

Metodología empleada para la zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en cuencas de drenaje del estado Vargas, Venezuela

Methodology used for the mass movements susceptibility zoning in drainage catchments of Vargas state, Venezuela

Scarlet Cartaya

scarletcartaya@gmail.com

Henry Pacheco

henrypacheco@gmail.com

Williams Méndez

williamsmendez@gmail.com

Universidad Pedagógica Experimental Libertador Instituto Pedagógico de Caracas

RESUMEN

El propósito de este trabajo es describir la metodología empleada en la zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en cuencas del estado Vargas. La metodología consistió en: elaboración de mapas digitales temáticos; tratamiento estadístico univariado para determinar la susceptibilidad específica de cada variable; procesamiento geo-estadístico para determinar cuantitativamente la relación de cada unidad de parámetro con respecto a los procesos de remoción en masa; elaboración del algoritmo de mapa para realizar el cruce de capas; y tratamiento estadístico multivariado para obtener el mapa de susceptibilidad final. Este procedimiento se ejecutó de manera experimental en la cuenca de la quebrada Curucutí, y como muestra piloto en las de las quebradas Piedra Azul, San Julián, San José de Galipán y Cerro Grande. En todos los casos los mayores pesos en orden decreciente lo obtuvieron las variables geología de superficie, geomorfología, pendiente del terreno y conflicto de uso.

Palabras clave: Zonificación; deslizamientos; susceptibilidad; cuenca de drenaje; Estado Vargas.

ABSTRACT

The purpose of this work is to describe the methodology used for the mass movements susceptibility zoning in drainage catchments of Vargas State. The methodology consisted in: drawing up of thematic digital maps; one-varied statistical processing for to determine the specific susceptibility of each variable; geo-statistical processing for to determine quantitatively the relationship between each parameter and mass movements; drawing up of map algorithm for to realize the cross of layers; and multi-varied statistical processing for to obtain the susceptibility map final. This method was carried out experimentally on the Curucutí Creek's drainage catchment, and as pilot sample on the drainage catchments of the Piedra Azul, San Julián, San José de Galipán y Cerro Grande creeks. In all cases, the biggest weights in decreasing order were obtained by the surface geology, geomorphology, terrain slope and use's conflict variables.

Key words: *Zoning; landslides; susceptibility; drainage catchment; Vargas State*

INTRODUCCIÓN

La cartografía automatizada y las operaciones con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se están convirtiendo en una herramienta importante en la mayoría de las actividades de investigación y producción. Sobre todo en el campo de la Geografía y las Geociencias, en las que los productos finales significan instrumentos valiosos para la toma de decisiones respecto a un mejor manejo y uso del espacio geográfico. En este sentido, los SIG representan plataformas tecnológicas que facilitan el manejo de amplia información concerniente a pequeñas áreas, así como a grandes territorios, de una manera más rápida, versátil y eficiente.

Se entiende por Sistema de Información Geográfica (SIG), a un sistema de información que es utilizado para ingresar, almacenar, recuperar, manipular, analizar y obtener datos geoespaciales, a fin de brindar apoyo en la toma de decisión. Los componentes claves de un SIG son un sistema de computación, datos espaciales y usuarios. Un sistema de computación para un SIG está compuesto de hardware, software y procedimientos

diseñados para manejar la captura de datos, procesamiento, análisis, modelado y visualización de información geoespacial (Murai, 1999). Sin embargo, recientemente pocos son los investigadores, en particular en Venezuela, que realmente han explotado la tecnología SIG en el análisis, evaluación y zonificación de procesos de remoción en masa por ejemplo, como en otras amenazas naturales (Lima y González, 2000).

La zonificación dentro de este proceso, es una división de la superficie terrestre en áreas que representan diferentes grados de susceptibilidad potencial o actual hacia la ocurrencia de procesos de remoción en masa u otros tipos de amenazas naturales. Investigadores de INGEOMINAS de Colombia, propusieron diferentes métodos para zonificar la susceptibilidad por procesos de remoción en masa en laderas, según el nivel de estudio, las escalas sugeridas para esos niveles y los factores que hay que considerar en una zonificación. De acuerdo como se sintetizan los factores o capas de información para obtener el mapa final de susceptibilidad, clasifican los métodos en: implícito, semi-implícito y explícitos. Este último se divide en: empírico, semi-analítico y analítico.

En esta investigación se trabajó con esta metodología, bajo una versión modificada y adaptada por los autores al caso venezolano del Estado Vargas. Se empleó el método explícito semi-analítico para asignar puntajes ponderados a las variables y categorías, y los análisis estadísticos univariado y multivariado para generar mapas de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa.

En el método explícito semi-analítico los factores se califican mediante el uso de puntajes ponderados y se combinan con ecuaciones matemáticas. La ponderación es dada por un especialista, quien con base en su experiencia y conocimiento del área bajo análisis, asigna valores a los componentes de un factor, para indicar algún grado de contribución a la estabilidad relativa del terreno. La suma de los puntajes de todos los factores da como resultado un mapa de valor numérico, los cuales se pueden dividir en rangos para definir zonas con distintos niveles de susceptibilidad relativa.

La técnica del análisis estadístico univariado se aplica en las áreas de las cuales se tienen muestras estadísticas representativas de los procesos de remoción en masa, de manera que se pueda obtener el mapa de distribución de éstos. Este mapa se combina con los factores intervinientes, como: geología de superficie, pendiente media del terreno, conflictos de uso y unidades geomorfológicas; y para cada clase de parámetros, se calcula la densidad de los procesos de remoción en masa y se les asigna un peso específico.

La técnica de análisis estadístico multivariado, se emplea para estudiar los factores pero dividiendo el área de estudio en unidades geomorfológicas. Para cada unidad se determina la presencia o ausencia de procesos de remoción en masa a fin de conformar una matriz, que luego se analiza para cada factor mediante regresiones múltiples.

Bajo estas consideraciones, es propósito de esta investigación adaptar la metodología propuesta por INGEOMINAS Colombia, para generar mapas de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en diferentes cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo El Ávila. Para ello, se trabajó con la cuenca de la quebrada Curucutí, que es un área experimental para el equipo de investigación, ya que en ella se han calculado además, alrededor de 50 parámetros morfométricos de su relieve y red de drenaje, se han estimado hidrogramas unitarios instantáneos geomorfológicos para determinar los caudales pico de crecientes para eventos extremos, así como aspectos relacionados con la percepción de los riesgos ambientales de los habitantes del área.

A su vez, se seleccionaron como cuencas pilotos para esta investigación, otras cuatro, correspondientes a las quebradas Piedra Azul y San Julián y a los ríos San José de Galipán y Cerro Grande; los criterios de selección empleados fueron: área de la cuenca, litología de superficie, pendiente del río principal, cobertura vegetal e intervención antrópica. Estas cuencas se localizan político-administrativamente en el Estado Vargas, las mismas sufrieron una serie de modificaciones por efecto de las extraordinarias precipitaciones que se produjeron en Diciembre de

1999, cuando se combinaron fenómenos meteorológicos y geológicos que intensificaron la actividad hidro-geomorfológica sobre la franja costera.

