

## LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIGs) EN LA DETECCIÓN DE ÁREAS INESTABLES

Heriberto Gómez<sup>1</sup>, Fernando Guerra<sup>2</sup> y Julio González<sup>3</sup>

*Universidad de Los Andes-Táchira, Dpto. Cs. Sociales- Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica*

### Resumen

Los avances científico-técnicos alcanzados en las ciencias ambientales, geográficas y de la Tierra han tenido una fuerte connotación renovando tanto los enfoques teóricos de estudio, como los métodos y técnicas de investigación en el campo ambiental y espacial. Hoy día, para el reconocimiento e inventario de recursos y para el manejo y aprovechamiento de los mismos se utilizan diferentes herramientas de percepción remota y procesamiento automatizado de información espacial, las cuales se han convertido en los medios más útiles y eficientes en las labores de investigación, principalmente en la prevención de amenazas naturales. Este trabajo tiene como objetivo describir y resaltar diferentes aspectos relacionados con el uso y aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) en la detección de áreas inestables en medios montañosos andinos, en base a experiencias locales y de otras partes. Se destacan las bondades de los SIGs en estas labores así como el uso de herramientas complementarias para la integración y análisis de la información de diferentes parámetros intrínsecos y extrínsecos a la problemática de la estabilidad de terrenos, para la representación tridimensional del relieve (modelos digitales de elevación) y de modelos para la predicción de áreas susceptibles a sufrir procesos morfodinámicos inestabilizantes.

**Palabras claves:** Inestabilidad Morfodinámica, Sistemas de Información Geográfica, Sensores Remotos, Modelos Predictivos.

## GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS (SIGs) IN THE DETECTION OF UNSTABLE AREAS

### Abstract

The reached scientist-technical advances in environmental, geographic and Earth sciences have had a strong connotation renewing not only the theoretical approaches of study, but also the methods and techniques of investigation in the environmental and spatial field. In this sense, nowadays, for the recognition and inventory of resources and their appropriated management, different tools from remote sensing and automated processing of space information are used, which have become in the more efficient approaches in this type of investigation, mainly in the prevention of natural threat. This work describes and emphasises, on the basis of local experiences and from other parts, different aspects related to the use and application of the SIGs in the detection of unstable areas in the Andean mountainous. Kindnesses of the SIGs as well as the use of complementary tools for the integration and analysis of the information from both intrinsic and extrinsic parameters refer to the land stability are examined. The use of SIGs for both the three-dimensional representation of

<sup>1</sup>Geógrafo, PhD. en Geografía. Email: hgomez@tach.ula.ve.

<sup>2</sup>Geógrafo, Email: fguerra@tach.ula.ve

<sup>3</sup>Ing Forestal, M.Sc. en Ciencias del Suelo. Email: jtovar@tach.ula.ve

the relief (elevation digital models) and the development of models for the prediction of areas susceptible to morphodynamic processes are also considered.

**Key words:** Morphodynamic instability, Geographical Information Systems, Remote Sensing, Predictive models.

### **Introducción**

Tal como lo demuestran las estadísticas (CRED, 2000), la ocurrencia de desastres naturales ha tenido un incremento considerable en las décadas recientes y parece que tal tendencia se mantendrá. En efecto, el impacto provocado por estos fenómenos, lejos de reducirse con el avance tecnológico y científico, tiende a incrementarse. Lógicamente, habría que contemplar en estos comentarios que también ha existido un aumento considerable de la población mundial, mucha de ella viviendo en áreas no adecuadas - sin importar su estatus socio-económico - pero además, habría que considerar el desarrollo drástico que han tenido las fuentes de información y comunicación, lo cual hace que la población mundial esté más informada sobre acontecimientos que ocurren no sólo en su ambiente local sino mucho más allá. En otras palabras, muchos más desastres o acciones de eventos son reportados y conocidos en la actualidad que en el pasado cercano y esto pudiera estar incidiendo en las mencionadas estadísticas.

Al referirse a los fenómenos naturales no se puede dejar de mencionar aquellos eventos que están intrínsecamente asociados al problema de la inestabilidad o pérdida de estabilidad de las vertientes. La ocurrencia de movimientos en masa, por ejemplo, que representan la evidencia más conspicua de inestabilidad, provoca daños considerables anualmente en muchos países del mundo. Esto es comprobable con las referencias (Schuster, 1996; IFRC, 2000) que muestran el gran número de pérdidas humanas - casi 200 mil en el siglo pasado - ocasionadas por derrumbes, deslizamientos y otros procesos morfodinámicos que ocurren en vertientes donde la estabilidad se ha perdido, y que por el colapso, los materiales - incluyendo bloques rocosos, suelos, vegetación e infraestructuras - son desplazados desde las partes más altas hacia las más bajas en, a veces, grandes volúmenes.

Además de la pérdida de vidas humanas, durante estos eventos catastróficos hay también grandes impactos ecológicos y ambientales que repercuten, obviamente, en la calidad de vida de la población. Enormes extensiones de tierras cultivables, cursos de aguas y bosques naturales son seriamente afectados, a veces completamente obliterados, por la acción de las masas desplazadas. Pero, además, las pérdidas económicas que la incidencia de estos hechos tiene, son a veces de considerables proporciones. En efecto, aquellos países donde es posible llevar un registro de las pérdidas económicas, ocurridas tanto por el daño directo como por las inversiones requeridas para la recuperación, reflejan que los efectos de los movimientos en masa por la inestabilidad de los terrenos, representan cifras monetarias cuantiosas que sobrepasan en algunos casos más de un billón de dolares al año (Schuster, 1996).

