

ERODABILIDAD DE LOS SUELOS DE LA ZONA CENTRAL CAFETERA DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS¹

Fernando Andrés Ramírez-Ortiz.*; Edgar Hincapié-Gómez**; Siavosh Sadeghian-Khalajabadi**

RESUMEN

RAMÍREZ, O., F.A.; HINCAPIÉ G. E.; SADEGHIAN K., S. Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. Cenicafé 60(1) 58-71. 2009.

La erodabilidad del suelo o factor K , es una descripción cuantitativa que indica la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, es considerado como el factor más importante para la predicción de la erosión y refleja el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferente tasa cuando los demás factores que afectan la erosión son los mismos. En este trabajo se determinó el factor K de los suelos pertenecientes a la zona cafetera central del departamento de Caldas, ubicada entre 4°55' a 5°42' latitud N y 75°45' a 75°20' longitud O. Se ubicaron 72 puntos de muestreo abarcando 14 unidades cartográficas de suelos, georeferenciados mediante el sistema de posicionamiento global. En cada punto se tomó una muestra de suelo de 10 kg, en los primeros 10 cm de profundidad, las cuales se llevaron a laboratorio para determinar en forma directa el factor K y mediante un simulador de lluvias de boquillas tipo Vee-jet 80100, se aplicó una intensidad de lluvia de 86 mm.h⁻¹ durante una hora. Se determinaron algunas propiedades del suelo y se correlacionaron con el factor K . Los valores del factor K oscilaron entre 0,0008 y 0,0086 t.ha.h.MJ⁻¹.ha⁻¹.mm⁻¹. Se encontró correlación entre la erodabilidad y el diámetro ponderado medio ($r = -0,82^{**}$), la densidad aparente ($r = 0,54^{*}$) y la resistencia a la penetración ($r = -0,54^{*}$). Con los promedios de erodabilidad por unidad de suelo se construyó el respectivo mapa para la zona de estudio, apoyados con sistemas de información geográfica.

Palabras clave: Erosión, lluvia simulada, factor K , información geográfica.

ABSTRACT

Soil erodibility or K factor is a quantitative description that indicates soil susceptibility to be eroded. It is considered the most important factor to predict erosion and it reflects the fact that different soils erode at different rates when the other factors that affect erosion are the same. In this study, the K factor of the soils in the central coffee zone of the department of Caldas located between 4°55' and 5°42' NL and 75°45' and 75°20' WL 4°55' NL 5°42' was determined. 72 points of soil sampling were located including 14 cartographic units, which were georeferenced using a global positioning system (GPS). In each point a 10-kg soil sample was taken in the first 10 cm of the soil layer; then, it was taken to laboratory to directly determine K factor and through a rainfall simulator of nozzles type Vee-jet 80100 an intensity of rain of 86 mm.h⁻¹ was applied during 1 hour. Some soil properties were determined and correlated with K factor whose values oscillated between 0.0008 and 0.0086 t.ha.h.MJ⁻¹.ha⁻¹.mm⁻¹. Correlation between soil erodibility and the estimated mean diameter ($r = -0.82^{**}$), bulk density ($r = 0.54^{*}$) and soil penetration resistance ($r = -0.54^{*}$). With the erodibility average values per soil unit, the map for the zone of study was made with the help of geographic information systems.

Keywords: Soil erosion, simulated rain, K factor, geographic information.

¹ Fragmento de tesis "Riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del departamento de Caldas", presentada para optar al título de Ingeniero Forestal de la Universidad del Tolima.

* Ingeniero Forestal, Universidad del Tolima.

** Investigador Científico I e Investigador Científico II. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

La erosión del suelo es uno de los problemas ambientales más serios en el mundo, pues ocasiona reducción en la productividad de los suelos, contaminación de las fuentes de aguas y sedimentación de ríos y embalses (27). Uno de los efectos directos de la erosión es la reducción de la fertilidad natural de los suelos, y con ello, el aumento en los costos de producción de los cultivos, debido a una mayor necesidad en la aplicación de fertilizantes y enmiendas (11); de allí el interés de cuantificar y predecir las pérdidas de suelo por erosión bajo diferentes sistemas de uso, manejo y conservación.

Para predecir las pérdidas de suelo por erosión hídrica comúnmente se han utilizado ecuaciones o modelos, dentro de los cuales la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS), (26), es la más ampliamente conocida y permite estimar las pérdidas de suelo por erosión laminar y en surcos, mediante el siguiente modelo matemático (Ecuación <<1>>):

$$A = R \times K \times S \times L \times C \times P \quad \ll 1 \gg$$

donde:

- A: Pérdida de suelo por erosión, generalmente se expresa en t.ha⁻¹.
- R: Factor de erosividad por la lluvia o la potencialidad de la lluvia para desprendimiento y dispersión de partículas del suelo, en MJ⁻¹.ha⁻¹.mm⁻¹.
- K: Factor de erodabilidad del suelo o susceptibilidad de éste a ser erosionado, en t.ha.h.MJ⁻¹.ha⁻¹.mm⁻¹.
- L: Factor longitud de la pendiente; distancia desde donde empieza el flujo de escorrentía hasta donde hay acumulación de sedimentos.
- S: Factor gradiente de la pendiente; relación entre las pérdidas de suelo para una determinada pendiente.

C: Factor cobertura; relación entre la erosión en un terreno cultivado en con diciones específicas.

