



Evaluación de susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa y uso de sistemas de información geográfica

Evaluation of susceptibility to mass wasting phenomena and use of geographical information systems for data processing

Avaliação da suscetibilidade de fenômenos de remoção de massa e utilização de sistemas de informação geográfica para o processamento de dados

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Soto Monroy, J. A. y Rojas Gamba, N. I. (2015). Evaluación de susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa y uso de sistemas de información geográfica. *Ingenio Magno*, 6(2), 22-38.

Javier Alcides Soto-Monroy

Facultad de Ingeniería,
Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica
y Amenazas Geoambientales (GIISAG),
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia
javialcides.soto@uptc.edu.co

Néstor Iván Rojas-Gamba

Facultad de Ingeniería Civil, Ambiental, Civil y
Básicas en Investigación (ACBI), Universidad
Santo Tomás, seccional Tunja
nestor.rojas@usantoto.edu.co

Fechas de recepción: 13 de Abril de 2015

Fecha de aprobación: 8 de Marzo de 2015

Resumen

La evaluación y zonificación de la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa (FRM) en Colombia cada vez se hace más importante debido al crecimiento humano que han tenido las principales ciudades. Como lo muestra el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), entre 1993 y 2005 Tunja pasó de tener 107.807 habitantes a contar con 152.419, con un incremento de 41,4%. Debido a lo anterior, se están ocupando lugares que anteriormente eran utilizados en actividades de agricultura, pastoreo, arborizaciones, zonas de erosión, etc. En esta investigación se utiliza la propuesta metodológica de Jiménez (2009) y la simulación de redes neuronales artificiales, integrados con el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para el procesamiento de datos y presentación de mapas. Se realizó la consulta de información existente relacionada con sondeos geotécnicos, zonificación geotécnica, estudios de erosión y flujo, caracterización geomecánica de materiales, comportamiento de suelos, y ello se complementó con recorridos de campo e identificación y caracterización de procesos erosivos y de inestabilidad. Para procesar la información se dividió el área de estudio en zonas de 50 m de lado; cada zona es caracterizada con las variables necesarias para emplear las metodologías (geología, erosión, usos del suelo, etc.), y posteriormente se crea una base de datos, los cuales son procesados mediante el uso de SIG, para obtener los mapas de susceptibilidad.

Palabras clave: deslizamientos, fenómenos de remoción en masa, sistemas de información geográfica, Susceptibilidad.

Abstract

The evaluation and zoning of the susceptibility to Mass Wasting Phenomena (MWP) in Colombia is becoming more and more important due to the human growth that major cities have experienced, leading to the use of areas not considered suitable for human settlement. Among the natural processes that can occur in an area, MWPs have a higher chance of occurrence due to their direct relationship with changes in subsoil humidity, topographical variation, precipitation, geological formations, soil use and anthropic activities.

As shown by the Administrative Department of National Statistics (DANE), between 1993 and 2005 Tunja went from having a population of 107,807 to one of 152,419 with an increase of 1.4%. Due to this, areas are beginning to be used which were previously used for activities of agriculture, shepherding, reforestation and that exhibit erosion. In this study the Ramírez and Gonzales (1989) methodology and the Omar Jiménez (2009) methodological proposal were used, integrated with the geographical information systems SIG for data processing and plan presentation. The necessary information in each methodology, was obtained by dividing the study area into a net with square components with 50m sides; this size is sufficient for the considered level of detail. Each cell is characterized with all variables (geology, erosion, etc.), so that a matrix is obtained with dimensions $M_a \times M_b$, where M_a is the number of cells (3623) and M_b is the number of studied variables.

Keywords: Landslides, Mass Wasting Phenomena, Geographic Information Systems, Susceptibility

Resumo

A avaliação e o zoneamento de suscetibilidade por fenômenos de remoção de massa (FRM) na Colômbia está se tornando cada vez mais importante devido ao crescimento humano que temo corrido nas grandes cidades, levando

a habitação de áreas consideradas impróprias para assentamentos humanos. Dentro dos processos naturais que podem ocorrer em uma zona, os FRM apresentam maiores probabilidades de ocorrência pela relação direta com as mudanças de umidade do subsolo, variação topográfica, precipitação, geomorfomas, usos do solo e actividades antrópicas. Como mostrado pelo Departamento Administrativo Nacional de Estatística (DANE), entre 1993 e 2005, Tunja passou de 107.807 para 152.419 habitantes com um aumento de 1,4%. Foram ocupados lugares que eram anteriormente utilizados nas actividades de agricultura, de pastagem, arborização e que apresentam erosão. Na pesquisa foi utilizada a metodología de Ramírez e Gonzales (1989), integrados com o uso de sistemas de informação geográfica SIG para o processamento de dados e apresentação de planos. A informação necessária em cada metodologia, obteve-se dividindo a área de estudo em uma malha com elementos quadrados de 50m de lado; este tamanho é apropriado para o nível de detalhe considerado (escala regional). Cada célula é caracterizada com todas as variáveis (geología, erosão, etc), de maneira tal que obtenha-se uma matriz de dimensão $M_a \times M_b$, aonde M_a é o número de células (3623) e M_b é o número de variáveis estudadas.

Palavras Chaves: deslizamentos, fenómenos de remoção de massa, sistemas de informação geográfica, susceptibilidade.

