

PREDICCIÓN DE LA ERODABILIDAD EN ALGUNOS SUELOS DE LADERA DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA¹

José Horacio Rivera-Posada^{*}; Rattan Lal^{**}; Édgar Amézquita-Collazos^{**}; Óscar Mesa-Sánchez^{****}; Bernardo Chaves-Córdoba^{****}

RESUMEN

RIVERA P., J. H.; LAL, R.; AMÉZQUITA C., E.; MESA S., O; CHAVES C., B. Predicción de la erodabilidad en algunos suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 61 (4): 344-357. 2010.

Con el objetivo de predecir la erodabilidad de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana, tres derivados de cenizas volcánicas Chinchiná, Montenegro y Fresno (Melanudands), y dos derivados de basaltos y areniscas olivínicas, Parnaso y Guamal (Typic eutropepts), respectivamente, se realizaron correlaciones lineales simples y multivariadas, entre índices de erodabilidad de los suelos y 71 variables físicas y químicas, obtenidas en el campo, en tres usos del suelo bosque, café y pastos, a cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm), y en el laboratorio. Se determinaron diez ecuaciones para la predicción de la erodabilidad (susceptibilidad de los suelos a la erosión) K_i , del Proyecto de Predicción de Erosión por el Agua (WEPP) y K de la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo). Para predecir K_i del WEPP, se considera promisorio la ecuación $K_i^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0,5SA) + 16,43 (AG1-05SA)^2$, R^2 de 1,00 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua, entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0,5SA). Para predecir el K de la USLE, se considera promisorio la ecuación $K^3 = 389E-8 - 39E-7 (AG1-0,5SA) + 685E-9 (AG1-0,5SA)^2$, con R^2 de 0,99 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua, entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0,5SA).

Palabras clave: Erosión, degradación, cenizas volcánicas, basaltos, areniscas olivínicas

ABSTRACT

In order to predict the erodibility of five soils of the Colombian Coffee Region, three volcanic ash derivatives: Chinchiná, Montenegro and Fresno (Melanudands) and two basalt derivatives and olivinic sandstones: Parnaso and Guamal (Typic eutropepts), respectively, were analyzed. Simple and multivariate linear correlations between erodibility indices of soils and 71 physical and chemical variables obtained in field, in three soil uses (forest, coffee and grass), at four depths (0-10, 10-20, 20-40 and 40-60 cm) and in laboratory conditions were performed. Ten equations for erodibility prediction (susceptibility of soils to erosion) K_i , of Water Erosion Prediction Project (WEPP) and K of the USLE (Universal Soils Loss Equation) were determined. In order to predict K_i (soil erodibility) of the WEPP, the equation $K_i^2 = 136,7 - 97,83(AG1-0,5SA) + 16,43(AG1-05SA)^2$, R^2 of 1.00 is considered promissory and highly significant for the variable aggregates without stable sands in water, with a size between 1-0.5 mm of diameter (AG1-0.5SA). In order to predict the K of the USLE, the equation $K^3 = 389E-8 - 39E-7 (AG1-0,5SA) + 685E-9 (AG1-0.5SA)^2$ is considered promissory, with, R^2 of 0.99 highly significant for the variable aggregates without stable sands in water, with size between 1-0.5 mm of diameter (AG1-0.5SA).

Keywords: erosion, degradation, volcanic ashes, basalts, olivinic sandstones.

¹ Aparte Tesis de Doctorado presentada por el primer autor, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, Colombia.

^{*} Investigador Científico II. Disciplina de Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia

^{**} Professor School of Natural Resources Columbus

^{***} Físico de Suelos. CIAT. Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

^{****} Profesor Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

La degradación de los recursos suelos y agua, así como la contaminación ambiental, son percibidos como los mayores problemas en los trópicos (15, 16). El área degradada en el trópico por diferentes procesos se estima en 915×10^6 de hectáreas por erosión hídrica, 474×10^6 hectáreas como erosión por el viento, 50×10^6 hectáreas por degradación física, y 213×10^6 hectáreas por degradación química (15, 16); no obstante, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (19), los datos de un nuevo estudio indican que, a pesar de la determinación de los 193 países que han ratificado de la Convención de Naciones Unidas para combatir la desertización de 1994, la degradación del suelo está empeorando en vez de mejorar, con más del 20% de las tierras agrícolas afectadas, el 30% de los bosques y el 10% de los pastizales (19).

En Colombia, el 40% del territorio presenta erosión de muy ligera a muy severa, y la zona Andina, donde se encuentra la región cafetera colombiana, es la más afectada, con un 88% de erosión hídrica (20). El territorio Colombiano por sus condiciones geomorfológicas y climáticas, presenta una degradación por movimientos masales de 19.137.239 ha, equivalente al 16,18% del área del país, y por erosión hídrica superficial de 73.000.000 ha, equivalentes al 64% del área del país (12).

En Estados Unidos, Wischmeier y Smith (29), establecieron una ecuación denominada "Ecuación Universal de Pérdida de Suelo", en la cual están involucrados los factores activos, pasivos y atemperantes, causantes de erosión. Los seis factores de la ecuación, hacen que el modelo tenga una validez universal; sin embargo, su aplicación se limita a estados y países donde la información está disponible para evaluaciones locales de los factores individuales de la ecuación.