P: Prácticas de conservación del suelo; relación entre las pérdidas de suelo y las prácticas culturales de conservación.

Algunos factores de la ecuación han tenido algún tipo de modificación de acuerdo al lugar donde se estudien, debido a las condiciones propias del medio (10, 12).

La erodabilidad o factor *K*, es una medida de la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y transporte de sus partículas, la cual está influenciada por numerosas propiedades, tales como textura, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, mineralogía de arcillas y constituyentes químicos, entre otros (6, 14, 16).

El factor *K* representa el grado de resistencia natural que ofrece el suelo a ser erosionado, al actuar sobre éste los otros factores erosivos (19). Este factor refleja el hecho que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas, cuando los demás factores que afectan la erosión son los mismos (12).

La erodabilidad de los suelos (factor *K*-USLE) puede ser determinada mediante el establecimiento y mantenimiento de parcelas de escorrentía bajo condiciones de lluvia natural, por un período mínimo de 3 a 5 años (14). Este método es costoso y requiere de mucho tiempo en las operaciones; las parcelas pueden establecerse en un número limitado de suelos. Por tales razones, se han generado modelos de regresión múltiple, los cuales utilizan el factor *EI*₃₀, de Wischmeier y Smith y algunas propiedades físicas y químicas de los suelos. Últimamente con el uso de simuladores de lluvia en el campo y/o laboratorio, se ha estimado la erodabilidad en un amplio

número de suelos con constituyentes físicas, químicas y mineralógicas variables y bajo diversas condiciones climáticas (14).

En Colombia, se ha determinado el factor *K* en forma indirecta a partir de modelos y métodos empíricos (15, 17, 18, 24). Esta metodología también se ha utilizado en algunos suelos de la zona cafetera de los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda (20), además se han utilizado simuladores de lluvia para evaluar la resistencia relativa del suelo a la erosión mediante diferentes metodologías (8, 9) lo cual ha permitido establecer diferentes categorías, desde suelos muy resistentes a la erosión (como aquellos derivados de cenizas volcánicas) hasta suelos altamente susceptibles (como los derivados de rocas sedimentarias).

El incremento de la erosión hídrica, lleva a buscar alternativas de predicción de pérdidas de suelo a niveles tolerables para un uso, manejo y conservación adecuados, que permitan mantener o mejorar la calidad de los suelos. El objetivo de esta investigación fue determinar en forma directa la resistencia de diferentes suelos a la erosión y relacionarla con algunas propiedades del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La investigación se llevó a cabo en la zona central cafetera del departamento de Caldas, ubicada entre 4°55' a 5°42' latitud N y 75°45' a 75°20' longitud O, con una altitud entre 1.000 y 2.000 m y precipitación anual de 1.708 a 2.690 mm, delimitada al Sur por el río San Francisco, al Norte por el río Arma, al Occidente por el río Cauca y al Oriente con una cota aproximada a los 2.100-2.200 m.s.n.m. Se diferencian dos áreas muy marcadas: la subregión "norte", comprendida por los municipios de Aguadas, Pácora, La

Merced, Salamina, Aranzazu y Filadelfia, en donde predomina la fisiografía de vertientes erosionadas, con pendientes fuertes del 75-100% y longitudes largas de 1.000-2.000 m, que tienen suelos desarrollados a partir de rocas metamórficas. La subregión "centro" está conformada por los municipios de Neira, Manizales, Chinchiná, Palestina y Villamaría, en donde el paisaje fisiográfico es diferente, con predominio de suelos derivados de cenizas volcánicas. De acuerdo con la clasificación de Federacafé por Ecotopos Cafeteros (zonas con determinadas condiciones agroecológicas para el desarrollo del cultivo de café) en esta región se ubican los Ecotopos 204A, 205A, 206A y 207A (5).

Suelos. Para la determinación del factor *K* en forma directa, se tomaron muestras disturbadas de 14 unidades de suelo, mapeadas dentro del área de estudio (Tabla 1).

Para la selección del sitio de muestreo se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Sitio de muestreo correspondiente a la unidad de suelo a evaluar.
- Ubicación de la unidad cartográfica de suelo en un área representativa.
- Localización del sitio de muestreo en un lote con la pendiente representativa de la zona.
- Área cultivada con café y representativa del sistema de producción de la zona.

En total se tomaron 72 muestras de suelo distribuidas en el área de estudio, el número de muestras por unidad de suelo se determinó de acuerdo con la proporción de cada unidad con respecto al área total, es decir, se aplicó un tamaño de muestra con asignación proporcional (Tabla 2). Cada punto de muestreo fue georeferenciado mediante GPS.

Tabla 1. Material parental, clasificación y área de las unidades cartográficas de los suelos seleccionados.

