

Zonificación de áreas susceptibles a los movimientos en masa: terraza de la Ciudad de Mérida y sus alrededores

Nerio de Jesús Ramírez¹
Silvia Midori Saito²

¹Instituto de Protección Civil y Administración de Desastres del Estado Mérida - INPRADEM
Av. Los Próceres sector Santa Bárbara Oeste, Código Postal 5101
Mérida, República Bolivariana de Venezuela
njrgeotec@hotmail.com

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Núcleo de Pesquisa e Aplicação de Geotecnologias em Desastres Naturais e Eventos
Extremos - GEODESASTRES-SUL
Caixa Postal 5021 - CEP: 97105-970, Santa Maria, RS, Brasil
silvia.saito@crs.inpe.br

Abstract. The city of Merida in Venezuela is located in an area prone to landslides due of its geologic and geomorphologic characteristics. Besides, the occurrence of heavy rainfall and seismic activity are triggering factors to landslides inducing damages of infrastructures and human casualties. A useful landslide monitoring tool for Civil Defense and other organizations of risk assessment is landslide susceptibility map. Therefore the aim of this paper is to assess the landslides susceptibility areas using geographical information system (GIS) and remote sensing (RS) techniques. For this purpose, thematic layers including slope, geology, geomorphology and land cover use were compared using the analytical hierarchy process (AHP). This method is a semi-qualitative proceeding which involves a matrix-based pair-wise comparison of the contribution of different factors for landsliding. The study area was classified in five categories of landslide susceptibility: very low, low, medium, high and very high. Field observations contributed to validate the results of this study. The outcome showed that 15% of the area was classified in very high and high landslide susceptibility. These zones are not recommended to human settlements. The medium susceptibility zones made up 53% of the area and also have restrictions to occupation. In these areas landslides could occur if they were in a conjunction of factors as meteorological or seismic aspects. The very low and low susceptibility sum 32% of the area in analysis. These zones are located in platforms, safe to landslides.

Keywords: Geoprocessing, AHP, landslides, susceptibility, geoprocessamiento, AHP, deslizamiento, susceptibilidad

1. Introducción

El área de estudio se localiza en la ciudad de Mérida, Venezuela, en la jurisdicción de los Municipios Libertador, Santos Marquina y Campo Elías del Estado Mérida; cubre una superficie de aproximadamente 305,25 km² y un perímetro de 83,11 km, tal como se aprecia en la Figura 1. La misma se enmarca entre las vertientes derecha e izquierda del río Chama en un tramo correspondiente a su cuenca media.

La ciudad de Mérida constituye un centro poblado metropolitano muy importante para la región andina, debido a que en ella se gestan diversas actividades desde la perspectiva socioterritorial, lo cual le proporciona un acelerado desarrollo urbanístico en áreas relativamente estables e inestables que valen la pena analizar. Este crecimiento poblacional descontrolado de los espacios no urbanizados, ha traído como consecuencia en algunos casos, la ocupación de áreas susceptibles a deslizamientos, reptación, caída de roca y flujos.

Una parte considerable de la población, habita en zonas que presentan problemas de estabilidad, bien sea, por procesos relacionados con movimientos en masa, sismicidad o por crecidas torrenciales de los cursos de agua que drenan hacia las zonas urbanas. Intrínsecamente, Mérida posee una serie de condiciones y características físicas que la hacen de interés particular para algunas instituciones del estado relacionadas con la planificación

urbanística, la protección civil y la gestión de riesgo, las cuales analizan su emplazamiento. Estas características se observan bastante heterogéneas como resultado de un conjunto de factores que han influido en su configuración y modelado; la variación de la precipitación en los diferentes pisos altitudinales, la topografía, la complejidad litológica y la actividad sísmica registrada a lo largo de la historia. Todos estos factores son condicionantes importantes de los procesos hídrico-geomorfológicos en la región andina.

