

RIESGO A LA EROSIÓN EN LA ZONA CAFETERA CENTRAL DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS¹

Fernando Andrés Ramírez Ortiz*; Edgar Hincapié Gómez**

RESUMEN

RAMÍREZ O., F.A.; HINCAPIÉ G., E. Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas. *Cenicafé* 60 (2): 173-189. 2009

En la zona cafetera colombiana la erosión constituye uno de los problemas agrícolas y ambientales más serios, debido a lluvias de gran intensidad y duración, a la diversidad de suelos y las fuertes pendientes; por ello se hace necesario conocer su magnitud para realizar planes de uso y manejo eficientes y focalizar esfuerzos donde realmente se necesitan. Esta investigación se propuso con el objetivo de generar un instrumento para estimar el riesgo a la erosión, para ello se empleó la ecuación universal de pérdida de suelo con modificaciones (RUSLE) utilizando el análisis multiplicativo de los factores erosividad (R), erodabilidad (K), longitud y gradiente de la pendiente (L y S). La erosividad se determinó mediante el Índice de Erosividad EI30 calculado a partir del índice de Fournier modificado $IFM = \sum (p2/P)$ y espacializados mediante interpolación Kriging; la erodabilidad o factor K se determinó en forma directa en el laboratorio, utilizando un simulador de lluvias y muestras de suelo alteradas, obtenidas en 72 puntos de muestreo, los cuales fueron georeferenciados con el fin de espacializar la información; los factores longitud y el gradiente de la pendiente se determinaron con la ayuda del modelo de elevación digital. Con la información obtenida de las pérdidas de suelo por erosión y la profundidad del horizonte A, fue posible diferenciar zonas con riesgo a la erosión apoyado con sistemas de información geográfica y se encontró que el 78% de la zona estudiada presenta alto riesgo a la erosión potencial.

Palabras clave: Erosión potencial, ecuación universal de pérdida de suelos, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

In the Colombian coffee region, erosion is one of the most serious agricultural and environmental problems, due to the great intensity and duration of the rains, its soils diversity and high slopes. Thus, it is necessary to know its magnitude to make efficient plans of use and management and to focus efforts where they are really needed. This work of research was proposed in order to generate an instrument to estimate the erosion risk; that is why the universal soil loss equation with modifications (RUSLE) and a multiplicative analysis of the factors erodibility (R), erodibility (K), slope length and gradient (L and S) were used. Erodibility was determined through the Erodibility Index EI30 calculated from the Modified Fournier Index $MFI = \sum (p2/P)$ and spatialized by Kriging interpolation; erodibility or K factor was determined directly in laboratory, by using a rainfall simulator and disturbed soil samples taken in 72 sampling points, which were georeferenced in order to spatialized the information. Slope length and gradient factors were determined with the digital elevation model. With the compiled data of soil losses by erosion and depth of the A horizon, it was possible to differentiate erosion risk zones using geographic information systems. 78% of the study area exhibited high risk to potential erosion.

Keyword: Potential erosion, universal soil loss equation, geographic information systems.

¹ Fragmento de tesis "Evaluación del 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. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

De los 130 millones de km² que comprenden la superficie continental, 20 millones de km², equivalentes al 66% de las tierras potencialmente cultivables, están degradadas debido a la erosión hídrica, de allí el interés a escala mundial de seguir estudiando este fenómeno (18, 32). La erosión hídrica se define como la pérdida progresiva de los componentes del suelo, como consecuencia de la dispersión de sus agregados, los cuales son arrastrados por el agua hasta lugares más bajos, contribuyendo a la degradación del suelo y a la pérdida de su fertilidad (3, 10, 15).

En Colombia, el 97% de la erosión de los suelos es causada por la acción de la lluvia, y en la zona cafetera éste es un factor determinante para la manifestación de dicho fenómeno (27).

Con el fin de predecir los niveles de erosión causada por el agua, se han desarrollado numerosos modelos (4). Estas técnicas de predicción de pérdidas de suelos se han desarrollado a lo largo de muchos años, como resultado de la creciente comprensión de los procesos que intervienen en la erosión (16), entre ellos está la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), que es la más utilizada en el ámbito mundial (30); se ha dado el caso en el cual en algunos lugares la USLE sobrestima los valores reales de pérdida de suelo, lo cual ha generado adaptaciones o modificaciones a dicha ecuación, dependiendo del lugar donde se utilice (10, 19, 25).

La aplicación de modelos está limitada, en muchos casos, a estados y países donde la información está disponible para evaluaciones locales, de los factores individuales que intervienen en el procesos erosivo (26). El uso de sistemas de información geográfica (SIG) facilita no solamente el cálculo de la tasa de erosión potencial, sino que permite localizar

geográficamente las áreas más afectadas (17). Se han publicado diversos estudios sobre la estimación de los procesos que intervienen en la erosión, utilizando como herramienta los SIG, con los cuales se pueden cuantificar las pérdidas de suelo y modelar, con diferentes sistemas de uso y manejo, de acuerdo con las características de cada región (13, 14, 17, 20, 21, 22, 23, 24).

El objetivo de esta investigación fue generar un instrumento para estimar el riesgo a la erosión de los suelos de la zona cafetera central del departamento de Caldas, mediante las evaluaciones directa e indirecta de algunos atributos del suelo. Este instrumento permite identificar y evaluar los factores más importantes que intervienen en los procesos de la erosión hídrica a escala regional, así como contribuir al desarrollo de planes de uso y manejo del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la zona central cafetera del departamento de Caldas, ubicada entre 4°55' a 5°42' LN y 75°45' a 75°20' LO, 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. Comprende los municipios de Manizales, Chinchiná, Palestina, Neira, Villamaría, Filadelfia, Pácora, La Merced, Aranzazu, Aguadas y Salamina. Los principales afluentes son los ríos Cauca, Chinchiná, Arma, Pácora y Maiba. 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, 205, 206A y 207A (7).