1. Introducción

En la mayoría de las ciudades de Colombia se han desarrollado diferentes estudios de evaluación y zonificación de la susceptibilidad por el fenómeno de remoción en masa (FRM). La aplicación de las diferentes metodologías existentes para evaluar la susceptibilidad depende de las condiciones de la zona de estudio y de la información disponible, que en muchas ocasiones no es la apropiada. En Tunja los FRM se pueden presentar con mayor probabilidad hacia los cerros orientales y occidentales, donde las pendientes son altas. Allí se ha modificado el uso del subsuelo, existen procesos geológicos y geomorfológicos y se han ejecutado diferentes actividades antrópicas, que, sumadas a factores ambientales como el régimen de precipitación, cambian las condiciones de estabilidad de las laderas.

Por este motivo es necesaria la zonificación del área de estudio mediante la aplicación de la propuesta metodológica de Jiménez (2009) y el uso de redes

neuronales artificiales, con el fin de establecer los niveles de susceptibilidad. Ello permitirá el procesamiento y manejo de la información obtenida en campo, de la secundaria existente y la representación gráfica de sistemas de información geográfica (SIG).

2. Generalidades y caracterización del área de estudio

El área de estudio se ubica en la parte urbana de Tunja; comprende el sector conocido como la Glorieta, hasta el límite urbano al noreste (salida al municipio de Paipa), y de oriente a occidente entre la vía a Bucaramanga y la variante vial de la ciudad. La zona tiene un área de 868 ha, que corresponde al 13,6% del área total del municipio, y su perímetro es de 14.474 m. En la figura 1 se presenta la localización de la zona de estudio.

A continuación se presenta un resumen de las principales características de la estratigrafía, geología estructural, geomorfología y sismicidad de Tunja. Esa información es útil para la aplicación de las metodologías. Las

principales formaciones identificadas según el estudio de *Zonificación geotécnica de la ciudad* (Ramírez, 1990) son las siguientes:

- *Formación Tiltá (TQt)*. Consiste en arcillas abigarradas, blancas, verdes y grises, dispuestas en forma subhorizontal.
- *Formación Bogotá (Tpb)*. La parte inferior de la formación presenta areniscas friables de color amarillo rojizo y cuarzosas de grano medio-grueso con matriz arcillosa; la parte media son arcillolitas y limolitas, y el nivel superior son areniscas friables amarillas y blancas.
- *Formación Cacho (Tpc)*. Está compuesta por areniscas cuarzosas, de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio en la parte superior y grueso en los niveles inferiores.

Respecto a los depósitos que se presentan en Tunja, Cáceres (1999) señala los siguientes:

- *Cuaternario aluvial (Qal)*. Está compuesto de grava y gránulos de arena blanca de grano fino, y de arena verdosa compacta en una matriz arcillosa.

- *Cuaternario lacustre (Ql)*. Arcillas plásticas, grisáceas y blancas, con intercalaciones de diatomitas, ligeramente inclinadas como si estuviera estratificada.
- *Cuaternario fluvio-lacustre (Qfl)*. Materiales no consolidados de espesor variable, debido a la variación de la intensidad de las corrientes hídricas que los depositaron. Está compuesto de alternancias de arenas y arcillas de color gris y café.
- *Coluviales (Qc)*. Se forman a partir de bloques de arena desprendidos de la roca competente.

A. Sinclinal de Tunja

Está ubicado en medio de los anticlinales de Arcabuco y Toca, separados unos 38 km. La estructura es de tipo asimétrico; especialmente hacia el norte de la zona periclinal se encuentra afectado por un sistema de fallas transversales, que han dislocado sus flancos, modificando los buzamientos y desplazando las rocas aflorantes (Bayona y Amaya, 2004).

B. Fallas

En Tunja se presentan dos tipos de falla: inversas y de rumbo (longitudinales y transversales a la estructura), las cuales afectan el sinclinal de diversos modos y en diferentes lugares. La mayoría de ellas corresponden con la orientación normal de la estructura. La denominación que se da a cada una de ellas se hace teniendo en cuenta el nombre de la región donde exhiben con mayor claridad sus características (Bautista y Flores, 2006). En la figura 2 se presentan el plano geológico de la zona de estudio y las fallas más influyentes.

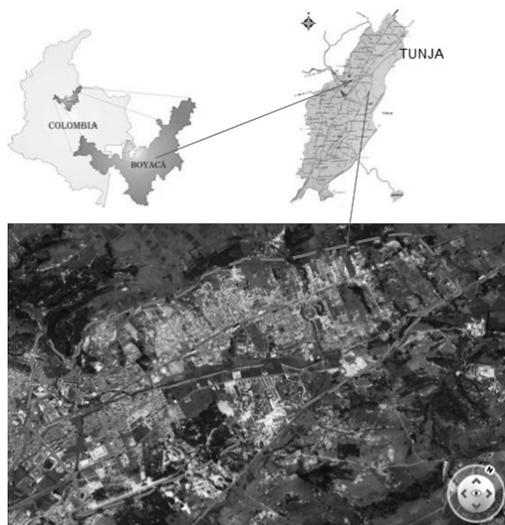


Figura 1. Localización general del municipio de Tunja dentro de la geografía nacional; ubicación de la zona de estudio

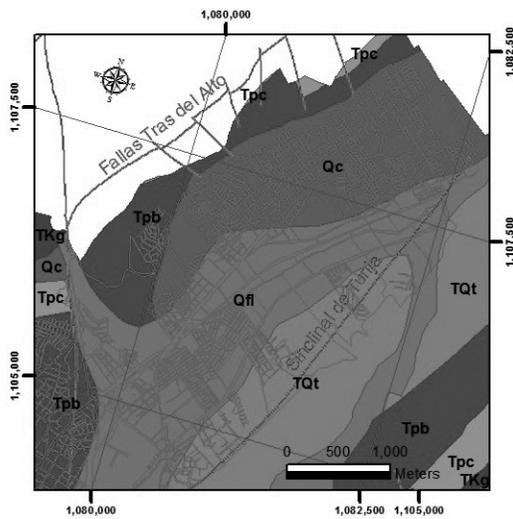


Figura 2. Plano geológico de Tunja con sus fallas

Fuente: Cáceres (1999).