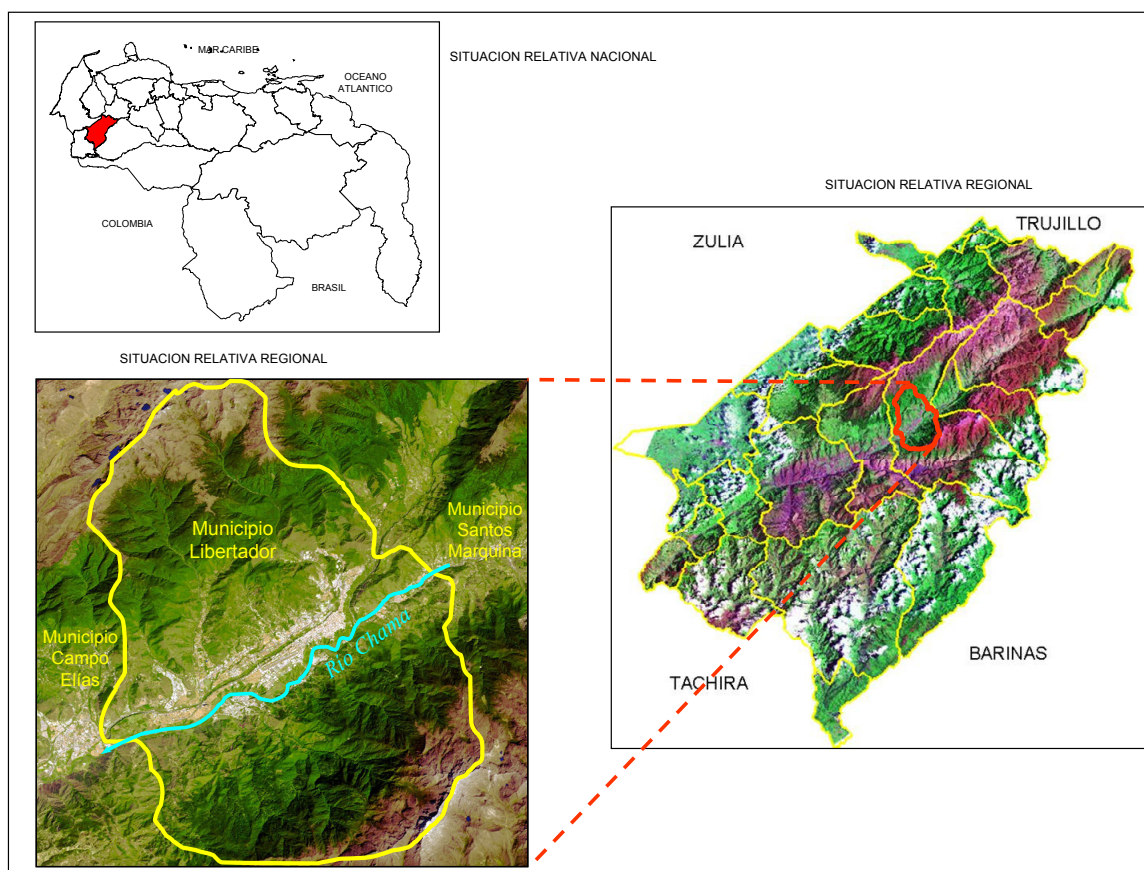


Figura 1. Localización del Área de Estudio.

Fuente: Imagen Aster 15m. RE, año 2003. Shapefile de proyecto Venutm.

Por su parte, la terraza de la ciudad de Mérida y sus alrededores, han presentado problemas de inestabilidad, debidos a la heterogeneidad de los estratos rocosos que la componen, resaltando eventos adversos en la mayoría de las cuencas hidrográficas que drenan hacia la mencionada área poblada (CABELLO, 1966).

En las vertientes de las microcuencas que drenan hacia el área de estudio, se presentan problemas de inestabilidad geológica y geomorfológica que ponderan los procesos geomorfológicos, sobre los desarrollos urbanos. En otras palabras, las características físicas del entorno mantienen actualmente, procesos de movimientos en masa activos y latentes relacionados con fenómenos hídricos y geomorfológicos que se constituyen como amenaza potencial sobre la población, en los cuales se destaca la afectación por eventos recientes en las comunidades de: El Chama, El Arenal, Don Perucho, La Pedregosa, La Vega, Las Calaveras, entre otras.