Unidad cartográfica	Material parental	Clasificación taxonómica	Área por Ecotopo (ha)				Total (ha)
			204A	205A	206A	207A	
Asociación 20	Cenizas volcánicas	<i>Hapludands</i>	-	17,8	759,8	-	777,5
Doscientos	Basaltos augíticos	<i>Typic Eutropepts</i>	-	-	3.023,3	-	3.023,3
Cascarero	Esquistos actinolíticos	<i>Typic Troporthents</i>	971,9	2.837,1	2.165,6	118,3	6.092,9
Chinchiná	Cenizas volcánicas	<i>Hapludands</i>	12.723,7	4.875,1	13.488,0	2.853,8	33.940,5
Chuscal	Esquistos anfibolíticos	<i>Typic Eutropepts</i>	-	5.783,2	268,3	1.212,5	7.263,9
Complejo de depósitos	Coluvio aluvial	<i>Typic tropaquepts</i> <i>Lithic Dystropepts</i>	283,8	334,7	436,0	502,1	1.556,7
Complejo Guacaica	Anfibolitas, filitas, cenizas volcánicas	<i>Typic Eutropepts</i> <i>Typic Troporthents</i> <i>Hapludands</i>	16.548,6	3.237,4	26,0	741,1	20.553,2
Letras	Cenizas volcánicas	<i>Fulvudands</i>	-	220,5	-	811,8	1.032,2
Consociación Maiba	Serpentinas	<i>Typic Troporthents</i> <i>Lithic Troporthents</i>	4.070,4	1.359,7	-	-	5.430,1
Manila	Pórfido andesítico	<i>Typic Eutropepts</i>	1.862,1	-	78,9	-	1.940,9
Sincerín	Andesita feldespática	<i>Typic Eutropepts</i>	-	90,5	-	-	90,5
Tareas	Conglomerados (Areniscas)	<i>Typic Eutropepts</i>	416,2	783,8	-	180,8	1.380,8
Tablazo	Filitas micáceas	<i>Typic Eutropepts</i>	5.502,5	-	-	-	5.502,5
Violeta	Gneiss biotítico	<i>Typic Eutropepts</i>	-	249,6	3,3	-	252,9
Total			42.379,2	19.789,3	20.249,1	6.420,4	88.838,0

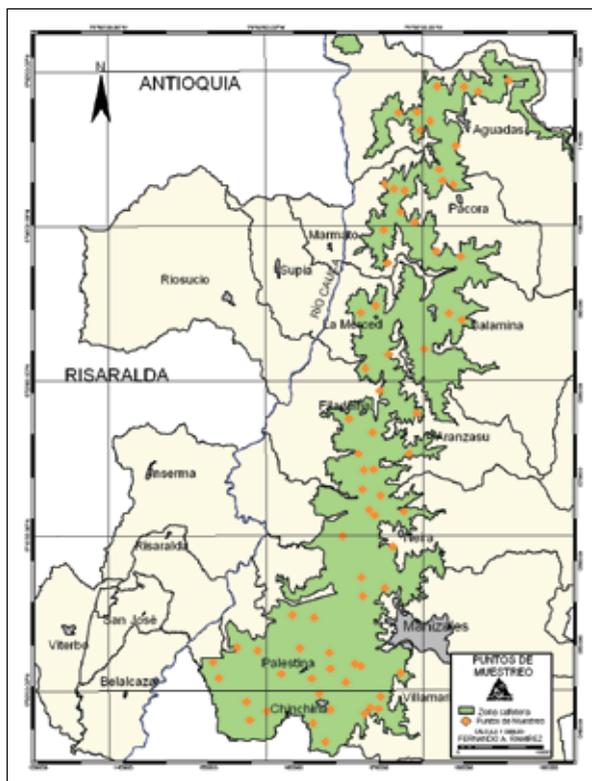
Fuente: Federacafé (5)

En la Figura 1, se indican los sitios donde se tomaron las muestras de suelo para las determinaciones. En cada punto de muestreo se registró la información obtenida en el campo, como: nombre del municipio y vereda, coordenadas geográficas, altitud,

inclinación y longitud de la pendiente, profundidad del primer horizonte y condiciones del cultivo.

Para la toma de la muestra se utilizó la metodología descrita por Hincapié y Rivera

Figura 1.
Distribución de puntos
de muestreo en la zona
cafetera central del
departamento de Caldas.



(9); en cada sitio se tomó una muestra de suelo de aproximadamente 10 kg, de los primeros 10 cm de profundidad del suelo. Las muestras se empaclaron en bolsas plásticas y se trasladaron al laboratorio de Suelos de Cenicafé, donde se secaron a la sombra y se tamizaron con tamiz No. 3/4 (abertura de orificio de 11,2 mm).

Las muestras se empaclaron en bandejas de lámina galvanizada de 20 cm de ancho por 40 cm de longitud y 5 cm de altura, se colocaron en su orden los siguientes elementos: un anjeo como soporte, una capa de 2 cm de arena como filtro y una tela de gasa. Luego, se colocó la muestra de suelo distribuida en forma uniforme; posteriormente, las bandejas con las muestras se sometieron a saturación por capilaridad en agua lluvia durante 24 horas. Después de la saturación, las muestras

se drenaron durante una hora, se colocaron en un soporte con una pendiente del 70% y se colocó alrededor del soporte una lámina protectora de 50 cm de altura para recolectar el suelo elevado por salpique.

Finalmente, las muestras se sometieron a la acción de la lluvia simulada, para lo cual se utilizó un simulador programable, con boquillas oscilatorias Vee-jet 80100. El simulador se colocó a una altura de 3,0 m sobre la bandeja y se aplicó lluvia con una intensidad de 86 mm.h⁻¹, el cual se considera un evento extremo y frecuente en la zona cafetera central colombiana.

Para cada muestra de suelo (sitio de muestreo), se simuló la lluvia con una

Tabla 2. Número de muestras tomadas por unidad de suelo y ecotopo. Zona central cafetera del departamento de Caldas.

