también es cierto que la posibilidad de pérdida de la capa arable del suelo, es mayor un 16% en el segundo escenario respecto al tercero y un 29% en el primer escenario frente al último. De tal

manera que en espacios territoriales de gran extensión, la posible pérdida de tierra sería de gran magnitud si no se efectúan los cálculos de la forma apropiada.

Así las cosas, las valoraciones llevadas a cabo en este ensayo, permiten recomendar que técnicamente la determinación del valor de factor de **permeabilidad** de un suelo, cuando se vaya a emplear en el cálculo del factor de erosionabilidad K de un terreno y con miras a ordenar un territorio, preferiblemente sea abordada mediante la utilización de la fórmula de Darcy.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA CITADA

GUTIÉRREZ ALARCÓN, Mario César. Simulación de la Escorrentía y Producción de Sedimentos Aplicando SWAT en las Microcuencas 7 y 13, Subcuenca III, Cuenca Sur del Lago Managua, Nicaragua. Trabajo de Diploma. Managua: Universidad Nacional Agraria. Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente. 2004.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC. Estudio General de Clasificación de los Suelos de La Cuenca Alta del Río Bogotá. Bogotá, 1980.

MALAGÓN CONTRERA, Dimas. Propiedades Físicas de los Suelos. Bogotá D.E.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Vol. XII. N^0 7. 1976.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE - MMA. Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico. Madrid: Secretaría General del Medio Ambiente. 1996. 2ª Edición.

RAMÍREZ, Laura Leda. Estimación del Pérdida de suelos por Erosión Hídrica en la Cuenca del Río Juramento – Salta. Tesina de grado para obtener el título de Ing. En Rec. Nat. y Medio Ambiente. Salta: Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. 2010.

SEOÁNEZ CALVO, Mariano. Ingeniería Ambiental Aplicada. Casos Prácticos. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 1997

VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Hidráulica de Aguas Subterráneas. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Faculta de Minas. 2004. Tercera Edición.

http://www.wikipwdia.org.wiki. Permeabilidad

ZÚÑIGA PALMA, Henry. Clase Magistral Ordenamiento Territorial. Proyecto Curricular Ingeniería Ambiental. Bogotá D.C.: 2008

ZUÑIGA, Henry. Los Recursos Naturales. Apuntes de clase. Especialización en Avalúos Universidad Distrital. Bogotá 2010.

OTRA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS. Manual de Conservación de Suelos de Ladera. Bogota D.E.: LitoModerna Ltda.1975.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC. Estudio General de Suelos de Cundinamarca. Escala: 1:100.000. Bogotá D.C. 2000.

MONTEGRO, Jenny. Estudio De Capacidad De Carga Territorial Y Posibilidad De Urbanizar Y Construir Con Vivienda Residencial En Suelo Urbano E Incorporar En El Plan Basico De Ordenamiento Territorial –PBOT- Municipal. Bogotá D.C. 2009. (Documento privado)

ZUÑIGA, Henry. Clases Magistrales Manejo Técnico Ambiental. Proyecto Curricular de Ingeniería Ambiental. Bogotá D.C. 2010.

ZUÑIGA, Henry. Hagamos el Ordenamiento Territorial del Sector Rural de Nuestro Municipio. Bogotá D.C.: Universidad Distrital. 2000

GRUPO TÉCNICO DE APOYO

SÁNCHEZ, Heliodoro. I.F. (Premio Mundial Kenton Miller a la Innovación para la Sostenibilidad de Áreas Protegidas. Año 2007). Revisión texto.