El caso de la inestabilidad de los terrenos capta la atención de las personas que hacen vida en un ambiente montañoso de gran envergadura como lo es el ambiente andino. Características muy particulares asociadas al hecho montañoso obligan a que la

inestabilidad de los terrenos sea un problema de prioritarias consideraciones. Los Andes poseen, en efecto, una gran diversidad en cuanto a sus rasgos litoestratigráficos, pedológicos y climáticos, que hacen de esta supra unidad morfoestructural un ambiente propicio para la ocurrencia de procesos morfodinámicos, que muchas veces, impactan negativamente a las comunidades. La diversidad litológica y edáfica no es "per se", el problema mayor. La amenaza la constituyen aquellos cuerpos rocosos y de suelos deleznable que bajo la mínima acción de los agentes del medio, desencadenan sin mayor dificultad grandes cambios morfodinámicos que se manifiestan en incontrolables procesos erosivos, donde los movimientos en masa son uno de los de mayor impacto. En los Andes se tienen pues, una alta variedad de formaciones geológicas en superficie y de suelos desarrollados a partir de esos materiales, proclives a ser afectados con relativa facilidad por el intemperismo y/o la acción modeladora del medio. Aunque la inestabilidad de las vertientes montañosas es una amenaza constante para la sociedad andina, se debe reconocer, en cierto modo, lo positivo de esta intensa actividad morfodinámica, al propiciar el desarrollo de procesos morfogénicos y pedogénicos que se manifiestan en el desarrollo de nuevas formas del paisaje y en la evolución de las condiciones de los suelos.

Aunado a las particularidades previamente descritas de los ambientes andinos montañosos, también debe considerarse, que estas enormes masas estructurales poseen un relieve accidentado, con una considerable variabilidad altitudinal que en recorridos muy cortos se manifiesta en pendientes moderadas a fuertes. Bajo tales condiciones topográficas, la inestabilidad de las vertientes se acelera dejando que la acción gravitatoria se manifieste en forma más evidente, como por ejemplo, el desplazamiento a velocidades variables de volúmenes de sedimentos que son movilizados verticalmente desde las secciones más inclinadas. Asociados a la topografía del macizo andino se observa además, una tendencia a cambios muy bruscos, en cortas distancias verticales, de las condiciones bioclimáticas y en consecuencia de la cobertura vegetal y uso de la tierra. Esta razón geográfica influye en la estabilidad de las vertientes en la medida en que los elementos que favorecen la inestabilidad convergen en un área determinada. Usos no recomendados de la tierra, cambios en la cobertura vegetal natural, alteración de la dinámica fluvial y cortes inadecuados para el desarrollo de infraestructura en las vertientes, son potenciadores de los mecanismos de desestabilización.

Los impactos que la inestabilidad de las vertientes pueden tener sobre el medio y la sociedad quedan perfectamente manifiestos en las cuencas de captación del Acueducto Regional del Táchira (ART), localizadas en los Andes venezolanos, al occidente del país. Las áreas de captación se encuentran en un ambiente donde predominan: formaciones geológicas que en su mayoría poseen materiales deleznable - alterados y diaclasados - como el caso de la Formación La Quinta del Jurásico, afectados por una activa tectónica asociada a la Zona de Fallas de Boconó -una de las más extensas y de mayor acción en el país-; una topografía típicamente andina con presencia mayoritaria de pendientes fuertes y moderadas; situaciones atmosféricas a mesoescala y de relieve que favorecen la ocurrencia de altas e intensas precipitaciones y, finalmente, un uso de la tierra que ha provocado históricamente, la desaparición de la casi totalidad de la vegetación arbórea natural a cambio de una vegetación herbácea.

Bajo estas condiciones biofísicas y geográficas descritas en los párrafos anteriores,

el normal desarrollo de las actividades asociadas a la captación y traslado de agua por túneles y tuberías a los centros de tratamiento, se ha visto seriamente afectado a través del tiempo. En décadas recientes, precipitaciones intensas han desencadenado, en estos terrenos inestables, la ocurrencia de un considerable número de movimientos en masa, sobre todo del tipo flujo de detritus. Estos hechos catastróficos han desplazado hacia las secciones bajas de las vertientes y hacia los colectores naturales, una cantidad considerable de sedimentos que destruyen los colectores y tuberías. Por esta razón, se invierten cuantiosos recursos en la potabilización del agua.

El colapso del sistema en varias oportunidades, con mayor frecuencia durante el período lluvioso, ha llevado a la suspensión del suministro de agua potable por tiempo prolongado a una población de casi un millón de habitantes, incluyendo las poblaciones fronterizas con Colombia, las cuales habitan en ambientes semi-áridos marcados por la escasez de agua. Es de suponer que casos similares se presentan con inusitada frecuencia en muchos países del hemisferio, y en particular de América Latina, donde la inestabilidad de los terrenos debería considerarse como aspecto obligado de estudio cuando se plantean planes locales o regionales de desarrollo.

### **Inestabilidad de vertientes**

El problema de la inestabilidad de los terrenos no es simple, por el contrario encierra una gran complejidad. Las preguntas serían diversas: ¿Qué produce la inestabilidad? ¿Por qué en un mismo sector algunos terrenos permanecen estables y otros colapsan con facilidad?. Es claro que el desarrollo y posterior colapso de los terrenos inestables dependen de la acción de un gran número de factores, variables o parámetros denominados por Terzaghi (1950) y Siddle, et. al. (1991) factores inherentes, pasivos o intrínsecos y factores activos, detonantes o extrínsecos.

Los pasivos o intrínsecos, son factores que hacen a una vertiente susceptible a la falla o colapso pero sin provocar el inicio del movimiento, creando sin embargo, las condiciones para que el terreno llegue a un estado de estabilidad marginal. Entre otros, los factores pasivos incluyen litología, propiedades geotécnicas del suelo, topografía, patrones de drenaje, meteorización y cobertura vegetal.

Los factores activos o extrínsecos hacen que las vertientes pasen de una condición marginalmente estable a un estado de inestabilidad, lo cual crea una alta susceptibilidad del terreno al colapso inminente. Estas variables detonantes incluyen altas e intensas precipitaciones, terremotos, erupciones volcánicas, grandes olas, rápido descongelamiento de la nieve y la alternancia de hielo y deshielo.

