

ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA DE SUELO EN LA REGIÓN CAFETERA DE CALDAS

Luz Adriana Lince Salazar*; Andrés Felipe Castro Quintero**;
Wadi Andrey Castaño**; Fabio Alexis Torres Angarita**

LINCES, L.A.; CASTRO Q., A.F.; CASTRO Q., W.A.; TORRESA., F.A. Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en suelo en la región cafetera de Caldas. Revista Cenicafé 68 (1): 73-82. 2017

Las unidades de terreno propensas a una actividad de deslizamiento en un área determinada pueden ser zonificadas mediante mapas de susceptibilidad o de igual potencial de inestabilidad. Con el objetivo de zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona cafetera del Departamento de Caldas se realizó una investigación utilizando el método determinístico, cuyo análisis se fundamentó en la predicción de los movimientos en masa a partir del álgebra de mapas temáticos de geomorfología, litología, formaciones superficiales y estructuras tectónicas. La información base fue obtenida a partir del estudio de zonificación de suelos de la zona cafetera de Caldas y de la interpretación de imágenes RapidEye. Se encontró que el 36,34% del área presenta susceptibilidad muy alta, 14,33% alta, 23,61% media, 21,76% baja y 3,96% nula; de éstos, los grados alto y muy alto se asociaron con las cenizas volcánicas y su contacto con rocas de baja permeabilidad, los materiales litológicos y la alta actividad tectónica. Además, se presentan los sistemas de información geográfica como una herramienta útil, rápida y confiable para la zonificación de susceptibilidades a procesos naturales.

Palabras clave: Cenizas volcánicas, Factores detonantes, Litología, Sistema de información geografía.

ZONING OF SUSCEPTIBILITY BY SOIL MASS MOVEMENTS IN THE COFFEE REGION OF CALDAS

Land units prone to slip activity in a given area can be zoned by susceptibility maps or maps with the same potential for instability. With the objective of zoning susceptibility by mass movements in the coffee region of the Department of Caldas, a research was carried out using the deterministic method, whose analysis was based on the prediction of mass movements from the algebra of thematic geomorphological maps, lithology, surface formations, and tectonic structures. The base information was obtained from the study of soil zoning of the coffee region of Caldas and the interpretation of RapidEye images. The results show that 36.34% of the area has very high susceptibility, 14.33% high susceptibility, 23.61% average susceptibility, 21.76% low susceptibility, and 3.96% null susceptibility. High and very high degrees were associated with volcanic ash and its contact with low permeability rocks, lithological materials and high tectonic activity. In addition, geographic information systems are considered as a useful, fast and reliable tool for the zoning of susceptibilities to natural processes.

Keywords: Volcanic ash, detonating factors, Lithography, Geography information system.

* Investigador Científico I, Disciplina de suelos

** Asistente de Investigación, Disciplina de Suelos Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia

Los movimientos en masa han sido definidos como los movimientos de una masa de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera (5, 17, 26, 22 y 7). Soeters y Van Westen (20) afirmaron que el origen de estos procesos es el debilitamiento progresivo de las propiedades mecánicas de los materiales litosféricos que conforman las vertientes, a causa de actividades humanas y procesos naturales, tales como meteorización y levantamientos tectónicos. Dai y Lee (10) y Ferrer (12) indican que las variables que controlan la ocurrencia y distribución de los movimientos en masa se dividen en cuasiestáticas o condicionantes y dinámicas; las cuasiestáticas incluyen las propiedades de los suelos, la geología y la topografía, mientras que entre las dinámicas se encuentran la precipitación y los sismos. La distribución espacial de los movimientos en masa está dada por las variables cuasiestáticas y el patrón temporal es definido por las dinámicas (10).

La zonificación por susceptibilidad a movimientos en masa o de igual potencial de inestabilidad tiene como objetivo zonificar las unidades de terreno que están propensas a una similar actividad de deslizamientos. De acuerdo con Varnes (24), la susceptibilidad es la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir con base en las condiciones locales del terreno, y la zonificación es la división de un territorio en áreas homogéneas dado el grado de susceptibilidad y amenaza para cada una. Aristizábal *et al.* (3) proponen tres modelos metodológicos para la evaluación de la susceptibilidad: (i) Heurístico que se basa en los procesos geomorfológicos, (ii) Estadístico, basado en predicciones estadísticas por combinación de variables generadoras de deslizamientos en el pasado y (iii) Determinístico, el cual se basa en modelos de estabilidad.