Para Colombia, la Federación Nacional de Cafeteros ha venido trabajando en la determinación de los factores: R, índice de erosividad de las lluvias, mediante el uso de los índices de erosión pluvial de Fournier (6) y de Hudson (11); K, susceptibilidad del suelo a la erosión, a través de índices de erodabilidad; L, longitud de la pendiente; S, grado de la pendiente; C, uso en cultivo; y P, prácticas de conservación de suelos, en parcelas de escorrentía diseñadas para estudiar y evaluar el comportamiento de estos parámetros en la Zona Cafetera Central Colombiana, en suelos de ladera (Melanudands), bajo diversos sistemas de producción de café y de otros cultivos (9, 22, 26). Sin embargo, debido a la especificidad del medio tropical, los datos reales de erosión no han podido ser reproducidos por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

Actualmente, con el fin de superar las limitaciones encontradas en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por Erosión, se desarrollaron según Renard *et al.* (21) investigaciones y experiencias adicionales, para un perfeccionamiento de la USLE, dando lugar a un modelo mejorado conocido como RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada), que incluye los procesos, dándosele mayor universalidad a la Ecuación Universal de Erosión. Según Renard *et al.* (21), la meta de los esfuerzos del proyecto WEPP (proyecto de predicción de erosión por el agua) es un modelo o familia de modelos de procesos, que son conceptualmente superiores al modelo de la RUSLE y más versátiles a las condiciones que puedan ser evaluadas. WEPP, es un instrumento importante, para ayudar a los planificadores a seleccionar las mejores rutas para producir en una finca específica, y protegerla con base en sus suelos, topografía y clima. Esto ayudará a los propietarios a conservar sus pozos y diques libres de sedimentos (17).

Rivera (22), para la zona cafetera central (Caldas, Quindío y Risaralda), determinó el factor erodabilidad en forma indirecta, utilizando la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (29), la cual permite determinar el factor erodabilidad de los suelos con contenidos máximos de materia orgánica del 12%. Esto limita su uso para gran cantidad de suelos de la zona cafetera con cantidades de materia orgánica superiores a dicho valor.

Con el presente trabajo, se busca mediante pruebas de correlación y regresión múltiple, entre propiedades físicas y químicas y los factores de erodabilidad, determinar una ecuación que permita predecir los índices de erodabilidad de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana, en forma rápida, sencilla y a costos bajos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fases

En la Fase I, se seleccionaron los suelos representativos de la Zona Cafetera Colombiana para el cultivo del café, con base en características contrastantes en textura, contenido de materia orgánica y pendiente del 75% o mayor. Tres de los suelos son derivados de cenizas volcánicas: Unidades Chinchiná, Montenegro y Fresno, Melanudands. Las dos Unidades restantes, Guamal y Parnaso, Typic eutropepts, son derivadas de areniscas olivínicas y basalto, respectivamente (Tabla 1). Se tomaron muestras de suelos en el campo, a profundidad de 0 – 10 cm, para determinar los índices de erodabilidad con el uso de un Simulador de Lluvias Tipo Purdue Programable. Boquilla Vee – Jet 80 – 100 en el Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad del Estado de Ohio (Columbus Ohio, Estados Unidos) y algunas propiedades físicas y químicas de los suelos en el laboratorio de Cenicafé (Manizales, Caldas, Colombia).

Los suelos estaban sembrados en cultivos perennes (bosque, café y pastos), de cada una de las unidades de suelos se tomaron 50 kg de suelo, a una profundidad entre 0 a 10 cm. Los suelos se secaron al aire y se pasaron a través de tamices con tamaños de 2, 1 y 0,5 mm de diámetro, para obtener 10 kg de agregados para cada uno de los siguientes tamaños: 2 - 1; 1 - 0,5 y < 0,5 mm de diámetro promedio, los cuales fueron empacados en botellas plásticas y transportados al Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad del Estado de Ohio, en Columbus Ohio (Estados Unidos), para la determinación de la erodabilidad.

Las muestras previamente tamizadas, se empacaron manualmente en bandejas metálicas de 20,32 cm de ancho por 40,64 cm de longitud (0,08258 m²), siguiendo la metodología propuesta por Truman y Bradford (27).

Se hicieron varias determinaciones físicas y químicas que permitieron, mediante correlaciones y regresiones múltiples, determinar su influencia en relación con los factores erodabilidad de los suelos K y K_p, de la USLE y WEPP, respectivamente:

- Determinaciones físicas (0-10 cm de profundidad): Se determinaron los porcentajes de arena limo y arcilla, por el método del hidrómetro propuesto por Bouyoucos (2)
- Contenido de humedad disponible: Para la determinación del agua disponible, fue necesario establecer el contenido de humedad de cada unidad de suelo a 0,033 MPa y 1,5 MPa
- Determinaciones químicas (0-10 cm de profundidad)
- Contenido de materia orgánica: Se determinó para cada uno de los tamaños de agregados

Tabla 1. Localización de los sitios de muestreo de suelos y sus condiciones climáticas

Departamento Municipio	Unidad suelo	Altitud (m)	Promedio de lluvia (mm)	Días lluviosos	Temperatura media (°C)	Humedad relativa anual (%)
Caldas Chinchiná	Chinchiná, Melanudands	1.400	2.665	251	20,6	78
Marquetalia	Fresno, Melanudands	1.450	3.627	216	20,8	82
Supía	Guamal, Typic eutropepts	1.200	2.254	183	21,7	75
Quindío Quimbaya	Montenegro, Melanudands	1.450	2.004	203	20,8	78
Valle Sevilla	Parnaso, Typic eutropepts	1.540	1.617	188	20,3	—

del suelo (2-1, 1-0,5 y <0,5 mm de diámetro promedio), por el método de Walkley y Black (28), con dicromato de potasio

- pH, K, Ca, Mg, P, Fe, Mn, Zn, Cu, Al y CIC (3)
- Los elementos como el Fe, Mn y Al, fueron extraídos en oxalato, pirofosfato y ditionito de Na – citrato (3)

Durante la Fase II, se efectuó un muestreo en el campo para la determinación de propiedades físicas y químicas de los suelos en tres usos (bosque, café y pastos) y cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm).