Los factores intrínsecos pueden cambiar en una amplia escala de tiempo mientras que los factores extrínsecos lo hacen sobre períodos de tiempo más cortos; sin embargo, se puede asumir que el colapso dependerá de la interacción de los dos grupos de factores mencionados.

Dado que es un tanto difícil estimar las propiedades extrínsecas, pues su radio de acción es sobre grandes territorios, la distribución espacial de las propiedades intrínsecas dentro de un área determinada facilita la determinación de la distribución espacial de la

susceptibilidad relativa de esa área a ser afectada por movimientos en masa.

De acuerdo con Varnes (1978), los procesos que conducen a una ruptura y colapso de los materiales comprenden un continuo evento de causa-efecto, que pueden ser agrupados en dos grandes bloques: los que incrementan la inestabilidad y los que la reducen. El incremento de la inestabilidad o cizallamiento induce al movimiento de partículas dentro de un cuerpo. Este incremento puede producirse por una sobrecarga, por levantamientos bruscos del terreno, por transitorio estrés provocado por terremotos y explosiones y por procesos que provocan la remoción del soporte basal. Al mismo tiempo, algunos materiales poseen la fortaleza o resistencia para soportar la deformación provocada por tensiones compresionales o por cizalla, de manera que, la reducción de esta fortaleza puede conducir al colapso.

Materiales con baja resistencia a la deformación, como los que se localizan en masas previamente afectadas por movimientos -deslizamientos por ejemplo- reflejan las características inherentes del material, sugiriendo la presencia de discontinuidades dentro de los cuerpos rocosos o suelos. En este orden de ideas, Young (1972) encontró que materiales orgánicos y arcillas pueden poseer un grado natural de baja resistencia, igualmente ocurre con aquellos materiales sometidos de manera permanente a altos contenidos de humedad.

### **Factor de seguridad**

Aunque se debate mucho sobre el tema de la estabilidad de los terrenos y las causas que provocan su inestabilidad y posterior colapso, la estabilidad puede ser definida, desde el punto de vista ingenieril, a partir de un factor de seguridad  $f$  (safety factor). De acuerdo con Cooke y Doornkamp (1990), el factor de seguridad, en su concepción más amplia, puede ser entendido como la suma de las fuerzas que resisten el fallamiento de la vertiente, dividido entre la suma de las fuerzas que ocasionan el fallamiento. Si ambas fuerzas son iguales entonces el valor de  $f$  es 1. Si  $f$  es menor que la unidad, están dadas las condiciones para el colapso del terreno en cuestión, pero si  $f$  es mayor que la unidad, es muy probable, según Selby (1993), que la vertiente sea estable. Sin embargo, es universalmente reconocido que no existe en la naturaleza un terreno con absoluta estabilidad, aunque ha sido demostrado que, la probabilidad de estabilidad se hace mayor en la medida en que el valor de  $f$  sea más grande.

$$f = \frac{\text{suma de fuerzas que se oponen al fallamiento}}{\text{suma de fuerzas favorables al fallamiento}}$$

El factor de seguridad es considerado como una fórmula que en su concepción global, resume muy bien la esencia de la inestabilidad de las vertientes y la forma cómo los parámetros o variables deben ser considerados en los análisis de inestabilidad.

La determinación de áreas propensas a sufrir colapsos, como movimientos en masa, es un elemento de gran importancia no sólo para la reducción de desastres naturales y sus impactos, sino también para la buena planificación del uso de la tierra. Sin embargo, hay que reconocer que a la fecha, a nivel mundial, los investigadores se esfuerzan en la creación de modelos eficientes para predecir la ocurrencia de movimientos en masa que

puedan desencadenarse en áreas inestables. En el caso particular de Venezuela, es de destacar que muchas de las investigaciones se han focalizado en el análisis de áreas ya afectadas por el fenómeno, pero salvo contadas excepciones, poco se ha hecho en el campo predictivo (Gómez, 2002).

### **Evaluación de la estabilidad**

Universalmente existen varias técnicas que permiten estudiar y analizar la distribución espacial de las áreas inestables y con ello la prevención de colapsos. Entre otros se pueden mencionar los métodos determinísticos, heurísticos y estadísticos, así como otras técnicas más recientes que incluyen la utilización de los sistemas de información geográfica (SIGs).

Los métodos determinísticos envuelven la estimación de valores cuantitativos de las variables de estabilidad (ejemplo factor de seguridad) sobre un área bien definida. Este método presenta buenos resultados en aquellos sectores donde son frecuentes movimientos en masa y donde los factores intrínsecos son relativamente bien conocidos. El modelo requiere de datos como resistencia y espesor del suelo, ángulo de inclinación y presión de poros, entre otros. Es efectivo en superficies pequeñas, pero inconsistente cuando los datos son incompletos. Por otro lado, los datos requeridos son a veces difíciles de obtener.

Los métodos heurísticos se basan exclusivamente sobre propiedades intrínsecas. Dentro de estos métodos se reconocen dos tipos básicos: el análisis geomórfico y la combinación cualitativa de mapas. El primero se ejecuta directamente en campo y la potencialidad de riesgo es establecida por el investigador. El segundo usa la combinación de mapas donde se utiliza la opinión de expertos para asignar los pesos a una serie de parámetros contenidos en los mapas temáticos. Estos métodos presentan limitaciones cuando el conocimiento del experto sobre el área de estudio es escaso, lo cual conduce a dudosas generalizaciones. También se corre el riesgo de una sobrecarga de subjetividad al momento de asignar pesos a los parámetros utilizados.