La intensidad y volumen de las precipitaciones sobresaturó el suelo y generó violentos movimientos en masa en las vertientes, desde las partes más altas de la zona occidental de la Serranía de El Ávila hasta la línea costera. La acentuada erosión generó aludes torrenciales de los tipos flujos de detritos y coladas de barro de gran fuerza expansiva, que se volcaron sobre los espacios que servían de asentamiento a la población, como consecuencia, se registraron grandes pérdidas humanas y materiales, quedando el estado en una situación de emergencia, que hasta ahora ha sido parcialmente superada.

Al no descartarse la probabilidad de ocurrencia de un evento similar al de 1999, se hace necesario generar información detallada de cada una de las cuencas de drenaje de la vertiente Norte del Macizo de El Ávila, y en especial lo concerniente a la zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa, de tal forma que los habitantes de la región en conjunto con las autoridades locales, tomen las medidas necesarias para prevenir desastres, conociendo cuáles son las áreas más propensas de ser activadas.

Para la síntesis y procesamiento de la información de las diferentes variables (geología de superficie, geomorfología, conflicto de uso y pendiente media del terreno), se utilizaron sistemas automatizados de análisis de datos espaciales como MapInfo, con el módulo Vertical Mapper, para trabajar altimetría (hipsometría, mapa de pendiente); ArcShell, para facilitar el ajuste y arreglo de las capas temáticas; y ArcView, para cruzar las capas temáticas y obtener los mapas de síntesis.

Área de estudio

Las cuencas de drenaje seleccionadas como experimental (cuenca de la quebrada Curucutí) y pilotos (cuencas de las quebradas Piedra Azul y San Julián y de los ríos San José de Galipán y Cerro Grande) para la aplicación

de la metodología propuesta en este trabajo, se localizan geográficamente en la Región Centro Norte del territorio venezolano, específicamente en el sector central del Estado Vargas, de cara al Mar Caribe y extendidas sobre la vertiente norte del Macizo de El Ávila (Figura 1).

Políticamente, estas cuencas se circunscriben a la jurisdicción del Municipio Vargas del Estado Vargas, limitando en conjunto, por el Norte con el Mar Caribe, por el Sur con la Fila de El Ávila y las cuencas de la vertiente sur de este macizo, por el Este con el extremo oriental de la Serranía de El Ávila, y por el Oeste con el Abra de Tacagua. Fisiográficamente, estas cuencas de drenaje forman parte de la provincia orográfica Cordillera de la Costa (Sistema Montañoso del Caribe) en su tramo central, emplazándose específicamente en el sector occidental de la vertiente norte de la Serranía o Macizo de El Ávila, por lo que gran parte de las superficies de éstas, pertenecen al Sistema de Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE), bajo la figura jurídica de Parque Nacional “El Ávila” (Figura 1).

Las características concernientes a cada una de las variables que conforman los respectivos medios físico, biológico y socio-económico de las cuencas consideradas en el estudio, se describen de manera sintética en el Cuadro 1.

MÉTODO

Se emplearon varias etapas de trabajo, esta fueron: (a) elaboración de mapas digitales temáticos, (b) tratamiento estadístico univariado para determinar la susceptibilidad específica de cada variable, (c) procesamiento geo-estadístico para determinar cuantitativamente la relación de cada unidad de parámetro con respecto a los procesos de remoción en masa, (d) elaboración del algoritmo de mapa para realizar el cruce de capas y (e) tratamiento estadístico multivariado para obtener el mapa de susceptibilidad final (Figuras 2 y 3).

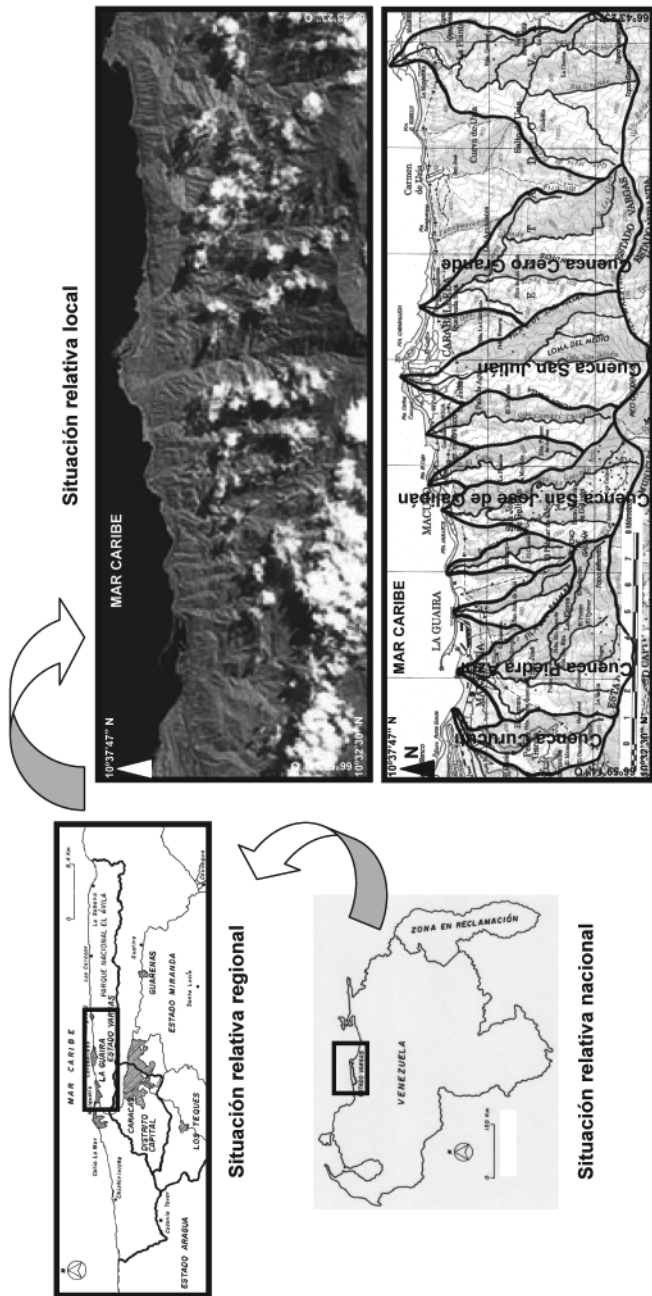


Figura 1. Localización de las cuencas de drenaje de drenaje experimental (cuenca de drenaje de la quebrada Curucuti) y pilotos (cuencas de drenaje de las quebradas Piedra Azul y San Julián y de los ríos San José de Galipán y Cerro Grande), estado Vargas, Venezuela. Base cartográfica tomada del mapa Caracas y alrededores (Mapa especial) a escala 1:100.000, del Instituto Geográfico de Venezuela "Simón Bolívar", 2003, Caracas; imagen del satélite SPOT-P, 1999.