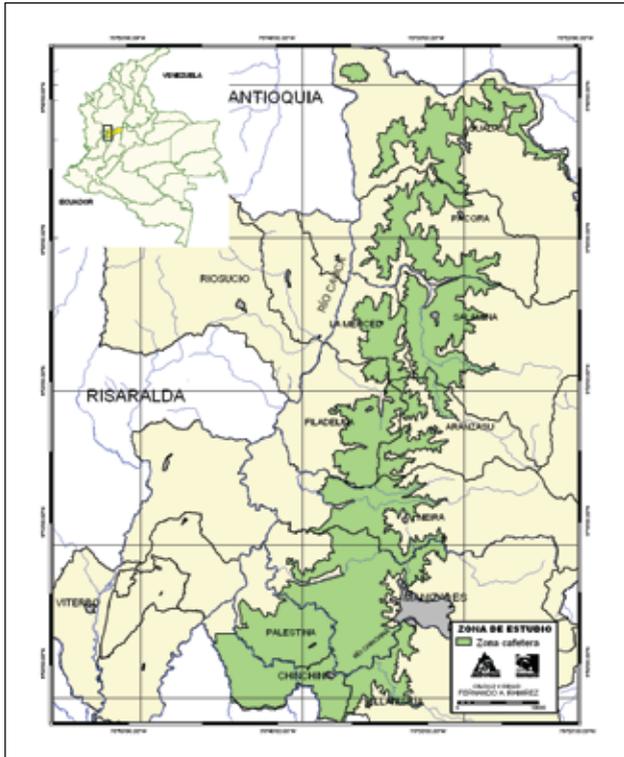


Figura 1.
 Área con potencial cafetero de la zona central del departamento de Caldas.

Con la información cartográfica del departamento de Caldas, disponible en la disciplina Suelos de Cenicafé, se identificaron y delimitaron las zonas aptas para el cultivo de café, la cual se limitó de acuerdo a los Ecotopos Cafeteros, comprendidos entre los 1.000 y 2.000 m (5).

Para estimar las pérdidas potenciales de suelo por erosión, se empleó la ecuación universal de pérdidas de suelo (Ecuación <<1>>):

$$A=R \times K \times LS \times C \times P \quad \langle\langle 1 \rangle\rangle$$

Donde:

- A: Pérdida de suelo por unidad de superficie, en t.ha⁻¹
- R: Factor de erosividad por lluvia, en MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹

- K: Factor de erodabilidad del suelo, en t.ha.h.MJ⁻¹.mm⁻¹.ha⁻¹
- LS: Factor longitud y gradiente de la pendiente
- C: Factor cobertura
- P: Factor de prácticas de conservación del suelo

Las pérdidas de suelo por erosión se estimaron mediante el análisis multiplicativo de los factores R, K y LS. Los factores C y P no se tuvieron en cuenta, con el fin de evaluar una situación extrema, sin la protección de las coberturas ni el efecto de las prácticas de conservación de suelos; de esta manera se evaluó el mayor grado de afectación del fenómeno erosivo en el suelo.

Factor de erosividad de la lluvia. Para la determinación del factor de erosividad se utilizaron los registros diarios de lluvia de

34 estaciones de la red climática de Cenicafé, previamente georeferenciadas (Tabla 1), para un período mínimo de diez años.

A partir de esta información se estimó para cada año, el Índice de Fournier Modificado

(*IFM*), mediante la Ecuación <<2>>, reportada por Arnoldus (1). Por estación se determinó el promedio y los valores se clasificaron de acuerdo con los rangos del *IFM* propuestos por Lobo *et al.* para Latinoamérica (10) (Tabla 2).

Tabla 1. Estaciones climáticas de la red de Cenicafé.

Municipio	Estación	Lat. (N)		Long. (W)		Altitud (m)
		o	‘	o	‘	
Manizales	La Juliana	05	8	75	29	1.785
Manizales	Santa Teresa	05	7	75	32	1.698
Manizales	Santa Teresita	05	4	75	37	1.172
Filadelfia	El Mirador	05	14	75	34	1.650
Manizales	Las Colinas	05	6	75	34	1.450
Palestina	Santa Ana	05	1	75	41	1.278
Chinchiná	La Francia	04	59	75	41	1.267
Palestina	La Palma	05	1	75	41	1.165
Chinchiná	La Sierra	04	59	75	38	1.440
Palestina	La Argentina	05	2	75	41	1.354
Chinchiná	Naranjal	04	58	75	39	1.381
Balboa*	La Tribuna	04	57	75	58	1.580
Belén de Umbria*	La Elvira	05	11	75	52	1.540
Ospirma*	Guática	05	20	75	49	1.661
Manizales	La Selva	05	5	75	36	1.312
Chinchiná	Los Pomos	04	58	75	35	1.583
Manizales	Java	05	1	75	32	1.778
Chinchiná	La Divisa	04	59	75	36	1.590
Chinchiná	Cenicafé	05	0	75	36	1.310
Manizales	Agronomía	05	3	75	30	2.088
Palestina	Santágueda	05	4	75	40	1.026
Palestina	Granja Luker	05	4	75	41	1.031
Manizales	El Algarrobo	05	4	75	35	1.202
Neira	El Refugio	05	10	75	35	1.398
Filadelfia	La Julia	05	18	75	34	1.650
Pácora	La Linda	05	33	75	32	1.738
Pácora	La Cascada	05	28	75	33	1.961
El Diamante*	Quinchía	05	19	75	42	1.550
Marmato	El Descanso	05	30	75	37	1.803
Riosucio	La Argentina	05	28	75	42	1.420
La Oriental*	Quinchía	05	22	75	43	1.730
Supía	Rafael Escobar	05	27	75	38	1.307
Aguadas	Cuatro Esquinas	05	40	75	25	1.900
Aguadas	Guaymaral	05	39	75	27	1.600

* Estaciones pertenecientes al departamento de Risaralda. Fuente: Federacafé (8)

Tabla 2. Clasificación del *IFM* para Latinoamérica.