En cuanto a la clasificación de susceptibilidad, Cruden y Varnes (6) indican que ésta varía dependiendo del cambio de los factores detonantes, es decir, las zonas **no susceptibles** a movimientos en masa son aquellas donde a pesar de sufrir exorbitantes cambios en sus factores detonantes no se dan los movimientos en masa; las zonas con **susceptibilidad baja** corresponden a los sitios en los que en presencia de fuertes cambios en factores detonantes ocurrirán muy pocos movimientos en masa; la **susceptibilidad media** ocurre en zonas que con un cambio moderado en factores detonantes sucederán algunos movimientos en masa; la **susceptibilidad alta** se presenta en áreas en que bajo un leve cambio en factores detonantes ocurrirá un número considerable de movimientos en masa y la **susceptibilidad muy alta** se presenta en aquellas zonas en las que inclusive bajo un débil cambio en los factores detonantes ocurrirá un gran número de movimientos en masa.

La susceptibilidad y la amenaza se diferencian en que en la primera se zonifica el terreno de acuerdo a la favorabilidad a fallar, y en la segunda se muestra la probabilidad de ocurrencia en áreas susceptibles a movimientos en masa e involucra la frecuencia, la magnitud, el tiempo y el espacio de los factores detonantes (4).

Para el departamento de Caldas, en el estado del arte se encuentran diferentes aportes. Naranjo y Ríos (18) delimitaron la influencia a los riesgos geológicos para la parte central del departamento, incluyendo el riesgo a movimientos en masa; Suárez (21) realizó un estudio de erosión en la cuenca hidrográfica del río Chamberí; Vásquez (25) efectuó un análisis de estabilidad de taludes en la carretera que de la población de Salamina conduce hacia Aranzazu; Cubillos y Salazar (8) zonificaron las amenazas

geológicas en el municipio de Filadelfia, teniendo en cuenta las unidades litológicas y geomorfológicas; el Instituto Nacional de Investigaciones Geológico – Mineras (15) presentó el mapa de amenazas geológicas a escala 1:250.000; Van Westen *et al.* (23) realizaron una aproximación determinística a la amenaza por deslizamientos, empleando sistemas de información geográfica, en un estudio de caso para Manizales; Arango (2) relacionó la lluvia con los deslizamientos y zonificó geotécnicamente un sector de la ciudad de Manizales; Lince y Orozco (16) presentaron la zonificación de la susceptibilidad a los movimientos en masa en los municipios de Filadelfia y Aranzazu, basada en la predicción de movimientos en masa mediante variables cuasiestáticas generadoras de deslizamientos en el pasado y el uso actual del suelo;

y Chardon (9) evaluó la vulnerabilidad a amenazas naturales en zonas urbanas de Manizales. Dado que para la región cafetera del departamento de Caldas no se dispone de reportes a escala 1:100.000 que muestren la susceptibilidad a los movimientos en masa, se realizó un estudio cuyo objetivo fue zonificar la susceptibilidad a movimientos en masa para dicha región.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó para la región cafetera del departamento de Caldas, ubicado entre 05°46'51" – 04°48'20" latitud Norte, y 74°38'01" – 75°55'45" longitud Oeste, en los flancos Oriental y Occidental de las cordilleras Occidental y Central, respectivamente (Figura 1).

