

Niveles de fragilidad potencial para la erosión y el deslizamiento en los suelos del municipio de Ibagué (Tolima)

Potential fragility levels for erosion and landslides in soils of Ibagué municipality (Tolima)

¹Julián Leal Villamil y ²Luis Alfredo Lozano Botache

¹Ingeniero forestal; especialista en evaluación y desarrollo de proyectos. ²Ingeniero forestal; magíster en ciencias biológicas.

E-mail: ¹julian.leal@unad.edu.co, ²llozano@ut.edu.co

¹Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA), Ibagué (Tolima). ²Facultad de Ingeniería Forestal, Departamento de Ciencias Forestales, Ibagué (Tolima)

Resumen

Con base en la metodología de fragilidad potencial de suelos, descrita por Alarcón y Gayoso (1999), se realizaron la evaluación y la distribución espacial de la fragilidad potencial a la erosión y los deslizamientos en los suelos del municipio de Ibagué. Las variables edáficas se tomaron a partir de unidades de suelos bajo dos sistemas de clasificación: el del Comité de Cafeteros de Colombia (1973) y el del IGAC (2004). Las variables ambientales de precipitación y altimetría fueron obtenidas del Plan de Ordenación y Manejo de las Cuencas de los Ríos Coello y Totare (CORTOLIMA, 2006) y del proyecto de ordenación forestal para el departamento del Tolima (Universidad del Tolima y CORTOLIMA, 2007). Con esta información se elaboraron los mapas de índices numéricos, teniendo en cuenta los criterios dados por Alarcón y Gayoso (1999). Con la información numérica mapeada y con los modelos matemáticos establecidos para los nomogramas de la metodología base, se determinaron los índices de fragilidad potencial a los dos fenómenos de degradación del suelo. Los resultados muestran que en el sistema de clasificación de suelos del IGAC el municipio de Ibagué es más susceptible a fenómenos de deslizamientos que a la erosión; se determinó el caso contrario en los términos del sistema del Comité de Cafeteros. Ambos sistemas coinciden en determinar que las zonas con mayor propensión a los fenómenos objeto de estudio se localizan, principalmente, en el cañón del río Combeima, en la región de cordillera hacia el municipio de Cajamarca, y los cerros y montañas circundantes al área urbana.

Palabras clave: Cartografía, degradación, riesgo, sustratos.

Abstract

Based on the methodology of potential soil fragility, described by Alarcón and Gayoso (1999), the evaluation and spatial distribution of the potential fragility for erosion and

landslides, was carried out in the soils of the municipality of Ibagué. Edaphic variables were taken from units of soils according to two systems of classification: Comité de Cafeteros de Colombia (1973) and IGAC (2004). Environmental variables of precipitation and altimetry were obtained from the hydrographic basin ordination and management plan of the Coello and Torare rivers (CORTOLIMA, 2006) and the forestry planning project for the Department of Tolima (Universidad del Tolima and CORTOLIMA, 2007). According to the numerical information organized in maps and the mathematical models established for the nomograms of the base methodology, the rates of potential fragility of the two phenomena of soil degradation were determined. The results show that with the soil classification system IGAC, the municipality of Ibagué is more sensitive to phenomena of landslides rather than to erosion, opposed to what is shown in the system of the Comité de Cafeteros de Colombia. Both systems coincide in stating that the zones with higher propensity to these phenomena are located mainly near the Combeima Canyon, in the mountainous area near the municipality of Cajamarca, as well as the hills and mountains that surround the urban area.

Key words: Cartography, degradation, risk, substratum.

Introducción

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (Wischmeier y Smith, 1978), el suelo es un cuerpo natural que comprende sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que se presentan en la superficie de la Tierra, que ocupa un espacio y se caracteriza por uno de los siguientes apartados, o por ambos: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y de materia, o por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural. A

su vez, el IGAC (1990) asume como suelo a la capa más superficial de la litosfera, donde se integran diversidad de factores formadores, que, a través de varios procesos a través del tiempo, hacen de esta una capa viva que sirve de soporte a las plantas. El IBGE (2007) plantea el concepto de suelo como aquel material mineral u orgánico consolidado en la superficie de la Tierra que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas.

El uso de este recurso por parte del ser humano ha sido constante desde la invención de las técnicas agrícolas, y este agente humano es, precisamente, el mayor acelerador de procesos de degradación del suelo. Alarcón y Gayoso (1999) destacan que los principales procesos de degradación del suelo comprenden la extracción de nutrientes o la improductividad del sustrato, la compactación, la erosión y los deslizamientos.

Debido a que este recurso es de vital importancia para la sostenibilidad alimentaria del planeta, se han desarrollado términos como calidad del suelo y salud del suelo. El primero hace referencia a la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo, según describen Carter *et al.* (1997); mientras, la salud hace énfasis en las propiedades dinámicas del suelo, como el contenido de materia orgánica, la diversidad de organismos o los productos microbianos, en un tiempo particular (Romig *et al.*, 1995).

La degradación del suelo afecta fenómenos tan importantes como el ciclo hidrológico, pues genera alteraciones en su balance hídrico, así como sedimentación y deterioro de la calidad de las aguas de las cuencas hidrográficas.

Según Alarcón y Gayoso (1999), una de las consecuencias del proceso de degradación del suelo es el fuerte impacto visual que ocasiona. La Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), a través del Grupo de Trabajo WRB (2007), destaca que las consecuencias de estos fenómenos incluyen una disminución en la productividad agrícola, migración, inseguridad alimentara, daños a los recursos y los ecosistemas básicos, y pérdida de biodiversidad, debido a cambios en los hábitats, tanto en el plano de las especies como en el genético.