Es esencial para la planificación del uso de la tierra y el ordenamiento del territorio, la elaboración de una zonificación de las áreas susceptibles ante estos procesos hidrogeomorfológicos útiles para la toma de decisiones en materia de gestión de riesgo, planificación y ordenamiento territorial. En función de estas premisas, el objetivo de esa investigación fue zonificar las áreas susceptibles a movimientos en masa a partir de la

evaluación de los factores condicionantes: geología (unidades litológicas), pendientes, geomorfología (posiciones y procesos geomorfológicos) y uso de la tierra y cobertura vegetal, utilizando el método de las jerarquías analíticas (AHP).

En este método se desarrolló una matriz de comparación por pares de factores empleando una escala con valores de 1 a 9 para valorar la preferencia entre dos factores (SAATY, 1980). El método de AHP, exige la definición de los pesos de cada factor condicionante, a través de un análisis pareado (CÂMARA *et al*, 2001). Este método requiere del conocimiento del área de estudio, para disminuir la incertidumbre relacionada con el grado de importancia relativa entre las variables bajo análisis. En el *software* SPRING (Sistema de Procesamiento de Información Georeferenciada), el módulo de análisis espacial permite calcular automáticamente los autovalores de la matriz de pesos, los cuales corresponden a las ponderaciones de los factores tomados en consideración. La razón de consistencia (RC) que es un parámetro que indica la coherencia en las relaciones debe ser $<0,10$ (MIRANDA, 2010).

2. Metodología del Trabajo

Teniendo el área de estudio delimitada, se dio inicio a la evaluación, selección y actualización de los factores condicionantes que tienen influencia en los movimientos en masa, entre ellos:

- Mapa base: Se contó con varios mapas fundamentales para el análisis topográfico y derivación de las capas referentes a rangos de elevación del terreno, modelo digital de elevación y rangos de pendiente. Resalta la información a escala 1:25.000 de la Dirección de Cartografía Nacional 1976 – 1979 con curvas de nivel con equidistancia de 20 m.

- Mapa de rangos de pendiente: El valor de las pendientes aumenta o bien atenúa la acción dinámica de los procesos modeladores del relieve y por ende, determina en alto grado la susceptibilidad de un espacio dado. Para los fines de la superposición cartográfica, cruzamiento y el análisis espacial, se consideraron las relaciones entre los niveles de susceptibilidad a movimientos en masa y los sectores de pendiente derivados del modelo digital de elevación del terreno con los rangos ($<5^\circ$; $5^\circ - 15^\circ$; $15^\circ - 30^\circ$; $30^\circ - 45^\circ$ y $> 45^\circ$).

- Mapa de geología (Unidades litológicas): Para efectos del geoprocesamiento de los factores involucrados en la interpretación, se analizaron las unidades litológicas y sus características físicas generales, los alineamientos estructurales más resaltantes y su distribución espacial, como bases para el análisis cartográfico. Este condicionante fue apoyado en la interpretación y procesamiento del material proveniente de sensores remotos, con la aplicación de técnicas de combinación de bandas, mejoramiento de contrastes y filtros sobre las imágenes.

- Mapa de geomorfología (Posiciones geomorfológicas y procesos): Se utilizó un mapa de posiciones y procesos geomorfológicos apoyado en las fases de interpretación y procesamiento digital de las imágenes de satélite, ortofotomapas y de datos de campo. Los procesos geomorfológicos cartografiados son un insumo importante para el análisis de niveles de susceptibilidad a movimientos en masa (IRIGARAY y CHACÓN, 1997; OLIVEROS, 1997; VARNES, 1994).

- Mapa de usos de la tierra y cobertura vegetal: Existe una correlación entre la dinámica de los movimientos en masa, el tipo de uso de la tierra y cobertura vegetal. Interpretándose que un suelo totalmente descubierto en comparación con un bosque denso protector es mucho más susceptible a los procesos erosivos y la activación de movimientos en masa. Para su implementación dentro del método, inicialmente se realizó una interpretación visual y para apoyar la representación cartográfica, una segmentación y clasificación no supervisada con una similaridad de 20 niveles de gris y un área de píxel de 100 de la imagen Spot 5 de resolución espacial 2,5 m. de enero de 2009, dando como resultado la unión de las unidades de uso de la tierra y vegetación requeridas para su análisis.

Todos los mapas fueron georeferenciados bajo la Proyección U.T.M. Huso 19 Norte, REGVEN-SIRGAS, Elipsoide GRS80, ampliamente utilizadas en Venezuela.