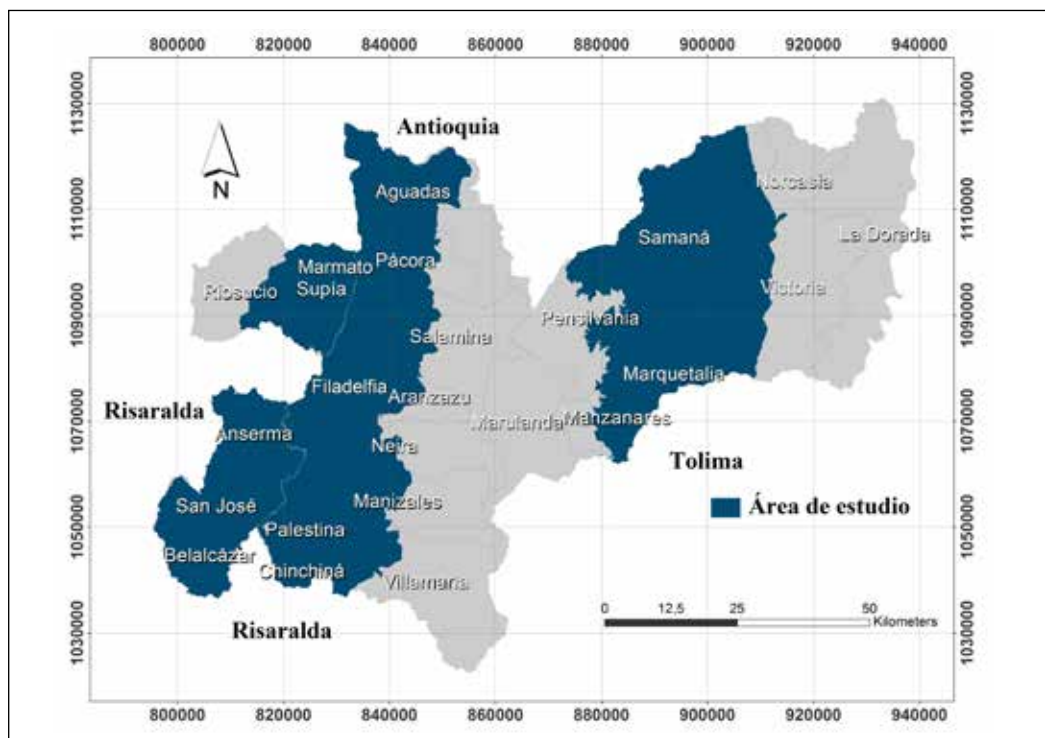


Figura 1. Ubicación de la región con potencial cafetero (área de estudio) en el departamento de Caldas.

El método empleado fue el determinístico, cuyo análisis se fundamentó en la predicción de movimientos en masa (generación de un mapa de susceptibilidad), a partir de información geomorfológica, litológica, estructuras tectónicas y formaciones superficiales, consideradas como propiedades cuasiestáticas generadoras de deslizamientos.

La información para construir los mapas temáticos de geomorfología, litología, estructuras tectónicas y formaciones superficiales, fue obtenida a partir del estudio de zonificación de suelos de la zona cafetera de Caldas, realizado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia a escala 1:100.000 del año 1982 y de la interpretación de imágenes RapidEye, logradas en los años 2010 – 2011, con una resolución espacial de 7 m, resolución espectral de cinco bandas y radiométrica de 16 bites.

La clasificación de los mapas temáticos se realizó teniendo en cuenta los valores de peso propuestos por Lince y Orozco (16), para los casos en los que el material parental tiene afinidad olivínica, el valor de peso empleado fue de 15 (mayor valor de peso para litología) debido a que dichos materiales son los más susceptibles al intemperismo (Tabla 1); además se excluyó el mapa temático de inclinación del terreno, debido a que dicho parámetro se tuvo en cuenta en la clasificación geomorfológica.

El mapa de susceptibilidad total se clasificó teniendo en cuenta los rangos ponderados propuestos por Lince y Orozco (16), de tal forma que la susceptibilidad de aquellas zonas cuya suma de mapas temáticos (SMT) fue: i) ≤ 20 , presentan **susceptibilidad nula**, es decir, que con exorbitantes cambios en los factores detonantes, no se darán deslizamientos; ii) >20 SMT ≤ 30 , **baja**, con fuertes cambios en

Tabla 1. Valores de peso para determinar la susceptibilidad a los movimientos en masa (16).

| Propiedad | Componente | Valor de peso | Susceptibilidad |
|------------------------|---|---------------|-----------------|
| Litología | Aglomerados | 5 | Baja |
| | Conglomerados, cuarzodioritas, cherts | 8 | Baja |
| | Granito | 9 | Media |
| | Andesita, gabro, pórfidos | 10 | Media |
| | Areniscas, monzonita | 12 | Alta |
| | Anfibolitas, gneis | 13 | Alta |
| | Basaltos olivínicos, esquistos, serpentinitas | 15 | Muy alta |
| Formación superficial | Cenizas volcánicas | 20 | Muy alta |
| | Coluvión | 9 | Media |
| | Saprolito | 2 | Baja |
| Geomorfología | Colinas | 5 | Baja |
| | Antiguas terrazas | 7 | Media |
| | Coluviones | 10 | Media |
| | Vertientes con cimas redondeadas | 8 | Media |
| | Vertientes colinadas | 12 | Alta |
| | Vertientes erosionadas y lomeríos | 15 | Muy alta |
| Estructuras tectónicas | Falla geológica | 10 | Muy alta |
| | Lineamiento geológico | 5 | Alta |