Se hicieron varias determinaciones físicas y químicas que permitieron, mediante correlaciones y regresiones múltiples (25),

determinar la influencia de cada una de ellas con el factor erodabilidad de los suelos K_e , de la Ecuación Universal de erosión y K_e del WEPP:

Determinaciones físicas en el campo

- Resistencia a la penetración del suelo por el método del penetrógrafo estático, Marca SPAD, con el fin de medir la fuerza por unidad de área seccional ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) (esfuerzo), necesaria para introducir un pistón lentamente hasta cierta profundidad en el suelo
- Resistencia al corte tangencial del suelo. Se usó el método de torsión con cuchillas, el cual según Forsythe (7), tiene la ventaja de poder medir la resistencia tangencial al corte del suelo directamente en el campo. Para las determinaciones se usó un equipo, Marca Edeco Pilcon

Determinaciones en el laboratorio

Determinación de la granulometría por el método del hidrómetro propuesto por Bouyoucos (2):

- Porcentaje de arenas, limos y arcillas
- Distribución del tamaño de arenas
- Distribución de agregados en seco (seco al aire)
- Determinación de la estabilidad de agregados en húmedo. Se efectuó por el método de Yoder, modificado por Amézquita. La determinación de las muestras se hizo a dos profundidades del perfil del suelo: 0-10 y 10 – 20 cm. A partir de los valores de estabilidad de agregados en húmedo, se calcularon los siguientes índices, siguiendo la metodología propuesta por González (10): Índice de estructura (IE), Peso diámetro promedio (PDP) y Estabilidad de la agregación(EA) (18); Porosidad total (Pt) (7); Densidad aparente (Da) (7); Densidad de partícula o densidad real (Dr) (método del picnómetro, descrito por Montenegro y Malagón, (18); Porosidad de aeración o espacio poroso lleno de aire (8); Humedad gravimétrica (HG) (7); Humedad volumétrica de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana (HV) (7)
- Retención de humedad del suelo. Ésta se determinó a 0,033; 0,1; 0,5; 1,0 y 1,5 Megapascales (Mpa). Para la toma de muestras, se hicieron calicatas escalonadas para cada profundidad (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm) y cada uso del suelo (bosque, café y pastos).

- Permeabilidad de suelos en medio saturado, por el método del permeámetro de cabeza constante (4).

Determinaciones químicas de 0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad

Se hicieron las siguientes determinaciones químicas:

- Materia orgánica (M.O.) en porcentaje. Se hizo por el método de Walkley y Black (28) (dicromato de potasio)
- pH, K, Ca, Mg, P, Fe, Mn, Zn, Cu, Al. La Capacidad de intercambio catiónico se efectuó por el método del acetato de amonio y coloración con reactivo de Nessler

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana en diferentes profundidades

En la Tabla 2 se agruparon los coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación (R^2) más altos, con sus respectivos valores de significancia ($Pr > F$), entre los índices de erodabilidad K_i de la WEPP y K de la USLE, en relación con 26 variables físicas. Éstas hacen parte de 71 variables físico - químicas determinadas durante la fase II de la investigación, las cuales permitieron obtener las ecuaciones de predicción de la erodabilidad K_i , del Proyecto de Predicción de Erosión por el Agua (WEPP) y K de la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos).

¹ Comunicación personal. Édgar Amézquita Collazos, Unidad de Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Enero de 1998.

Tabla 2. Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación (R²) entre los índices de erodabilidad Ki de la WEPP (5) y K de la USLE (25), y propiedades fisicoquímicas de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana promedio de tres usos, en los primeros 0 a 10 cm de profundidad.

FACTORES VARIABLES	Ki (WEPP)			K (USLE)		
	(r)	R2	Significancia	(r)	R2	Significancia
Ki (WEPP)	1,00	1,00	0,0001**	1,00	1,00	0,0001**
K (USLE)	1,00	1,00	0,0001**	1,00	1,00	0,0001**
Da	0,87	0,75	0,06**	0,87	0,76	0,05*
Pt	-0,87	0,76	0,05*	-0,87	0,76	0,05*
DSAG 2 - 1	-0,93	0,87	0,02*	-0,93	0,87	0,02*
RFP	0,90	0,81	0,04*	0,90	0,81	0,04*
AG > 2 CA	-0,88	0,78	0,05*	-0,88	0,78	0,05*
AG 2- 1 CA	0,95	0,90	0,01*	0,95	0,90	0,01*
AG 1- 0,5 CA	0,94	0,88	0,02*	0,94	0,88	0,02*
AG 0,5-0,25 CA	0,96	0,91	0,01**	0,96	0,92	0,01**
AG < 0,25 CA	0,96	0,92	0,01**	0,96	0,92	0,01**
AAG 2 - 1	0,94	0,89	0,02*	0,94	0,88	0,02*
AAG 1- 0,5	0,96	0,91	0,01*	0,96	0,91	0,01*
AAG 0,5 - 0,25	0,96	0,93	0,01**	0,96	0,93	0,009**
AAG < 0,25	0,99	0,98	0,002**	0,99	0,98	0,001**
AG 2 - 1 SA	0,94	0,89	0,02*	0,94	0,89	0,02*
AG 1 - 0,5 SA	0,93	0,87	0,02*	0,93	0,87	0,02*
AG 0,5 - 0,25 SA	0,95	0,90	0,01*	0,95	0,90	0,01*
AG < 0,25 SA	0,91	0,84	0,03*	0,92	0,84	0,03*
IE	0,96	0,92	0,01**	0,96	0,92	0,01**
PDPAG > 2	-0,88	0,78	0,05*	-0,88	0,78	0,05*
PDPAG 2 - 1	0,95	0,90	0,01*	0,95	0,90	0,01*
PDPAG 1 - 0,5	0,94	0,88	0,02*	0,94	0,88	0,02*
PDPAG 0,5- 0,25	0,96	0,92	0,01*	0,96	0,92	0,01*
PDPAG < 0,25	0,96	0,93	0,01**	0,96	0,93	0,01**
A > 1	0,97	0,95	0,005**	0,97	0,95	0,005**
A 0,25 - 0,1	-0,98	0,96	0,003**	-0,98	0,96	0,003**
A < 0,05	0,97	0,95	0,005**	0,97	0,95	0,0057**