Unidad cartográfica	Número de muestras por ecotopo				Total
	204A	205A	206A	207A	
Asociación 20	-	-	2	-	2
Doscientos	-	-	4	-	4
Cascarero	1	2	2	-	5
Chinchiná	6	3	8	4	21
Chuscal	-	2	-	-	2
Complejo de depósitos	-	-	1	1	2
Complejo Guacaica	9	5	-	6	20
Letras	-	1	-	-	1
Consociación Maiba	4	1	-	-	5
Manila	-	-	1	-	1
Sincerín	-	1	-	-	1
Tareas	2	1	-	-	3
Tablazo	4	-	-	-	4
Violeta	-	1	-	-	1
Total	26	17	18	11	72

duración de una hora y se realizaron las siguientes determinaciones:

Distribución del flujo de agua por escorrentía y percolación. Se colectaron las aguas de escorrentía y percolación durante el tiempo de duración de la lluvia simulada. Para ello, se colocaron recipientes plásticos en la salida de los canales de escorrentía y percolación, respectivamente, y se midió el volumen de agua en probetas. Estos valores se expresaron como lámina de agua en $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$.

Pérdidas de suelo por escorrentía. Se determinaron la cantidad de suelo contenido en cada una de las muestras de la escorrentía y el suelo depositado en el canal que no fue arrastrado hasta el recipiente por el flujo de escorrentía. Las muestras se secaron en estufa a 105°C durante 24 horas. Se estimó la cantidad de suelo seco perdido por escorrentía en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

Pérdidas de suelo por salpique. Se determinaron las pérdidas de suelo por

salpique de los agregados, debido al impacto de las gotas de lluvia durante una hora. Se recolectó el suelo depositado en los canales laterales que rodearon la bandeja, lo mismo que el suelo adherido a las paredes del protector metálico que bordeaba la bandeja. Las muestras se secaron en estufa a 105°C durante 48 horas, posteriormente se estimó el suelo perdido por salpique en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

Con la información obtenida de pérdidas de suelo A (Pérdidas de suelo por escorrentía sumadas con las pérdidas por dispersión) y con el valor de la erosividad de la lluvia R estimada para la lluvia simulada, se determinó el factor K de cada muestra, mediante la ecuación básica (Ecuación <<2>>), tal como lo sugiere Hudson (1982):

$$K = A/R \quad \text{<<2>>}$$

Los factores L y S se mantuvieron constantes para todas las muestras, por lo tanto, no se incluyeron para estimar el factor K ; los factores C y P se asumieron como 1, ya

que las determinaciones se realizaron con suelo totalmente desnudo y sin prácticas de conservación.

El valor K estimado, se representó espacialmente de acuerdo con las coordenadas determinadas con GPS. Posteriormente, estos valores se clasificaron en rangos, basados en la calificación del factor K , sugerida por Rivera y Gómez (20) (Tabla 3).

Adicionalmente, en cada punto de muestreo se realizaron determinaciones físicas y químicas del suelo, con el fin de explicar las variaciones del factor K y establecer algunas relaciones que pudieran existir entre ellas, y así obtener una aproximación del factor K a partir de algunas propiedades del suelo en forma indirecta; dichas determinaciones fueron:

Resistencia a la penetración. Se evaluó con penetrómetro de impacto, de acuerdo con la metodología descrita por Stolf *et al.* (21).

Distribución de tamaño de partículas. Se realizó mediante el método del hidrómetro propuesto por Bouyoucos, se utilizó como dispersante Pirofosfato de Na al 8% (13).

Densidad aparente. Se determinó mediante el método de los cilindros cortos (13).

Estabilidad estructural de los agregados en húmedo. Se empleó el método de Yoder, con un equipo Daiki y un juego de cinco tamices de 2 mm a 0,106 mm (2).

Contenido de materia orgánica (MO). Se estimó a partir de la determinación del contenido de carbono orgánico por el método de Walkley – Black (25) con dicromato de K y colorimetría a 585 nm, sobre muestras de suelo pasadas por tamiz No. 35.

Con la información obtenida se realizaron los análisis de estadística descriptiva con cada una de las variables y el análisis de regresión múltiple para determinar la relación entre las propiedades evaluadas y el factor erodabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución del flujo de agua por escorrentía e infiltración. El flujo de agua por escorrentía varió entre 4,8 y 34,3 mm, mientras que la

Tabla 3. Calificación de la erodabilidad, propuesto para la zona cafetera colombiana.

Código	Erodabilidad (t.ha.h.MJ ⁻¹ . ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	Calificación
1	Menor de 0,01	Natural
2	0,01 a 0,02	Muy bajo
3	0,02 a 0,04	Bajo
4	0,04 a 0,06	Moderado
5	0,06 a 0,08	Alto
6	0,08 a 0,10	Muy alto
7	0,10 a 0,15	Severo
8	Mayor de 0,15	Extremadamente severo

Fuente: Rivera y Gómez (20)

infiltración osciló entre 42,3 y 76,2 mm, este último proceso fue siempre mayor al compararlo con los otros procesos evaluados (Tabla 4), comportamiento que se puede relacionar principalmente con la alteración del suelo para las determinaciones en el laboratorio, ya que se aumenta considerablemente la porosidad y, por ende, la capacidad de infiltración de agua en el suelo; de igual manera, en los suelos con mayor contenido de arcillas, el movimiento de agua por escorrentía fue mayor comparado con los suelos de textura franca o franca arenosa, tal es el caso de los suelos de la Unidad Sincerín, los cuales presentan textura arcillosa y un flujo de agua por escorrentía alta, mientras que en los suelos de la Unidad Cascarero y Chinchiná la escorrentía fue baja, asociada a la textura franca y franca arenosa de estos suelos.