los factores detonantes ocurrirán muy pocos deslizamientos; iii) $>30 \text{ SMT} \leq 40$, *media*, con un cambio moderado en los factores detonantes acontecerán algunos deslizamientos; iv) $>40 \text{ SMT} \leq 45$, *alta*, con un leve cambio en factores detonantes sucederá un número considerable de deslizamientos; v) >45 , *muy alta*, bajo el débil cambio en los factores detonantes ocurrirá un gran número de deslizamientos. Tanto la edición temática como la extracción de áreas y el álgebra de mapas se realizaron con el software ArcGis 10.2. 2013.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cuanto a la susceptibilidad atribuida a la litología, el 69,33% del área presentó valores de susceptibilidad muy alta, 20,21% alta, 8,04% media y 2,42% baja (Figura 2). Las razones por las cuales más del 89,54% de la zona muestra litológicamente susceptibilidad alta a muy alta, se debe a la abundancia de materiales de composición básica y ultrabásica (Figura 2), que por su naturaleza química

presentan poca resistencia a los procesos de meteorización y a cuerpos metamórficos de dinámica regional, que por ser foliados aumentan la susceptibilidad, ya que determinan planos preferenciales de deslizamiento (16). El 10,46% correspondiente a susceptibilidad media y baja, posiblemente debido a la naturaleza ácida e intermedia de los materiales y a la resistencia al intemperismo, como es el caso del granito, la cuarzodiorita, la andesita y los depósitos conglomeráticos y de areniscas, eventualmente provenientes de terrazas aluviales precuaternarias. Procesos similares a éste fueron descritos por Roa (19) para una localidad en Venezuela.

La susceptibilidad generada por las formaciones superficiales, fue alta en 73,06% del área, media en 2,21% y baja en 24,74%. La susceptibilidad alta fue atribuida a que la mayor parte de la zona de estudio está cubierta por cenizas volcánicas (Figura 3), que reposan discordantemente sobre materiales de permeabilidad inferior, lo que genera una interrupción en el continuo hídrico, y con

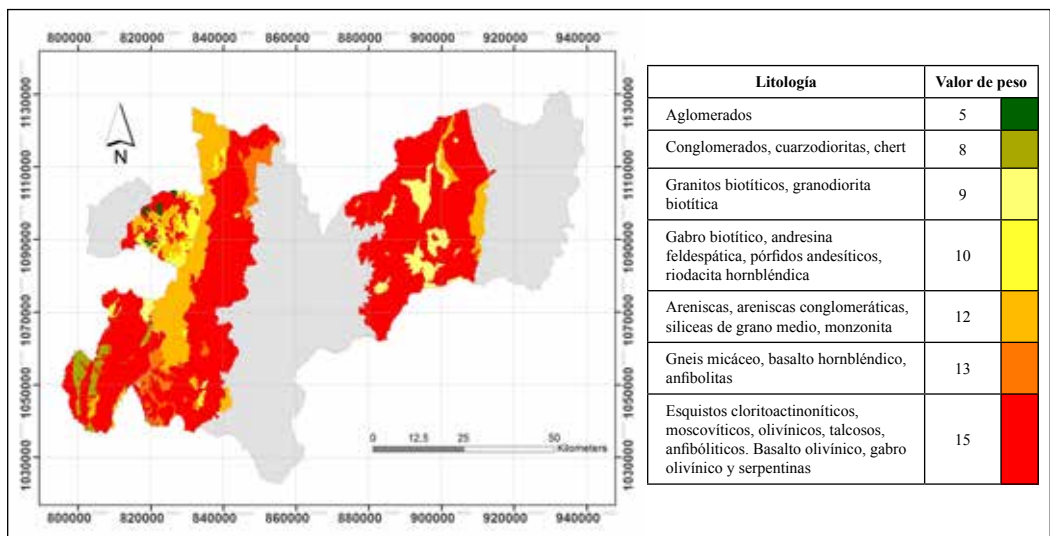


Figura 2. Mapa de valores de peso para unidades litológicas para la región con potencial cafetero de Caldas.