Se realizó una comparación entre los factores condicionantes y los niveles de susceptibilidad resultantes de la aplicación del método AHP. A través de este análisis cartográfico e interpretación de los resultados, se realizó la zonificación definitiva de los niveles de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa para el área bajo estudio, siguiendo el flujoograma mostrado en la Figura 2.

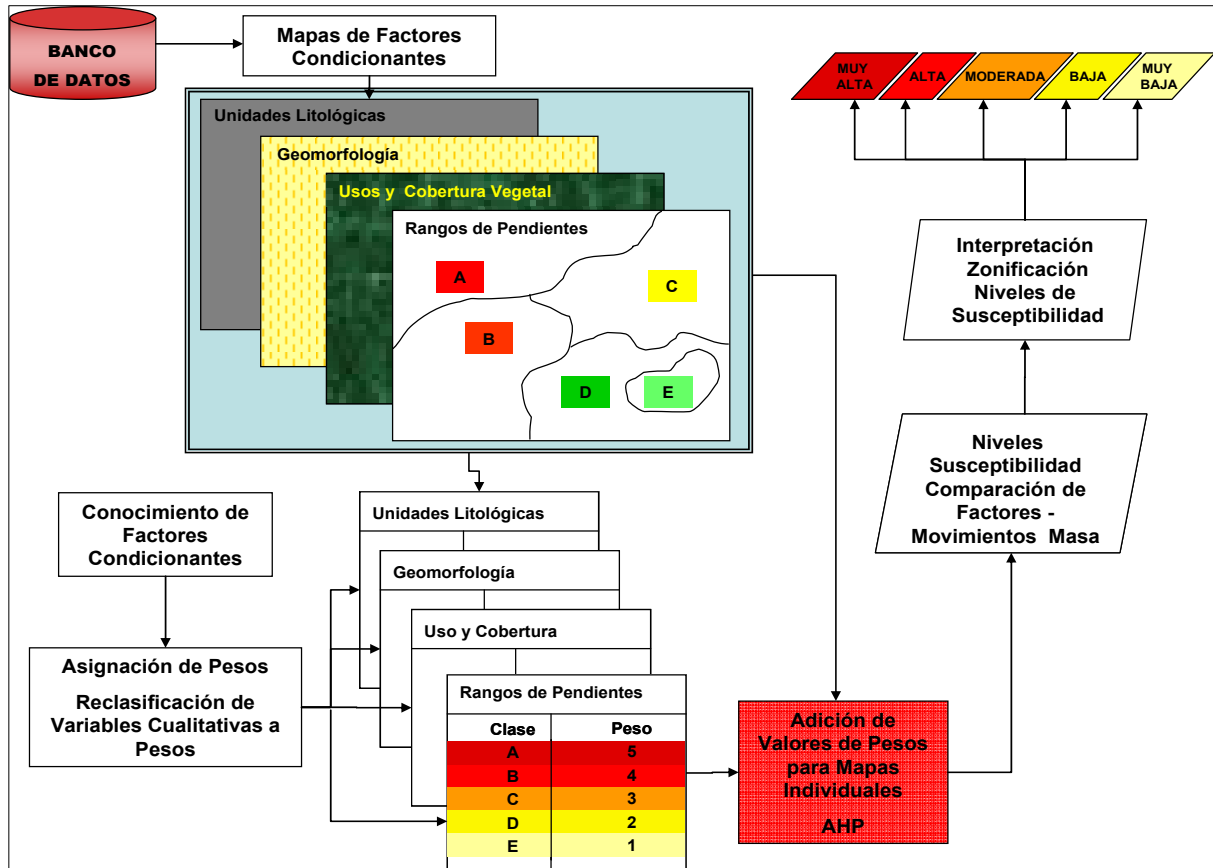


Figura 2. Geoprocésamiento y obtención de resultados.

El proceso de reclasificación de las variables que caracterizan cada factor condicionante y su asignación de valores o pesos fundamental para la aplicación del método AHP, se muestra a través de un ejemplo para la variable pendientes en la Figura 3.