Cuadro 1
 Características Físicas, Biológicas y Socio-Económicas de las Cuencas de Drenaje Experimental (Cuenca de Drenaje de la Quebrada Curucutí) y Pilotos (Cuencas de Drenaje de las Quebradas Piedra Azul y San Julián y de los Ríos San José de Galipán y Cerro Grande), Estado Vargas, Venezuela

Cuenca	Localización geo-astronómica				Jurisdicción político - territorial	Límites
	Coordenadas angulares		Coordenadas UTM			
	Norte	Oeste	N (m)	E (m)		
Q. Curucutí	10°33'08" 10°36'21"	66°57'35" 66°59'12"	1.167.200 1.173.170	720.300 723.230	Parroquias Carlos Soublette y Maiquetía	N: A. I. de Maiquetía "Simón Bolívar" y Mar Caribe; S: Fila de Pajarito y fila La Triguera; E: Cuenca de la Qda. Piedra Azul; O: Cuenca de la Qda. Las Pailas N: Puerto de La Guaira y Mar Caribe; S: Cuencas de las quebradas El Asno, Catuche y Cotiza; E: Cuencas de las quebradas Osorio y Cariaco y río San José de Galipán; O: Cuenca de la quebrada Curucutí
Q. Piedra Azul	10°32'44" 10°36'15"	66°54'15" 66°58'05"	1.166.488 1.173.000	722.355 729.300	Parroquia Maiquetía	N: Mar Caribe; S: Cuencas de las quebradas Anaico y Chacaito; E: Cuencas de las quebradas El Cojo y Camuri Chiquito; O: Cuencas de las quebradas La Alcantarilla, Cariaco y Piedra Azul
R. San José de Galipán	10°32'36" 10°36'33"	66°51'56" 66°54'20"	1.166.275 1.173.600	729.200 733.525	Parroquia Macuto	N: Mar Caribe; S: Cuencas de las quebradas Chacaito y Pajarito y río Tócome; E: Cuencas de la quebrada Seca y río Cerro Grande; O: Cuenca de la quebrada Camuri Chiquito
Q. San Julián	10°32'25" 10°37'21"	66°49'09" 66°51'37"	1.165.975 1.175.100	734.163 738.575	Parroquia Caraballeda	N: Mar Caribe; S: Cuencas de la quebrada Galindo y los ríos Tócome y Caurimare; E: Cuencas de la quebrada Tanaguarena y los ríos Uria y Naiguatá; O: Cuencas de las quebradas Seca y San Julián
R. Cerro Grande	10°32'36" 10°36'59"	66°46'32" 66°49'53"	1.166.325 1.174.475	737.325 743.375	Parroquia Caraballeda	

Cuenca	Geología	Geomorfología	Clima	Hidrografía/Hidrología
Q. Curucutí	Complejo San Julián, Serpentina, Esquisto de Tacagua, Mármol de Antimano y Aluviones	Llanura costera y grupo de formas de acumulación (glacis, terrazas y abanicos); fondo de valle; laderas y cimas	Las cuencas en general se enmarcan en un sector de tipo climático Bsh (clima tropical estepario). La precipitación en la parte baja del área (franja costera) presenta montos pluviométricos anuales que oscilan entre 521,4 mm y 647,4 mm, y temperatura media anual de 26,0 °C. En la parte alta se presenta un monto anual de precipitación de 551,7 mm, y temperatura media anual de 17 °C	Cuenca de orden 5 con un área de 7,34 Km ² y tipología de embudo, exorreica, densidad de drenaje media de 8,13 Km/Km ² , red dendrítica con control estructural, caudal máx. instantáneo (Tr= 100 años) de 159 m ³ /seg
Q. Piedra Azul	Augengneiss de Peña de Mora, Complejo San Julián, Serpentina, Esquisto de Tacagua, Anfibolita de Nirgua y Aluviones	Llanura costera y grupo de formas de acumulación (glacis, terrazas y abanicos); fondo de valle; laderas, cimas y plano inclinado		Cuenca de orden 5 con un área de 20,22 Km ² y tipología de embudo, exorreica, densidad de drenaje media de 5,63 Km/Km ² , red dendrítica con control estructural, caudal máx. instantáneo (Tr= 100 años) de 413 m ³ /seg
R. San José de Galipán	Augengneiss de Peña de Mora, Complejo San Julián, Serpentina, Esquisto de Tacagua, Anfibolita de Nirgua y Aluviones	Fondo de valle; laderas, colinas, cimas, terrazas y plano inclinado		Cuenca de orden 6 con un área de 14,56 Km ² y tipología de embudo, exorreica, densidad de drenaje alta de 15,25 Km/Km ² , red dendrítica con control estructural, caudal máx. instantáneo (Tr= 100 años) de 320 m ³ /seg
Q. San Julián	Augengneiss de Peña de Mora, Complejo San Julián, Asociación Metamórfica Ávila, Esquisto de Tacagua y Aluviones	Cordón litoral; fondo de valle; laderas, colinas, cimas y plano inclinado		Cuenca de orden 5 con un área de 20,68 Km ² y tipología de embudo, exorreica, densidad de drenaje media de 6,69 Km/Km ² , red dendrítica con control estructural, caudal máx. instantáneo (Tr= 100 años) de 448 m ³ /seg
R. Cerro Grande	Complejo San Julián, Metagrano de Naiguatá, Asociación Metamórfica Ávila, Esquisto de Tacagua y Aluviones	Llanura costera, cordón litoral; fondo de valle; laderas, lomas, cimas y colinas		Cuenca de orden 6 con un área de 25,38 Km ² y tipología de embudo, exorreica, densidad de drenaje media de 8,03 Km/Km ² , red dendrítica con control estructural, caudal máx. instantáneo (Tr= 100 años) de 500 m ³ /seg

Cuenca	Vegetación	Centros poblados	Uso actual de la tierra	Actividades económicas
Q. Curucuti	Espinar tropical denso, espinar tropical medio, matorral tropical denso, matorral tropical medio, matorral tropical ralo, bosque premontano medio, bosque premontano bajo medio, bosque premontano bajo ralo, y bosque tropical medio medio	Montesano, Mafongá, 10 de Marzo, Patriata, El Oasis, El Corozo, Pedro García, Curucuti, El Mamonal, El Onoto, Tabacal y Capuchino	Desarrollos informales; equipamientos educacionales, asistenciales y gubernamentales; servicios, puerto y aeropuerto; viviendas unifamiliares y multifamiliares; áreas de protección y recuperación ambiental; uso no conforme; y Parque Nacional "El Ávila"	Transporte y comunicaciones; administración pública; terciario superior (entidades financieras, inmuebles y servicios a las empresas); agricultura y pesca; y comercio
Q. Piedra Azul	Sabana, sabana tropical, espinar tropical medio, espinar tropical ralo, matorral tropical denso, matorral tropical medio, matorral tropical ralo, bosque premontano denso, bosque premontano medio, bosque premontano bajo medio, y bosque montano bajo medio	Maiquetía, Quenepe, El Rincón, San José, Punta Araya, Guayabal, Corozal, La Venta, Castillo Blanco, Castillo Negro, Gato Negro, Las Flores, El Palmar, El Peñón y El Infernito	Casco histórico y valor patrimonial; desarrollos informales; equipamientos educacionales, asistenciales y gubernamentales; áreas verdes, plazas y canchas deportivas; servicios y vivienda unifamiliar y multifamiliar; áreas de protección y recuperación ambiental; uso no conforme; y Parque Nacional "El Ávila"	Transporte y comunicaciones; administración pública; terciario superior (entidades financieras, inmuebles y servicios a las empresas); agricultura y pesca; y comercio
R. San José de Galipán	Espinar tropical denso, matorral premontano ralo, matorral tropical medio, matorral tropical ralo, bosque premontano medio, bosque premontano ralo, y bosque montano bajo medio	Macuto, San José de Galipán, San Antonio de Galipán, Los Asientos, Helechal, Capuchino y Los Cedros	Balnearios, marinas, clubes y hoteles; casco histórico y valor patrimonial; desarrollos informales; usos mixtos; vivienda unifamiliar y multifamiliar; áreas de protección y recuperación ambiental; uso no conforme; Parque Nacional "El Ávila"; y agrícola	Agricultura y pesca; terciario superior (entidades financieras, inmuebles y servicios a las empresas); administración pública; transporte y comunicaciones; y comercio