La mayor infiltración se registró en la unidad de suelo Cascarero, debido a la presencia de arenas gruesas que favorecen

el movimiento de agua a través del suelo. La menor infiltración la presentó la unidad de suelo Sincerín, como consecuencia de los altos contenidos de arcilla que dificultan la circulación del agua a través del suelo.

Pérdidas de suelo. Las pérdidas de suelo por escorrentía oscilaron entre 0,03 y 0,81 kg.m⁻² (Tabla 5). Las mayores pérdidas se presentaron en los suelos de la unidad Sincerín, seguidas por la unidad Complejo de depósitos, lo cual concuerda con los altos flujos de escorrentía que se presentaron en estos suelos, debido a la menor capacidad de infiltración del agua en el suelo.

Las pérdidas de suelo por dispersión oscilaron entre 0,08 y 0,53 kg.m⁻² siendo menores en los suelos de la Unidad Manila y mayores en los suelos de las Unidades Complejo de depósitos y Letras. Este proceso de erosión es considerado un indicador de la susceptibilidad del suelo al desprendimiento

Tabla 4. Distribución del flujo de agua por escorrentía, percolación y agua retenida en cada una de las unidades de suelo evaluadas.

Unidad cartográfica	Flujo de agua (mm)		Agua retenida (mm)
	Escorrentía	Percolación	
Cascarero	4,8	76,2	5,0
Chinchiná	6,4	73,4	6,3
Chuscal	8,5	71,4	6,1
Complejo de depósitos	24,3	57,7	4,0
Doscientos	10,8	67,8	7,4
Complejo de Guacaica	16,0	67,2	2,8
Letras	7,3	75,5	3,3
Consociación Maiba	21,9	60,8	3,3
Manila	10,5	75,0	0,5
Sincerín	34,3	42,3	9,5
Tablazo	7,0	75,3	3,8
Tareas	20,3	60,4	5,4
Asociación 20	6,9	74,8	4,4
Violeta	18,3	67,0	0,8

y la dispersión de los agregados producidos por el impacto de las gotas de lluvia, de allí que en los suelos donde este proceso es alto, hay mayor cantidad de agregados para ser arrastrados por las aguas de escorrentía, lo cual puede explicar las altas pérdidas que se presentaron por este último proceso en los suelos de las Unidades Complejo de depósitos y Letras, e igualmente explica las bajas pérdidas en las Unidades Manila y Tablazo.

Las mayores pérdidas de suelo por escorrentía se registraron en las unidades Sincerín, Complejo de depósitos y Letras. La alta pérdida de suelos registrada en los suelos de la unidad Sincerín, se puede explicar por el material de origen (*Andesita feldespática*) que origina suelos con alto contenido de arcillas, así como por el bajo contenido de materia orgánica (4,8%), lo cual hace que estos suelos presenten baja estabilidad estructural, y a su vez favorezca la dispersión de agregados por acción

del impacto de las gotas de lluvia; esta dispersión ocasiona el sellado superficial y, por consiguiente, aumento de la escorrentía tal como lo han demostrado Castillo *et al.* (3) y Gómez (7).

Las menores pérdidas totales de suelo se registraron en los suelos de la unidad Manila, éstos presentaron alto contenido de materia orgánica y alta estabilidad estructural, lo cual explica las bajas pérdidas de suelo tanto por escorrentía como por salpique.

Factor K. En la Tabla 6 se presentan los promedios de la erodabilidad para cada una de las unidades de suelo estudiadas y la calificación de acuerdo con la escala propuesta por Rivera y Gómez (20) para la zona cafetera colombiana.

Los valores del factor *K* oscilaron entre 0,0008 y 0,0086 t.ha.h.MJ⁻¹.ha⁻¹.mm⁻¹, calificados según Rivera y Gómez (20) como erodabilidad natural en todas las muestras

Tabla 5. Pérdidas de suelo por escorrentía y salpique evaluadas en 14 unidades de suelo.

Unidad cartográfica	Pérdidas de suelo (kg.m ⁻²)		Total
	Escorrentía	Dispersión	
Cascarero	0,28	0,21	0,49
Chinchiná	0,26	0,24	0,50
Chuscal	0,21	0,18	0,39
Complejo de depósitos	0,61	0,50	1,11
Doscientos	0,29	0,25	0,53
Complejo Guacaica	0,27	0,23	0,50
Letras	0,58	0,53	1,12
Consociación Maiba	0,32	0,29	0,60
Manila	0,03	0,08	0,11
Sincerín	0,81	0,39	1,19
Tablazo	0,10	0,09	0,19
Tareas	0,39	0,28	0,66
Asociación 20	0,23	0,17	0,40
Violeta	0,46	0,31	0,76

evaluadas, lo cual indica la alta resistencia de estos suelos a la erosión. Valores similares de erodabilidad fueron encontrados por Leihner *et al.* (15) en suelos ándicos del Suroccidente colombiano.

Correlación entre el factor *K* y algunas propiedades del suelo. En la Tabla 7, se presentan los valores promedios del contenido de MO y de las propiedades físicas evaluadas por unidad de suelo.