Dada la evolución histórica del estudio del suelo, se han establecido diferentes modelos para evaluar su degradación. El modelo clásico es el presentado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), y conocido como la *ecuación universal de pérdida del suelo* (USLE, por las siglas en inglés de *universal soil loss equation*), la cual se define como: $A \text{ (ton/ha/año)} = R K L S C P$

Donde A representa las toneladas por hectárea año de suelo perdido en función del índice de erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), el factor relieve (LS), un factor de cobertura vegetal (C) y un factor de prácticas de conservación de suelos (P) (Wischmeier y Smith, 1978).

También existe el método revisado (RUSLE, por las siglas en inglés de *revisated universal soil loss equation*), el cual fue planteado para determinar las pérdidas de suelo a largo plazo en condiciones de campo dadas, usando un sistema específico de manejo, tal como lo describen Renard *et al.* (1997).

En Colombia se ha empleado históricamente el modelo USLE; por ejemplo, Ramírez (2006) evaluó el riesgo de erosión potencial de los suelos presentes en la zona cafetera central del departamento de Caldas; a su vez, Rivera (1999) determinó, mediante un simulador de lluvias en laboratorio, el índice de erodabilidad de cinco suelos de la zona cafetera colombiana. Para el municipio de Ibagué la Corporación Autónoma Regional del Tolima (COR-TOLIMA) elaboró en 2006 los valores de erosión para las cuencas de los ríos Totare y Coello empleando la misma metodología USLE. A partir de este modelo universal de pérdida de suelos, algunos investigadores y teóricos han desarrollado modificaciones, y dado origen a modelos como MUSLE (por las siglas en inglés de *modified universal soil loss equation*).

En el ámbito nacional Pérez (2001) desarrolló una metodología para determinar la erosión del suelo con base en Sistemas de Información Geográfica fundamentados en datos alfanuméricos y espaciales. Por su parte, Mendiavelso (2004) realizó en Colombia un estudio utilizando imágenes de satélite sobre las distintas regiones del país; a raíz de dicho estudio se encontró que los procesos erosivos se concentran con mayor intensidad en la región andina, y, en particular, en aquellos departamentos y áreas donde existen fuertes presiones sobre el uso de la tierra.

En el documento *Guía de conservación de suelos forestales*, que fue desarrollado para los sustratos forestales en Chile, Alarcón y Gayoso (1999) presentan un modelo MUSLE centrado en la atención a la potencialidad de ocurrencia de los fenómenos degradativos, y no a su medición, teniendo como base algunos factores determinantes para la fertilidad y la productividad de los suelos, tales como las precipitaciones, los factores intrínsecos del sustrato (textura, profundidad efectiva, drenaje interno, entre otros) y la topografía.

El método consiste en desarrollar un *índice numérico* que se deduce a partir de los valores absolutos de las variables físicas, y los cuales, normalizados a una escala ordinal y por medio de análisis multicriterio y nomogramas, permiten clasificar el riesgo para cada proceso de degradación (erosión, deslizamiento, remoción, entre otros). El resultado es un valor de fragilidad potencial intrínseco del sitio, usado con el fin de determinar, de manera sencilla, el riesgo de los procesos de degradación en un suelo específico.

La metodología propuesta por Alarcón y Gayoso (1999) presenta ventajas frente a metodologías tradicionales basadas en la ecuación universal de pérdida del suelo (USLE), ya que permite establecer el riesgo potencial de

las zonas respecto a la ocurrencia del fenómeno, como una forma de prevención de dicho riesgo, sobre la cuantificación de la pérdida del suelo después del evento. El sistema de Alarcón y Gayoso permite determinar la potencialidad de deslizamientos, fenómeno que usualmente no se contempla dentro de los sistemas tradicionales: ellos se enfocan en la medición de la pérdida del suelo por la erosión total. A su vez, el modelo presenta mayor eficiencia en cuanto al manejo de la información ambiental, pues requiere una valoración numérica en cada variable.

Esta investigación se ubica dentro de un enfoque modificado de la USLE, y busca, mediante la metodología planteada por Alarcón y Gayoso, determinar los niveles de fragilidad potencial frente a fenómenos de erosión y deslizamientos en los suelos de Ibagué; procura convertirse en una herramienta que, de manera práctica, determine la fragilidad potencial de los suelos, con el fin de incentivar la conservación, la restauración ecológica y la seguridad física de los habitantes de la zona.

Métodos

Caracterización del área de estudio

El municipio de Ibagué está localizado dentro de las coordenadas geográficas 4° 15' y 4° 40' de latitud norte, los 74° 00' y 75°30' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, en la parte central de la Región Andina de Colombia (Figura 1).

Con una extensión de 149800 hectáreas y una altura promedio sobre el nivel del mar de 1248 msnm; está situado en la parte alta del valle del río Magdalena, entre las regiones fisiográficas de la depresión del río Magdalena y la Cordillera Central (Alcaldía de Ibagué, 2000). Tiene un régimen de lluvias anual bimodal y precipitaciones promedio anuales de 1691,3 mm; a su vez, la Clasificación de Caldas-Lang caracteriza 7 provincias climáticas en el departamento, que van desde la provincia páramo alto súper-húmedo hasta la provincia cálida semiárida. Geológicamente, el municipio de Ibagué se caracteriza por tener unidades geológicas de diverso origen; estas unidades varían en edad de formación, desde el periodo precámbrico hasta el cuaternario. Con base en los estudios realizados por Ingeominas (1982), el municipio presenta 12 unidades geológicas.