Q. San Julián	Espinar tropical denso, matorral premontano ralo, bosque premontano medio, bosque montano bajo denso, bosque montano bajo medio, y sabana montano bajo	El Palmar, Los Corales, Camurí, El Caribe y Caraballeda	Balnearios, marinas, clubes y hoteles; casco histórico y valor patrimonial; desarrollos informales; equipamientos educacionales, asistenciales y gubernamentales; áreas verdes, plazas y canchas deportivas; servicios; usos mixtos; vivienda unifamiliar y multifamiliar; áreas de protección y recuperación ambiental; uso no conforme; y Parque Nacional "El Ávila"	Construcción; comercio; minería e hidrocarburos; manufactura; y administración pública
R. Cerro Grande	Espinar tropical denso, bosque premontano medio, bosque premontano ralo, bosque montano bajo denso, bosque montano bajo ralo, y sabana montano bajo ralo	Tanaguarena	Vivienda unifamiliar y multifamiliar; uso no conforme; y Parque Nacional "El Ávila"	Construcción; comercio; minería e hidrocarburos; manufactura; y administración pública

Nota. Tabla elaborada con información tomada de las Hojas "Maiquetía" (6847-IV-NO), "El Caribe" (6847-IV-NE), "Naiguatá" (6847-I-NO), "23 de Enero" (6847-IV-SO), "Los Chorros" (6847-I-SO) y "Curupao" (6847-I-SE) y "Curupao" (6847-I-SO) a escala 1:25.000 por Dirección de Cartografía Nacional, 1979, Caracas; Mapa "Estado Vargas" a escala 1:125.000 por Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional y Gobernación del Estado Vargas, 1999, Caracas; "Datos climatológicos: Estaciones Maiquetía, Maiquetía - Aeropuerto y Los Castillos" por Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Dirección de Hidrología y Meteorología, 2000, Caracas; "Estado Vargas: Aspectos socioeconómicos, función urbana y opciones de desarrollo, Litoral Vargas: Corredor urbano y red vial estructurante" por F. Marciano y S. Barrios, 2001, Caracas; "Proyecto Ávila, Mapa de Riesgos" por Instituto Geográfico de Venezuela "Simón Bolívar" / Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, 2002, Caracas; "Estimación de hidrogramas de crecidas en cuencas de Venezuela Litoral Central luego de los aludes torrenciales de Diciembre de 1999" por M. González y J. Córdoba, 2003, *Acta Científica Venezolana*, 54 (1), 63-87; "Plan de Manejo para la Ordenación y Restauración Ambiental del Eje Atrecife - Los Caracas" por Autoridad Única de Área para el Estado Vargas / Ecology and Environment, 2003, Maiquetía.

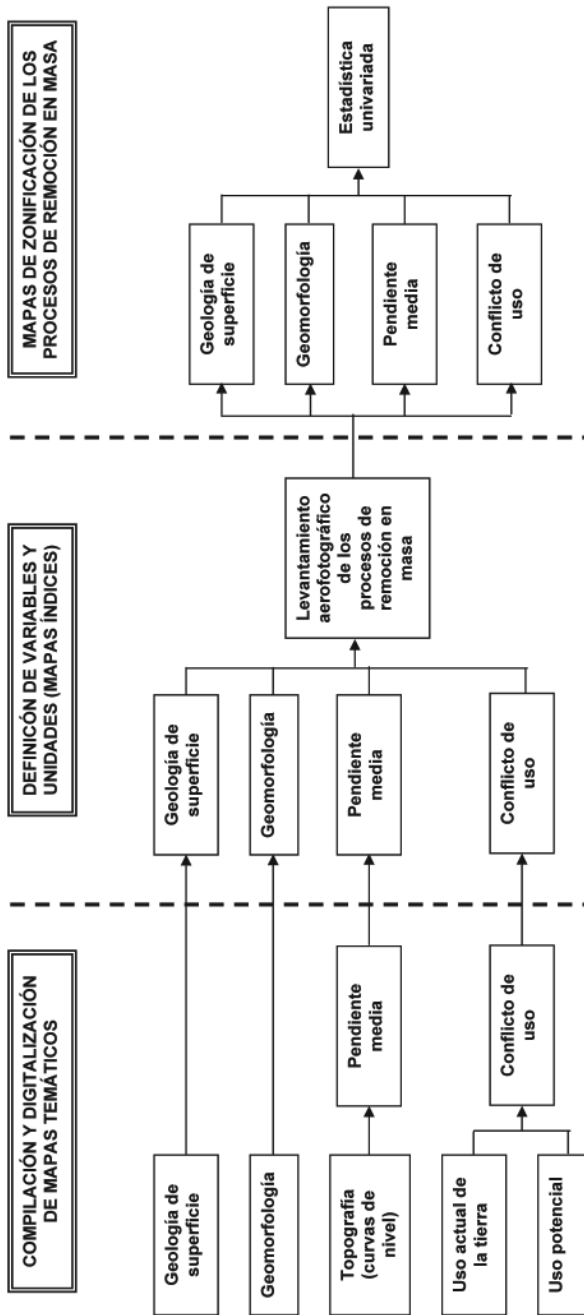


Figura 2. Secuencia metodológica para la obtención de los mapas de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en las cuencas experimentales (cuenca de drenaje de la quebrada Curucutí) y pilotos (cuencas de drenaje de las quebradas Piedra Azul y San Julián y de los ríos San José de Galipán y Cerro Grande), Estado Vargas, Venezuela.