Principales fallas:

- *Fallas tras del alto.* Es inversa y paralela al rumbo de las formaciones; su eje corresponde con un contacto entre la formación Guaduas y Cacho, en una longitud de 9,5 km. Afecta el flanco occidental del sinclinal y se halla cortada por fallas transversales de carácter local.
- *Falla en asís.* Es una falla de desplazamiento del rumbo, de trazado transversal a la dirección de la estructura de rumbo, levemente ortogonal a la falla del alto, afectando a la formación Tpb. Se le atribuye la complejidad tectónica del flanco occidental.
- *Falla de Tunja o central.* Es una falla de rumbo; corta ambos flancos del sinclinal en forma transversal a este. Su desplazamiento direccional corta y desplaza los flancos, a una distancia alrededor de 500 m.

C. Modelo geomorfológico de Tunja

Las unidades geomorfológicas se basan en el sistema de clasificación fisiográfica del terreno (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac], 1992). Las siguientes zonas son la primera aproximación:

- *Zona I.* Presenta pendientes altas, litológicamente conformada por materiales muy competentes y duros.
- *Zona II.* Una geofoma de pendiente media a baja litológicamente. Conformada por intercalaciones de rocas duras y blandas, materiales arcillosos con niveles arenosos que proporcionan una morfología de moderada a suave, con variación de pendiente entre el 11 y el 25%.
- *Zona III.* Se presenta sobre el valle con el eje del sinclinal y sobre los cauces del río Chicamocha, la quebrada la Vega y la quebrada la Cascada.

Respecto a la morfografía, el sector de estudio presenta zonas verdes (pastos) en los sectores bajos, donde se encuentra el depósito fluvio-lacustre. En los flancos del sinclinal se presentan afloramientos de la formación Tpb y TQt.

Por su parte, en la morfodinámica, los procesos denudativos existentes son producidos por los agentes atmosféricos sobre los materiales expuestos, en su mayoría en los flancos. Los procesos observados generalmente son de erosión laminar, en surcos y cárcavas, los cuales son favorecidos por la composición de los materiales (areno-arcilloso).

D. Análisis de sismicidad

De acuerdo con el *Reglamento colombiano de construcción sismorresistente*, o NSR-10, (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), Tunja se encuentra en una región con tectónica compleja, por su cercanía a las fallas del borde llanero; sin embargo, localmente no presenta fallas importantes (Guacaneme, 2006). La zona presenta una amenaza sísmica media, con una aceleración del terreno de 0,20, la cual tiene una probabilidad de excedencia de 475 años.

Se ejecutó un análisis de los sismos registrados desde 1993 hasta 2012 por la Red Sismológica

Nacional de Colombia, en un radio de 100 km, el cual es recomendable para la evaluación del parámetro de sismología. Del análisis se logró establecer que el máximo evento sísmico presentado entre 1993 y 2012 tuvo lugar en Páez en 1995, con una magnitud de 6.6, correspondiente a una clasificación de intensidad Mercalli tipo VIII, que indica a un sismo destructivo con el colapso parcial de estructuras.

E. Procesos identificados en la zona de estudio

De los recorridos de campo se logran identificar los siguientes procesos relacionados con FRM:

- *Procesos antrópicos.* Para adecuar el terreno en la construcción de infraestructura, se lleva a cabo el retiro de la cobertura vegetal y descapote, seguidos de excavaciones para extracción de material, rellenos poco compactados de zonas bajas y cortes de taludes sin revegetalización. La figura 3 muestra uno de los sectores intervenidos por actividades antrópicas.
- *Taludes fuertemente inclinados y desprotegidos.* En el costado occidental y oriental de la zona se tienen taludes de diferente altura e inclinación en materiales de suelo y roca. Para los sitios donde prevalecen materiales de suelo, se puede observar que son de mediana resistencia, susceptibles a fenómenos erosivos; en su mayoría son arcillosos y arenosos. La figura 4 muestra el aspecto de un talud de alta pendiente.

También se tienen taludes rocosos generados en la construcción de vías y viviendas. Allí se observa la estratificación, la composición, las discontinuidades y la orientación. Se componen de arcillolitas de color gris, violeta y rojo, con niveles de arenisca arcillosa. La figura 5 muestra afloramientos de arcillas y areniscas.