El mayor contenido de MO se presentó en los suelos de las Unidades Chinchiná, Tablazo y Manila, a la vez estos suelos presentaron mayor resistencia a la erosión, mientras que los suelos de las Unidades Sincerín y Complejo de depósitos presentaron bajo contenido de MO y menor resistencia a la erosión; lo cual confirma lo reportado por varios autores (1, 4, 8, 14, 19, 22, 23), debido a que la MO tiene un efecto cementante entre las partículas del suelo, lo cual hace que haya una mayor y mejor

agregación, mayor estabilidad estructural y resistencia del suelo a la erosión, a su vez la MO influye en otras propiedades como incremento de la infiltración y retención de agua y reducción de la escorrentía, entre otras.

Propiedades como densidad aparente, estabilidad estructural en húmedo y conductividad hidráulica, mostraron relación con la resistencia del suelo a los procesos erosivos. Los suelos de las unidades Sincerín, Complejo de depósitos, Tareas y Violeta, presentaron los mayores valores de densidad aparente y a la vez la menor resistencia a la erosión; mientras que los suelos de las unidades Manila, Tablazo, Asociación 20, Chinchiná y Cascarero, presentaron la menor densidad aparente y mayor resistencia a la erosión, lo anterior asociado a procesos físicos del movimiento del agua en el suelo. La unidad Letras, aunque presentó una densidad aparente baja, tiene menor resistencia a la erosión, debido básicamente a la baja estabilidad estructural, contrario a

Tabla 6. Promedios del factor de erodabilidad, determinado mediante lluvia simulada para las unidades de suelo estudiadas, con su respectiva calificación.

Unidad cartográfica	Factor <i>K</i> (t.ha.h.MJ ⁻¹ .ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	Calificación
Chinchiná	0,00356	Natural
Letras	0,00813	Natural
Asociación 20	0,00292	Natural
Doscientos	0,00360	Natural
Manila	0,00082	Natural
Sincerín	0,00864	Natural
Violeta	0,00556	Natural
Cascarero	0,00202	Natural
Chuscal	0,00282	Natural
Consociación Maiba	0,00437	Natural
Tablazo	0,00153	Natural
Complejo de depósitos	0,00809	Natural
Tareas	0,00607	Natural
Complejo Guacaica	0,00409	Natural

Tabla 7. Promedios del contenido de materia orgánica y algunas propiedades físicas del suelo.

Unidad cartográfica	MO (%)	DA (g.cm ⁻³)	DMP (mm)	EA (%)	CH (cm.h ⁻¹)	RP (kPa)	Distribución de partículas		
							A	L (%)	Ar
Cascarero	8,2	0,90	2,82	43,2	8,85	0,31	48,5	22,5	29,0
Chinchiná	13,1	0,74	3,08	95,3	6,24	0,25	56,3	11,9	31,8
Chuscal	6,3	1,06	2,61	85,8	5,61	0,28	48,0	26,5	25,5
Complejo de depósitos	5,8	1,35	1,83	71,9	0,67	0,28	51,5	19,5	29,0
Doscientos	5,0	0,95	1,61	77,2	3,79	0,79	37,0	37,3	25,8
Complejo Guacaica	9,0	1,02	2,11	73,3	2,52	0,25	48,0	23,1	28,9
Letras	8,6	0,83	0,99	40,9	0,60	0,16	64,0	6,0	30,0
Consociación Maiba	6,9	1,20	2,29	87,5	3,79	0,30	50,0	20,2	29,8
Manila	10,7	0,90	3,01	93,0	3,25	0,56	40,0	33,0	27,0
Sincerín	4,8	1,17	1,32	74,6	0,29	0,19	50,0	31,0	19,0
Tablazo	10,4	0,84	2,67	91,5	2,67	0,41	41,4	27,6	31,0
Tareas	6,2	1,20	2,21	78,4	6,43	0,30	59,0	17,3	23,7
Asociación 20	7,7	0,96	3,07	95,2	3,93	0,43	55,0	16,5	28,5
Violeta	5,4	1,09	1,92	73,4	7,30	0,18	40,0	19,0	41,0

MO:Materia Orgánica, DA:Densidad Aparente, DMP:Diámetro Medio Ponderado, EA:Estabilidad de Agregados, CH:Conductividad Hidráulica Saturada, RP:Resistencia a la Penetración, A:Arenas, L:Limos, Ar:Arcillas

la unidad Manila, la cual presentó la mayor resistencia a la erosión y la mayor estabilidad estructural.

En la Tabla 8, se presenta el análisis de correlación lineal simple entre el factor *K* y las propiedades del suelo evaluadas. Tal como lo reportan Wischmeier y Smith (26), Nearing *et al.* (16) e Hincapié (9), se ha encontrado relación entre la erodabilidad y propiedades del suelo tales como contenido de MO, DA y contenido de arenas, entre otros. Aunque en este caso no hubo alta correlación, seguramente porque el rango de dichas propiedades no es muy amplio, por la complejidad de las mismas y por el limitado número de muestras; también se encontró una tendencia negativa entre la erodabilidad y la MO; al igual que con otras propiedades tales como el contenido

de arcillas (Ar), la conductividad hidráulica y la resistencia del suelo a la penetración, así mismo se presentó una alta correlación con el diámetro ponderado medio ($r = -0,82^{**}$).

Se ha demostrado que el contenido de MO influye en otras variables tales como la agregación de partículas de suelo y estabilidad de estos agregados, lo cual favorece además la resistencia del suelo a la erosión; la relación inversa entre la conductividad hidráulica y la erodabilidad indican que la estructura subsuperficial juega un papel importante, ya que ésta determina el movimiento de agua en el perfil del suelo (1, 3, 19, 23).