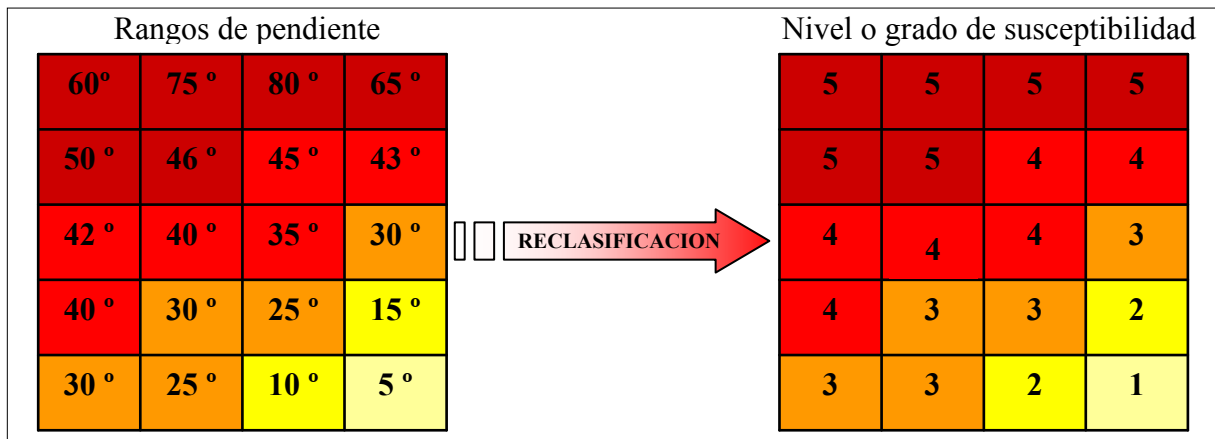


Figura 3. Reclasificación de mapas y asignación de pesos a la variable pendiente.

Con la aplicación de la técnica de AHP fue obtenido el mapa de zonificación de la susceptibilidad. Para este mapa se usaron cinco niveles de susceptibilidad (muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo). Cada capa de información cartográfica tiene una base de datos que describe las características de las variables consideradas como condicionantes en el análisis cartográfico. En función de estas características físicas de cada variable, fueron asignados pesos para cada nivel de susceptibilidad. El procedimiento y aplicación del método AHP se efectuó bajo el *software* SPRING 5.1.6. Los mapas escogidos para el cruzamiento fueron inseridos en la herramienta de soporte de decisión AHP, en el cual fueron atribuidos los criterios de importancia para cada mapa, donde la razón de consistencia final fue de 0,045, tal como se muestra en el Cuadro 1. El método incluye la programación de análisis cartográfico en el lenguaje espacial para geoprocésamiento algebraico (LEGAL). De este procesamiento se obtuvo como resultado una matriz numérica referente a la media ponderada de las variables analizadas.

Cuadro 1. Normalización de valores, asignación de pesos y razón de consistencia de los datos
Método de Jerarquías Analíticas

Comparación de Atributo	Pendiente	Litología	Geomorfología	Uso tierra/Cob. Veg.	
Pendiente	1,00	1,00	3,00	5,00	
Litología	1,00	1,00	5,00	5,00	
Geomorfología	0,33	0,20	1,00	3,00	
Uso tierra/Cob. Veg.	0,20	0,20	0,33	1,00	
Sumatoria	2,53	2,40	9,33	14,00	
Normalización	Pendiente	Litología	Geomorfología	Uso tierra/Cob. Veg.	PESO
Pendiente	0,39	0,42	0,32	0,36	0,37
Litología	0,39	0,42	0,54	0,36	0,43
Geomorfología	0,13	0,08	0,11	0,21	0,13
Uso tierra/Cob. Veg.	0,08	0,08	0,04	0,07	0,07
Sumatoria	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Estimación de razón de consistencia			Average del vector de consistencia		
Atributo	Cálculo 1	Cálculo 2	LANDA λ = 4,123		
Pendiente	1,537	4,127	Índice de Consistencia		
Litología	1,805	4,238	CL = 0,041		
Geomorfología	0,545	4,068	Razón de Consistencia		
Uso tierra/Cob. Veg.	0,273	4,055	CR = 0,045		