Clase	Rango	Calificación
1	Menor de 60	Muy bajo
2	60 a 90	Bajo
3	90 a 120	Moderado
4	120 a 160	Alto
5	Mayor de 160	Muy alto

Fuente: Lobo *et al.* (12)

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_1} \quad \langle\langle 2 \rangle\rangle$$

Donde:

IFM: Índice de Fournier Modificado

p_i : Precipitación mensual (mm)

P_1 : Precipitación anual (mm)

Con el fin de obtener una aproximación que permita determinar el factor R-USLE, a partir del *IFM*, se correlacionaron los valores promedios mensuales del *IFM* obtenidos, con los valores promedios mensuales del factor R o EI_{30} de la USLE (31), estimados por Rivera (16), para un período de 15 años, en algunas de las estaciones que disponían de información en común. Posteriormente, se construyeron los mapas de erosividad o factor R, utilizando como herramientas el software GS+ 3.1 e ILWIS 3.3, y partiendo del cumplimiento de los supuestos de normalidad, estacionalidad y continuidad espacial.

El análisis geoestadístico del factor R, mostró que el semivariograma isotrópico presentó un mejor ajuste con modelos de tipo esférico, la distancia máxima fue de 60.000 m y el intervalo lag de 10.000 m. El modelo presentó la siguiente información: *Nugget* = 1.000; *Sill* = 1.428.000; *Rango* = 22.700 m; *Peso de la variabilidad espacial* = 0,998; R^2 = 0,959 y 6 *lag* que contienen entre 61 y 120 pares de puntos.

La erosividad se calificó utilizando la clasificación propuesta por Rivera y Gómez (17), para la zona cafetera colombiana (Tabla 3).

Factor de erodabilidad. Se determinó en forma directa, en el laboratorio; para ello se tomaron 72 muestras disturbadas, de 14 unidades de suelo, mapeadas dentro del área de estudio (Tabla 4).

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.

Para la toma de la muestra se utilizó la metodología descrita por Hincapié y Rivera (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 empacaron en bandejas de 20 cm de ancho por 40 cm de longitud y 5 cm de altura, se colocaron en su orden los

Tabla 3. Clasificación de la erosividad propuesta por Rivera y Gómez (28).

Código	Erosividad, R (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹)	Calificación
1	Menor de 1.000	Natural
2	1.000 a 2.500	Muy baja
3	2.500 a 5.000	Baja
4	5.000 a 7.500	Moderada
5	7.500 a 10.000	Alta
6	10.000 a 15.000	Muy alta
7	15.000 a 20.000	Severa
8	Mayor de 20.000	Extremadamente severa

Tabla 4. Número de muestras tomadas por Unidad de Suelo y Ecotopo.

Número	Unidad de Suelo	Código	204A	205A	206A	207A	Total
1	Veinte	20	-	-	2	-	2
2	Doscientos	200	-	-	4	-	4
3	Cascarero	CA	1	2	2	-	5
4	Chinchiná	CH	6	3	8	4	21
5	Chuscal	CHU	-	2	-	-	2
6	Depósitos	DP	-	-	1	1	2
7	Guacaica	GU	9	5	-	6	20
8	Letras	LE	-	1	-	-	1
9	Maiba	MA	4	1	-	-	5
10	Manila	MN	-	-	1	-	1
11	Sincerín	SI	-	1	-	-	1
12	Tareas	TA	2	1	-	-	3
13	Tablazo	TB	4	-	-	-	4
14	Violeta	VI	-	1	-	-	1
	TOTAL		26	17	18	11	72

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 de manera 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 (26).

Para cada muestra de suelo (sitio de muestreo), se simuló la lluvia con una duración de una hora y se realizaron las siguientes determinaciones:

Pérdidas de suelo por escorrentía. Se determinaron las cantidades 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 kg.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 24 horas, posteriormente se estimó el suelo perdido por salpique, en kg.m⁻².

Con los valores de pérdidas totales de suelo, la erosividad, y los factores L y S, se determinó la erodabilidad de cada sitio, mediante la Ecuación <<1>>. Este valor se registró espacialmente utilizando el promedio por polígono de suelo. Los promedios de erodabilidad se clasificaron en rangos, teniendo en cuenta la calificación sugerida por Rivera y Gómez (28) (Tabla 3).

Factor de longitud y gradiente de la pendiente.

A partir de las curvas de nivel digitalizadas se construyó un modelo de elevación digital (MDE), mediante la interpolación en contornos del programa ILWIS 3.3, del cual se obtuvo el ángulo de la pendiente así como su longitud en cada píxel; posteriormente, se aplicaron los algoritmos para el factor LS (30) con modificaciones (25), como se muestra en la Ecuación <<3>>:

$$L = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right] \quad \text{<<3>>}$$

Donde:

- L: Factor de longitud de la pendiente
- λ: Longitud de la pendiente
- m: Exponente de la longitud de la pendiente
- 22,1: Longitud de la parcela unitaria

Renard *et al.* (25) reportan modificaciones al exponente *m* de longitud de pendiente, mediante la ecuación <<4>>, para evitar la sobrestimación en pendientes superiores a las estudiadas por Wischmeier (30):

$$m = B/(1+BI) \quad \text{<<4>>}$$

Donde:

- m: Exponente de la longitud de la pendiente
- B = (senθ/0,0896)/[3,0(senθ^{0,8}+0,56)]
- θ: Ángulo de pendiente

Las modificaciones realizadas al Factor S de USLE, por Renard *et al.* (25), se presentan en las Ecuaciones <<5>> y <<6>>:

$$s = 10,8 * \text{sen}\theta + 0,03 \quad \text{cuando } s < 9\% \quad \text{<<5>>}$$

$$s = 16,8 * \text{sen}\theta + 0,5 \quad \text{cuando } s > 9\% \quad \text{<<6>>}$$

Donde:

s: Factor de inclinación de la pendiente (%)

θ : Ángulo de la pendiente (°)

Estimación de las pérdidas totales de suelo.

Se obtuvieron mediante el producto de los tres factores: erosividad (R), erodabilidad (K) y longitud y gradiente de la pendiente (LS), descritos anteriormente. Con esta información se construyó el mapa de erosión potencial para la zona de estudio, mediante análisis multiplicativo, utilizando el programa ILWIS 3.3.