Para el área de estudio se determinan dos sistemas de clasificación de suelos; el primero corresponde al Comité de Cafeteros de Colombia (1973), el cual está basado en el material parental, y el segundo, al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2004), y el cual desarrolla su clasificación según los criterios del Soil Survey Staff de Estados Unidos. Los suelos descritos en ambas metodologías son derivados de origen ígneo, metamórfico, sedimentario y cenizas volcánicas.

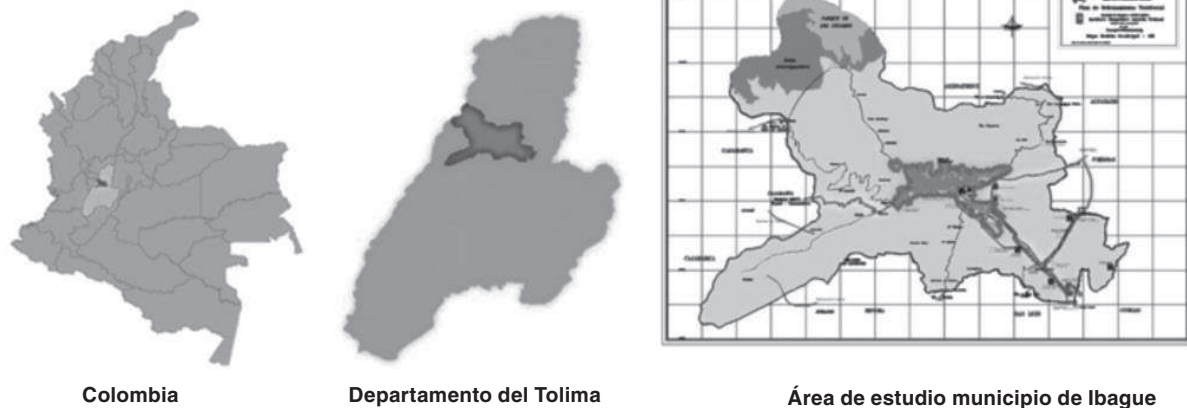


Figura 1. Localización del área objeto de estudio. Fuente: Los autores con base en Alcaldía de Ibagué (2000).

Metodología para el mapa de índices numéricos según la precipitación media anual del municipio

Se tomó como base el análisis estadístico de las series de datos de precipitación anual entre 1987-2002 para 32 estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), en las cuencas de los ríos Coello y Totare, contenidas en los planes de ordenación y manejo de las cuencas elaborados por la Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). Se elaboró un mapa de las estaciones en

el software ILWIS 3.3, para, posteriormente, interpolar los valores de precipitación mediante el método Kriging; se delimitó el área de estudio y se la valoró de acuerdo con la metodología Alarcón y Gayoso (1999).

Metodología para el mapa de índices numéricos según las pendientes municipales

Se empleó la información altimétrica del plan de ordenación forestal para el departamento del Tolima a escala 1:25.000, en formato SHAPE, empleando el software ILWIS 3.3. Se obtuvieron las curvas de nivel del municipio a escala 1:100.000 y con cotas distanciadas cada 100 m. Con la información

altimétrica municipal se hicieron las comprobaciones topológicas pertinentes y se procedió a elaborar el mapa de pendientes municipales, las cuales, posteriormente, se valoraron según la metodología Alarcón y Gayoso (1999).

Metodología para los mapas de unidades de suelo según el sistema del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y del Comité de Cafeteros de Colombia

Para la elaboración del mapa de suelos en sistema IGAC se empleó la información cartográfica de suelos para el Tolima contenida en el documento *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Tolima*, elaborado por el IGAC (2004). Contando con dicha información fue posible establecer las unidades de suelo correspondientes al polígono municipal, mediante el software ILWIS 3.3.

Para el sistema del Comité de Cafeteros se desarrolló la cartografía según las características de génesis de las unidades descritas por la entidad, ya que la cartografía disponible no se encuentra digitalizada, debido a su año de elaboración (1973). Se utilizaron como información base las unidades geológicas comprendidas en las planchas 244, 245 y 225 del Instituto Nacional de Geología y Minería (Ingeominas). Con la información geológica georreferenciada se digitalizaron las unidades geológicas siguiendo los criterios establecidos por IBGE (2007) para aéreas mínimas de mapeación. Finalmente, con base en los polígonos geológicos se reclasificó la información de acuerdo con Comité de Cafeteros (1973) y Fajardo (2006), y así se obtuvo el mapa de suelos para el sistema de clasificación.

Metodología para los mapas de índices numéricos según la textura del suelo.

Usando la metodología Alarcón y Gayoso (1999) fue necesario determinar la textura de los suelos según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS); los sistemas de clasificación de suelos abordados en el trabajo contemplan exclusivamente texturas de sustratos en los términos del método Boyoucos y el método de pipeta, los cuales se llevan a cabo mediante triángulo textural.

Se realizó la homologación textural de los sistemas de clasificación de suelos empleados al sistema SUCS de acuerdo con los criterios establecidos por Ruiz y Calderón (2004). Determinadas las texturas SUCS, se las reclasificó según los parámetros establecidos en la metodología base.

Metodología para los mapas de índices numéricos según la profundidad efectiva del suelo

Se determinó la profundidad efectiva como la distancia vertical del suelo hasta el material parental. En consecuencia, este valor se originó al sumar las distancias o profundidades de los horizontes hasta el material parental, de acuerdo con los datos suministrados para las unidades de suelo por Fajardo (2006) y el IGAC (2004).