* P > F < 0,05; Significativo** P > F < 0,01; Altamente significativo. Da: Densidad aparente; Pt: Porosidad total; DSAG 2 - 1: Distribución en seco de agregados entre 2-1 mm de diámetro promedio; RFP: Resistencia final a la penetración; AG > 2 CA: Agregados mayores de 2 mm, con arenas; AG2- 1 CA: Agregados entre 2 a 1 mm, con arenas; AG1- 0,5 CA: Agregados entre 1- 0,5 mm, con arenas; AG 0,5-0,25 CA: Agregados entre 0,5 a 0,25 mm, con arenas; AG < 0,25 CA: Agregados menores de 0,25 mm, con arenas; AAG 2 - 1: Arenas en agregados entre 2-1 mm de diámetro promedio; AAG 1- 0,5: Arenas en agregados entre 1-0,5 mm de diámetro promedio; AAG 0,5 - 0,25: Arenas en agregados entre 0,5-0,25 mm; AAG < 0,25: Arenas en agregados < 0,25 mm; AG 2 - 1 SA: Agregados entre 2-1 mm de diámetro promedio sin arenas; AG 1 - 0,5 SA: Agregados entre 1-0,5 mm de diámetro promedio sin arenas; AG0,5 - 0,25 SA: Agregados entre 0,5-0,25 mm de diámetro promedio sin arenas; AG < 0,25 SA: Agregados entre 0,5-0,25 mm de diámetro promedio sin arenas; AG < 0,25 SA: Agregados < 0,25 mm de diámetro promedio sin arenas; IE: Índice de estabilidad de agregados; PDPAG > 2, PDPAG 2-1, PDPAG 1-0,5, PDPAG 0,5-0,25 y PDPAG < 0,25: Peso diámetro promedio de agregados >2,0 entre 2-1, 1,0-0,5, 0,5-0,25 y <0,25 mm de diámetro promedio; A > 1: Tamaño de arenas mayores de 1 mm de diámetro promedio; A 0,25 - 0,1: Tamaño de arenas entre 0,25 a 0,1 mm; A < 0,05: Tamaño de arenas menores de 0,05 mm.

La densidad aparente (D_a) de los suelos estudiados presenta una relación directa con la erodabilidad de los suelos, con un coeficiente de determinación ($R^2= 0,75^{**}$) altamente significativo para K_i de la WEPP, y significativo para K de la USLE ($R^2= 0,76^*$) (Tabla 2), lo que infiere que entre más alto sea el valor de la densidad aparente, mayor será el valor de la erodabilidad de los suelos, y así mismo su susceptibilidad a la erosión. Esto indica la necesidad de dar un uso y manejo adecuado a los suelos, evitando el tráfico pesado de maquinaria agrícola sobre los mismos y el mal uso y manejo de la ganadería, y demás prácticas como son las desyerbas drásticas con azadón y herbicidas, que desnudan totalmente los suelos y conducen a su compactación, oclusión de poros, disminución de la infiltración y aumento de la escorrentía en épocas lluviosas.

De las correlaciones lineales simples altamente significativas para ambos índices de erodabilidad, se discuten por su importancia las siguientes:

Tamaño de agregados entre 0,5 a 0,25 mm de diámetro promedio, con presencia de arenas (AG0,5-0,25CA), con una correlación lineal simple de 0,96 y 0,96, para K_i y K , respectivamente, y un coeficiente de determinación de 0,91** y 0,92**, para K_i y K , respectivamente. Esto indica que en los suelos estudiados, la mayor presencia de agregados entre 0,5 a 0,25 mm de diámetro promedio con arena, el valor de la erodabilidad es mayor, y así mismo su susceptibilidad a la erosión, debido a que los agregados pequeños son más livianos y, por lo tanto, pueden ser dispersados fácilmente por el impacto de la lluvia y arrastrados por las aguas de escorrentía, siendo necesario mantener sobre el terreno una capa densa de coberturas vivas o

muertas, que eviten el impacto directo del agua sobre el terreno desnudo.

Tamaño de agregados menores de 0,25 mm de diámetro promedio, con presencia de arenas (AG<0,25CA), con una correlación lineal simple de 0,96 y 0,96, para K_i y K , respectivamente, y un coeficiente de determinación de 0,92** y 0,92**, para K_i y K , respectivamente, lo que indica que para los suelos estudiados, la mayor presencia de agregados menores de 0,25 mm de diámetro promedio con arenas, el valor de la erodabilidad es mayor y así mismo su susceptibilidad a la erosión, ya que por ser agregados tan pequeños, son fácilmente dispersados por el impacto de las gotas de lluvia y arrastrados por las aguas de escorrentía.

Porcentaje de arenas encontradas en los agregados entre 0,5 a 0,25 mm de diámetro promedio (AAG0,5-0,25), con una correlación lineal simple de 0,96 y 0,96, para K_i y K , respectivamente, y un coeficiente de determinación de 0,92** y 0,93**, para K_i y K , respectivamente. Esto indica que para los suelos estudiados, una presencia alta de arenas en los agregados, entre 0,50 a 0,25 mm de diámetro promedio, favorece el valor mayor de la erodabilidad y así mismo su susceptibilidad alta a la erosión, ya que la mayor presencia de arenas, indica que no hay atracción entre partículas, las cuales pueden ser fácilmente dispersadas por el impacto de las lluvias, destruyendo así los agregados del suelo, favoreciendo el transporte de los mismos por las aguas de escorrentía.