La relación entre el factor *K* y propiedades como contenido de MO, DPM y EA, entre otras propiedades, muestran la importancia de

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre la erodabilidad y algunas propiedades del suelo.

	Factor K	MO	A	Ar	L	EA	DMP	DA	CH				
MO	-0,517												
A	0,499	0,141											
Ar	-0,370	-0,273	-0,820	**									
L	-0,159	0,243	-0,186	-0,409									
EA	-0,427	0,245	-0,289	0,292	-0,041								
DMP	-0,821	**	0,586	*	-0,151	0,051	0,151	0,567	*				
DA	0,544	*	-0,747	*	0,022	0,111	-0,227	0,010	-0,349				
CH	-0,485		0,097		-0,136	-0,086	0,365	0,004	0,544	*	-0,200		
RP	-0,540	*	-0,010		-0,576	*	0,659	*	-0,211	0,337	0,223	-0,220	0,014

p<0,05; ** p<0,001. MO:Materia orgánica, A:Arenas; Ar:Arcillas; L:Limos; EA:Estabilidad de agregados; DMP:Diámetro medio ponderado, DA:Densidad aparente; CH:Conductividad hidráulica saturada, RP:Resistencia a la penetración.

las prácticas de conservación de suelos que contribuyan a la reducción del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, a la reducción del flujo de agua por escorrentía, al aumento de la infiltración y, en general, al mantenimiento o mejoramiento de la calidad del suelo.

Con el fin de tener una aproximación de la relación entre la erodabilidad del suelo y algunas propiedades de éste, se realizó el análisis de regresión lineal utilizando el método Stepwise, con un nivel de significancia del 5%. La variable que mayor peso tuvo sobre la erodabilidad fue el diámetro ponderado medio (DMP, pr<0,01), seguido por el contenido de arenas (pr<0,05) y por la densidad aparente (pr<0,05). A partir de estas variables se construyó un modelo de regresión lineal múltiple (Ecuación<<3>>), el cual explica el 90% de la variación total de la erodabilidad o variable respuesta.

$$K = - 0,0007 + 0,0001A - 0,0025 DMP + 0,0045 DA \quad \langle\langle 3 \rangle\rangle$$

donde:

K= Erodabilidad (t.ha.h.MJ⁻¹.ha⁻¹.mm⁻¹).

A= Contenido de Arenas (%).

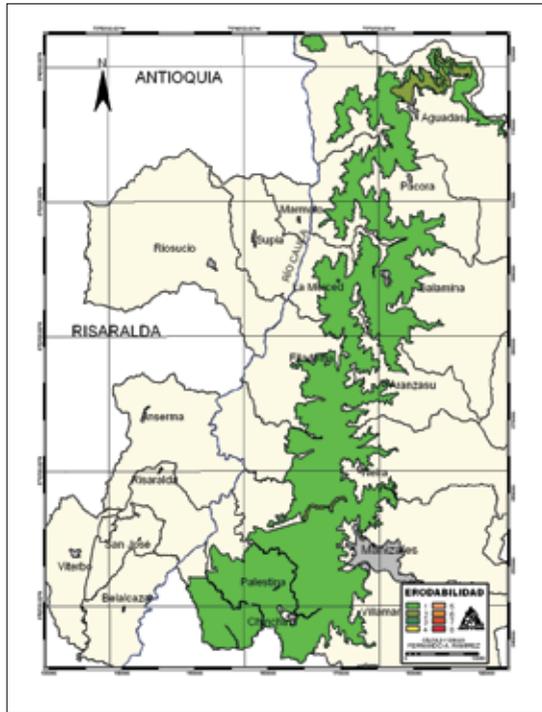
DMP = Diámetro Medio Ponderado (mm).

DA= Densidad Aparente (g.cm⁻³).

Mapa del factor K. Como se mencionó, la erodabilidad determinada para la zona de estudio se encuentra en la clase erodabilidad natural, esto hace que al espacializar la información no se encuentren diferencias para los distintos suelos. Únicamente se pudo diferenciar en 3% del área, erodabilidad calificada como muy baja, ubicada en la subregión norte, correspondiente al municipio de Aguadas, en suelos de la Unidad Complejo Guacaica, y en la subregión centro, en suelos de la Unidad Complejo de depósitos en el municipio de Manizales (Figura 2).

En general, se observó que con la metodología utilizada para estimar la resistencia de los suelos a la erosión, los 14 tipos de suelos evaluados mostraron alta resistencia a la erosión, ya sea por su baja susceptibilidad a la escorrentía, y salpique o a la combinación de estos procesos. Esta consideración permite inferir que las altas pérdidas de suelo que se presentan en la zona de estudio se deben posiblemente a la influencia de otros factores como son la alta agresividad de las lluvias (erosividad), presencia de pendientes fuertes (75-100% o más) y de longitudes largas (1.000 - 2.000 m), además de factores antrópicos como uso inadecuado de los suelos, eliminación de las

Figura 2.
Mapa del factor *K*
(erodabilidad), de la
zona de estudio.



coberturas vegetales y la falta o ausencia de prácticas preventivas de conservación de suelos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimientos a la Dra. Esther Cecilia Montoya R., al Ing. Alveiro Salamanca J., al Ing. Uriel Pérez G. de la Universidad del Tolima, a los Comités Municipales de Cafeteros del Departamento de Caldas, a los caficultores de Caldas y al personal de apoyo de Cenicafé.