Obtenidos los valores de profundidad efectiva para las unidades de suelos, se procedió a establecer dos mapas con los valores de profundidades efectivas (uno por cada sistema de clasificación de suelos), los cuales posteriormente fueron valorados y clasificados conforme la metodología Alarcón y Gayoso (1999).

Metodología para los mapas de índices numéricos según el drenaje interno del suelo

Por medio del software ILWIS 3.3 se valoró el drenaje interno de los suelos para el sistema de clasificación IGAC, según la metodología Alarcón y Gayoso (1999). Dado que el sistema del Comité de Cafeteros no contiene los valores del drenaje interno para sus unidades de suelo, se hizo un muestreo estratificado conforme a tres usos del suelo municipal: bosques y áreas de conservación; pasturas; cultivos. En dicho muestreo se eliminaron otros posibles usos del suelo, como zonas urbanas, lagunas, zonas de amortiguación, y zonas nivales, entre otras, debido a la poca accesibilidad a las zonas nivales y de amortiguación, así como por las posibles modificaciones en las características físicas y químicas de los suelos en los demás usos.

Se determinaron 16 sitios de muestreo según la representatividad litológica, la edáfica, el uso del suelo, la accesibilidad, y la pendiente del terreno, entre otras. En cada sitio se corroboró la información secundaria del suelo en los términos del sistema de clasificación del Comité de Cafeteros; además, se realizó un plateo del área de muestreo, y, por medio de cilindros de acero galvanizado, se procedió a extraer la muestra de los primeros 5 cm de suelo; se hicieron dos repeticiones por sitio.

En la determinación de las conductividades hidráulicas (medida del drenaje interno) de las muestras se empleó un permeámetro de cabeza constante y se realizaron los procedimientos correspondientes al marco teórico establecido por IGAC (1990), Forsythe (1985) y Velasco (1990).

Una vez determinados los valores de conductividad hidráulica para las unidades de suelo municipales fue necesario, entonces, establecer un valor ponderado para efectos de mapeación. Este valor se determinó como la media ponderada de los valores por cobertura en la unidad de suelo; para ello se empleó el mapa de cobertura y uso de la tierra en el departamento del Tolima elaborado por la Universidad del Tolima y CORTOLIMA (2007).

Mediante el software ILWIS 3.3 se extrajeron los polígonos registrados para las categorías de uso (bosques, pasturas y pastizales). Con los valores de extensión se ponderaron las conductividades hidráulicas por unidad, y con ello se obtuvo un valor representativo de conductividad hidráulica por unidad de suelo. La conductividad hidráulica se clasificó según los parámetros establecidos por Alarcón y Gayoso (1999) para obtener una categoría de drenaje interno y su valoración respectiva en la metodología del mismo autor. Por medio del programa ILWIS 3.3 se realizó la distribución espacial de los índices numéricos

para los drenajes internos de los suelos municipales según el sistema de clasificación del Comité de Cafeteros.

Metodología para la elaboración de los mapas de fragilidad potencial a erosión y deslizamientos

Con el fin de determinar la fragilidad potencial frente a la erosión y el deslizamiento en el municipio de Ibagué, se emplearon los nomogramas establecidos en la metodología Alarcón y Gayoso (1999). Para el desarrollo del trabajo, en el software ILWIS 3.3, fue necesario establecer las ecuaciones para cada curva en los nomogramas.

Se realizó una tabulación de los valores en cada curva, con el fin de determinar los posibles modelos regresivos. Se eligieron los modelos con mayor ajuste a los datos (según su coeficiente de correlación, error estándar y absoluto de estimación, al igual que su coeficiente de determinación múltiple).

Para facilitar las labores de transformación y operación de los mapas en ILWIS 3.3 se decidió elaborar cuatro mapas intermedios, determinados por los ejes cardinales de cada nomograma. Básicamente, se hizo el cálculo de los mapas intermedios pasando de un eje cardinal a otro por medio de las fórmulas regresivas hasta llegar al eje inicial, que, a su vez, determina la fragilidad potencial frente al fenómeno degradador del suelo. Posteriormente se realizó la clasificación cualitativa de los índices de fragilidad y se los modificó según los parámetros establecidos por Alarcón y Gayoso (1999).

Resultados y discusión

Para el área de estudio se definieron dos sistemas de clasificación de suelos: el de Comité de Cafeteros de Colombia y el del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). De estas clasificaciones se tomaron valores edáficos, sin que necesariamente fueran coincidentes, debido a la taxonomía de las clasificaciones: el del Comité de Cafeteros se hizo con base en el material parental, y el del IGAC, según el Soil Survey Staff. Esto tuvo como consecuencia que en algunos casos se trabajara sobre la homologación de los valores entre las clasificaciones, e incluso, con lo propuesto por Alarcón y Gayoso (1999). En definitiva, se hizo necesario elaborar los mapas de riesgo con base en cada una de las dos clasificaciones, sin que en los resultados se observaran diferencias significativas para replantear la metodología.

Así, por ejemplo, para la variable *textura del suelo* ambos sistemas coinciden en determinar que el municipio de Ibagué se encuentra constituido por suelos con texturas de arenas finas, pero su distribución espacial y su extensión difieren en ambos sistemas de clasificación. Igualmente, para la variable *profundidad efectiva del suelo y drenaje interno* los sistemas de clasificación muestran que en el municipio predominan suelos con profundidades efectivas mayores que 90 cm y drenajes internos moderados, con extensiones y distribuciones espaciales diferentes en ambos sistemas (Tabla 1).