Porcentaje de arenas encontrado en los agregados menores que 0,25 mm de diámetro promedio (AAG<0,25), con una correlación lineal simple de 0,99 y 0,90, para K_i y K , respectivamente, y un coeficiente de determinación de 0,98** y 0,98**, para K_i y K , respectivamente. Esto indica que para los suelos estudiados, con una presencia

mayor de arenas en los agregados menores que 0,25 mm de diámetro promedio, el valor de la erodabilidad es mayor y así mismo su susceptibilidad a la erosión, tal como se discutió para el porcentaje de arenas encontradas en los agregados entre 0,5 a 0,25 mm de diámetro promedio (AAG0,5-0,25).

Índice de estabilidad de los agregados del suelo (IE), con una correlación lineal simple de 0,96 y 0,96, para K_i y K, respectivamente, y un coeficiente de determinación de 0,92** y 0,92**, para K_i y K, respectivamente. Esto indica que para los suelos estudiados, con un mayor Índice de Estabilidad de los Agregados del suelo, el valor de la erodabilidad se incrementa y así mismo su susceptibilidad a la erosión. Por lo tanto, suelos que presenten un alto índice de estabilidad de los agregados del suelo (IE) con respecto a otros suelos, es un indicador, de que su uso y manejo debe ser especial con prácticas preventivas intensivas de conservación de suelos.

Peso del diámetro promedio de los agregados menores que 0,25 mm (PDPAG<0,25), con un r de 0,96 y 0,96, para K_i y K respectivamente, y R^2 de 0,93** y 0,93**, para K_i y K, respectivamente. Esto indica que para los suelos estudiados, con un peso del diámetro promedio de los agregados menores que 0,25 mm, mayor será el valor de la erodabilidad y así mismo su susceptibilidad a la erosión. La determinación de este parámetro puede servir como otro indicador de resistencia o susceptibilidad del suelo a la erosión.

Porcentaje promedio de arenas mayores que 1 mm ($A>1$), con un r de 0,97 y 0,97, para K_i y K, respectivamente, y R^2 de 0,95** y 0,95**, para K_i y K, respectivamente. Este valor muestra que para los suelos estudiados, un incremento en el porcentaje promedio de arenas mayores que 1 mm, repercute en un aumento del valor de la erodabilidad y así mismo de su susceptibilidad a la erosión.

Porcentaje promedio de arenas entre 0,25 y 0,1 mm de diámetro, con una correlación lineal simple de -0,98 y -0,98, para K_i y K, respectivamente, y un coeficiente de determinación de 0,96** y 0,96**, para K_i y K, respectivamente. Para los suelos estudiados esto indica que un incremento en el porcentaje promedio de arenas entre 0,25 y 0,1 mm de diámetro promedio, repercute en una disminución del valor de la erodabilidad y a su susceptibilidad a la erosión, siendo éste, otro indicador físico que orienta en la toma de decisiones sobre las prácticas de manejo más adecuadas, para evitar la degradación del suelo por efecto de la erosión.

Porcentaje promedio de arenas menores que 0,05 mm de diámetro, con un r de 0,97 y 0,97, para K_i y K, respectivamente, y un R^2 de 0,95** y 0,95**, para K_i y K, respectivamente. Esto revela que para los suelos estudiados, un incremento en el porcentaje promedio de arenas menores que 0,05 mm de diámetro, repercute en un incremento del valor de la erodabilidad y así mismo de su susceptibilidad a la erosión. Por lo tanto, éste es un indicador de que aquellos suelos que presenten este tamaño de arenas deben disturbarse lo menos posible, para evitar su pérdida, siendo necesaria la cero labranza o siembra directa.

Kandiah (13), reporta varias propiedades físicas, químicas y fisico-químicas como factores clave que influyen en la erodabilidad del suelo. Estas propiedades incluyen densidad aparente, porosidad, permeabilidad, estructura del suelo, mineralogía de arcillas, contenido de materia orgánica, cohesión entre partículas y dispersión. No obstante, una sola característica o índice, no provee un significado satisfactorio de predicción de la erodabilidad. Passwell (1973) citado por Kandiah (13), reporta que por lo general, los índices de clasificación del suelo usados, no han demostrado utilidad

como predictores de erosión. Los índices estructurales deben ser definidos en orden a establecer la erodabilidad relativa de un suelo dado, en comparación con otros suelos.

Los agregados del suelo más grandes, son los más resistentes a la erosión. Los suelos altamente estructurados resistentes a la erosión, son aquellos con un porcentaje alto de agregados entre 0,25 a 5 mm (15). Por lo tanto, es un gran error pretender controlar problemas de erosión usando maquinaria pesada, con la cual se remueve todo el terreno, destruyendo la estructura natural del suelo y su cohesión natural, lo que los hace más susceptibles a la erosión, permitiendo que se agrande el problema y se incrementen ostensiblemente los costos de control.

Según Kirby y Morgan (14), la proporción de agregados estables al agua menores de 0,5 mm en un suelo, es un buen índice de erodabilidad. A mayor proporción de agregados menores de 0,5 mm, será mayor la erodabilidad del suelo.

En el contexto de la erosión del suelo, la estructura involucra las siguientes características: ligamento de las partículas del suelo y resistencia a la dispersión por el agua, porcentaje de agregados estables al agua y peso del diámetro promedio de agregados, facilidad de aceptación de agua lluvia y capacidad para transmitir el agua a través del perfil, proporción relativa de macroporos y estabilidad y continuidad de poros. Los materiales ligantes de las partículas de suelo están constituidos por materia orgánica, arcilla y sesquióxidos (15).