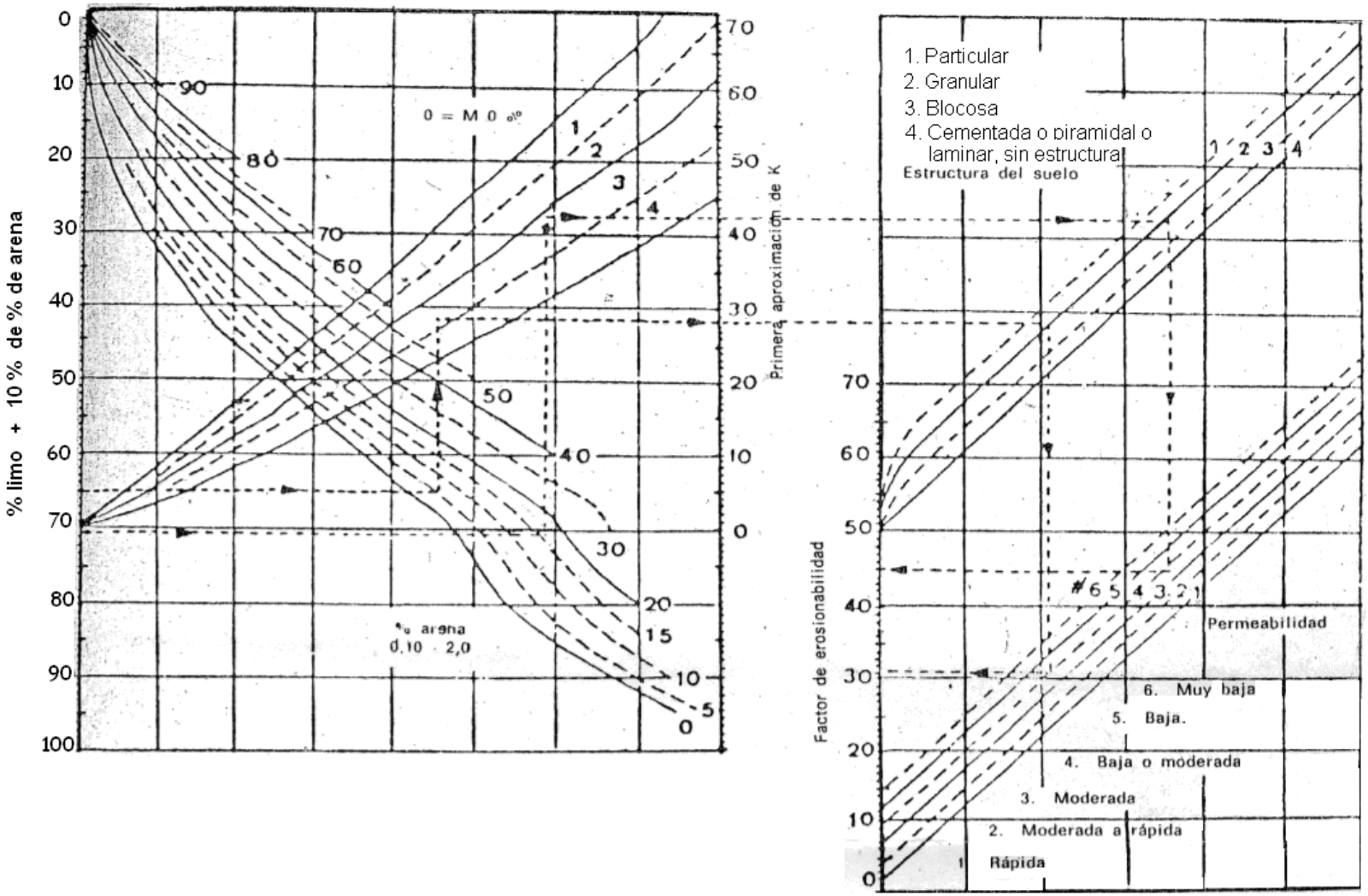
FIGUEROA, Alberto Edición pagina web

ZUÑIGA, Pier Paolo Revisión documental procesos aplicados en otros lugares.

OCHOA, Johanna. Monitora Ordenamiento Territorial. Aplicación métodos cualitativos en estimación de permeabilidad y erosionabilidad. Digitación texto.

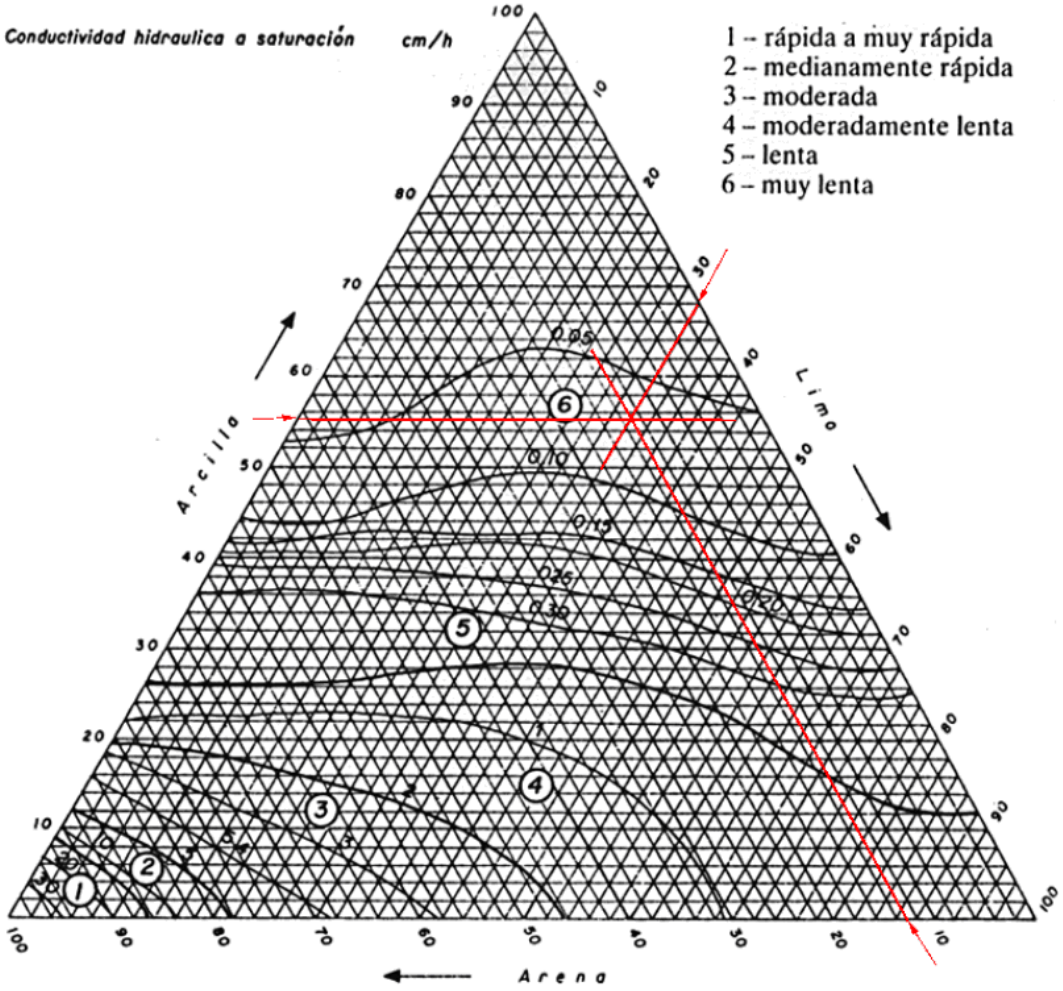
ANEXO 1: Gráficos

Figura 1. Nomograma de Wischmeier (1971).



Fuente: MMA, 1996. Pág.: 575. Adaptado por el autor

Figura 2. Triángulo Textural para la Determinar clases la permeabilidad



Fuente: Ramírez, 2010. Pág.: 42