Riesgo por erosión potencial. El riesgo es representado por una adaptación de la pseudo ecuación (Ecuación <<7>>), propuesta por De Man (2):

$$R=A \times V \times C \quad \text{<<7>>}$$

Donde:

A: Amenaza (factor erosividad)

V: Vulnerabilidad (factor erodabilidad * factor longitud y gradiente de la pendiente)

C: Capacidad de respuesta (profundidad del horizonte A).

El mapa de riesgo a la erosión se obtuvo mediante la relación de las pérdidas de suelo que involucran la amenaza y la vulnerabilidad con la profundidad del horizonte A.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Factor de erosividad. El *IFM* en todas las estaciones evaluadas superó el umbral de 160, lo cual indica que la zona presenta lluvias con alto poder erosivo (Tabla 2). El análisis de regresión entre el promedio mensual del *IFM* y el promedio mensual del EI_{30} para 15 años, hallado por Rivera (26), mostró que el *IFM* explicó la variación del EI_{30} en un 70% (Figura 2).

A partir de los datos registrados se obtuvo el siguiente modelo (Ecuación <<8>>):

$$EI_{30} = \sum_1^{12} 38,4 (IFM) + 28,3 \quad \text{<<8>>}$$

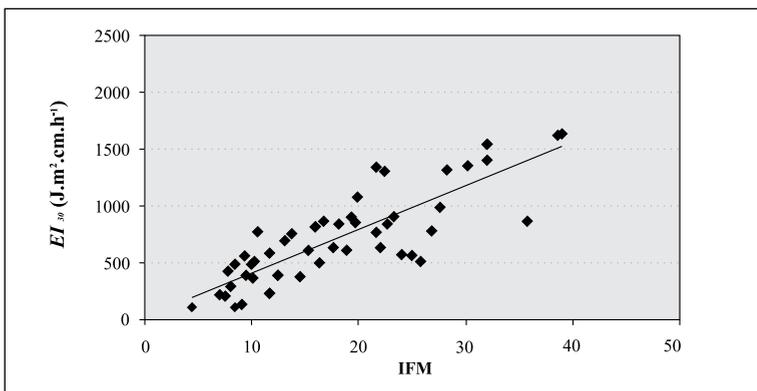
Donde:

EI_{30} : Erosividad (factor R).

IFM : Índice de Fournier Modificado

En la Figura 3 se representa espacialmente el factor R (erosividad) con su clasificación de acuerdo a la escala reportada por Rivera y Gómez (28), donde se aprecia que la erosividad (EI_{30}) es muy alta en un 5%, concentrándose en el municipio de Chinchiná, y alta en un 95% del área estudiada.

Figura 2.
Tendencia entre el Índice de Fournier Modificado (*IFM*) y el Factor de Erosividad (EI_{30}).



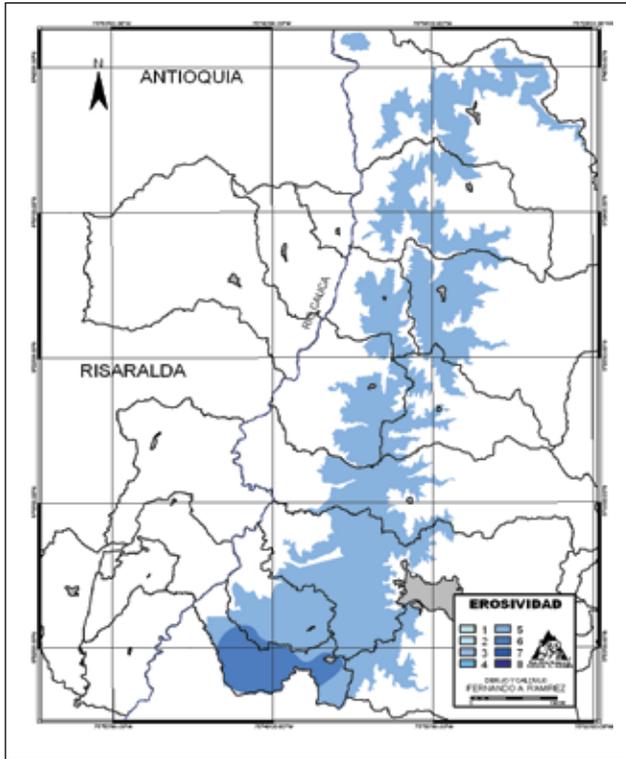


Figura 3.
Mapa de erosividad (Factor R) en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas.

Tabla 5. Promedios del factor de erodabilidad (K), determinados mediante lluvia simulada, para las unidades de suelo estudiadas.

Unidad de suelo	Código	Material de origen	Factor K ($t.ha.h.MJ^{-1}.mm^{-1}.ha^{-1}$)	Calificación
Chinchiná	CHI	Cenizas volcánicas	0,00356	Natural
Letras	LE	Cenizas volcánicas	0,00813	Natural
Veinte	20	Cenizas volcánicas	0,00292	Natural
Doscinetos	200	Ígneo	0,00360	Natural
Manila	MN	Ígneo	0,00082	Natural
Sincerin	SI	Ígneo	0,00864	Natural
Violeta	VI	Ígneo	0,00556	Natural
Cascarero	CA	Metamórfico	0,00202	Natural
Chuscal	CHU	Metamórfico	0,00282	Natural
Maiba	MA	Metamórfico	0,00437	Natural
Tablazo	TB	Metamórfico	0,00153	Natural
Depósitos	DP	Sedimentario	0,00809	Natural
Tareas	TA	Sedimentario	0,00607	Natural
Guacaica	GU	Mezcla	0,00409	Natural

Factor de erodabilidad. En la Tabla 5 se presentan los valores promedios del factor erodabilidad para cada una de las unidades de suelo estudiadas, igualmente se presenta la calificación de acuerdo a la escala propuesta por Rivera y Gómez (28), para la zona cafetera colombiana.

Los valores de erodabilidad oscilaron entre 0,0008 y 0,0086 t.ha.MJ⁻¹.mm⁻¹.ha⁻¹ calificándose, según Rivera y Gómez (28), como **natural** en todos los suelos evaluados, lo cual indica que son suelos altamente resistentes a la erosión.