ello líneas preferenciales de flujo de agua que sirven de desplazamiento de material litosférico. Además, al proceso anterior puede sumarse la inestabilidad que crea el aumento en el peso en los cuerpos de ceniza debido a la alta saturación de agua. El 2,21% en susceptibilidad media, se atribuye a la caída de fragmentos de roca provenientes de coluviones y el 24,74% restante en susceptibilidad baja probablemente se deba a la poca resistencia del material litosférico meteorizado que no presenta coberturas cuaternarias. La anterior descripción relacionada con las cenizas volcánicas concuerda con lo propuesto por Guirales *et al.* (14) en el estudio de propiedades mecánicas de arcillas alófanas en Colombia ante procesos de saturación.

Desde la geomorfología el 56,43% de la zona presenta susceptibilidad muy alta, 0,99% alta, 11,01% media y 31,24% baja. El 57,42% con susceptibilidad muy alta y alta se debe a que el desplazamiento de masas es favorecido por acción de la fuerza de gravedad en las altas pendientes. En el

42,58% perteneciente a susceptibilidad media y baja, el desplazamiento de masas no es favorecido por la acción de la gravedad ya que corresponden a zonas de baja inclinación y los procesos de infiltración son continuos en las cimas redondeadas. Cruden (7) y Duque (11), presentan resultados similares en cuanto a la relación de la inclinación de las laderas con la susceptibilidad a los movimientos en masa.

La susceptibilidad influenciada por tectonismo regional afecta el 23,16% del área y se asocia con el sistema de fallas de Romeral. El análisis del mosaico RapidEye, indicó que lo sugerido por Aguilar y Mendoza (1) de tomar un corredor de seguridad de 500 m a lado y lado de la falla, es insuficiente para delimitar el área de influencia tectónica del sistema de Romeral, ya que se apreciaron indicios de movimiento incluso hasta 5 km del eje central de la falla (Figura 5). La susceptibilidad en esta zona es alta, debido a que se trata de un sistema de falla inverso, el cual aumenta la probabilidad de ocurrencia

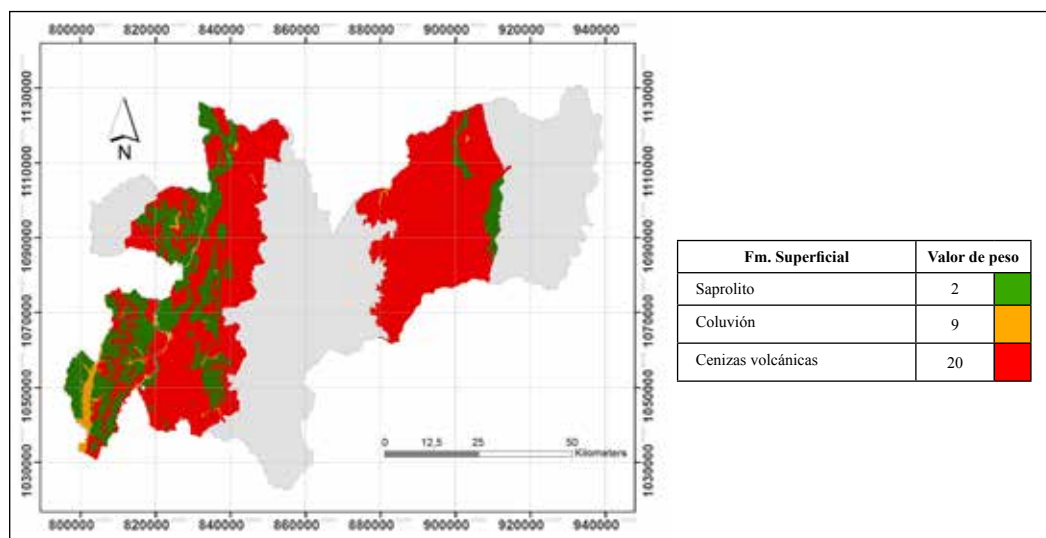


Figura 3. Mapa de valores de peso para formaciones superficiales para la región con potencial cafetero de Caldas.