La precipitación media anual municipal se estableció con base en los datos aportados por CORTOLIMA, en los planes

de ordenación y manejo de las cuencas de los ríos Coello y Totare. Se realizaron dos modelos de distribución de la precipitación: el primero, basado en la media móvil de los datos, y el segundo, usando el método Kriging. Ambos modelos mostraron comportamientos similares; el modelo Kriging fue el más confiable. Las precipitaciones presentaron tendencias circulares y semicirculares; esto, debido al poco número de estaciones en el área municipal y a su distribución espacial.

En los términos del sistema de clasificación del Comité de Cafeteros, el municipio de Ibagué muestra un riesgo frente al fenómeno erosivo mayor que ante fenómenos de deslizamientos, debido a que las texturas del suelo en dicho sistema poseen mayores extensiones en los valores de riesgo más elevados (texturas de limos y arcillas de baja y alta plasticidad) a la luz de la metodología abordada; tal comportamiento es similar para la profundidad efectiva del sustrato (Tabla 2).

Caso contrario al anterior es el del sistema de clasificación IGAC, donde Ibagué, según la metodología empleada, es más susceptible a fenómenos de deslizamientos, pues los valores de extensión del riesgo valorados para drenaje interno del suelo son más elevados que en el sistema del Comité de Cafeteros (Tabla 2).

Como no existe un estudio realizado para el municipio según la misma metodología o métodos similares de fragilidad, no es posible comparar los resultados de fragilidad potencial ante los fenómenos analizados; sin embargo, se han realizado estudios sobre pérdidas de suelos por erosión usando la metodología USLE, como el planteado por CORTOLIMA (2006), donde la erosión severa y fuerte presentada en el municipio equivale al 30% del territorio; este valor es similar al obtenido para la metodología Alarcón y Gayoso según el sistema de clasificación de suelos del IGAC, en el cual los índices de fragilidad potencial altos y muy altos representaron el 31% del área municipal.

La localización del fenómeno erosivo en los términos de la metodología Alarcón y Gayoso se da en las montañas graníticas circundantes al perímetro urbano y en el cañón del río Combeima; se corrobora, pues, lo establecido por la Agenda Ambiental Municipal de Ibagué (CORTOLIMA, 2010), pues dicha entidad determinó la existencia de montañas y colinas graníticas erosionales que bordean el perímetro urbano; a su vez, señala montañas y colinas metamórficas erosionales localizadas en el cañón del río Combeima (Figura 2).

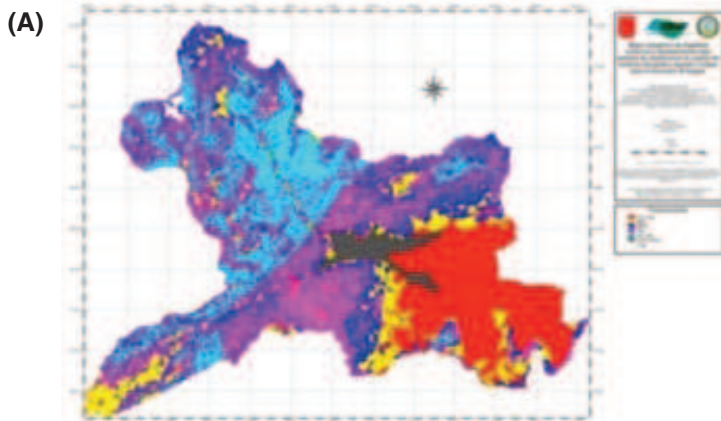
Para el fenómeno de deslizamientos, el Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS (2002) elaboró el *Catálogo nacional de movimientos en masa*, donde se recopilan los eventos históricos de deslizamientos y movimientos en masa en el municipio de Ibagué; así se determinó que las áreas más propensas se localizan en el cañón del río Combeima y en las montañas graníticas circundantes del perímetro urbano. Los resultados obtenidos para fragilidad potencial ante deslizamientos mediante la metodología Alarcón y Gayoso muestran sectores de fragilidad alta y muy alta ante el fenómeno en las zonas descritas por Ingeominas.

Tabla 1. Resultados obtenidos para los mapas de índices numéricos de las variables edáfico-ambientales requeridas por la metodología de Alarcón y Gayoso (1999)