La mayor erodabilidad se observó en el municipio de Aguadas en la unidad de suelo Guacaica, ésta presenta poca profundidad del horizonte A (10 – 15 cm), lo cual indica que es zona de suelos con mayor susceptibilidad a los procesos erosivos frente a las otras

unidades de suelo estudiadas. De igual manera, se observó mayor erodabilidad en la Unidad Depósitos, en el municipio de Manizales, tal como se aprecia en la Figura 4.

Factor longitud y gradiente de la pendiente. Están asociados al material de origen, tal como lo reporta Federacafé (7); los suelos derivados de cenizas volcánicas se caracterizan por presentar pendientes suaves de longitudes cortas, con valores menores de 3, de calificación baja a muy baja (Tabla 6), mientras que en los suelos originados a partir de rocas metamórficas e ígneas, predominan pendientes fuertes de longitudes largas, con valores superiores a 3.

La espacialización del factor *LS* presentó los valores más bajos al sur de la región estudiada, en los municipios de Chinchiná, Palestina y en parte del municipio de Manizales, donde

Figura 4.
Mapa del factor de erodabilidad (factor *K*), de la zona de estudio.

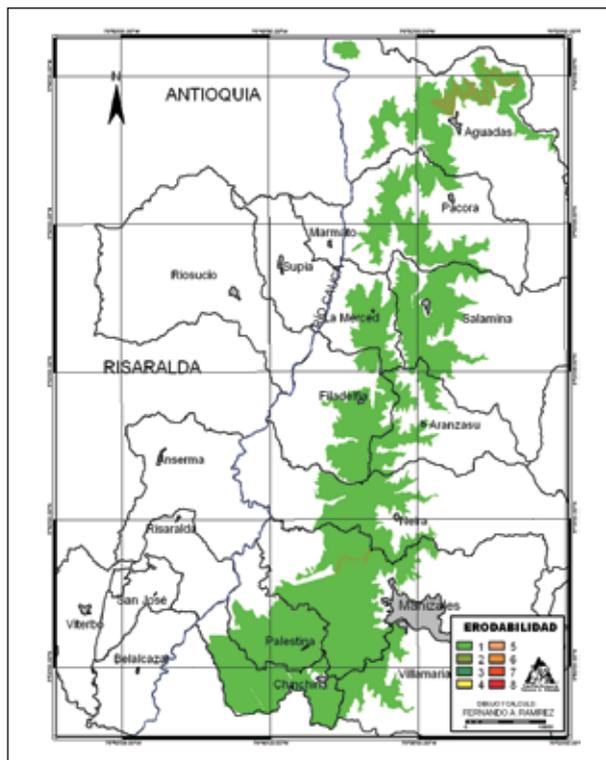


Tabla 6. Clasificación propuesta para la zona cafetera del Factor *LS*.

Clase	Valor	Calificación del factor <i>LS</i>	Área (%)
1	Menor de 1,5	Muy bajo	27,2
2	1,6 a 3,0	Bajo	27,8
3	3,0 a 5,0	Moderado	24,8
4	5,1 a 7,0	Alto	12,3
5	Mayor de 7,0	Muy alto	7,8

predominan los suelos originados de cenizas volcánicas. En la región norte se concentran los valores altos del factor *LS* en los municipios de Aguadas y Pácora (Figura 5).

Cuando el factor *LS* se incrementa, aumenta la vulnerabilidad de los suelos a la erosión, lo cual se traduce en mayores pérdidas de

suelo en la zona, esto se debe principalmente a que el aumento de la pendiente y de la longitud de la ladera, aceleran la velocidad del flujo de escorrentía y disminuyen la capacidad de infiltración de los suelos, lo que incrementa el poder erosivo del agua, tal como lo afirman Wischmeier y Smith (30).

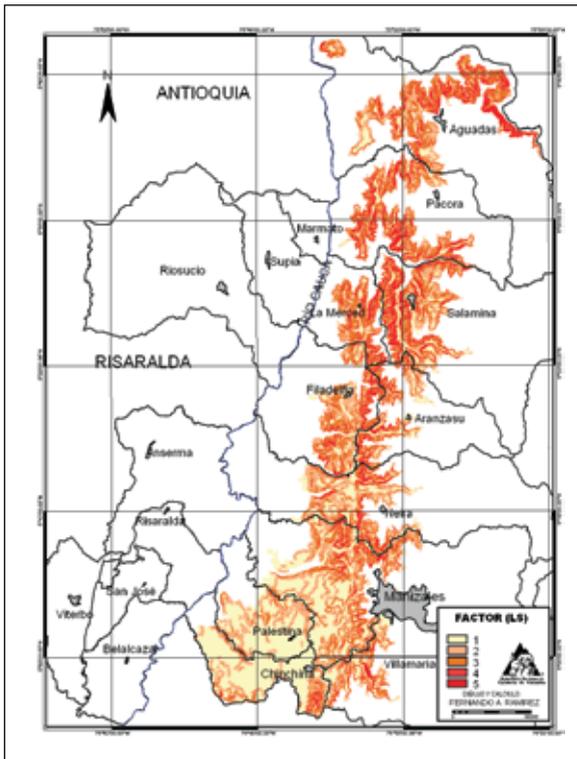


Figura 5. Mapa del factor longitud y gradiente de la pendiente en la zona potencial cafetera central del departamento de Caldas.

Pérdidas de suelo. Como se observa en la Tabla 7, las pérdidas potenciales de suelo (PPS) menores a 10 t.ha⁻¹.año⁻¹ son las menos frecuentes en la zona estudiada (Clase 1). Valores de la PPS entre 50 a 100 t.ha⁻¹.año⁻¹ son los más frecuentes, afectando a más de 29 mil hectáreas, equivalente al 32,7%.

Las PPS predominantes en la zona estudiada son las que superan las 25 t.ha⁻¹.año⁻¹, éstas representan cerca del 88% del área estudiada. Las PPS mayores a 100 t.ha⁻¹.año⁻¹ representan el 31,7% del área estudiada.