Los métodos estadísticos usan muestras de datos obtenidos a partir de la interrelación entre la variable dependiente, la cual puede ser por ejemplo, la ausencia o presencia de movimientos en masa, y las independientes, como por ejemplo, los parámetros intrínsecos. Se consideran dos tipos de métodos estadísticos: los bi-variados y los multi-variados. En el primero, cada mapa-parámetro se cruza con el mapa de inventario de movimientos en masa, obteniendo así un peso de la densidad de los movimientos según cada una de las categorías contenidas en los mapas-parámetros. En el método multivariado, todos los parámetros relevantes son muestreados utilizando una matriz o unidades píxeles. Para cada unidad reconocida, la presencia o ausencia de movimientos en masa también es establecida. La data requerida, para que el desarrollo y resultados de los métodos estadísticos sean aceptables, es generalmente grande. Por otro lado, están usualmente supeditados al registro continuo de movimientos en masa.

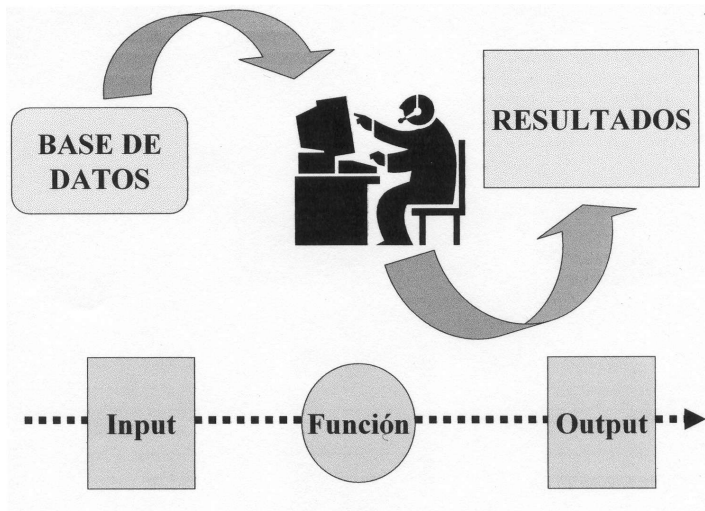
### **Los Sistemas de Información Geográfica (SIGs)**

Los sistemas de información geográfica o SIGs representan una herramienta alternativa para el análisis de áreas potencialmente inestables. Tal como se ha expresado hasta ahora, la ocurrencia del colapso de una vertiente depende generalmente de la interacción

de un complejo número de factores parcialmente interrelacionados. El análisis y determinación de áreas inestables requiere de la evaluación de la relación entre distintas condiciones del terreno y la ocurrencia de movimientos en masa.

Los SIGs poseen la capacidad de poder almacenar y manipular grandes volúmenes de datos relacionados a los diferentes factores del terreno, considerándolos como capas de mapas temáticos, lo cual era una limitante para muchas de las técnicas hasta ahora empleadas. Aún más, parte de las técnicas tradicionalmente utilizadas encontraron en los SIGs un medio para su desarrollo y aplicación efectiva. Los SIGs son definidos, según el DOE (1994:11), como un "sistema para capturar, almacenar, validar, integrar, manipular, analizar y representar datos referenciados sobre la Tierra". Los componentes básicos de un SIGs se resumen en (Figura 1):

- a. Hardware, constituye la parte sólida del sistema. Está conformado por la computadora y todos los periféricos auxiliares, entre los que se cuentan: escaner, impresora, mesa digitalizadora, quemadora de discos compactos, cables, entre otros. Un sofisticado equipo proveerá una mayor capacidad de almacenamiento y velocidad de procesamiento. Al mismo tiempo que una pantalla de regular tamaño (17" o más) facilitará el trabajo con las imágenes o capas.
- b. Software, constituye la parte "blanda" del sistema. Está constituida por los programas o software operativos que permiten el desarrollo de los sistemas necesarios para el procesamiento de los datos. El software posee en su diseño interno un conjunto de operaciones lógico-matemáticas y algorítmicas que facilitan dichos procesamientos.
- c. Personal, es la parte inteligente del sistema. Comprende el personal técnico que opera las computadoras y los periféricos, además, desarrolla y alimenta el sistema. El personal interroga al sistema y recibe de éste respuestas, como información, expresadas en mapas, tablas y gráficos. El usuario no sólo está representado por el operario dentro de un concepto SIGs, sino también por el elemento externo que hace uso de la información generada del SIGs (un turista, por ejemplo). El operario requiere tener conocimientos del SIGs, mientras que el usuario común no requiere de él.
- d. Datos, es la base numérica y cualitativa sobre la cual funciona el sistema. Los datos provienen de distintas fuentes y pueden ser introducidos al sistema de manera manual o automática. Los datos deben ser de buena calidad pues de ello depende la confiabilidad de los resultados. La obtención de los datos genera el mayor costo y consumo de tiempo dentro del SIGs. Todos los datos deben ser convertidos a un formato digital, lo cual puede hacerse, por ejemplo, utilizando un escaner para llevar un mapa de papel a esta condición.



**Figura 1.** Componentes de un sistema de información geográfica

La fuente de datos necesaria para el análisis de áreas inestables dentro de una plataforma SIGs es de origen variado. Una fuente primaria de datos lo constituyen los trabajos llevados a cabo en campo. Aquí una importante cantidad de datos pueden ser generados incluyendo geología, suelos, inventario de colapsos pre-existentes, tanto activos como latentes, uso de la tierra, tipo de vegetación, entre otros. De todos los datos levantados en campo, el inventario de los procesos morfodinámicos actuales y pasados es fundamental. Este inventario debe incluir el número de fenómenos, su localización precisa, dimensiones, tipo, tiempo de ocurrencia, material afectado y de ser posible una reseña de los mecanismos detonantes.