En zonas montañosas en Taiwan, Wan y Lin (1965) citados por Lal (15), observaron que los suelos con erodabilidad mínima presentan alta estabilidad de agregados y aquellos con erodabilidad alta, presentan relación de dispersión alta. En Bulgaria,

Krusteva (1977) citado por Lal (15), estableció una relación entre la erodabilidad del suelo y la estabilidad de sus agregados macro y microestructurados al agua. Sahi *et al.* (1976), citado por Lal (15), observaron que el grado de agregación por sí solo, no es un índice del suelo suficientemente capaz para resistir la erosión.

En India, Bhatia y Sarmah (1976) citados por Lal (15), establecieron que altos porcentajes de agregados al agua y un peso promedio alto, son las características de un suelo resistente a la erosión para suelos aluviales y sedimentarios de Bihar (India).

Factor Erodabilidad del suelo, K_i del WEPP.

En la Tabla 3 se presentan los factores de erodabilidad y calificación de K_i y K , de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana (23).

Los valores más altos de erodabilidad K_i y K , del WEPP y USLE, se registraron en la unidad de suelos Guamal, con valores de 53,94 y 0,05, respectivamente, para los agregados menores de 0,5 mm de diámetro promedio; mientras que la erodabilidad más baja, se evaluó en la unidad de suelos Fresno, para K_i del WEPP (8,75), y la unidad Parnaso (0,004), para K de la USLE, en los agregados menores de 0,5 mm de diámetro promedio.

Para K_i , del WEPP, las calificaciones de la erodabilidad se encuentran entre alta a extremadamente severa, para todas las unidades de suelos estudiados, según Bruce Okine's, citado por Albaladejo (1) y Rivera y Gómez (24), respectivamente. Para K , de la USLE, los valores de erodabilidad, se califican de estable a natural para todas las unidades de suelos estudiadas, de acuerdo con Bruce Okine's, citado por Albaladejo (1), y de estable a moderada, según Rivera y Gómez (24). Esto indica, que hay mucha

divergencia en las escalas de calificación, de acuerdo con los autores, lo cual es necesario complementar con base en nuevos estudios sobre erodabilidad de suelos de otras unidades de suelos contrastantes.

Ecuaciones para la predicción de la erodabilidad de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana

Con base en las correlaciones y regresiones múltiples entre los índices de erodabilidad y 71 parámetros físico - químicos determinados de los suelos (23, 25), se determinaron diez ecuaciones que permiten predecir la erodabilidad K_i del WEPP y K de la USLE, de cinco unidades de suelos de la Zona Cafetera Colombiana (Tabla 4).

Las ecuaciones determinadas (Tabla 4), permiten predecir en forma directa, rápida, sencilla y económica el factor erodabilidad de los suelos de la Zona Cafetera Colombiana. Por lo tanto, para predecir el K de la USLE y K_i del WEPP, para cada una de las cinco unidades de suelos ilustradas, éstas se consideran promisorias.

En este estudio se seleccionaron dos ecuaciones como promisorias, por su coeficiente de determinación y el número menor de

variables por determinar. Estas ecuaciones presentan coeficientes de determinación ajustados altos, con R^2 de 1,00 altamente significativo para la variable agregados entre 1-0,5 mm de diámetro promedio sin arenas (AG1-0,5SA), representada en la ecuación: $K_i^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0,5SA) + 16,43 (AG1-0,5SA)^2$ (Figura 1).

En la Figura 1, se ilustra como a medida que se hace mayor el parámetro agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro promedio sin arenas (AG1-0,5 SA), el factor de erodabilidad K_i del WEPP, se incrementa, es decir, el aumento en el porcentaje de estos agregados en el suelo, influye en una mayor susceptibilidad de los suelos estudiados a la erosión. Por lo tanto, debe tenerse cuidado de no pulverizar los suelos con el uso de la maquinaria agrícola pesada, con el fin de formar una buena cama para la siembra de semillas o para su restauración, ya que se estaría induciendo a una degradación acelerada de los suelos por efecto de la erosión.

Para predecir el K de la USLE, de cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, se considera como la ecuación más recomendable la $K^3 = 389E^{-8} - 39E^{-7} (AG1-0,5SA) + 685E^{-9} (AG1-0,5SA)^2$ (Figura 2), con un coeficiente de determinación ajustado alto, con R^2 de

Figura 1.
Función polinomial de segundo grado entre el factor erodabilidad del WEPP (K_i) y agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro promedio sin arenas (AG1-0,5 SA).

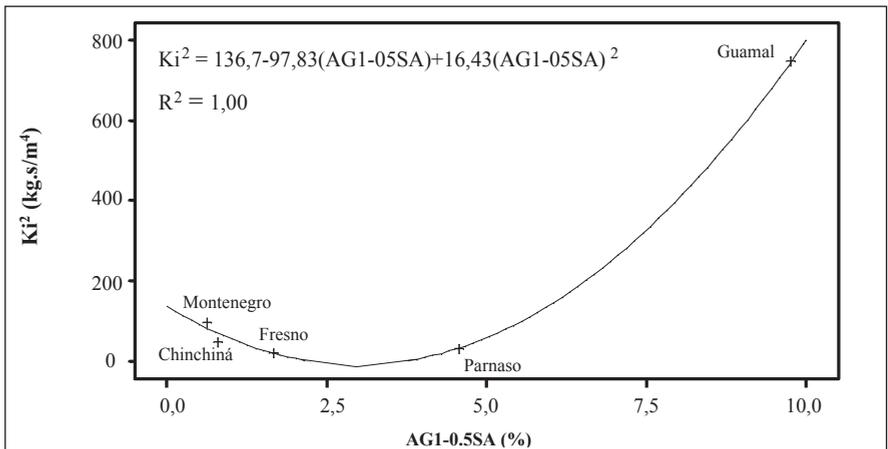


Tabla 4. Ecuaciones de predicción de la erodabilidad, Ki del WEPP y K de la USLE, de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