En la Tabla 8 se muestran las clases de PPS por municipio, su área en porcentaje y su área potencial cafetera con respecto al total. El municipio con mayor área potencial cafetera es Manizales (17,8%), mientras que el de menor es La Merced con 4,7%.

El 68,8% del municipio de La Merced presenta PPS superiores a 100 t.ha⁻¹.año⁻¹ (muy alta), siendo el municipio más afectado por este fenómeno con respecto a su área, caso contrario ocurre en el municipio de

Tabla 7. Clasificación de pérdidas de suelo de acuerdo a la clasificación propuesta por Pérez (21) para Colombia.

Clase	Pérdidas de suelo (t.ha ⁻¹ año ⁻¹)	Calificación de pérdidas	Área (%)
1	Menores de 10	Ligera	1,0
2	10 a 25	Baja	11,5
3	26 a 50	Moderada	23,0
4	51 a 100	Alta	32,7
5	Mayores de 100	Muy alta	31,7

Tabla 8. Porcentaje de área, de acuerdo con la pérdida potencial de suelo, en cada municipio. Clasificación de pérdidas potenciales de suelo en porcentaje para cada municipio.

Municipio	Área Potencial Cafetera (%)	Muy Alta	Alta	Área (%)		
				Moderada	Baja	Ligera
Aguadas	12,2	22,5	13,3	20,0	37,3	6,8
Aranzazu	5,1	51,6	34,7	13,8	-	-
Chinchiná	10,0	11,3	28,7	15,0	45,0	-
Filadelfia	8,1	50,9	30,2	15,2	3,7	-
La Merced	4,7	68,8	24,3	4,9	2,0	-
Manizales	17,8	25,8	36,1	34,6	3,5	-
Neira	8,7	33,0	34,6	27,9	4,4	-
Pácora	9,6	26,6	35,3	28,3	8,0	1,9
Palestina	8,6	12,4	54,9	31,1	1,1	0,5
Salamina	10,5	52,7	30,6	14,8	1,9	-
Villamaría	4,7	26,2	44,7	28,9	0,2	-
Total del área (%) afectada		31,7	32,7	23,0	11,5	1,1

Chinchiná, con el 11,3% de su área. Las pérdidas menores a 10 t.ha⁻¹.año⁻¹ (Ligera) se registraron en el 6,8% del municipio de Aguadas, de igual manera se registraron en los municipios de Pácora y Palestina con 1,9% y 0,5%, respectivamente.

Los resultados obtenidos de la interacción de los factores “erosividad, erodabilidad y longitud y gradiente de la pendiente” se observan en la Figura 6. Los municipios más afectados por la erosión hídrica son: La Merced, Salamina, Filadelfia y gran parte del municipio de Aguadas.

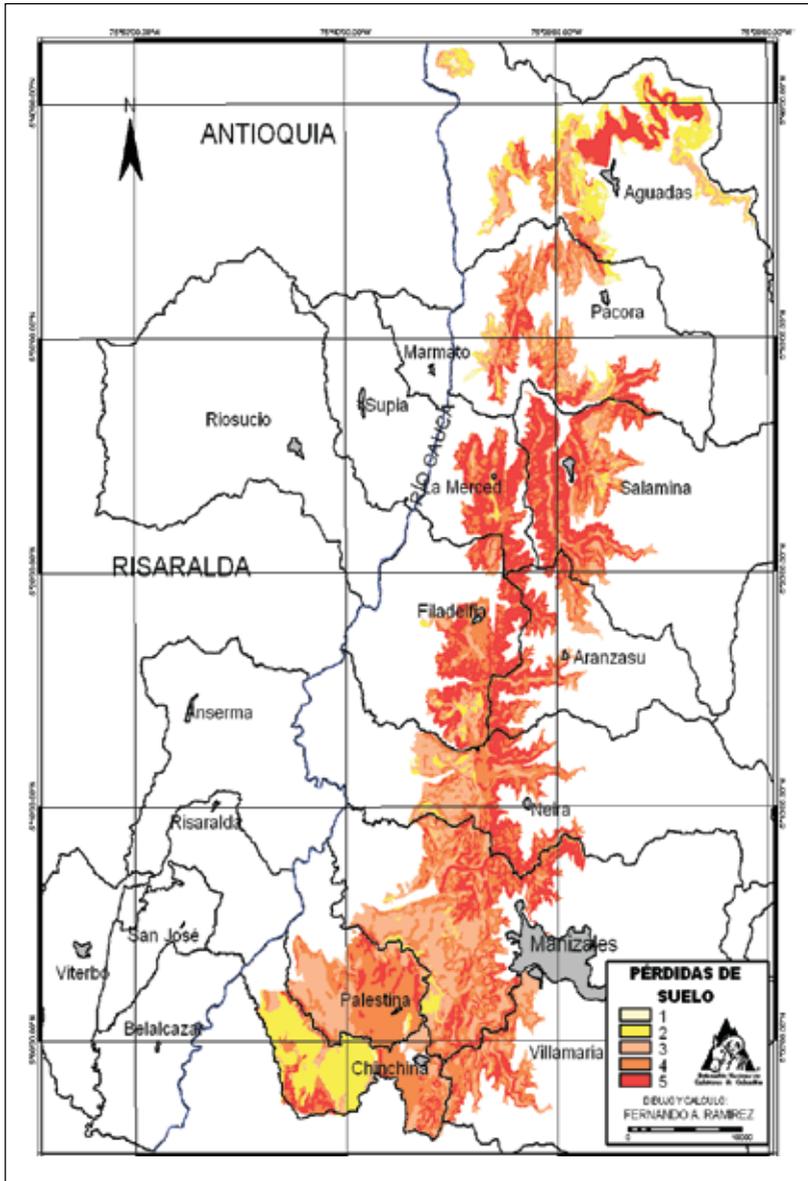


Figura 6. Mapa de pérdidas de suelo en la zona cafetera central del departamento de Caldas.

Figura 7.
Riesgo a la erosión en función de las pérdidas potenciales de suelo y la profundidad del horizonte A.