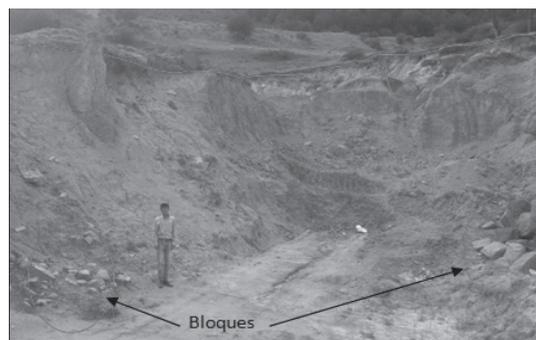


Figura 3. Zona de excavaciones en material fino arcilloso y granular “bloques”, donde se expone los materiales a procesos erosivos



Figura 4. Taludes de suelo de composición arcillosa con evidente erosión laminar y en surcos

- *Variación de pendiente del terreno.* La zona presenta una gran variación de pendientes; la mayor parte presenta pendientes entre 2 y 7°. En la parte más alta llega a variar entre 12 y 25°. La figura 6 muestra la variación de pendientes en la zona.
- *Deslizamientos.* Como parte de los FRM, se presentan deslizamientos de tipo rotacional, que se localizan en la parte alta cerca de cárcavas. En la figura 7 se logra evidenciar un deslizamiento con un escarpe de unos 2 m de altura, 60 m de largo y de 10 m de ancho.
- *Cárcavas.* En las zonas de media y alta pendiente se tiene gran variedad de cárcavas formadas en

los sitios donde confluyen aguas de escorrentía, que generalmente son en suelos arcillosos de consistencia media. En la figura 8 se evidencia

la cárcava más extensa de la zona de estudio, la cual tiene hasta 300 m de longitud, 95 m de ancho y unos 10 m de profundidad en la parte más alta.



Figura 5. Formación Bogotá, intercalaciones de arcillolitas y areniscas



Figura 7. Deslizamiento de tipo rotacional cubierto por pastizales



Figura 6. Diversidad de pendientes topográficas en la zona de estudio



Figura 8. Aspecto de las cárcavas en la zona de estudio

3. Metodologías y descripción del trabajo

4. Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por FRM (Jiménez, 2009)

En la tabla 1 se presentan de manera general los siete parámetros que incluye esta metodología. Los factores que se deben evaluar se explican a continuación.

Tabla 1. Parámetros de evaluación de zonas homogéneas inestables

Parámetro	Símbolo	Valor máximo
a. Roca		
Material	b. Intermedio M	42
c. Suelo		
Relieve	R	42
Hipsometría de las cuencas	H	35
Erosión	E	42
Vegetación	V	32
Sismicidad	S	45
Evidencia de inestabilidad	F	42

Fuente: Jiménez (2009).

De material. Este parámetro incluye lo siguiente: a) roca: se relaciona la génesis del material, textura, su orientación y resistencia a compresión, además de su condición de fracturamiento; b) suelo: se reconocen dos tipos de suelo de acuerdo con su génesis, como suelo residual y suelo transportado; c) material intermedio: aquel que retiene más del 70% en el tamiz 4; se realiza un análisis de la relación entre la génesis, la estabilidad de la matriz, la textura del material y la influencia de las estructuras.

Relieve. Se evalúa a partir de la pendiente y forma de la ladera (convexa, cóncava, etc.).

Hipsometría y morfometría de la cuenca o microcuenca. Se relaciona la topografía del terreno a partir de la pendiente media de la cuenca, la que permite hacer

un paralelo con la velocidad del flujo, con resultados satisfactorios y más fáciles de manejar; además relaciona la anterior variable con la densidad de drenaje y el estado hipsométrico de la cuenca.

Sismicidad. Se tienen en cuenta los parámetros dados por la normatividad vigente NSR-10. Para evaluarlo, se debe conocer la clasificación del perfil de suelo, que se relaciona con la zona de amenaza sísmica. De esta manera es posible estimar el valor de aceleración horizontal.

Evidencias de inestabilidad. Analiza el porcentaje de área afectada (0-10%, 10-30%, 30-60% y 60%) por las evidencias de FRM (activo, suspendido, inactivo y reactivo).

Erosión. Partiendo de que la erosión es el arrastre de partículas, encontramos la siguiente subdivisión: erosión hídrica (superficial, subsuperficial, subterránea), erosión eólica y sin erosión.

Vegetación. Se relaciona la vegetación, el uso del suelo, el clima, las zonas de vida, la temperatura y la precipitación media, para poder utilizar el diagrama para la clasificación de zonas de vida o formaciones del mundo de L. R. Holdridge (IGAC, 1995) (figura 9). La evaluación se hace con base en la relación de los datos que se obtienen del diagrama y los usos de suelo encontrados en la zona.

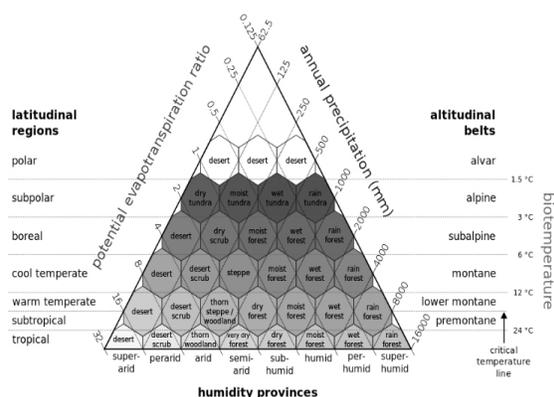


Figura 9. Diagrama para la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales del mundo, según Holdridge

Fuente: IGAC (1995).

Zonificación de la susceptibilidad. La evaluación consiste en la sumatoria de los siete parámetros evaluados, los cuales se ubican y califican como se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Intervalos de evaluación para susceptibilidad por FRM metodología propuesta

Categoría	Intervalo	Susceptibilidad
I	< 100	Muy baja
II	100-135	Baja
III	135-165	Moderada
IV	165-200	Media
V	200-230	Alta
VI	> 230	Muy alta

Fuente: Jiménez (2009).