Soeters y Van Westen (1996) sugieren, que dependiendo del tipo de terreno estudiado, intervalos de tiempo entre 5 y 20 años pudieran ser los adecuados para el estudio de áreas inestables colapsadas. Este método de análisis de intervalos permite estimar eficientemente el número o porcentaje de movimientos en masa reactivados, nuevos o estabilizados. La información puede ser presentada luego como un porcentaje de cobertura dentro de un mapa de unidades. Estas unidades de mapeo pueden relacionarse con unidades geomórficas, unidades geológicas, o cualquier otro tipo de unidades cartográficas que influyan en estos procesos. Este trabajo requiere obviamente de la cooperación multidisciplinaria, que no necesariamente incluya al especialista en SIGs, pero si a geólogos, pedólogos, geomorfólogos, geógrafos, entre otros.

Los mapas constituyen una importante fuente de datos para alimentar un SIGs que se esté desarrollando para el estudio de áreas inestables. La utilización de una cartografía temática que incluya la representación visual de los resultados que arrojaron estudios previos de un área determinada, como geología, geomorfología y suelos, entre otros; significa un ahorro en tiempo y costo para la investigación a desarrollar. Por lo general, estos mapas temáticos son elaborados por especialistas que siguen procedimientos rigurosos de gabinete, campo y laboratorio, haciendo de estos mapas una fuente confiable de datos. La información cartográfica elaborada en papel puede ser ingresada al sistema,

rasterizada o digitalizada, utilizando para ello los recursos periféricos como el escaner o la mesa digitalizadora. Al ser operada dentro de la herramienta SIGs, esta data cartográfica puede ser manipulada en forma de capas, las cuales poseen la bondad de estar georeferenciadas. Esto facilita, por ende, la realización de cálculos como la estimación de superficies, perímetros y distancias. Además, cada nuevo elemento que sea incorporado al mapa digitalizado quedará automáticamente bajo el sistema de coordenadas y datum preestablecido, es decir, en correspondencia precisa con la localización del fenómeno en el terreno.

Un recurso incuestionable en los estudios de áreas inestables lo constituyen los sensores remotos. En efecto, la información capturada por sofisticados equipos a distancia del objeto bajo estudio, permite al operario no sólo tener una mejor comprensión del fenómeno sino que facilita el análisis de las variables asociadas al mismo.

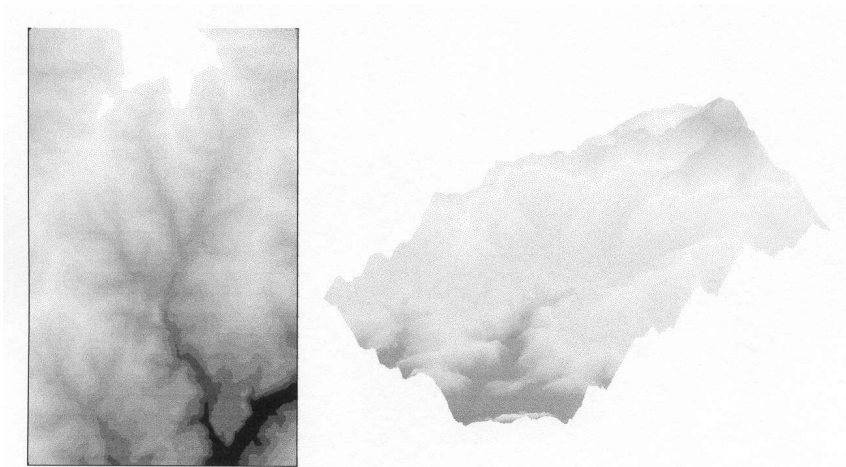
Entre otros, las fotografías aéreas aportan al investigador valiosa información en cuanto a características geológicas, cobertura vegetal, inventario de movimientos en masa y otros procesos morfodinámicos presentes en el área de estudio. Las fotografías aéreas poseen varias cualidades entre las que destacan: 1) la escala, que facilita las mediciones de los fenómenos observados y, 2) la estereoscopia, que facilita el análisis de estructuras geomórficas en su contexto tridimensional. Finalmente, las fotografías aéreas hacen que el trabajo de campo se ejecute a un menor riesgo y en el menor tiempo posible.

Junto con las fotografías aéreas, se puede considerar también el uso de las imágenes de satélite y de radar. Las imágenes de satélite tienen la bondad de aportar, dentro del estudio, algunos parámetros o elementos que incluso escapan de la percepción del ojo humano. Los satélites pueden, en efecto, capturar datos del objeto bajo estudio que están fuera del rango visible del espectro electromagnético. Esta característica permite estudios geológicos y geomorfológicos, entre otros, con un mayor nivel de precisión. Por otro lado, las escenas capturadas por satélites pueden hacerse con una frecuencia mayor y abarcando grandes extensiones. Satélites como el Landsat TM, SPOT e IKONOS, ofrecen una excelente resolución para los estudios de áreas inestables. Las escenas obtenidas con el Landsat TM se presentan en siete bandas que abarcan casi todo el espectro electromagnético, haciéndolo de gran utilidad en la generación de datos para los estudios de estabilidad de vertiente. El satélite SPOT, por otra parte, posee cualidades estereoscópicas similares a las fotografías aéreas, lo cual hace de este recurso una valiosa fuente de datos para los estudios geológico-geomorfológicos. Las imágenes IKONOS pueden alcanzar hasta un metro de resolución, lo cual implica obviamente un mayor nivel de detalle. Más recientemente se han venido desarrollando nuevos sistemas remotos capaces de alcanzar información sobre la superficie de la Tierra con una resolución de apenas centímetros.

Similar a las imágenes de satélite, las de radar, son utilizadas como una fuente importante de datos. Por ser un sensor activo, el radar compensa las limitaciones que presentan las imágenes de satélites en condiciones bioclimáticas adversas. El radar puede operar y capturar información a una resolución aceptable de la superficie, aún bajo condiciones de nubosidad y cobertura vegetal densa. La data generada por radar tiene una extensa aplicación en estudios geológicos y geomorfológicos de superficie, y por lo tanto, es de mucha utilidad dentro de los SIGs. Como se tratará más adelante, su reciente

aplicación en la generación de puntos de elevación hace del radar una interesante fuente de datos para el modelado digital del relieve.