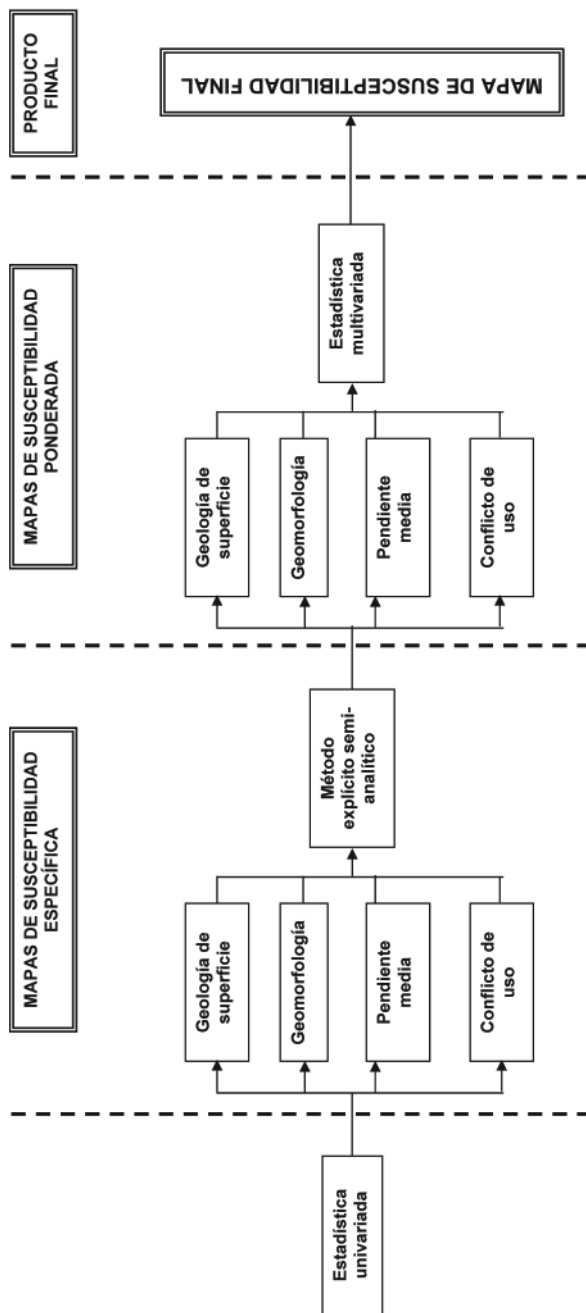


Figura 3. Secuencia metodológica para la obtención de los mapas de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en las cuencas experimentales (cuenca de drenaje de la quebrada Curucutí) y piloto (cuencas de drenaje de las quebradas Piedra Azul y San Julián y de los ríos San José de Galipán y Cerro Grande), estado Vargas, Venezuela.

Elaboración de mapas temáticos digitales

Para el caso en estudio se eligieron mapas topográficos base a escala 1:25.000, obtenidos en el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar [IGVSB],(2003) (Dirección de Cartografía Nacional [DCN], 1979a, 1979b, 1979c, 1979d, 1979e, 1979f), así como mapas temáticos concernientes a: Geomorfología, geología de superficie, vegetación, uso potencial, uso actual, red de drenaje (escala 1:25.000), y algunos de susceptibilidad (inundaciones y procesos de remoción en masa) (IGVSB / Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales [MARN], 2000; Autoridad Única de Área para el Estado Vargas [AUAEV] / Ecology and Environment, 2003), los cuales se emplearon sólo con fines comparativos. Para identificar las áreas con evidencias de procesos de remoción en masa, se emplearon fotos aéreas a escala: 1:25.000 del mes de Febrero de 2002.

Se eligió un número determinado de variables como lo propone INGEOMINAS de Colombia, a saber: (a) Ubicación de los procesos de remoción en masa (a partir de las fotografías aéreas del año 2002, donde se evidencian los efectos del evento de Diciembre de 1999), (b) geomorfología, (c) geología de superficie, (d) pendiente media del terreno (a partir de cartas topográficas), y (e) conflicto de uso (a partir de la conjugación de los mapas de uso actual y uso potencial de la tierra). Con la información cartográfica verificada se procedió a su transformación en mapas digitales para emplearlos en el Sistema de Información Geográfica. La información en soporte papel fue escaneada para obtener imágenes raster, y luego se digitalizaron en pantalla para vectorizarlas. Para ello, se trabajó con la plataforma SIG MapInfo (versión 8.5) y ArcView (versión 9.0).

Para la comprobación y eliminación de los posibles errores cometidos, tales como, existencia de líneas duplicadas, sueltas, inexactitud de contornos, entre otros, se empleó el módulo auxiliar ArcShell (versión 3.2). Esto se hizo con la finalidad de no invalidar los resultados finales por la propagación de pequeños errores. Para la elaboración del mapa

de pendientes e hipsométrico se utilizó el módulo de altimetría Vertical Mapper (versión 3.3) que funciona en MapInfo y se compararon con los mapas de pendientes e hipsométrico existentes. Las licencias educativas de estos softwares, fueron adquiridas por la Subdirección de Investigación y Postgrado del Instituto Pedagógico de Caracas, a través del Proyecto N° 04-016.

Elaborados los mapas, se definieron los atributos que describen los diferentes elementos geográficos, mediante la adición de nuevos elementos en las tablas asociadas con cada capa temática, definición del diccionario de datos y las relaciones entre las tablas de atributos.

Estadística univariada para determinar la susceptibilidad específica

Cada uno de los valores que toman las variables representadas en los mapas, influyen en mayor o menor grado en la estabilidad relativa de las laderas, es por ello que se inicia el análisis zonificando en cada mapa índice (geología de superficie, geomorfología, pendiente media del terreno, y conflictos de uso) los procesos de remoción en masa, a través de una operación algorítmica. De esta forma, se obtuvieron cuatro mapas de zonificación de los procesos de remoción en masa por cada variable. La finalidad de este procedimiento es calcular el área removida en cada una de las unidades en que se dividen las variables. Se empleó la herramienta SIG, para determinar tanto el área de la superficie removida como el área de cada unidad en hectáreas; datos básicos éstos requeridos para realizar el análisis geoestadístico.

Para determinar el peso o fragilidad que cada unidad de terreno tiene con relación a la propensión de ocurrencia de procesos de remoción en masa, se empleó el método estadístico univariado, ya que es una aproximación semi-cuantitativa para estimar la posibilidad de ocurrencia de dichos procesos en diferentes zonas de una misma cuenca.

El peso o grado de influencia de cada factor interno del terreno, se determinó calculando la sumatoria de las áreas con evidencias de procesos de remoción en masa, que se encuentran dentro de las áreas que abarca cada Unidad Cartográfica de Variable (UCV), para lo cual se empleó la ecuación:

$$W\% = DZX \times 100 / S$$

donde:

W% = Peso o susceptibilidad de la UCV respecto al movimiento en masa analizado.

DZX = Superficie acumulada con procesos de remoción en masa (Km²) que existe sobre la UCV.

S = Superficie total acumulada de la UCV (Km²)

Todos los datos obtenidos mediante la ecuación anterior en cada UCV, se expresaron a rangos, considerando la media y la desviación estándar. Luego, estos rangos y las categorías de susceptibilidad se ajustaron a juicio de expertos. Este cruce de mapas se fundamenta en que el mecanismo de ruptura en una UCV es diferente para cada tipo de variable. De esta forma se determina el peso o susceptibilidad (W) de cada UCV. Los mapas que se obtienen en este procedimiento se denominaron mapas de susceptibilidad específica, ya que sólo brindan información acerca de cuál unidad es más susceptible a removerse dentro de cada variable. En el SIG, los mapas se generan mediante una operación geométrica de dos capas de polígonos y almacenaje en una capa resultado, preservando los atributos de cada una de ellas.