A. Simulación de FRM mediante redes neuronales artificiales (RNA)

Las redes neuronales artificiales (RNA) constituyen una herramienta útil que ha sido aplicada en diversos campos del conocimiento. Existen diferentes ejemplos de la aplicación de las RNA en ingeniería para mapear relaciones no lineales (Herrera, Cañón y Leal, 2013). Su propósito es encontrar la relación funcional entre los factores predisponentes (geología, pendiente, usos del suelo, etc.) y la probabilidad de ocurrencia del movimiento en masa (Martínez *et al.*, 2006). Ello se hace mediante un proceso de aprendizaje en el que se presentan datos de entrenamiento al sistema neuronal, y por medio de iteraciones se mejoran las conexiones entre neuronas hasta lograr un error mínimo en el modelo, es decir, que los datos de entrada sean similares a los de salida.

Existen tres tipos de unidades en un sistema neuronal: entradas, salidas y ocultas (Alegre, 2003). Las unidades de entrada reciben señales desde el entorno; las de salida envían la señal fuera de la red; las ocultas son

aquellas cuyas entradas y salidas se encuentran dentro del sistema. Los pasos utilizados en la metodología, de acuerdo con la Universidad Nacional de Colombia (2009), se describen a continuación.

Recopilación de información de factores predisponentes, detonantes y movimientos en masa. Consiste en recopilar toda la información disponible para el municipio, relacionada con geología, geomorfología, usos del suelo, topografía, pendiente, erosión, etc., a partir de los mapas suministrados por la Alcaldía de Tunja, planes de ordenamiento territorial y otros estudios específicos. Por otra parte, se compiló información de campo mediante recorridos de las zonas erosivas, con cárcavas y deslizamientos.

Creación de una base de datos para la modelación con las RNA. Para poder manejar la información base para el modelo neuronal, se tomó el área total de estudio y se dividió en una malla con celdas cuadradas de 50 m de lado. Cada celda considerada es caracterizada con todas las variables existentes; al final del proceso se obtiene una matriz de dimensión $Ma \times Mb$, donde Ma es el número total de celdas del área estudiada, que para este caso es de 3623; Mb , por su parte, es el número de atributos de las variables consideradas (geología, pendiente, erosión, etc.), que resulta ser de 19. Para la generación de esta matriz se utiliza una hoja de cálculo tipo Excel y posteriormente un *software* con un lenguaje de programación propio, como el Matlab (Moreno, 2009).

Creación, entrenamiento y validación del modelo neuronal:

- Creación: este procedimiento comenzó con el procesamiento de la base de datos para verificar su normalidad, es decir, que todas las variables de entrada de la base de datos presentaran valores numéricos binarios [0 1]. De esta manera, un valor de 0 indica que en la celda se tiene la ausencia de

la variable que se desea evaluar, y un valor de 1 representa su existencia.

- Entrenamiento: después de establecer la matriz binaria, se procede con la etapa de entrenamiento de la red neuronal, para lo cual se tomó el 43,50% de las celdas de trabajo; se conformó así una matriz de entrada de 1575 filas y 19 columnas. En esta etapa se le incluye una salida al modelo para que aprenda cuál es el resultado que se debería obtener según los datos de entrada. Para ello se generó una matriz de una columna por 1575 filas; allí se indica cuáles de las celdas no presentan deslizamientos, tras lo cual obtienen un valor 0, y cuáles, según las evidencias de campo (deslizamientos, cárcavas, erosión, etc.), toman un valor de 1. Posteriormente se crean varios modelos con diferentes arquitecturas (es decir, con diferentes capas ocultas y neuronas), épocas y funciones de transferencias, y enseguida se verifica el desempeño de cada modelo mediante el cálculo de sus errores de validación. El modelo que presente el menor error medio cuadrático (mse) y el mayor grado de correlación entre los datos de entrada y salida se considera adecuado para resolver el problema planteado, y sobre su arquitectura se realiza la validación con otros datos del área de estudio.
- Validación: posteriormente se realiza la validación del modelo estimado en el entrenamiento, para lo cual se tomaron 1047 datos correspondientes al 29% del total. Con la estructura de la red estimada y con los datos de validación se corre nuevamente el modelo.

Resultados. En los resultados se discuten la relación entre todas las variables involucradas y la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa. Con la información que se obtuvo de la RNA, el SIG produce un mapa de amenaza por movimientos en masa (Dowla y Rogers, 1996).

B. Sistemas de información geográfica aplicados a los métodos de susceptibilidad

Un SIG es un grupo de herramientas para recolectar, almacenar, recuperar y presentar datos en forma espacial (Burrough, 1986); incluye las siguientes funciones: entrada de información, salida/representación gráfica, gestión de la información espacial y funciones analíticas (Cartaya y Pacheco, 2008).

Toda implementación de un SIG para un estudio territorial comienza con la selección de la información necesaria para ingresar al sistema (Brignardello, 1997).

Para realizar un mapa de susceptibilidad de FRM mediante un SIG, es necesario seleccionar la unidad de terreno que se va a utilizar en el análisis. La unidad de terreno es la porción de una superficie del área que contiene una serie de condiciones del terreno que difieren de las unidades adyacentes. Para este caso, se utilizó la unidad de celda de una malla regular, que consiste en la división de la zona en unidades de tamaño regular (cuadradas), donde en cada celda se asigna un valor para un factor determinado.