3. Resultados y Discusión

Del cruzamiento de los mapas temáticos tomados como factores condicionantes se obtuvo que el área bajo estudio, suma un área total de (47,67 km²) con niveles de susceptibilidad entre altas (A) y muy altas (MA) y se localizan en los taludes de la terraza de Mérida y puntualmente en secciones de vertientes inclinadas y muy inclinadas. Estos niveles de susceptibilidad representan las áreas muy activas e inestables, consideradas como críticas ya que representan las zonas con fuertes restricciones para su ocupación y uso, tal como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Niveles de susceptibilidad

Niveles de susceptibilidad	Superficie km ²	% Superficie
Muy Bajo (MB)	19,59	6,41
Bajo (B)	75,96	24,87
Moderado (M)	162,12	53,07
Alto (A)	43,26	14,16
Muy Alto (MA)	4,41	1,49

El nivel de susceptibilidad moderada (M), ocupa la mayoría de las vertientes de la Asociación Sierra Nevada y la Formación Sabaneta, en secciones medias y altas de las subcuencas que drenan hacia las zonas urbanas. Incluye las secciones con menor pendiente especialmente en áreas de colinas y divisorias de agua y representan el 53,07 % de la superficie bajo análisis, tal como se aprecia en la Figura 4. Esta condición de moderada susceptibilidad estará sujeta al igual que los demás niveles, a comportamientos hidrogeomorfológicos complejos ante la presencia de factores detonantes o desencadenantes tales como eventos hidrometeorológicos y cosísmicos, pudiendo interpretarse los niveles de moderada susceptibilidad como aquellas zonas que mantiene suficientes condiciones físicas para que se generen los procesos asociados a movimientos en masa.

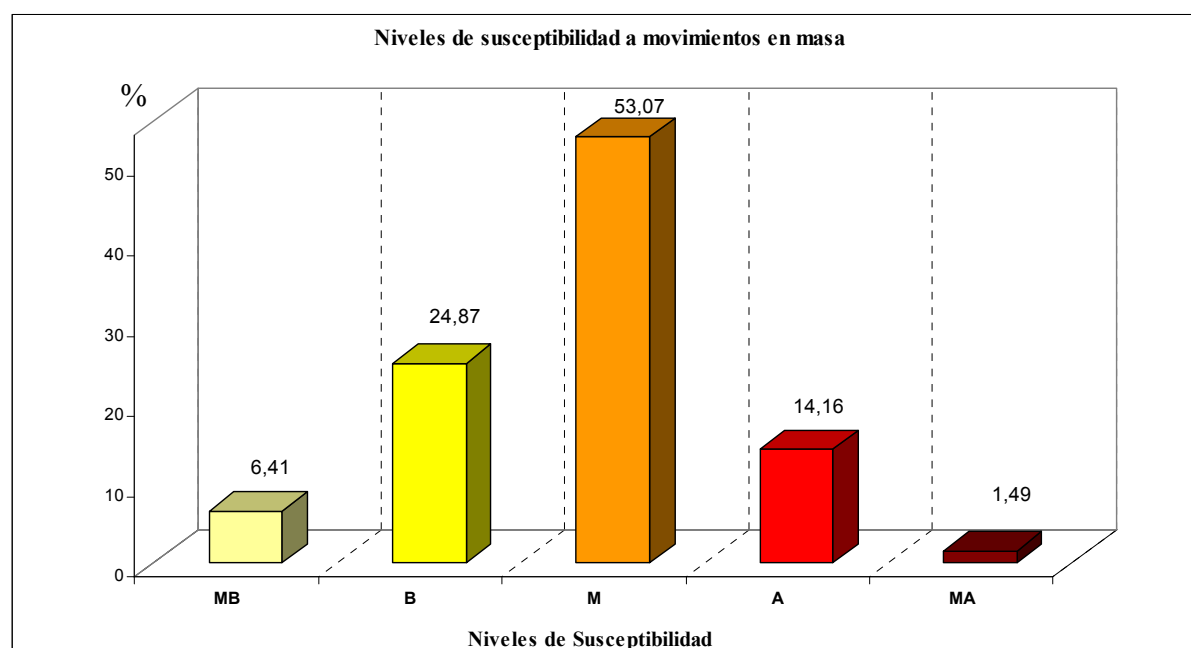


Figura 4. Niveles de susceptibilidad a movimientos en masa.