Factores variables	R ² ajustado	Significancia del modelo Pr > F	C.V. Modelo	Ecuación de Predicción
DSAG4-2 Da	1,00	0,0017**	0,32	$1/K^3 = -154E^6 + 2,99E^7 (Da) + 9,03E^6 (DSAG4-2) - 162E^4 (Da \times DSAG4^2)$
DSAG4-2 Da	1,00	0,0144**	0,67	$1/\sqrt{Ki} = -0,756 + 0,626 (Da) + 0,0704 (DSAG4^2) - 0,046 (Da \times DSAG4^2)$
AG1-0,5SA	0,99	0,0030**	15,77	$K^3 = 389E^{-8} - 39E^{-7} (AG1-0,5SA) + 685E^{-9} (AG1-0,5SA)^2$
AG1-0,5SA	1,00	0,0019**	10,18	$Ki^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0,5SA) + 16,43 (AG1-0,5SA)^2$
AAG<0,25	0,97	0,0013**	34,47	$K^3 = -41E^{-7} + 217E^{-7} (AAG<0,25)$
AAG<0,25	0,97	0,0161**	15,02	$Ki = 2,7828 + 20,69 (AAG<0,25)$
PDPAG1-0,5	0,97	0,0130**	28,80	$K^2 = 0,0002 - 0,015 (PDPAG1-0,5) + 0,261 (PDPAG1-0,5)^2$
PDPAG1-0,5	0,99	0,0024**	11,34	$Ki^2 = 142,6 - 9836 (pdpag1-0,5) + 179680 (PDPAG1-0,5)^2$
AG1-0,5CA	0,99	0,0023**	13,97	$K^3 = 453E^{-8} - 31E^{-7} (ag1-0,5ca) + 427E^{-9} (ag1-0,5ca)^2$
AG1-0,5CA	0,99	0,0023**	11,31	$Ki^2 = 142,6 - 73,84 (AG1-0,5CA) + 10,12 (AG1-0,5CA)^2$

DSAG4-2: Distribución de agregados en seco entre 4 y 2 mm de diámetro promedio (%). **Da:** Densidad aparente (g/cm³). **AG1-0,5SA:** Agregados entre 1-0,5mm de diámetro promedio sin arenas (%). **AAG<0,25:** Contenido de arenas en los agregados < 0,25mm (%). **PDPAG1-0,5:** Peso diámetro promedio de agregados entre 1-0,5mm de diámetro promedio (%). **AG1-0,5CA:** Agregados entre 1-0,5mm de diámetro promedio con arenas (%). (**) Altamente significativo estadísticamente.

0,99, altamente significativo para una sola variable, al igual que la determinada para predecir Ki del WEPP: agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0,5SA) (23).

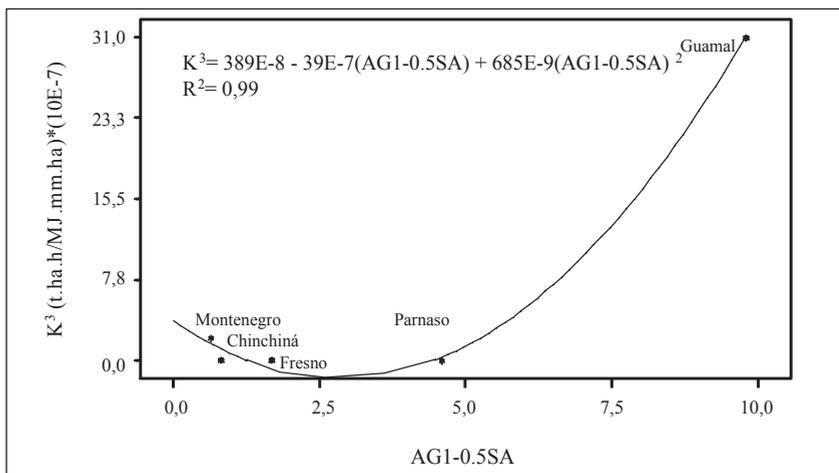
Se recomiendan estas dos ecuaciones por presentar el número menor de variables y aquellas más fáciles de determinar a costo menor, además de presentar un coeficiente de determinación alto y altamente significativo. No obstante, en la curva de ambas ecuaciones, se presenta un espacio demasiado amplio entre las unidades de suelo Parnaso y Guamal, lo que indica la necesidad de trabajar con mayor número de unidades suelos contrastantes, que permitan un mayor número de puntos y mejor ajuste de las ecuaciones.

Finalmente, se puede concluir que: Para predecir el Ki del WEPP para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, en

la zona cafetera Colombiana, se recomienda la ecuación $Ki^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0,5SA) + 16,43 (AG1-0,5SA)^2$, como la más promisoría de usar. Esta ecuación presenta coeficiente de determinación ajustado alto, con R² de 1,00 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro promedio (AG1-0,5SA).

Para predecir el K de la USLE para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, en la zona cafetera Colombiana, se considera la ecuación $K^3 = 389E^{-8} - 39E^{-7} (AG1-0,5SA) + 685E^{-9} (AG1-0,5SA)^2$, como la más promisoría. Esta ecuación presenta coeficiente de determinación ajustado alto, con R² de 0,99 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro promedio (AG1-0,5SA).

Figura 2. Función polinomial de segundo grado entre el factor erodabilidad de la USLE (K) y agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro promedio sin arenas (AG1-0,5 SA).