Para el procesamiento de datos es conveniente utilizar un programa de sistemas de información geográfica que permita la inclusión de información descriptiva en la información espacial. A partir de la cartografía georreferenciada de los polígonos que representan cada celda analizada, se incluyó de forma sistemática la información contenida en hojas de cálculo, a manera de atributos de cada celda. Lo anterior permitió elaborar planos temáticos que describen claramente el comportamiento espacial de la susceptibilidad en la zona de estudio mediante simbologías.

5. Resultados

Después de obtener, analizar y procesar la información secundaria de la zona de estudio, se procede a realizar la zonificación de la susceptibilidad por los métodos

propuestos. Para la realización de la zonificación se tuvo en cuenta la información recolectada durante las primeras etapas del estudio y, a la vez, se sustentó sobre literatura encontrada recientemente. Se trabajó sobre una cartografía 1:10.000, con curvas de nivel cada 1 m, donde se incluye la parte predial de la zona de estudio. Con base en esta esta información se traslaparon los diferentes mapas para conocer la información de cada celda de trabajo, como es el mapa geológico, geomorfológico, de pendientes, zonas de vida, de uso del suelo, hidrológico, etc.

Adicionalmente, la información secundaria recopilada fue complementada con recorridos de campo, para la determinación de sitios influyentes en la zonificación.

1. Zonificación de la susceptibilidad de FRM en masa, método de Jiménez (2009)

La zona se dividió en elementos cuadrados de 50 m de lado. En total se consideraron 3623 celdas, a las cuales se les realizó la evaluación de cada uno de los parámetros, para finalmente realizar la clasificación de los niveles de susceptibilidad de FRM. En la tabla 4 se presentan los valores evaluados para 15 diferentes celdas de la zona de estudio.

Tabla 4. Clasificación de susceptibilidad por FRM, metodología Jiménez (2006)

Zona	Material	Relieve	Erosión	Hipsometría y morfometría	Vegetación	Sismicidad	Evidencias de inestabilidad	Calificación de estabilidad	Nivel de susceptibilidad
1	24	39	12	27	20	25	4	151	III
2	24	39	12	27	20	25	4	151	III
3	24	39	12	27	20	25	4	151	III
4	24	39	12	27	20	25	4	151	III
9	24	39	12	27	20	25	4	151	III
10	24	39	12	27	20	25	4	151	III
22	24	39	18	27	23	25	14	170	IV
23	24	39	18	27	23	25	14	170	IV
47	24	39	18	27	23	25	14	170	IV
48	24	39	18	27	23	25	14	170	IV
49	22	20	0	27	20	25	4	118	II
50	22	20	0	27	20	25	4	118	II
51	22	20	0	27	20	25	4	118	II
56	24	39	12	27	20	25	4	151	III
57	24	39	12	27	20	25	4	151	III

La evaluación arrojó cuatro zonas denominadas II (baja), III (moderada), IV (media) y V (alta). Del total de celdas, 1447 obtuvieron una categoría II, correspondiente a un área de 3617.50 m². La categoría III incluye 1977 celdas, para un área de 4837.50 m². La categoría IV incluye 154 celdas, para un área de 370.00 m². Finalmente, la categoría V incluye 45 celdas, para un área de 112.50 m².

La susceptibilidad V corresponde a zonas donde se presentan cárcavas, inestabilidades, materiales expuestos y fuertes pendientes. Los sectores de susceptibilidad III son aquellos donde se tienen focos de erosión, en su mayoría con materiales finos expuestos al ambiente. El nivel IV se presenta a media ladera, con pendientes entre el 7 y 25% y de uso residencial. El nivel II se presenta en su mayoría en zonas planas.

2. Zonificación de la susceptibilidad mediante redes neuronales artificiales

El programa utilizado para diseñar el modelo neuronal fue Matlab versión R2013a, que tiene un módulo

especializado de aplicación para RNA. En la tabla 5 se presenta la estructura de los datos para el entrenamiento del modelo.

Tabla 5. Estructura de la base de datos para el entrenamiento del modelo

Parámetro	Clase/celda	24	25	....	n
Geología	TQt	0	0	....	0
	Tpb	0	0	....	0
	Tcp	0	0	....	0
Relieve- pendiente (°)	Qfl	1	1	....	1
	0-3	1	1	....	1
	3-7	0	0	....	0
	7-12	0	0	....	0
Forma de la pendiente	12-25	0	0	....	0
	Cóncavo	0	0	....	0
	Valle	1	1	....	1
Erosión	Laminar	1	1	....	1
	Diferencial	0	0	....	0
	Cárcavas	0	0	....	0
Usos del suelo	Área urbana	0	0	....	0
	Área de bosques	0	0	....	0
	Área de pastos	1	1	....	1
	Área Agrícola	0	0	....	0
Geomorfología	Valle aluvial	1	1	....	1
	Colinas erosionables	0	0	....	0

Se realizaron varias corridas al modelo de las RNA, al cual se le varió la arquitectura de la red (número de capas ocultas y neuronas) y el número de sus épocas, es decir, cuántas veces el modelo repite el proceso de

iteración. Del proceso de entrenamiento se obtuvo que el error medio cuadrático (mse) para todas las corridas presenta valores entre 0,0202 y 0,0278, los cuales son bajos e indican que la red arroja salidas muy similares

a las esperadas. Esto significa también que la red ha aprendido y está lista para ser validada en el siguiente proceso. Igualmente se obtuvieron correlaciones altas, entre el 87,9 y 91,2%, que reflejan que los datos de entrada y salida son similares.