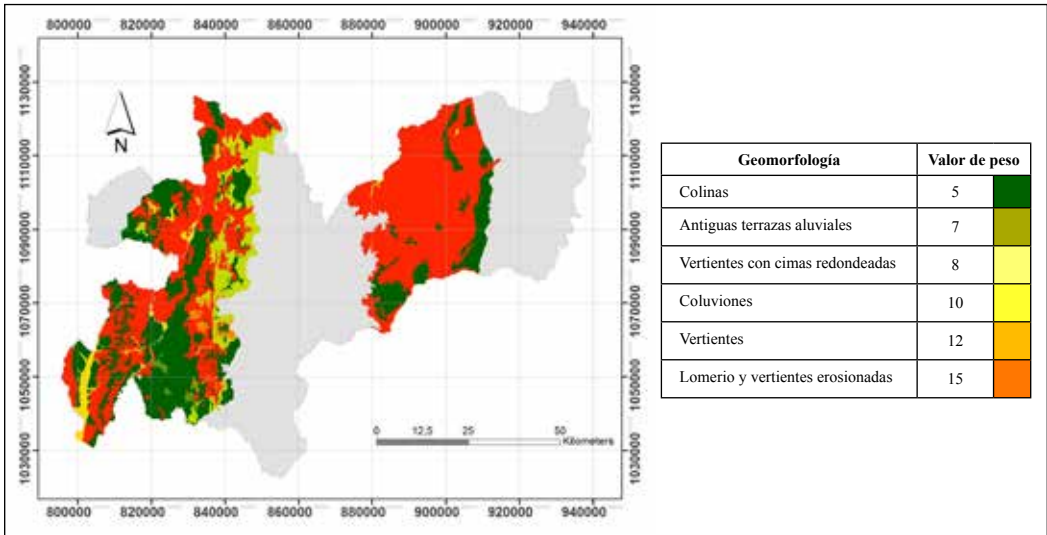


Figura 4. Mapa de valores de peso para la geomorfología en la región con potencial cafetero de Caldas.

de movimiento en masa tal como lo indican Naranjo y Ríos (18).

El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa indica que el 36,34% de la zona presenta susceptibilidad muy alta, 14,33% alta, 23,61% media, 21,76% baja y 3,96% nula. Las susceptibilidades muy alta y alta se encuentran en las regiones central y occidental del departamento, con influencia parcial o total en los municipios de Aguadas, Aranzazu, Pácora, Salamina, Chinchiná, Manizales, Neira, Palestina, Villamaría, Filadelfia, La Merced, Marmato, Riosucio, Supía, Anserma, Belalcázar, Risaralda, San José y Viterbo. La susceptibilidad de la región central se atribuye al sistema de fallas de Romeral y de la región oriental a la naturaleza de los materiales, la inclinación de la pendiente y longitud de las laderas.

Las regiones con susceptibilidad baja y media (45,37%) se encuentran al Occidente y afectan parcialmente los municipios de La Merced, Marmato, Riosucio, Supía, Anserma,

Belalcázar, Risaralda, San José y Viterbo; estas condiciones se atribuyen a la baja presencia de cenizas volcánicas y al predominio de topografía suave con cimas redondeadas. Finalmente, la región con susceptibilidad nula ocurre en tan solo el 3,96% de la zona, presentándose de forma dispersa en los bordes oriental y occidental; estas zonas coinciden con áreas de topografía plana y materiales litológicos donde predominan suelos ácidos en los cuales los reportes de ceniza volcánica son bajos.

En este estudio puede concluirse que la mayor parte de la región con potencial cafetero del departamento de Caldas presenta un grado alto de susceptibilidad a los movimientos en masa, el cual se asoció a la presencia de cenizas volcánicas en contacto con rocas de baja permeabilidad, la baja resistencia de las rocas al intemperismo y alta actividad tectónica.