Los mapas de susceptibilidad específica son el resultado de superposiciones polígono-polígono. Con ello se determinan las relaciones de inclusión que permiten establecer para cada parámetro, la correlación que existe entre los valores que toma y la superficie por unidad de remoción. Cuanto mayor sea el número total de procesos de remoción en masa, y sobre todo, cuanto menor sea la superficie por unidad de remoción para un determinado valor de la variable, más propicia será ésta a que se produzca una futura inestabilidad.

En esta parte del desarrollo del modelo, se empleó el método explícito semi-analítico, que combina los factores de clasificación del método explícito empírico, el cual consiste en asignar puntajes ponderados a cada variable, para indicar el grado de contribución a la estabilidad relativa del terreno. La suma de los puntajes de todos los factores da como resultado un mapa de valores numéricos, los cuales se pueden dividir en rangos para definir zonas con distintos niveles de susceptibilidad relativa.

Una vez establecida semi-cuantitativamente las relaciones de peso en los diferentes mapas de susceptibilidad específica, se procedió a otorgarle pesos ponderados a cada variable, lo que implicó recurrir al juicio de expertos. Una vez determinado el peso de cada variable, se multiplicó el peso de la unidad en porcentajes por el peso ponderado de la variable. Con la data producto de la operación matemática, se recodificaron y reajustaron los rangos, manteniendo las cinco categorías de susceptibilidad (1 = muy baja; 2 = baja; 3 = media; 4 = alta y 5 = muy alta). La cartografía obtenida se denominó mapas de susceptibilidad específica ponderada.

Algoritmo de mapa para realizar el cruce de capas y estadística multivariada para obtener el mapa de susceptibilidad final

El mapa de susceptibilidad final se elaboró mediante el análisis estadístico multivariado, en el cual son sumados digitalmente por el SIG, los cuatro mapas de susceptibilidad específica ponderada. En este procedimiento se utilizó el siguiente algoritmo de mapa modificado:

$$SF = \frac{SGs(pp\%) + SGm(pp\%) + SPm(pp\%) + SCu(pp\%)}{Ntv}$$

donde:

SF = Susceptibilidad final

pp% = Peso ponderado de la variable en porcentaje

SGs = Susceptibilidad de la variable geología de superficie

SGm = Susceptibilidad de la variable geomorfología

SPm = Susceptibilidad de la variable pendiente media del terreno

SCu = Susceptibilidad de la variable conflicto de uso

Ntv = Número total de variables

Para fines de calibración del modelo se cruzó el mapa de susceptibilidad final con el de procesos de remoción en masa; este último contiene información del evento extraordinario de Diciembre de 1999. Se corrió el modelo varias veces con ponderaciones diferentes, con la finalidad de objetivar y validar los resultados finales. Por lo tanto, los resultados que se muestran en este reporte son los que mejor se ajustan al evento extremo en consideración.

RESULTADOS

Zonificación de los procesos de remoción en masa

Geología de superficie

En las unidades de geología de superficie del mapa de zonificación de los procesos de remoción en masa, se observa que sobre la unidad litológica Esquisto de Tacagua, predominan estos procesos con promedios entre 77 % y 87 %, para todas las cuencas en estudio. Esto contrasta, con la unidad Aluvión Cuaternario, en la que no se registraron procesos de remoción en masa, y con las otras formaciones litológicas que poseen menos del 1 % afectado.

Geomorfología

De las once unidades geomorfológicas, sólo cinco presentan evidencias de procesos de remoción en masa, cuyos promedios son: (a) Conjunto de laderas de vertientes disectadas entre 10 % y 20 %, (b) laderas de vertientes onduladas disectadas entre 0,5 % y 2 %, (c) lecho de crecidas con agradación de bloques y lodos entre 0,5 % y 2%, (d) conjunto de laderas de vertientes onduladas disectadas entre 0,5 % y 2 % y (e) conjunto de laderas de vertientes cóncavas a onduladas entre 0,2 % y 1%. De todas las unidades anteriores, parece ilógico observar superficies de procesos de remoción en masa en el “lecho de crecidas con agradación de bloques y lodos”, sin embargo, tal apreciación puede deberse al hecho de que se cartografiaron, tanto las cicatrices como las zonas de acumulación del material desplazado.

Pendiente media del terreno

En el mapa de pendiente media del terreno, el rango donde se registran más evidencias en los procesos de remoción en masa es el de 18 % a 33 %, dentro del cual en las cuencas investigadas, la superficie removida abarca un rango entre 0,55 % y 1,54%. El otro rango de pendientes significativo es de 3 % a 18 %, en el cual la superficie alterada representa entre 0,97 % y 1,48 %. El rango entre 33 % y 45 % de pendientes, registra menos del 1 % de superficie removida, y en el de 0 % a 3 %, no se registran procesos de remoción en masa.

Conflicto de uso

En el mapa de conflictos de uso, las zonas sin conflictos registraron valores de áreas removidas que en promedio van desde 0,54 % hasta 1,20%. En los conflictos alto, medio y bajo no hubo afectación.

Posteriormente, estos datos de todas las variables se vaciaron en un nuevo formato para procesarlos, y determinar el peso que tienen las unidades en cada variable. De esta forma se obtienen los insumos básicos que se requieren para construir los mapas de susceptibilidad específica.

Mapas de susceptibilidad específica

Geología de superficie

En la variable geología, la unidad de mayor peso la representa el Esquisto de Tacagua (3,25 % - 7,48 %) con grado de susceptibilidad 5, en relación con el Mármol de Antímano (1,38 % - 5,47 %) con grado de susceptibilidad 4, Serpentinita (0,46 % - 3,12 %) de grado 2, Complejo San Julián (0,09 % - 1,26 %) y Aluvión Cuaternario, ambos con grado de susceptibilidad 1.

Geomorfología

En la variable geomorfología, el conjunto de laderas de vertientes disectadas posee el mayor peso (10,04 % - 15,69 %), le continúan en orden decreciente, las laderas de vertientes onduladas disectadas (1,11 % - 5,74 %), el lecho de crecidas con agradación de bloques (1,05 % - 3,59 %), el conjunto de laderas de vertientes onduladas disectadas (0,70 % - 1,52 %) y el conjunto de laderas de vertientes cóncavas a onduladas (0,59 % - 0,90 %). Los grados de susceptibilidad son respectivamente: 5, 4, 4, 3 y 2, el resto de las unidades geomorfológicas que no se mencionaron, no poseen registros de procesos de remoción en masa, por ello, se les asignó grado 1, ya que no se puede descartar la probabilidad de ocurrencia de estos procesos en ellas.