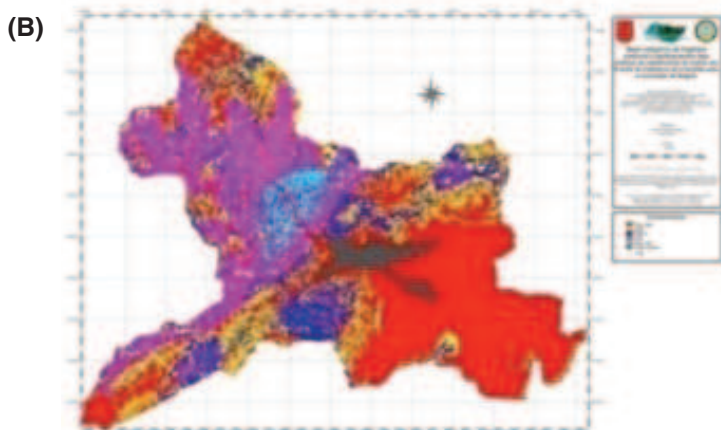
Fenómeno de degradación del suelo	Sistema de clasificación de suelos	Variable edáfico-ambiental	Índice numérico según la metodología Alarcón y Gayoso (1999)	Rango de la variable	Unidad de la variable	Área municipal (ha)	% del área municipal	
Erosión	N. A.	Pendiente	1,0	0-5%		28594,84	20,38	
			2,5	5-15%		17727,89	12,63	
			5,0	15-30%		22088,44	15,74	
			7,5	30-45%		25022,29	17,83	
			10,0	>45%		46894,40	33,42	
			Total			100,00		
Deslizamientos	N. A.	Pendiente	1,0	0-30%		68411,17	48,75	
			2,5	30-45%		25022,29	17,83	
			5,0	45-60%		22700,65	16,18	
			7,5	>60%		24193,75	17,24	
			Total			100,00		
Erosión y deslizamientos	N. A.	Precipitación promedio anual	1,00	0-600mm/año		0,00	0,00	
			2,50	600-1200mm/año		528,24	0,37	
			5,00	1200-1800mm/año		112426,77	80,11	
			7,50	1800-2400mm/año		27384,10	19,51	
			10,00	>2400mm/año		0,00	0,00	
			Total			100,00		
Deslizamientos	Comité de Cafeteros	Drenaje externo	1,00	<0,13cm/h		39151,31	27,90	
			2,50	0,13-0,51cm/h		79142,70	5,64	
			5,00	0,51-12,7cm/h		93248,21	66,45	
				Total			100,00	
	IGAC	Sin registros	2,50	0,13-0,51cm/h		26213,83	18,68	
			5,00	0,51-12,7cm/h		61521,49	43,84	
			7,50	12,7-25,40cm/h		51190,52	36,47	
			Total			100,00		
Erosión y deslizamientos	Comité de Cafeteros	Profundidad efectiva	1,00	>90cm		57017,15	40,63	
			2,50	90-60cm		30167,41	21,49	
			5,00	60-45cm		53129,25	37,86	
				Total			100,00	
	IGAC	Sin registros	1,00	>90cm		117,373,13	83,64	
			2,50	90-60cm		6,170,52	4,39	
			5,00	60-45cm		6,723,36	4,79	
			Total			100,00		
Erosión	Comité de Cafeteros	Textura del suelo	5	Arenas finas	N. A.	61708,98	43,99	
			7,5	Limos y arcillas de alta plasticidad	N. A.	39151,32	27,90	
			10	Limos y arcillas de baja plasticidad	N. A.	39,453,5	28,11	
				Total			100,00	
	IGAC	Sin registros	1,00	Fragmentos de roca	N. A.	5,168,36	3,71	
			5,00	Arenas Finas	N. A.	108,748,17	78,02	
			Total			100,00		
			10,00	Limos y arcillas de baja plasticidad	N. A.	25,460,79	18,27	
			Total			100,00		

Tabla 2. Extensión de las diferentes categorías de fragilidad potencial para los fenómenos de erosión y de deslizamiento en el municipio de Ibagué

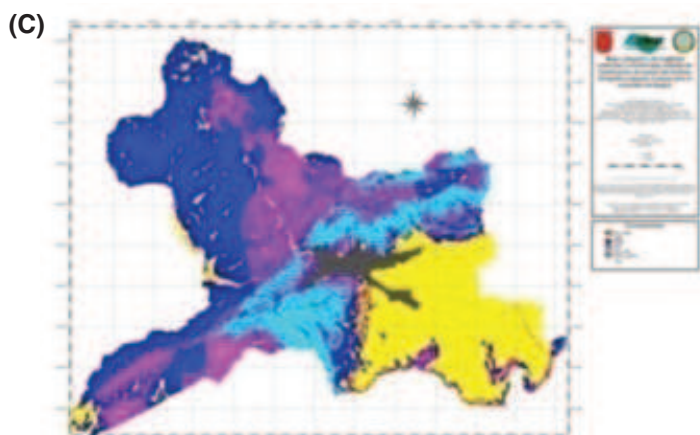
Categoría de fragilidad potencial	Fenómeno	Sistema de clasificación de suelos	Área (ha)	%
<i>Muy bajo</i>			60518,79	43,12
<i>Bajo</i>			30922,61	22,03
<i>Medio</i>	Deslizamiento	Comité de Cafeteros de Colombia	25830,55	18,41
<i>Alto</i>			20354,33	14,50
<i>Muy alto</i>			2673,56	1,91
<i>Muy bajo</i>			28112,64	20,03
<i>Bajo</i>	Deslizamiento	Instituto Geográfico Agustín Codazzi	20963,93	14,94
<i>Medio</i>			28081,01	20,01
<i>Alto</i>			36918,79	26,31
<i>Muy alto</i>			24807,95	17,68
<i>Muy bajo</i>	Erosión	Comité de Cafeteros de Colombia	0	0
<i>Bajo</i>			32265,78	22,99
<i>Medio</i>			35467,85	25,27
<i>Alto</i>			48363,80	34,46
<i>Muy alto</i>			24202,40	17,25
<i>Muy bajo</i>	Erosión	Instituto Geográfico Agustín Codazzi	810,610	0,58
<i>Bajo</i>			42422,85	30,23
<i>Medio</i>			52,240,26	37,22
<i>Alto</i>			27038,40	19,27
<i>Muy alto</i>			16823,67	11,99



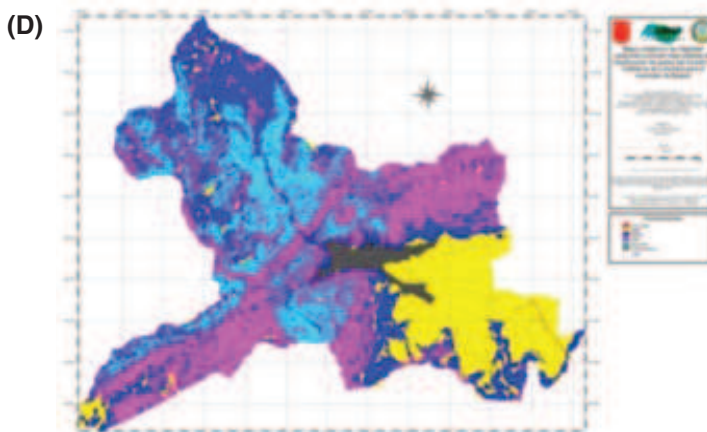
(A) Fragilidad potencial ante deslizamientos según el sistema de clasificación de suelos del IGAC.