LITERATURA CITADA

- BURBANO, H. El suelo: una visión sobre componentes biogénicos. Pasto, Universidad de Nariño, 1989. 447 p.
- CARTER, M.R. Soil sampling and methods of analysis. Boca Raton, Lewis Publishers, 1993. 823 p.
- CASTILLO, J.A.; GONZÁLEZ, A.M.; MÜLLER-SÁMANN, K.M. Determinación del índice de erodabilidad (*K*) en dos suelos del Departamento del Cauca. Suelos Ecuatoriales 25:81-85. 1995.
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Manual de conservación de suelos de ladera. Chinchiná. FEDERACAFÉ. Cenicafé, 1975. 267 p.
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Estudio de suelos de Caldas (zona de la cuenca del río Cauca). Bogotá. FEDERACAFÉ, 1998. 268 p.
- FOSTER, G. R. User requirements: USDA-water erosion prediction project (WEPP) Draft 6.2. USDA-ARS. Purdue, National Soil Erosion Research Laboratory, 1987. 43 p.
- GÓMEZ F., E. Procesos erosivos: estrategias para su caracterización e implementación de sus prácticas básicas de control y prevención. Medellín. Universidad Nacional de Colombia, 1999. 154 p.
- HINCAPIÉ G., E. Validación del factor erodabilidad K_i - WEPP, usando un simulador de lluvias en suelos de la unidad Chinchiná, Melanudands. Manizales,

- Universidad de Caldas. Facultad de Agronomía, 2001. 134 p. (Tesis: Ingeniero Agrónomo).
9. HINCAPIÉ G, E.; RIVERA, H. Validación del factor erodabilidad en suelos de la unidad Chinchiná, Melanudads, mediante el uso de simulador de lluvias. *Cenicafé* 54 (1): 77-89. 2003.
 10. HUDSON, N. Conservación de suelos. Barcelona, Reverté, 1982. 335 p.
 11. MÜLLER. S.K. Conservación de suelos y aguas en la zona andina: hacia un concepto integral con más interacción, más adopción y más impacto Memorias del taller "conceptos integrales en la conservación de suelos y aguas en la zona andina". (Cali), CIAT, 1997. 227 p.
 12. KIKBY M., J.; MORGAN R., P. Erosión de suelos. México, Limusa, 1984. 375 p.
 13. KLUTE, A Z. Methods of Soil Analysis. Physical and mineralogical properties. Madison, American Society of Agronomy and Soil Science of America, 1986. 1187 p.
 14. LAL, R. Soil erosion research methods. Ankeny, Iowa, USA. Soil and Water Conservation Society, 1988. 244 p.
 15. LEIHNER, D. E.; RUPPENTHAL, M.; CASTILLO F., J. A.; MÜLLER, K. Cuantificación y estudios de la erodabilidad de los suelos andinos en el suroccidente colombiano. Memorias del taller "Conceptos integrales en la conservación de suelos y aguas en la zona andina". (Cali), CIAT, 1997. 227 p.
 16. NEARING, M. A; PAGE, D. I.; SIMANTON, J. R.; LANE, L. J. Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model. *Transactions American Society of Agricultural Engineers*. 32: 919-924. 1989.
 17. PÉREZ G., S. Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica. Bogotá, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2001. 65 p. (Tesis: Especialización Ingeniería ambiental).
 18. RIVERA P., J. H. Determinación de los índices de erosividad, erodabilidad y erosión potencial en la zona Cafetera Central Colombiana. (Caldas, Quindío y Risaralda). Palmira, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, 1990. 310 p. (Tesis: Máster Science).
 19. RIVERA P., J. H. Predicción, prevención y control de diferentes procesos de erosión en suelos de ladera de la zona cafetera de Colombia para lograr un desarrollo sostenible. Chinchiná, *Cenicafé*, 1997. 323 p.
 20. RIVERA P., H.; GÓMEZ A., A. Erodabilidad de los suelos de la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé* 42 (3):67-88. 1991.
 21. SUÁREZ V., S. La materia orgánica en la nutrición del café y el mejoramiento de los suelos de la zona cafetera. Chinchiná, *Cenicafé*, 2001. 8 p. (Avances Técnicos *Cenicafé* No. 283).
 22. SUÁREZ V., S. Características físicas de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas del Departamento de Risaralda y su relación con la conservación. Chinchiná, *Cenicafé*, 1998. 8 p. (Avances Técnicos *Cenicafé* No. 257).
 23. STOLF, R.; FERNADES, J.; FURLALINETO, V. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto. modelo IAA/Planalsucar - Stolf. São Paulo, MIC/IAA/PNMCA-Planalsucar, 1995. 8 p. (Serie penetrômetro de impacto; Boletim N°1).
 24. VAHOS M., J. D. Generación de modelos digitales hidrológicos y de pérdida de suelos y su comparación con métodos tradicionales en la cuenca del Río Claro (Suroeste Antioqueño). Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2003. 106 p. (Tesis: Ingeniero Forestal).
 25. WALKLEY, A., BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37:29-38. 1934.
 26. WISCHMEIER, W.; SMITH, D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rock mountains. Guide for selection of practices soil and water conservation. *Agricultural Handbook*. No. 282. 1965. 47 p.
 27. ZINCK, A., Suelos: información y sociedad. In: Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. México, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, 2005. p 9-19.