La Figura 5 permite observar que los niveles de baja (B) y muy baja (MB) susceptibilidad, ocupan la mayoría de las áreas ocupadas por usos urbanos en las posiciones geomorfológicas más sobresalientes y con mejores condiciones topográficas y geológicas. Sin embargo, algunas de estas zonas son susceptibles a los procesos geomorfológicos de mayor magnitud en las áreas colindantes con: bordes de taludes y vertientes inestables, dando pie a la posibilidad de ser afectadas. Esto quiere decir que su nivel de susceptibilidad real ante la potencial afectación, dependerá del comportamiento de los procesos geomorfológicos en las zonas vecinas de mayor susceptibilidad y la acción de factores hidrometeorológicos o cosísmos detonantes, los cuales pueden acelerar o reactivar los procesos, avanzar hacia las áreas pobladas y generar daños.

En el nivel de muy baja susceptibilidad con 6,41 % del área total, destacan las zonas dentro de la terraza de Mérida, retiradas de los bordes de los taludes y sobre relieves relativamente planos, con gradientes inferiores a (5°), pero sobre posiciones geomorfológicas altas o superiores dentro de la terraza de la ciudad de Mérida y en secciones de abanicos aluviales. Se corresponden con zonas bastante retiradas de las superficies de ruptura y de vertientes con pendiente abrupta, así como distantes a zonas de contacto coluvio aluvial.