Para la zona de estudio, la susceptibilidad en la región oriental se atribuye a la naturaleza

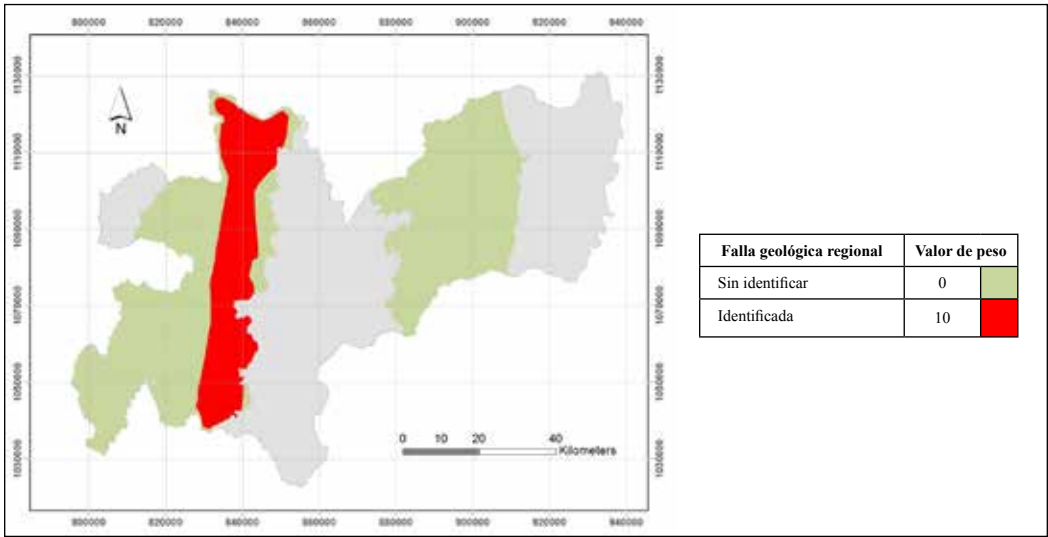


Figura 5. Mapa de valores de peso para influencia tectónica para la región con potencial cafetero de Caldas.

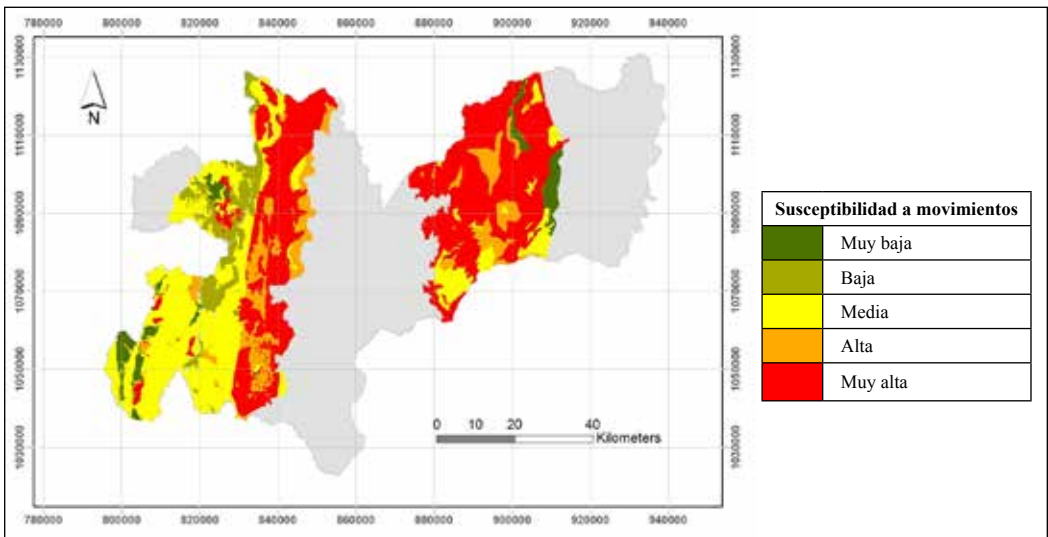


Figura 6. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para la región con potencial cafetero de Caldas.

de los materiales, la inclinación de la pendiente y la longitud de las laderas, mientras que en la región central, la susceptibilidad está fuertemente ligada al sistema de fallas de Romeral, por lo cual en la zona constantemente

se activan deslizamientos, que en gran parte involucran material rocoso.

Los sistemas de información geográfica se presentan como una herramienta útil,

rápida y confiable para la zonificación de susceptibilidades a procesos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Comité Departamental Cafeteros de Caldas, a la disciplina de Suelos de Cenicafé y a la ONG Solidaridad Andes.