(B) Fragilidad potencial ante deslizamientos según el sistema de clasificación de suelos del Comité de Cafeteros de Colombia.



(C) Fragilidad potencial ante erosión según el sistema de clasificación de suelos del IGAC.



(D) Fragilidad potencial ante erosión según el sistema de clasificación de suelos del Comité de Cafeteros de Colombia.

Figura 2. Mapas de fragilidad potencial a erosión y deslizamientos para los suelos del municipio de Ibagué, departamento del Tolima. Fuente: Los autores con base en Alcaldía de Ibagué (2000).

Conclusiones

Los resultados de fragilidad potencial obtenidos con la metodología Alarcón y Gayoso son, hasta la fecha, los únicos elaborados para el municipio de Ibagué; se los puede considerar información guía en los fenómenos, pues determina las áreas potenciales de ocurrencia de los eventos de erosión y deslizamientos.

La metodología es una alternativa de fácil implementación y relativo bajo costo, por la poca información cartográfica que requiere; además, brinda una importante herramienta de planificación y uso del territorio, ya que al establecer zonas de alta fragilidad pueden preverse medidas de acción y de mitigación.

El municipio de Ibagué cuenta con información ambiental elaborada desde diferentes instituciones de los órdenes nacional y local. No obstante, la información no está homologada por todas las instituciones, y obedece a razones misionales y criterios técnicos de cada una de ellas, como, por ejemplo, la de ofrecer información básica ambiental, la del manejo agrícola, la explotación minera, la ordenación del territorio o el manejo de riesgos a la población humana. Tal descoordinación no facilita tener un estado del arte apropiado a la modernidad de los sistemas de información geográfica, y dificulta el manejo de la temporalidad y la precisión de la información.

Esta investigación superó dichas dificultades apoyándose en información, técnicas y tecnologías digitales, y así hizo posible un resultado plausible para el municipio, en el sentido de establecer un sistema de fragilidad potencial ante la erosión y los deslizamientos para el municipio de Ibagué.

Los sistemas de clasificación de suelos empleados (del Comité de Cafeteros y del IGAC) presentan diferencias en cuanto a la distribución espacial y la extensión de sus respectivos valores edáficos, lo cual se manifiesta en resultados diferentes con la misma metodología; dicha variación se debe al origen de las clasificaciones: el del Comité de Cafeteros, con base en el material parental, y el del IGAC, con base en el Soil Survey Staff.

Según el sistema de clasificación de suelos planteado por el Comité de Cafeteros de Colombia, la fragilidad potencial del municipio de Ibagué muestra un mayor riesgo ante al fenómeno erosivo, debido a que las texturas del suelo en este sistema de clasificación poseen mayores extensiones en los valores de riesgo más elevados (texturas de limos y arcillas de baja y alta plasticidad); tal comportamiento, similar para la profundidad efectiva del sustrato, incrementa el riesgo ante la pérdida del sustrato, según la metodología Alarcón y Gayoso.

La localización de las áreas con mayor riesgo ante fenómenos erosivos en el contexto municipal, según la metodología Alarcón y Gayoso, se presenta en las montañas graníticas circundantes del perímetro urbano y en el cañón del río Combeima, y ello corrobora lo establecido por las entidades ambientales municipales.

Las áreas más propensas a eventos de deslizamientos según los resultados obtenidos para el municipio de Ibagué se localizan en el cañón del río Combeima y las montañas graníticas circundantes del perímetro urbano, lo cual es congruente con los eventos históricos registrados por Ingeominas.

El proyecto permite actualizar conocimientos sobre los riesgos de los fenómenos de erosión y deslizamientos en el municipio de Ibagué; además, ofrece una herramienta de fácil consulta y aplicación, que establece áreas de riesgo potencial sobre las que se pueden orientar normas de manejo para la prevención del deslizamiento y la erosión de los suelos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencias, Tecnología e Innovación (Colciencias), y a la Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad del Tolima. Al ingeniero forestal Rosvén Arévalo Fuentes, decano de la Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad del Tolima. Al ingeniero forestal Luis Alfredo Lozano Botache, profesor de la Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad del Tolima y tutor designado al presente proyecto. A la ingeniera agrónoma Nidia Esperanza Ortiz, profesora del LabSig de la Universidad del Tolima. Al ingeniero forestal Harold Caicedo, profesor de la Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad del Tolima. Al ingeniero forestal Simón Harrison Bustos, de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, de la Gobernación del Tolima. A Juan José Rivera V., director (e) de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), sede Nataima, y a lader Correa Arango, investigador del área de suelos. A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), sede Nataima. A los habitantes de las veredas Puerto Perú (cañón del Combeima), El Secreto (cañón del Combeima), Cataima (corregimiento de Tapias), Cataimita (corregimiento de Tapias), El Ingenio (corregimiento de Tapias), y Los Túneles (Boquerón). Así mismo, a los habitantes del corregimiento de Buenos Aires (Ibagué) y Gualanday, en el municipio de Coello. Finalmente, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), sede Nataima, y al Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica LabSig, de la Universidad del Tolima.