Después de realizar varios procesos de entrenamiento y analizar los resultados, la arquitectura adecuada para utilizarla en el proceso de validación debe tener dos capas ocultas de 50 y 30 neuronas y una capa de salida. En la figura 10 se presentan los resultados del modelo estimado durante el proceso de entrenamiento. En la figura 11, por su parte, se presenta la gráfica de regresión obtenida en el entrenamiento.

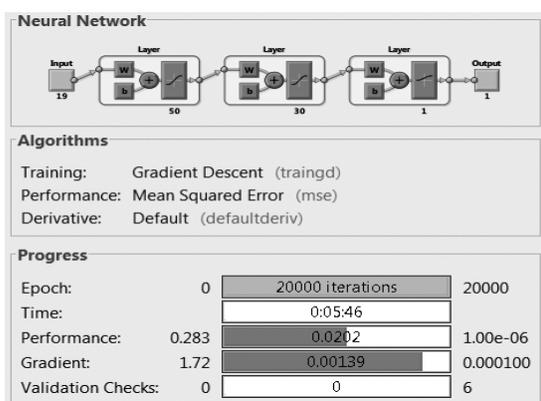


Figura 10. Estructura de entrenamiento y estimación del error medio cuadrático (mse)

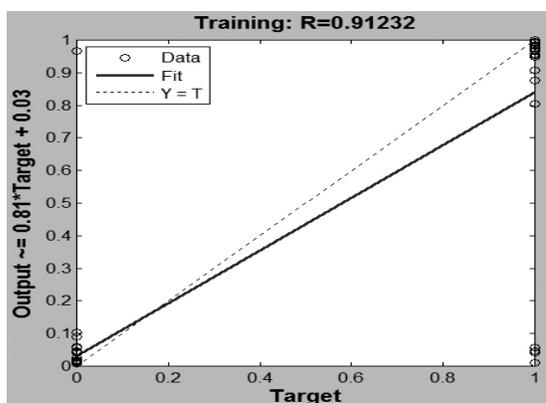


Figura 11. Gráfica de regresión del proceso de entrenamiento

Posteriormente se realiza la validación del modelo estimado en el entrenamiento, para lo cual se tomaron 1047 datos, correspondientes al 29% del total. Con la estructura de la red estimada en el paso anterior y con los datos de validación se corre nuevamente el modelo. Se obtiene así un error medio cuadrático de $mse = 0,322$, el cual resulta ser bajo e indica que la red está lista para estimar la susceptibilidad de la totalidad de los datos.

Para la estimación de la susceptibilidad se realiza la simulación del 100% de los datos de trabajo con la red determinada en los pasos anteriores. En este caso se genera la matriz de entrada para el modelo con todos los datos (red de 3623×19), y el modelo neuronal estima la matriz de salida (3623×1). De allí se determinan las zonas donde existe la posibilidad de ocurrencias de deslizamientos. Así, se establecieron los intervalos de equivalencia de salida de la red con los niveles de susceptibilidad (tabla 6).

Tabla 6. Estructura de la base de datos para el entrenamiento del modelo

Intervalo de salida de la red	Nivel de susceptibilidad
0,0-0,16666667	I: muy Baja
0,16666667-0.33333334	II: baja
0.33333334-0.50000001	III: moderada
0.50000001-0.66666668	IV: media
0.66666668-0.83333335	V: alta
0.83333335-1.0	VI: muy alta

Mediante las redes neuronales se determinó la cantidad de celdas correspondientes a cada nivel de susceptibilidad, como se muestra en la tabla 7. Se aprecia que la mayor cantidad del área de estudio presenta una

susceptibilidad muy baja, con un porcentaje del 90%, y muy alta, con el 8,5%.

Tabla 7. Estructura de la base de datos para el entrenamiento del modelo

Resultado de las redes neuronales	
Cantidad celdas	Nivel de Susceptibilidad
3289	I: muy baja
12	II: baja
0	III: moderada
4	IV: media
11	V: alta
307	VI: Muy Alta

En la figura 12 se presenta el mapa de susceptibilidad obtenido de la metodología de Jiménez (2009), mientras que en la figura 13 se presenta el obtenido con las RNA

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en cada una de las metodologías son confiables, debido a que cuentan con una base de revisión detallada de cada celda de trabajo, a partir de la información disponible. Además, se complementó con una evaluación geotécnica ejecutada en los recorridos de campo y de la diferente literatura relacionada.

La metodología de Jiménez (2009) establece cuatro niveles de susceptibilidad denominados II (baja), III (moderada), IV (media) y V (alta). El área con categoría II corresponde al 40% del total, en toda la zona central de topografía plana (pendiente entre el 0 y 3%), básicamente en el eje residencial de la ciudad. La zona de nivel III corresponde al 55%, en sectores de media ladera algo

erosionados y destinados a viviendas residenciales. El nivel IV corresponde al 0,05% del área donde se exhiben procesos de erosión en surcos y cárcavas, así como sitios intervenidos por actividades antrópicas intensas. Finalmente, el área de categoría V apenas es del 0,012% y corresponde a sectores de cárcavas con algunas zonas de explotación de material y zonas inestables en los costados de las cárcavas.