Pendiente media del terreno

En los rangos de pendiente media del terreno, el de mayor probabilidad de ocurrencia corresponde al de 3 % – 18 % (grado 4), el de mediana probabilidad a los rangos 18 % – 33 % y 33 % – 45 % (grado 3 cada uno), y el de baja probabilidad al rango 0 % – 3 % (grado 1).

Debido a que el lecho de crecidas con agradación de bloques se encuentra ubicado en el rango de pendiente media del terreno que va de 3 % a 18 %, y éste posee una alta probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa, es de suponer que por la configuración de esta unidad geomorfológica y dadas las características topográficas, el mismo está confinado a un valle aluvial estrecho, y los procesos de remoción en masa probablemente se pueden generar en las vertientes con fuerte pendiente, aledañas al lecho de crecida, al cual aportan los materiales removidos, y por la acumulación debida a procesos tipo flujos (aludes torrenciales).

Esta información se dedujo de los datos obtenidos, pero no se pudo verificar en campo por el difícil acceso a las cuencas en estudio, las malas condiciones de la vialidad y los altos niveles de inseguridad.

Conflicto de uso

Con relación a la variable conflicto de uso, el más alto grado de susceptibilidad (grado 4) se encuentra en los polígonos que representan al más alto grado de conflicto (1,46 % - 2,01 %); seguido por el de sin conflicto de uso con 0,99 % - 1 %, pero que generó un grado medio de susceptibilidad (grado 3), luego el resto de los grados de conflictos dieron categoría de susceptibilidad 1. Esto se debe a que aún cuando los procesos de remoción en masa del evento de Diciembre de 1999 no estuvieron relacionados directamente con los conflictos de uso, fue en esa área (de mayor conflicto de uso) donde se produjo el mayor número de movimientos, es por ello, que cuando se le asigna peso dentro de la variable a la unidad de conflicto de uso afectada, genera una categoría

elevada de susceptibilidad.

Mapas de susceptibilidad específica ponderada

La geología de superficie fue ponderada con 40 %, la geomorfología con 30 %, la pendiente media del terreno con 20 % y el conflicto de uso con 10 %. Estos porcentajes se atribuyeron según la intervención que cada variable tiene en la génesis de los procesos de remoción en masa. Se le otorgó el valor más alto a la geología, ya que ésta jugó un papel fundamental en los eventos de Diciembre de 1999; las unidades geomorfológicas consideradas están estrechamente vinculadas a la geología y a las condiciones topograficas del área, es por ello, que se le asignó el segundo peso en la ponderación.

En cuanto a la pendiente media del terreno, aunque este factor es ampliamente mencionado en la literatura, como el de mayor influencia en los procesos de remoción en masa, en el caso particular de las cuencas en estudio, el rango de 3 % – 18 %, fue donde sucedieron más desplazamientos de materiales, por ello se le concedió sólo el 20 % del total. Los conflictos de uso al igual que las pendientes no tuvieron relevancia, ya que precisamente en donde no hay conflictos de uso, fue la zona con mayor densidad de procesos de remoción en masa.

Los valores que resultan de este procedimiento son más bajos que los calculados para los mapas sin ponderar. Se observa, con relación a estos últimos que se mantiene la tendencia, es decir, siguen dando más altas, las mismas unidades en cada variable, pero con los rangos de valores categóricos de susceptibilidad recalculados y ajustados a la nueva data.

La geología de superficie ponderada, no varió con respecto al no ponderado. Las laderas de vertientes onduladas disectadas y el lecho de crecidas con agradación de bloques y lodos, pasaron de grado 4 a grado 3 en el mapa geomorfológico ponderado. En el mapa ponderado

de pendiente media del terreno, los valores de los rangos 3 % – 18 %, 18 % – 33 % y 33 % – 45 %, disminuyen a 3, 2 y 2, respectivamente, manteniéndose como una variable de baja influencia en los procesos de remoción en masa, ya que sus máximos alcanzan sólo hasta la categoría 3 de susceptibilidad.

El mapa de conflictos de uso, es más homogéneo, quedando reducido su alcance a grado 2 y 1 de susceptibilidad, siendo el dato más elevado, el alto grado de conflicto, representado por las zonas con viviendas informales (barrios). Es importante resaltar que en el mapa no ponderado, la zona sin conflicto de uso alcanzó grado 3 de susceptibilidad, pero como la mayor parte de ese polígono lo ocupa el Parque Nacional El Ávila y en él no se registraron procesos de remoción en masa importantes, el sistema lo reclasifica a grado 1, en el mapa ponderado.

Es importante destacar, que la ponderación se realizó considerando la influencia diferencial de cada parámetro o factor de terreno, sobre la estabilidad o susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa, para ello se analizó espacial y digitalmente los diferentes mapas de susceptibilidad temáticos para establecer los pesos en porcentaje de acuerdo al juicio de expertos con técnicas de evaluación multicriterio.

Mapa de susceptibilidad final y calibración del Modelo

En el mapa de susceptibilidad final de cada cuenca, que se generó de la superposición algorítmica de las capas de susceptibilidad específica ponderada, se muestra sólo la probabilidad con la que se puede producir un movimiento en masa. Se observa que existen pocas zonas con susceptibilidad de categoría “muy alta”, la mayoría está situada en la cuenca baja, donde coinciden la unidad geomorfológica denominada conjunto de laderas de vertientes disectadas, la formación geológica Esquistos de Tacagua, el rango de pendiente media del terreno de 18 % a 33 % y sin conflictos de uso.

Se observan algunas pequeñas áreas de “muy alta” susceptibilidad en la unidad geomorfológica laderas de vertientes onduladas disectadas, igualmente ubicadas sobre el Esquisto de Tacagua y con el mismo rango de pendiente (18 % – 33%), pero en una zona de conflicto medio a alto. En el mapa síntesis, predominan las áreas de “muy baja” a “baja” susceptibilidad, abarcando entre el 70 % y 80 % de la superficie de las cuencas de drenaje. Las áreas de “muy alta” a “alta” susceptibilidad corresponden a superficies entre 17,05 % y 26,49 % del total, y las de mediana susceptibilidad son prácticamente inexistentes, ocupando entre el 2 % y 5 %, y se comportan como una especie de área de transición.

En atención a estos resultados, se debe aclarar que es fundamental conocer el nivel de incertidumbre del modelo, para lo cual se calibró superponiendo al mapa final de susceptibilidad, el mapa de áreas con procesos de remoción en masa durante el evento extremo de Diciembre de 1999, encontrándose que menos del 5 % de la superficie de las cuencas trabajadas, fue removida. Sin embargo, de ese 5 % entre el 79,26 % y 86,87 %, se localizan dentro de la zona que abarca las categorías de susceptibilidad “muy alta” y “alta”.

Este resultado indica la validez del modelo, con un grado de incertidumbre menor al 20 %, por lo tanto se propone su aplicación en ambas vertientes del Macizo El Ávila y otras regiones del país con características físico-geográficas similares, por constituir una formidable herramienta de análisis para proponer acciones estratégicas a la comunidad y a los organismos locales, que produzcan respuestas oportunas y eficaces ante las amenazas vinculadas a procesos de remoción en masa.