Es importante destacar, que con cinco puntos es muy arriesgado ajustar una curva que tiene tres o cuatro parámetros, siendo necesario continuar estos estudios con nuevas unidades de suelos contrastantes en sus propiedades físico-químicas distribuidas por toda la Zona Cafetera Colombiana.

Para la determinación de los índices de erodabilidad, por precisión y costos, se deben determinar las variables comprendidas entre los primeros 0 a 10 cm, ya que hacerlo a profundidades mayores, no aportaría resultados importantes en relación con la erodabilidad de los suelos, situación contraria, sería si se tratara de determinar la susceptibilidad o resistencia de los suelos a los movimientos en masa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores hacen extensivos sus agradecimientos a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, por su apoyo económico y logístico, a Colciencias por su apoyo económico, y a la Universidad del Estado de Ohio, Columbus Ohio Estados Unidos.

LITERATURA CITADA

1. ALBALADEJO M., J. 1985. Proposed methodology for the establishment of an erosion units classification in PLAS., I. soil conservation and productivity IV International conference on soil conservation. Maracay (Venezuela) Noviembre 3-9 de 1985. pp 911-927.
2. BOUYOCOS G.J. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soil. Soil Science 23: 343-353.
3. CARRILLO P., I.F. 1985. Manual de laboratorio de suelos. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Chinchiná Caldas Colombia. 111p.
4. CORDERO A., J.A. 1974. Construcción de un permeámetro de cabeza constante para la determinación de la conducción hidráulica en muestras sin disturbar Palmira (Colombia). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 56 p. (Tesis de grado).
5. ELLIOT W.J.; LAFLEN J.M.; KOHL K.D. 1989. Effect of soil properties on soil Erodibility. ASAE/CSAE Paper # 892150. 24p.
6. FOURNIER, F. 1975. Conservación de Suelos. Mundi Prensa, Madrid, España. 254 p.
7. FORSYTHE, W. 1975. Física de Suelos, Manual de Laboratorio. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José de Costa Rica. 212 p.

8. GAVANDE, S.A. 1986. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Mexico ed. Limusa, S.A. de C.V. 351 p. No está citado en el texto
9. GOMEZ A.,A. 1987. La zona Andina Colombiana. Erosión y Conservación de Suelos. IN: Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 4. Coloquio de la degradación de los suelos en Colombia, 9. Neiva Huila, 18-21 de Agosto, 1987. Cenicafé, Chinchiná (Colombia). 34 p.
10. GONZÁLEZ M., A. E. 1983. Anotaciones sobre física de suelos. Fracción teórica. Palmira. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 104 p.
11. HUDSON, N. 1982. Conservación de suelos. Barcelona (España). Reverté S.A. 335 p.
12. INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). 2000. Terrenos afectados por movimientos en masa en Colombia. On line Internet: <http://www.ideam.gov.co>
13. KANDIAH, A. Influence of soil properties and crop cover on the erodibility of soil. In: Lal, R.; GREENLAND, D.J. Ed. Soil Physical properties and crop production in the tropics. Chinchester (Inglaterra), John Willey & Sons, 1979. pp 475 – 487).
14. KIRBY, M. J.; MORGAN, R., P., C. Erosión de suelos. 1ª edición. México. Limusa S.A. 1984. 367p.
15. LAL R. 1990. Soil Erosión in the Tropics. Principles and Management. United States of America MacGraw Hill, inc. 580 p.
16. LAL, R.. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Soil Management Support Services USDA Soil Conservation Service and U.S. Agency for International Development. SMSS Technical Monograph # 21. 78 p.
17. LAFLEN, J.M. 1997. Erosion Prediction for the Next Millennium. Agricultural Research (Estados Unidos) 45 (4) 2.
18. MONTENEGRO H., G.; MALAGÓN D., C. 1990. Propiedades Físicas de los Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá, D.E. (Colombia). 813 p.
19. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO) Aumenta la degradación del suelo. <http://www.oei.es/noticias/spip.php?article2965>. consultado en Marzo 12 de 2012.
20. OLMOS, E. y MONTENEGRO, H. 1987. Inventario de los problemas de la erosión y degradación de los suelos de Colombia. IN: Congreso Colombiano de la ciencia del suelo, 4 y Coloquio la degradación de los suelos en Colombia, 9. Neiva (Colombia), 18-21 de agosto de 1987. Resúmenes. Neiva, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p.23.
21. RENARD K.G.; FOSTER G.R.; WEESIES G.A.; McCOOL D.K.; YODER D.C. 1997 Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook N° 703. 384 p.
23. RIVERA P., H. 1990. Determinación de los Índices de Erosividad Erodabilidad y Erosión Potencial en la Zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Palmira (Colombia). Universidad Nacional de Colombia. (Tesis Master Science). 310p.
24. RIVERA P., J.H. 1999. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera central colombiana. Medellín (Colombia), Universidad Nacional. Facultad de Minas. 525 p. 103. (Tesis: Doctorado)
25. RIVERA P., H.; GÓMEZ A., A. 1991. Erodabilidad de los suelos de la Zona Central Colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Cenicafé (Colombia) 42(3): 67 - 88.
26. SAS INSTITUTE INC. 1993. CARY. Estados Unidos. SAS. Insight User's Guide. Versión 6.2. ed. 4ª. Cary, NC (Estados Unidos), SAS Institute Inc., 492p.
27. SUÁREZ DE C., F. 1980. Conservación de suelos. 3a edición. San José de Costa Rica IICA. 315 p.
28. TRUMAN C.C. AND BRADFORD J.M. 1995. Laboratory Determination of Intertill Soil erodibility. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 519-526.
29. WALKLEY A.; BLACK I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37 : 29-38
30. WISCHMEIER W. H.; SMITH D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning United States Department of Agriculture. Agricultural Handbook, No 282.