Literatura citada

1. Alcaldía de Ibagué. 2000. Plan de ordenamiento territorial para el municipio de Ibagué. Departamento administrativo de planeación. Alcaldía de Ibagué. Ibagué. Colombia.
2. Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. Soil quality for crop production and ecosystem health, Volumen (25). (pp. 1-19). Amsterdam, Netherlands, Elsevier Science Publishers.

- 3.** Comité de Cafeteros de Colombia. 1973. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Tolima. Bogotá D.C. Colombia.
- 4.** Corporación Autónoma Regional Del Tolima (CORTO-LIMA). 2006. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Coello. Fase de diagnóstico. Ibagué. Colombia.
- 5.** Corporación Autónoma Regional Del Tolima (CORTO-LIMA). 2006. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Totare. Fase de diagnóstico. Ibagué. Colombia.
- 6.** Corporación Autónoma Regional Del Tolima (CORTO-LIMA). 2010. Agenda ambiental municipal de Ibagué. (pp. 66-70). Ibagué. Colombia.
- 7.** Corporación Autónoma Regional Del Tolima (CORTO-LIMA) Y Universidad del Tolima. 2007. Plan general de ordenación forestal para el departamento del Tolima. Fase de diagnóstico. Ibagué. Colombia.
- 8.** Departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA). 2010. Claves para la taxonomía de suelos. Onceava edición. Servicio de conservación de recursos naturales. (pp. 1-37).
- 9.** Fajardo Puerta. Néstor Fidel. 2006. Uso y manejo de suelos. Primera edición. Universidad del Tolima. Ibagué. Colombia.
- 10.** Forsythe, Warren. 1985. Física de suelos: Manual de laboratorio. Segunda edición. Serie de libros y materiales educativos IICA. (pp. 171-179). San José. Costa Rica.
- 11.** Gayoso, Jorge y Alarcón, Diego. 1999. Guía de conservación de suelos forestales. Universidad Austral de Chile. Proyecto certificación del manejo forestal en las regiones Octava, Decima y Duodécima. Valdivia, Chile.
- 12.** Instituto Brasileiro de Geología y Estadística (IBGE). 2007. Manual técnico de pedología. Segunda edición. Manuales técnicos en Geociencias.
- 13.** Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEO-MINAS. 1982. Geología y prospección geoquímica de las planchas 244 (Ibagué) y 263 (Ortega) departamento del Tolima. (pp. 1-27). Bogotá D.C, Colombia.
- 14.** Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEO-MINAS. 1999. Planchas geológicas 244 (Ibagué). 243 (Armenia). 245 (Girardot) y 225 (Nevado del Ruíz). Escala 1:100.000 Bogotá D.C. Colombia.
- 15.** Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEO-MINAS. 2004. Proyecto compilación y levantamiento de la información geomecánica. Tomo V. Bogotá D.C. Colombia.
- 16.** Instituto Geográfico Agustín Codazzi. IGAC (1990). Propiedades físicas de los suelos. Subdirección Agrícola. (pp. 390-428). Bogotá D.C. Colombia.
- 17.** Instituto Geográfico Agustín Codazzi. IGAC (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento del Tolima. (pp. 29-103). Bogotá D.C. Colombia.
- 18.** IUSS grupo de trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. (pp. 1-11). Primera actualización. Serie de Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos (103). FAO. Roma. Italia.
- 19.** Mendivelso. D.; Rubiano. S.; Malagón C. D y López L. D. 2004. Erosión de tierras colombianas. Departamento Administrativo Nacional De Estadística – DANE. Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC. Subdirección de agrología. (pp. 1-20). Bogotá D. C. Colombia.
- 20.** Pérez, G.S. 2001. Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica. Tesis de especialista. Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander sede Bogotá. Bogotá D. C. Colombia.
- 21.** Ramírez, F.A. 2006. Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del departamento de Caldas. Tesis de pregrado. Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.
- 22.** Renard, K. Foster, G. Weesies, D. & D, Yoser. 1997. Predicting soil erosion by water "A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation". Agriculture research, USDA. Agriculture Handbook, 703. (pp. 1-9).
- 23.** Rivera, P. J.H. 1999. Procesos físicos de erosión y su dinámica; prevención y control en suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. En M, Karl. Saman, M. y Restrepo, José (Ed), Conservación de suelos y aguas en la zona andina. (pp. 47-61). Cali, Colombia.
- 24.** Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F. y Mcsweeney, K. 1995. How farmers assess soil health and quality. Soil Water Conservation, 50 (Suppl 1). (pp. 229-236).
- 25.** Ruiz A. y Calderon, Y. 2004. Proyecto compilación y levantamiento de la información geomecánica. Zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá. Hidrología y clima de la Sabana, Volumen IV. Instituto Colombiano de Geología y Minería-INGEOMINAS, Servicio Geológico.
- 26.** Velasco Molina, Hugo A. 1990. Uso y manejo del suelo. (pp. 123-157). Editorial Limusa. México D.F. México.
- 27.** Wischmeier, W y D, Smith. 1978. Predictin rainfall erosion losses. Agriculture Handbook (USDA-SCS), 537. (pp. 1-58).

Recibido: 1 de marzo de 2012.
Aceptado: 20 de abril de 2012.