CONCLUSIONES

Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta valiosa para abordar trabajos que requieran zonificar y modelar múltiples variables, debido al gran volumen de información que pueden procesar, a su capacidad de generar topología y, por lo tanto, a la posibilidad de realizar

la superposición de mapas, llegando a obtener un producto que englobe las características de todos ellos. Si bien, clásicamente, los trabajos de este tipo se abordan con sistemas raster, la utilización de un sistema vectorial para la realización de análisis espaciales que impliquen superposiciones, permite trabajar con mapas a diferentes escalas. Sin embargo, hay que precisar, que las dificultades surgidas en el momento de realizar los análisis con un sistema de tipo vectorial, aumenta exponencialmente con el número de variables involucradas, lo que no sucede con otro tipo de sistemas.

Como producto del modelaje, que implicó el cruce geométrico de los mapas ponderados, se obtuvo el mapa de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa de la cuenca de drenaje experimental de la quebrada Curucutí y a manera de muestras pilotos en las quebradas Piedra Azul y San Julián y en los ríos San José de Galipán y Cerro Grande del Estado Vargas.

Para obtener el mapa final, empleando como plataforma un SIG, se seleccionaron cuatro variables con incidencia en la remoción de material (geología de superficie, geomorfología, pendiente media del terreno y conflicto de uso). Cada variable fue sometida a un análisis estadístico para observar cuáles valores son más frecuentes en la zona afectada, y con base en estos resultados, clasificar los mapas para ser superpuestos. Se emplearon dos tipos de superposiciones: Sin ponderar las variables (mapa de susceptibilidad específica) y ponderando las variables (mapas de susceptibilidad específica ponderada).

Con la aplicación del modelo, resultó que en todas las cuencas estudiadas las zonas de más alta probabilidad a los procesos de remoción en masa fueron aquellas donde se combinan las siguientes variables: la formación geológica Esquisto de Tacagua, el conjunto de vertientes disectadas, las pendientes medias entre 3 % y 18 %, y las áreas sin conflictos de uso. Del mapa final, se puede deducir que la zona con alta potencialidad a desplazarse, no abarca grandes superficies, sino que está reducida y dispersa en algunos sectores. En todos los casos y

salvando las particularidades el mayor peso lo obtuvo la variable “geología de superficie”, seguida de “geomorfología”, “pendiente del terreno” y por último “conflicto de uso”.

Esta metodología se basó inicialmente, en el modelo de trabajo propuesto por un grupo de investigadores de INGEOMINAS de Colombia. Se incorporaron modificaciones y adaptaciones al prototipo, consistieron en: (a) Adición de la ponderación para generar los mapas de susceptibilidad específica ponderada, ya que sólo se basan en los pesos sin ponderar; y (b) cambio de los rangos y las categorías de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa.

Dados estos resultados, se recomienda su empleo en el resto de las cuencas de drenaje de la vertiente norte del Macizo El Ávila, así como en las de las vertientes sur, y en otros sistemas montañosos del país. Finalmente, vale la pena señalar, que en la tercera etapa de esta investigación, se pretende incorporar el análisis de frecuencia de distribución de las pendientes medias del terreno, el cual es mucho más ajustado a las particularidades de las curvas de nivel; así como emplear el análisis de componentes principales, para asignar los pesos ponderados a las variables intervinientes en el desencadenamiento de procesos de remoción en masa.

REFERENCIAS

- Autoridad Única de Área para el Estado Vargas / Ecology and Environment. (2003). Plan de Manejo para la Ordenación y Restauración Ambiental del Eje Arrecife –Los Caracas. En *Autoridad Única de Área para el Estado Vargas* [Página Web]. Disponible: <http://www.auev.gov.ve> [Consulta: 2007, Octubre 01]
- Castro, E., Valencia, A., Ojeda, J., Muñoz, F., y Fonseca, S. (2001). *Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa: Guía metodológica*. Santa Fé de Bogotá, Colombia: INGEOMINAS /

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca / Escuela Colombiana de Ingeniería.

Dirección de Cartografía Nacional.(1979a). *23 de Enero, hoja 6847-IV-SO* [Mapa a escala 1:25.000]. Caracas, Venezuela: Autor.

Dirección de Cartografía Nacional. (1979b). *Curupao, hoja 6847-I-SO* [Mapa a escala 1:25.000]. Caracas, Venezuela: Autor.

Dirección de Cartografía Nacional. (1979c). *El Caribe, hoja 6847-IV-NE* [Mapa a escala 1:25.000]. Caracas, Venezuela: Autor.

Dirección de Cartografía Nacional. (1979d). *Los Chorros, hoja 6847-IV-SE* [Mapa a escala 1:25.000]. Caracas, Venezuela: Autor.

Dirección de Cartografía Nacional. (1979e). *Maiquetía, hoja 6847-IV-NO* [Mapa a escala 1:25.000]. Caracas, Venezuela: Autor.

Dirección de Cartografía Nacional. (1979f). *Naiguatá, hoja 6847-I-NO* [Mapa a escala 1:25.000]. Caracas, Venezuela: Autor.

González, M., y Córdova, J. (2003). Estimación de hidrogramas de crecidas en cuencas del Litoral Central luego de los aludes torrenciales de Diciembre de 1999. *Acta Científica Venezolana* [Revista en línea], 54(1), 63-87.Disponible: <http://acta.ivic.ve> [Consulta: 2007, Octubre 01]

Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar. (2003). *Caracas y alrededores* (Mapa Especial) [Mapa a escala 1:100.000]. Caracas, Venezuela: Autor.

Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar / Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. (2002). *Proyecto Ávila: Mapa de Riesgos*. Caracas, Venezuela: Autor.

Lima, Y. y González, M. (2000). Medidas de protección en el río Piedra Azul (Estado Vargas, Venezuela) [Documento en DC]. En *Seminario Internacional Los Aludes Torrenciales de Diciembre 1999 en Venezuela*, Caracas. Disponible: Seminario Internacional Los Aludes Torrenciales de Diciembre 1999 en Venezuela, Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2000. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de Fluidos.

Marcano, F., y Barrios, S. (2001). *Estado Vargas: Aspectos socioeconómicos, función urbana y opciones de desarrollo, Litoral Vargas: Corredor urbano y red vial estructurante*. Caracas, Venezuela: Instituto de Urbanismo, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela / Centro de Estudios del Desarrollo.

Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Dirección de Hidrología y Meteorología. (2000). [Datos climatológicos: Estaciones Maiquetía, Maiquetía – Aeropuerto y Los Castillitos]. Datos no publicados.

Murai, S. (1999). SIG, Manual Base: Conceptos fundamentales. *Selper*, 15 (1), 1-72.

Sánchez, R., Urrego, L., Mayorga, R., y Vargas, G. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real [Documento en línea]. En *Simposio Latinoamericano de Control de Erosión, Colombia*. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/Modelo-pronostico-FRM.pdf> [Consulta: 2007, Septiembre 30]

Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional y Gobernación del Estado Vargas. (1999). *Mapa del estado Vargas* [Mapa a escala 1:125.000]. Caracas, Venezuela: Autor.