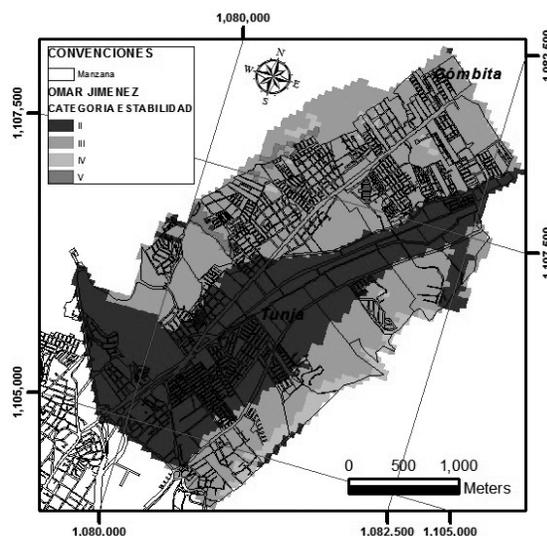


Figura 12. Mapa de susceptibilidad, metodología de Jimenez (2009)

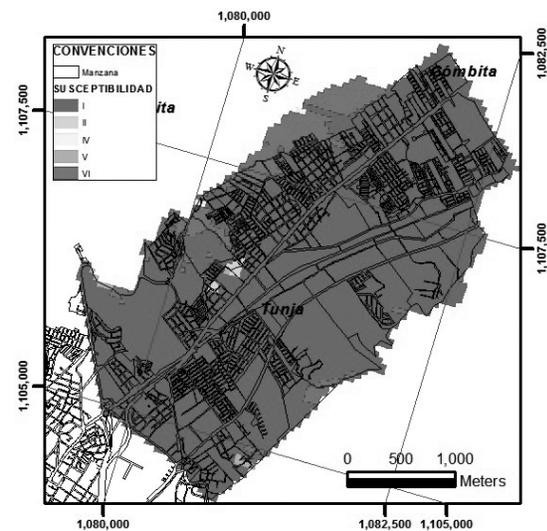


Figura 13. Mapa de susceptibilidad, metodología RNA

El uso de redes neuronales arrojó que la zona presenta en su gran mayoría un nivel muy bajo I de susceptibilidad, llegando a ocupar el 90,7% del área; el segundo nivel que ocupa más extensión es el nivel muy alto VI, con un 8,47 %. En general, la zona no presenta probabilidades de ser susceptibles a FRM, pero se debe tener cuidado con los sectores con un nivel muy alto, ya que estos se pueden expandir afectando zonas estables. El nivel bajo corresponde a 0,33%, el moderado al 0,3% y medio al 0,11%. Estas zonas corresponden a las partes de media ladera, de topografía ligeramente plana, con uso del suelo residencial y algunos sectores de pastoreo.

La construcción de la base de datos de entrada al modelo neuronal es una tarea que consume bastante tiempo y concentración. El gran número de elementos o celdas de trabajo evaluadas exige una alta capacidad computacional y disposición continua de los elementos del modelo.

La metodología que refleja la susceptibilidad más precisa que se ajusta a las condiciones de la zona es la de RNA, por cuanto tiene en cuenta la combinación aleatoria de todas las variables del modelo y no depende del criterio del evaluador que realiza la zonificación.

Referencias

Alegre, M. (2003). *Simulación de redes neuronales artificiales* (tesis de grado). Corrientes: Universidad Nacional del Nordeste.

Bautista, H. y Flores, R. (2006). *Estudio morfométrico y morfodinámico de los sistemas de cárcavas en la zona noroccidental de la ciudad de Tunja* (tesis de grado). Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Bayona, J. M. y Amaya, M. (2004). *Características de compresibilidad de suelos arcillosos del depósito fluvio lacustre de Tunja* (tesis de grado). Tunja: Universidad

Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Burrough, P. (1986). *Principles of geographical information, systems for land resources assessment*. 3.ed. Oxford, Clarendon Press.

Brignardello, L. (1997). Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica. *Revista de Geografía Norte Grande*, 24, 91-102.

Cáceres, L. (1999). *Erosión por flujo superficial y sub-superficial en los alrededores de la ciudad de Tunja* (tesis de maestría en Geotecnia). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Cartaya, S. y Pacheco, H. (2008). Metodología empleada para la zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en cuencas de drenaje del estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, 64(188), 162-164.

Dowla, F. y Rogers, L. (1996). *Solving problems in environmental engineering and geosciences with artificial neural networks*. Cambridge: MIT Press.

Guacaneme, J. (2006). Tunja: Zonificación de suelos en superficie de la ciudad de Tunja. *Épsilon*, 6, 34-40.

Herrera, E., Cañón, A. y Leal, J. (2013). Redes neuronales artificiales para representar la atenuación de la intensidad sísmica. *Ing. Univ. Bogotá*, 17(2): 277-292,

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (1995). *Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación distribución y uso*. Bogotá: Autor.

Jiménez, O. (2009). Metodología para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por fenómenos de

remoción en masa. *Revista de la Facultad de Ingeniería UPTC*, 19(28), 7-19.

Lee, S., Hyung, J., Min, K. y Sun, J. (2003). Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 1361-1376.

Martínez, E., Giraldo, A., Alarcón, E. y Zapata, J. (2006). Zonificación geotécnica del Valle de Aburrá usando redes neuronales artificiales. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). *Reglamento colombiano de construcciones sismorresistentes (NSR-10)*. Bogotá: Autor.

Moreno, A. (2009). *Desarrollo de una interfaz gráfica de redes neuronales usando Matlab*. Madrid: Universidad Carlos III.

Ramírez, O. (1990). *Zonificación Geotécnica de Tunja* (tesis de maestría en Geotecnia). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Universidad Nacional de Colombia (2009). *Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el valle de Aburrá*. Medellín: Autor.