LITERATURA CITADA

1. AGUILAR, V.; MENDOZA, D. Aproximación a un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa en el eje cafetero, Colombia. Cali : Universidad del Valle. Facultad de ingeniería topográfica, 2002. Tesis: Ingeniera topográfica.
2. ARANGO, J. Relaciones lluvia-deslizamiento y zonificación geotécnica de la comuna 2 de la ciudad de Manizales. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 2000. Tesis.
3. ARISTIZÁBAL, E.; MARTÍNEZ, H.; VÉLEZ, J.I. Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. Revista academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales 34(131):209-227. 2010.
4. ARISTIZÁBAL, E.; YOKOTA, S. Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de aburra. Dyna 73(149):5-16. 2006.
5. BRABB, E.E. Innovative approaches to landslide hazard mapping. Toronto : Proceed. IV Int. Symp. Landslides, 1984.
6. CRUDEN, D.M.; VARNES, D.J. Landslide types and processes. p. 36-75. En: Landslides: Investigation and mitigations. Washington : Transportation research board, 1996. 675 p.
7. CRUDEN, D.M. A simple definition of a landslide. Bulletin of the international association of engineering geology 43(1):27-29. 1991.
8. CUBILLOS, V.; SALAZAR J. Zonificación de amenazas geológicas en el municipio de Filadelfia (Caldas). Manizales : Universidad de Caldas, 1992.
9. CHARDON, A.C. Un enfoque geográfico de la vulnerabilidad en zonas urbanas expuestas a amenazas naturales: El ejemplo andino de Manizales Colombia. Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2002.
10. DAI, F.C.; LEE, C.F. Frequency volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. Engineering geology 59(3/4):253-266. 2001.
11. DUQUE, E.G. Manual de geología para ingenieros. [En línea]. Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2003. Disponible en internet: <http://www.galeon.com/manualgeo>.
12. FERRER, O.C. Un enfoque metodológico para la evaluación de la estabilidad relativa de los terrenos en la conurbación Valera-Trujillo/Andes Venezolanos): La ciudad de Trujillo y sus alrededores como caso especial de estudio. Mérida : ULA : Instituto de geografía, 1984.
13. GRISALES, A.; ÁLVAREZ, J.O.; BERNAL, E.; CABALLERO, A. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Caldas. Manizales : COESAGRO : CENICAFÉ, 1982. 256 p.
14. GUIRALES, Y.B.; BRAND, M.B.; ÁNGEL, A.M. Variación de las propiedades mecánicas de arcillas alófanas en Colombia al variar el grado de saturación. EIA 10(20):173-181. 2013.
15. INGEOMINAS. Mapa geológico generalizado del departamento de Caldas: Escala 1:250.000. Manizales : El Instituto, 1993.
16. LINCE S., L.A.; OROZCO C., A.M. Estudio de susceptibilidad por movimientos en masa y caracterización geotécnica de los materiales en el área de influencia de la conducción del acueducto de Filadelfia. Manizales : Universidad de Caldas. Facultad de ciencias exactas y naturales. 2001. 191 p. Tesis: Geóloga.
17. MEDINA, J. Fenómenos geodinámicos: Estudio y medidas de tratamiento. Lima : ITGD, 1991. 87 p.
18. NARANJO, J.L.; RÍOS, P.A. Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. Universidad de Caldas 10(13). 1989.
19. ROA, J.G. Aproximación al mapa de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos de la ciudad de Trujillo, Venezuela. Agora 9(2).
20. SOETERS, R.; WESTEN, C.J. VAN. Slope instability recognition, analysis and zonation. p. 129-177. En:

- TURNER, A.K.; SCHUSTER, R.L. Landslides investigation and mitigation. Washington : National academy, 1996.
21. SUÁREZ, F. Estudio semidetallado de erosión en la cuenca hidrográfica del río Chambery. Cali : Corporación autónoma regional del Cauca, 1990. 63 p.
22. SUÁREZ, J. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga : UIS, 1998. 548 p.
23. WESTEN, C.J. VAN; TERLIEN, M.T.J. An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS: A case study from Manizales (Colombia). *Earth surface processes and landforms* 21(9):853-868. 1996.
24. VARNES, D.J. Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. Paris : UNESCO, 1984. 64 p.
25. VÁSQUEZ, L. Estudio geológico ambiental de la parte sw de Salamina salida hacia Aranzazu y San Félix. Manizales : Universidad de Caldas. Facultad de geología y minas, 1991. Tesis: Geóloga.
26. VILLOTA, H. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras. Bogotá : IGAC, 1991.