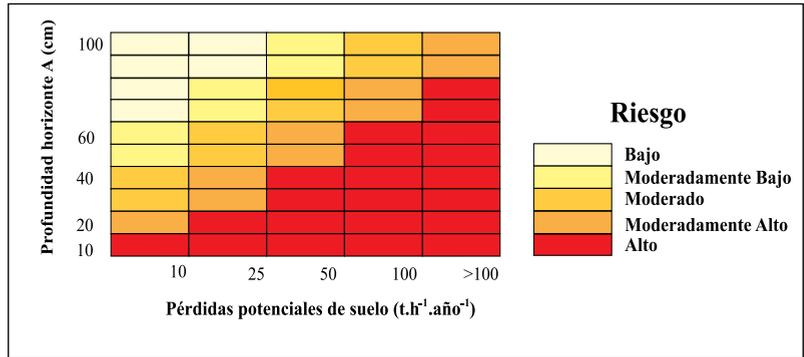


Figura 8.
Mapa de riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas.

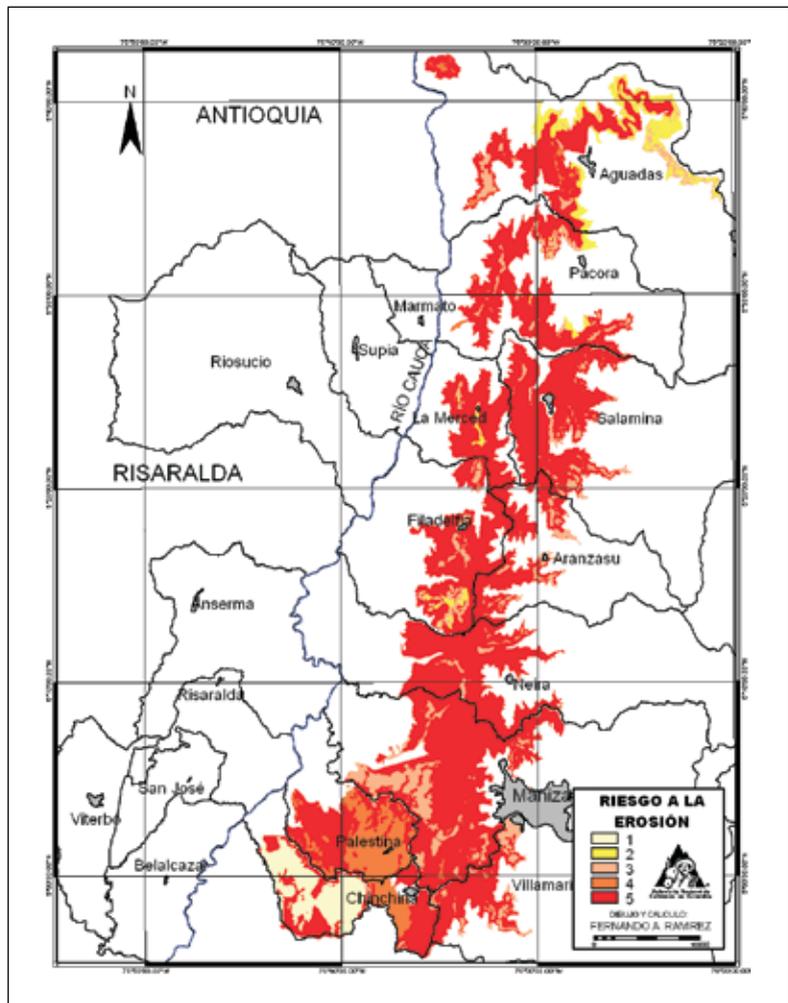


Tabla 9. Clasificación de riesgo a la erosión del área estudiada, obtenida a partir de la relación entre pérdidas potenciales de suelo y profundidad del primer horizonte.

Clase	Riesgo a la erosión	Área (%)
1	Bajo	4,3
2	Moderadamente bajo	4,1
3	Moderado	8,4
4	Moderadamente alto	5,4
5	Alto	77,7

Riesgo a la erosión potencial. Este es un factor pronóstico que indica la probabilidad y severidad de que la erosión se convierta en un problema mayor. A medida que la profundidad del primer horizonte del suelo (Horizonte A, Ap, 1) es menor, el efecto de la erosión será mayor, lo cual indica que se aumenta el riesgo a la erosión (Figura 7).

El mapa de riesgo potencial (Figura 8) está dado por el producto entre la probabilidad que se presente la erosión (erosión potencial) y la profundidad del primer horizonte, este factor permite diferenciar los suelos a partir de la capacidad de respuesta ante el proceso erosivo.

En la Tabla 9, se presenta una clasificación propuesta, para calificar los suelos del área estudiada de acuerdo al riesgo por erosión potencial. Al calificar los suelos con base en ésta, se observa que el 78% del área evaluada, se clasifica como suelos de alto riesgo a la erosión.

En general, se encontró que los suelos de la zona cafetera central del departamento de Caldas se clasifican como resistentes a los procesos erosivos, y que el factor determinante para que ocurran problemas de erosión en esta región es la erosividad de las lluvias, la cual se presenta en un 8% del área como muy alta y en un 92% como alta.

Dadas las anteriores condiciones, cerca del 90% del área de estudio es susceptible de pérdidas potenciales de suelo superiores a 25 t.ha⁻¹.año⁻¹, mientras que el 30% de la zona puede presentar pérdidas potenciales de suelo superiores a 100 t.ha⁻¹.año⁻¹, lo cual implica que el 78% de la región estudiada, está clasificada como zona de alto riesgo a la erosión.

Los sistemas de información geográfica permitieron obtener estimaciones de pérdidas de suelo a través del análisis multiplicativo de los diferentes factores, al igual que el factor de mayor incidencia en el proceso erosivo. Además, permiten visualizar y localizar las áreas de mayor riesgo a la erosión, lo cual es una herramienta importante para implementar planes de prevención de la erosión.