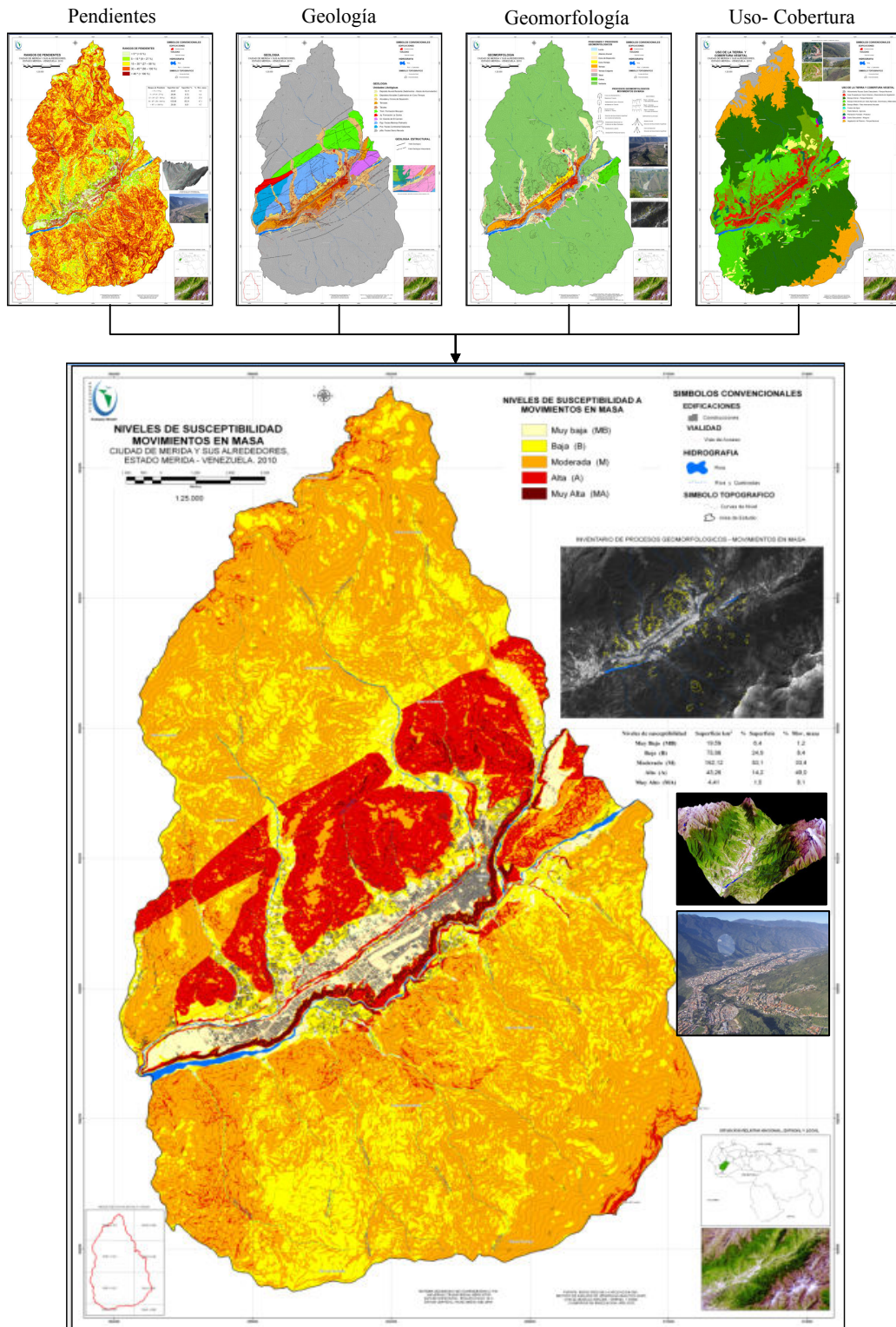


Figura 5. Mapas temáticos utilizados y resultado de la zonificación.

4. Conclusiones

El mapa de las áreas susceptibles a movimientos en masa, posibilita la planificación de la ocupación para sitios con potencialidades y sin restricciones, constituyendo así un importante instrumento para la gestión de riesgos. A través de los mapas de las variables condicionantes y el resultado de la aplicación del método AHP, se pueden establecer diferentes niveles de restricciones para la ocupación o expansión urbana evitándose así desastres futuros.

Queda claro que las zonas correspondientes a taludes y vertientes con gradientes considerables y geológicamente inestables, poseen alta y muy alta susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa, situación que determina la vulnerabilidad de algunos sectores en el ámbito bajo estudio y que son de interés para la gestión de riesgo en las comunidades.

El método AHP demostró ser recomendable para este tipo de análisis de susceptibilidad debido a que permite al usuario la manipulación de distintas coberturas cartográficas relativas al problema planteado y finalmente permite obtener resultados satisfactorios en corto tiempo.

Se deben adicionar mayor número de condicionantes en este tipo de análisis multicriterio, por ejemplo: estudios detallados de suelos, estudios sedimentológicos y geológicos y análisis de las condiciones meteorológicas y sísmicas como factores detonantes de los procesos analizados en esta investigación.

El uso de imágenes provenientes de sensores remotos permitió actualizar la información cartográfica de manera rápida y práctica, superponer información cartográfica fundamental para el análisis de la susceptibilidad, generar mapas derivados, modelos digitales del terreno, visualización en pantalla de la realidad presente en el área bajo estudio y apoyar la interpretación de los resultados.

El sistema para procesamiento de informaciones georeferenciadas (SPRING), es una herramienta ideal para los trabajos que intentan realizar análisis espacial a través de datos matriciales o vectoriales, en especial para el cruzamiento de capas de información cartográfica temática, en donde se amerita dar jerarquías en función de la importancia de las mismas, facilitando el análisis cartográfico en un lenguaje espacial para geoprocesamiento algebraico que permite obtener resultados satisfactorios.

Referencias bibliográficas

- Cabello, O. **Estudio Geomorfológico de Mérida y sus Alrededores**. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de geografía. Mérida. 1966. 105 p.
- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.V. (Ed.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 344 p. (INPE-10506-RPQ/249). Disponible en: <http://urlib.net/sid.inpe.br>. Acceso el: 27 Ago. 2001.
- Irigaray. C.; Chacón, J. **Métodos de Análisis de la Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera Mediante SIG**. Madrid España. 2002. p. 21 – 36
- Miranda, J. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Editorial Embrapa. Brasil. 2010. 433 p.
- Saaty, T. **The Analytical hierarchy process**. New York. USA, Mc Graw Hill. 1980. Pittsburgh: RWS Publications. 192 p.
- Oliveros, O. **Estudio Geotécnico de la Ciudad de Mérida y sus Alrededores**. Congreso Geológico Venezolano V, Ministerio de Energía y Minas.- Sociedad Venezolana de Geólogos TIV. 1997. 1779-1798 p.
- Varnes, D.J. **Landslide Hazard Zonation. A Review of Principles and Practice**. UNESCO press, Paris, 1984. 63 p.