Los modelos digitales de elevación (MDE) o DEM (por sus siglas en inglés), han dado un vuelco total a la utilización de los recursos cartográficos, específicamente de los mapas topográficos (Figura 2). La posibilidad de poder convertir un mapa bidimensional de curvas de nivel (el cual refleja las características topográficas del relieve utilizando líneas imaginarias que agrupan puntos sobre el terreno con igual valor altitudinal) a una imagen tridimensional, ha permitido el desarrollo de modelos y estudios más precisos sobre el relieve y sus procesos formadores.



**Figura 2.** Modelo digital de elevación (MDE). Quebrada La Jabonosa. Estado Táchira. Venezuela (Gómez, 2002).

Los MDE pueden ser definidos como una representación numérica de las continuas variaciones de las elevaciones que posee la superficie. Su desarrollo, ha estado asociado al de los sistemas computarizados capaces de permitir el manejo de un cuantioso volumen de datos de elevación en un área determinada. Los modelos digitales se construyen en base a dos estructuras básicas: TIN y GRID. En la estructura TIN, la superficie de elevación se genera a partir de triángulos en cuyos vértices se encuentran los valores de altitud. La GRID, es en realidad una matriz de datos donde se considera para cada celda o pixel un valor altitudinal. Aunque ambas estructuras producen excelentes resultados, McCullagh (1988), recomienda la estructura TIN en los estudios geomorfológicos.

Los modelos digitales de elevación son construídos utilizando diversas fuentes de datos que incluyen las fotografías aéreas, imágenes de satélite (como el SPOT), radar (como RADARSat y LIDAR), mapas topográficos, los cuales son aún una fuente importante de datos de elevación en muchos países del mundo; y, los GPS. Además de generar una información bastante precisa de los distintos puntos de elevación que existen sobre la totalidad de la superficie de un área estudiada, los MDE, permiten la estimación automática de variables asociadas a la inestabilidad de las vertientes y al estudio de los movimientos en masa. En efecto, una vez elaborado el MDE, se puede generar en fracciones de

segundo, mapas de sectores de pendiente, los cuales poseen la virtud de registrar el valor de la pendiente para cada pixel, haciendo más preciso el análisis. Así también se pueden crear mapas de aspecto o exposición de la vertiente, mapas de longitud de la vertiente relevantes en el análisis del alcance de una masa desplazada, mapas de índice de humedad y perfiles topográficos entre otros.

Es de reiterar que la velocidad de elaboración de estos mapas, a partir del MDE, puede tomar en algunos momentos sólo fracciones de segundo, lo cual se verá facilitado por la velocidad del equipo disponible y el tamaño de la data, aunque esta última, no es de mayor incidencia en la rapidez del procesamiento. Finalmente, la condición tridimensional de los MDE permite que estos sean actualmente utilizados con gran éxito en visualizaciones y fotorealismo.

### **Factores (parámetros) intrínsecos manipulados en ambiente SIGs para el estudio de áreas inestables**

Cuando se planifica un estudio de áreas inestables bajo una plataforma SIGs, sobre todo cuando se intentan desarrollar modelos para predecir la susceptibilidad de áreas a ser afectadas por movimientos en masa, la selección de los parámetros constituye un punto importante. Es de confesar, sin embargo, que hasta la fecha no existe una regla a seguir en cuanto al número de variables a considerar. Por ejemplo, Carrara, et. al. (1991), utilizaron algo más de 20 parámetros en un estudio de predicción de áreas propensas a movimientos en masa, desarrollado en Italia aplicando el método estadístico. Otros, como Grupta y Joshi (1990), han utilizado sólo geología y pendiente en los Himalayas, para modelos creados en ambiente SIGs con fines predictivos.

En reglas generales, puede afirmarse que el número de parámetros tiende a ajustarse a la realidad del área bajo estudio, a la disponibilidad de la data original y de los equipos y software adecuados para la recolección y procesamiento de la misma. La tendencia es, sin embargo, a utilizar parámetros promotores e inhibidores de la inestabilidad. Entre otros, pueden mencionarse cobertura vegetal, lineamientos, elevación, pendiente, longitud de la vertiente, índice de humedad, orientación o aspecto, suelos y geología. Estos parámetros pueden ser estimados a partir de tres fuentes básicas: mapas temáticos, imágenes de satélites y modelos digitales de elevación.

### **Modelos predictivos**

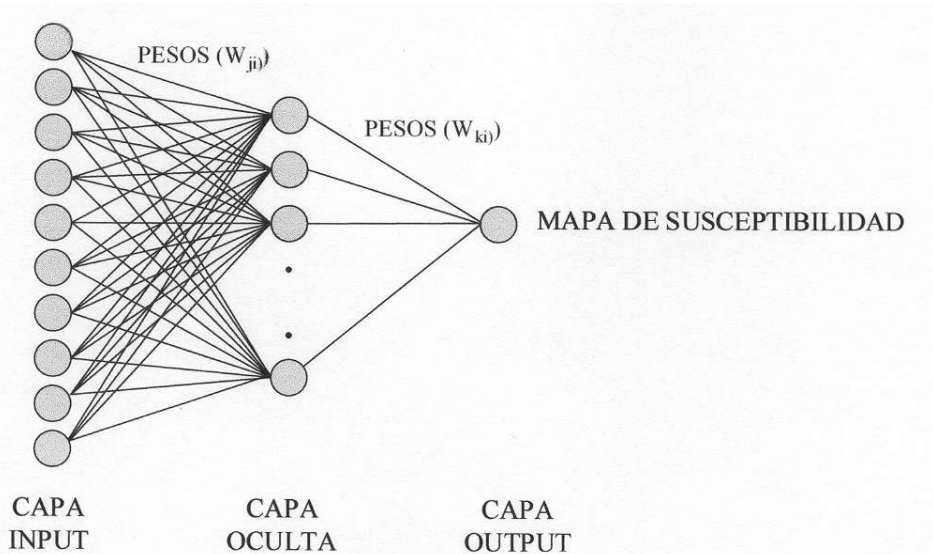
Los modelos predictivos constituyen un esfuerzo para intentar simular, bajo un ambiente controlado, un problema o situación adversa que puede estar afectando el interés colectivo, y dar, como consecuencia, una respuesta o recomendación acertada. En este orden de ideas, el desarrollo de modelos predictivos que permitan la delimitación, dentro de un contexto espacial definido, de áreas con mayor o menor grado de estabilidad y que son susceptibles de ser afectada por procesos morfodinámicos como los movimientos en masa, constituyen un reto para la comunidad científica dedicada al estudio de la problemática ambiental.