Los resultados muestran que el modelo utilizado (USLE con modificaciones) al igual que los sistemas de información geográfica son instrumentos que permitan estimar la erosión potencial de los suelos de la zona cafetera, y pueden ser evaluados y utilizados en otras regiones del país.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la doctora Esther Cecilia Montoya R. de la Disciplina de Biometría, al doctor Siavosh Sadeghian Kh. de la Disciplina

de Suelos, al Ing. Uriel Pérez G. de la Universidad del Tolima, a los Comités Municipales del departamento de Caldas, a los caficultores de Caldas y al personal de apoyo de Cenicafé.

LITERATURA CITADA

1. ARNOLDUS H., M. J. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil loss Equation. In: BOOT; GABRIELS. Assesment of erosion. England: John Wiley Sons, 1980. p. 125-132.
2. DE MAN, E. A few dilemmas and how to cope with them. [cd rom]. In: Memories Geo information tools for community-based disaster management. Ibagué: Universidad del Tolima, 2005.
3. HUBERT, W. K. Mantengamos viva la tierra: Causas y remedios de la erosión del suelo. Roma: FAO, 1983. 21 p.
4. FAO. Erosión y Pérdida de Fertilidad del Suelo. [En línea]. Documentos de la FAO. < <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S06.htm> >. (consultado en Abril 28 de 2005)
5. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS. Base altimétrica de la zona cafetera: Memoria explicativa. Bogotá: FEDERACAFÉ, 1993. 50 p.
6. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS. Ecotopos cafeteros caracterización agroecológica de la zona cafetera: Avance de resultados. Bogotá: FEDERACAFÉ, 1993. 63 p.
7. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS. Estudio de suelos de Caldas (zona de la cuenca del río Cauca). Bogotá: FEDERACAFÉ, 1998. 268 p.
8. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Disciplina de Agroclimatología: Archivos climáticos. Chinchiná: Cenicafé, 2005.
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. HELLIN, J. De erosión se suelos a suelos de calidad: LEISA. Revista agroecológica. 19(4):75. 2004.
11. LAL, R. Soil erosion research methods. Iowa: Soil and Water Conservation Society, 1988. 244 p.
12. LOBO, D.; GABRIELS, D.; OVALLES, F.; SANTIBAÑEZ, F.; MOYANO, M.; AGUILERA, R.; PIZARRO, R.; SANGÜESA, C.; URRÁ, N. Guía metodológica para la elaboración el mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de américa latina y el caribe [En línea]. <http://www.cazalac.org/documentos/Guia_Mapas_ZA_ALC.pdf>. (Consultado en Junio 04 de 2006).
13. LÓPEZ, T.; AIDE, M.; SACTENA, N. The effect of land use on soil erosion in the uadiana watershed in Puerto Rico. Caribbean Journal of Science. 34(3/4):298-307. 1998.
14. MENDIVELSO, D.; RUBIANO, S.; MALAGÓN C., D.; LÓPEZ L., D. Erosión de tierras colombianas. Bogotá: DANE: IGAC. Subdirección de agrología, 2004. 20 p.
15. MEYER, D.; HARMON, C. Susceptibility of Agricultural Soils to Interrill Erosion. Soil Science Society of America Journal. 48(5): 1152-1157. 1984.
16. MITCHELL J., K.; BUBENZER G., D. Estimación de la pérdida del Suelo. México: [s.n.], 1980. 71 p.
17. MONTES L., M.; DOMÍNGUEZ M., A.; VENTURA R., E. Utilización de un SIG en la estimación del riesgo de erosión hídrica en la cuenca Santa Catarina, Queretaro. México, Universidad Autónoma de Queretaro. Facultad de Ingeniería, 2000. 36 p. (Tesis maestro en Hidráulica).
18. MOVILLON M., B.; RICHARDS, H.; TUMAWIS. What happens on earth in one minute? In: BRIDGES, E.M. Response to land degradation. Enfield: Science Publishers, 2001. 40 p.
19. ONSTAD C., A.; FOSTER G., R. Erosion modeling over watershed. American society of Agricultura engeneefrs 18(2): 288-292. 1975.
20. PÁEZ M., L. Clasificación de suelos por riesgos de erosión hídrica con fines de planificación agrícola. Facultad de Agronomía 20:83-100. 1994.
21. PÉREZ G., S. Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica. Bogotá: Universidad Industrial de Santander. FACULTAD?, 2001. 65 h. (Tesis: Especialista en ingeniería ambiental).
22. RAMÍREZ O., F. A. Evaluación del riesgo por erosión potencial en la zona cafetera central del departamento de Caldas. Ibagué: Universidad del Tolima., Facultad de Ingeniería Forestal, 2005. 99 h. (Tesis Ingeniero Forestal).

23. RAMÍREZ O., F. A.; HINCAPIÉ G., E.; SADEGHIAN K., S.; PÉREZ G., U. Erosividad de la lluvia en la zona cafetera central y occidental de Caldas. Caldas (Colombia) 58 (1): 40-52 2004,
24. RAMÍREZ O., F. A.; HINCAPIÉ G., E.; SADEGHIAN K., S. Erodabilidad y su relación con algunas propiedades del suelo en la zona cafetera colombiana. Chinchiná: Cenicafé, 2006 (en prensa) <-- Lleva tres años en prensa??? No entiendo. Se publicó si o no? Esto es un libro, revista o folleto??
25. RENARD K., G.; FOSTER G., R.; WEESIES G., A.; McCOOL D., K.; YODER D., C. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington: Department of Agriculture, 1997. 404 p.
26. 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 Ingeniería afonómica. 1990. 310 h. (Tesis máster science).
27. 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. 14 p.
28. 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.
29. VARGAS, R. Amenaza, vulnerabilidad, riesgo y desastre. [cd rom] In: Memories Geo-information tools for community-based disaster management. Ibagué: Universidad del Tolima, 2005.
30. WISCHMEIER, W.; SMITH, D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rock mountains: Guide for selection of practices soil and water conservation. In: *Agricultural Handbook*. No. 282 (1965); 47 p.
31. WISCHMEIER, W and SMITH, D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rock mountains. Guide for selection of practices soil and water conservation. In: *Agricultural Handbook*. No. 282 (1965); 47 p.
32. ZINCK, A. Suelos, información y sociedad. In: BAUTISTA, F.; PALACIO, G. 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.