Los sistemas de información geográfica constituyen una comprobada herramienta que, en tiempos recientes, ha dado resultados exitosos en el campo de las predicciones de áreas susceptible al colapso, tal como lo han demostrado Van Westen (1993), Quintana

y Lomoschitz (2000), entre otros. En efecto, los SIGs facilitan el desarrollo de modelos como: a) redes neurales artificiales, b) Sinmap (Stability Index MAPping), y c) Shasltab (Shallow Landsliding Stability).

Las redes neurales artificiales (RNA) se han aplicado con resultados bastante positivos en otros campos del conocimiento, principalmente en el campo de las predicciones (Hassoun, 1995). Las redes neurales, son modelos computacionales que intentan emular las capacidades del cerebro humano imitando sus mecanismos más simples y obvios. Tal como lo destaca Schalkoff (1997), el cerebro humano posee un conjunto de cualidades que se intentan emular en los sistemas computacionales. En general, dentro de estas cualidades destacan las capacidades que posee el cerebro humano para utilizar las experiencias vividas, lo cual permite una preparación para enfrentar situaciones futuras similares o predecir circunstancias ante eventos desconocidos. Por otro lado, en función de la experiencia almacenada, el cerebro es capaz de generalizar sobre situaciones en las cuales no posee información completa y tiene una capacidad de recuperación y de aprendizaje continuo.

En el caso de las redes neurales artificiales, estas aprenden a reconocer un problema a partir de un grupo de datos que representan los patrones o parámetros intrínsecos y sus diversas categorías, y aplica estas reglas a un grupo de patrones que son dados como resultados. Así, las RNA, están diseñadas y entrenadas para resolver una variedad considerable de problemas. En este sentido Gómez (2002), desarrolló un modelo para establecer las áreas susceptibles a movimientos en masa utilizando RNA (Figura 3).



**Figura3.** Arquitectura de una red neural para detección de áreas inestables(Gómez, 2002).

Para ello, en la investigación se utiliza por un lado un mapa o imagen que contiene el inventario de los movimientos en masa, y por el otro, los parámetros que pueden estar incidiendo en la ocurrencia del movimiento. Así, el programa está en la condición de ser

entrenado utilizando una muestra representativa, para reconocer, en un sector afectado por un movimiento, cuáles fueron los parámetros que allí incidieron y, dentro de cada parámetro, precisar la categoría que tuvo el mayor peso para que el mencionado movimiento se efectuara. Una vez que la red es entrenada, se alimenta la misma con la totalidad de la data.

La red, ya con el conocimiento adquirido, puede ahora seleccionar aquellos sectores que agrupan parámetros y categorías específicas similares a aquellas donde, en otro espacio, bajo las mismas condiciones, ocurrió un movimiento en masa, por lo tanto sugerirá que este es un sector propenso al movimiento. Por el contrario, donde no se reúnan similares condiciones para el posible movimiento, los considerará como estables. Los resultados se presentan en un mapa con diversos intervalos de susceptibilidad, el cual es previamente procesado para darle colores a los tonos grises de la imagen que produce la red. Estos mapas pueden ser sobreimpuestos a un modelo digital de elevación para darle tridimensionalidad, facilitando así el análisis.

Cabe destacar que el programa arroja automáticamente datos sobre el error del mismo durante la fase de entrenamiento. Posteriormente, la imagen resultado es sometida a un procesamiento estadístico de muestreo aleatorio para determinar su precisión. En el caso en referencia, el modelo allí desarrollado, presentó un nivel de precisión de 90%. Este grado de precisión refleja la confiabilidad del método, la cual es ligeramente superior a otros ya probados.

SINMAP (Stability Index MAPping), es un modelo creado por Pack, et. al. (1998), de la Universidad de Utah en Estados Unidos. Consiste en una extensión, que corre con el programa ArcView, el cual sirve para evaluar áreas potenciales a sufrir movimientos en masa. El modelo tiene su fundamentación en la teoría de vertientes estables. Usando un modelo digital de elevación se derivan la pendiente del terreno, así como también las áreas con potenciales condiciones de humedad (índice de humedad), estimadas a partir de las características topográficas que facilitan la convergencia del flujo de agua. Otros parámetros del modelo son fricción del suelo, transmisividad, cohesión del suelo por el sistema radical y recarga del agua. Una vez ejecutado el programa se genera una imagen que contiene índices de estabilidad, que pueden ser utilizados para definir la potencialidad de un terreno a ser afectado por movimientos en masa.

De acuerdo con sus autores, la calidad de los resultados dependerá de la calidad del modelo digital de elevación y del mapa de inventario de los puntos de iniciación de los movimientos en masa que existan en el área de estudio. Este último, es usado como opcional por el usuario si desea comparar la localización de áreas inestables resultado de la predicción con aquellas que existan en la realidad. Finalmente, se debe destacar que el programa está disponible en la WEB en la dirección <http://www.engineering.usu.edu/dtarb>.

SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability), fue desarrollado por Dietrich y Montgomery (1998) en los Estados Unidos. El modelo trabaja de manera un tanto similar al anterior, pues corre en plataforma ArcView. Utiliza, como información base, además del modelo digital de elevación, una serie de parámetros de suelos entre los que destacan

la cohesión, densidad del suelo saturado, profundidad, conductividad hidráulica, ángulo interno de fricción y la inclinación del terreno. El modelo genera un mapa de estabilidad asociada con parámetros extrínsecos como lo es la precipitación. Por ejemplo, un sector dentro del área de estudio será "incondicionalmente inestable" si caen de 0 - 50 mm de precipitación al día, y otro, será "incondicionalmente estable" así la precipitación alcance valores entre 100 y 500 mm al día. El programa también está disponible en la WEB en la dirección <http://socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>.

### **Potencialidades y debilidades del SIGs**

Tal como se ha indicado a lo largo de este trabajo, los sistemas de información geográfica constituyen una herramienta idónea, tanto para el procesamiento y generación de parámetros, como para el análisis de áreas inestables. Estos poseen ciertas bondades que lo ratifican como instrumento útil cuando se desea procesar grandes volúmenes de datos de campo y laboratorio, así como en el tratamiento de información proveniente de sensores remotos. Entre sus ventajas cuentan, con la posibilidad de presentar la información en forma de mapas vinculados interactivamente a tablas, lo cual es necesario cuando se desea tomar decisiones. Por otro lado, los SIGs facilitan la actualización inmediata de la información.

Tienen los SIGs, lógicamente, algunas debilidades entre las que destacan, lo costoso de la inversión inicial en equipos, software y preparación de personal, pero sobre todo, los costos que genera la creación de una base de datos densa y confiable. También tienen el inconveniente de requerir, para cualquier estudio, de al menos dos software distintos, entre los que existen en el mercado. La razón es que difícilmente, un sólo paquete contenga todo los procedimientos y mecanismos operativos para llevar a cabo una investigación donde intervergan muchas variables con orígenes diferentes.

Existe en el mercado una cantidad considerable de programas para desarrollar SIGs entre los que destacan, el primero en su condición genérica como es ArcInfo, y su versión más actualizada ArcGIS. También se cuenta con otro potente software como ArcView, y su extensión más popular, Spatial Analyst, que puede ser utilizado para correr programas completos creados por el usuario. Otros software que trabajan con SIGs son: MAPInfo, el cual es una herramienta útil para el registro de mapas y la digitalización en pantalla; ERDAS Imagine, excelente para el procesamiento de sensores remotos y otras operaciones aritméticas; IDRISI, que es una buena herramienta para el análisis estadístico, utilizando directamente los mapas temáticos. Por último, entre otros, se pueden mencionar los programas ILWIS del ITC holandés y GRASS, este último, es una potente herramienta para desarrollar SIGs, creado por las fuerzas armadas de los Estados Unidos y está disponible en forma gratuita en la WEB.

### **Recomendaciones**

Finalmente, a continuación se sugieren algunas recomendaciones que pueden ser consideradas valiosas para abordar el estudio de la inestabilidad de los terrenos. Primeramente, es necesaria la conformación de equipos pluridisciplinarios que faciliten abarcar este problema de origen complejo, como lo es la susceptibilidad de los terrenos a la inestabilidad. Así, el equipo puede desarrollar o aplicar metodologías de trabajo que permitan, entre otros alcances, la conformación de una buena base de datos, pues como se ha señalado, es un elemento relevante dentro de este tipo de investigación. Por otro lado, es necesario

mantener un registro actualizado de los procesos morfodinámicos que continuamente afectan nuestro entorno, esto facilitará, entre otros aspectos, el desarrollo más efectivo de futuros modelos predictivos así como el conocimiento más preciso del impacto humano, ecológico y socioeconómico que tales eventos producen. Es necesario también contar con una buena base cartográfica, preferiblemente digitalizada o digitalizar la existente, así como planificar la adquisición de imágenes de sensores remotos.

La construcción de modelos digitales de elevación, aunque un poco laborioso, es una tarea sencilla, que permite tener a disposición una información digitalizada de las características topográfica del terreno. Tal como se ha expresado, a partir de los MDE puede derivarse un cúmulo importante de información, cuestión que el pasado reciente era una tarea muy ardua.

Aunque es parte de la inversión inicial que debe acometerse en casi todo proyecto, es necesario contar con programas que faciliten la implementación de los SIGs. Es recomendable para ello la adquisición de al menos dos software, que complementen sus funciones operativas. Con esta disponibilidad de equipos, datos, personal y software, sólo queda sugerir el desarrollo de modelos predictivos, los cuales han tenido mucho éxito en países de avanzada tecnología y donde también se presenta el problema de los impactos negativos que provocan las vertientes inestables.

### Referencias

- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. and REICHENBACH, P. (1991) "GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard". *Earth Surface Process and Landforms*, 16, 427 – 445.
- COOKE, R. and DOORNKAMP, J. (1990) *Geomorphology in Environmental Management: A New Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- CRED (Centre for Research in the Epidemiology of Disasters) (2000). Disponible en: <http://www.cred.be/emdat/intro.html>
- DIETRICH, W. E. and MONTGOMERY, D. (1998) SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential, NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement). Technical Report, February 1998, 29pp.
- DOE (Department of the Environment) (1994) *Landsliding in Great Britain*. Edited by D. Jones and M. Lee. London: HMSO.
- GÓMEZ, H. (2002) *Modelling landslide potencial in the Venezuelan Andes*. PhD Thesis, The University of Nottingham, UK.
- GRUPTA, R. and JOSHI, B. (1990) "Landslide hazard zoning using the GIS approach: A case study from the Ramganga catchment, Himalayas". *Engineering Geology*, 28 (1), 119 – 131.
- HASSOUN, M. (1995) *Fundamentals of Artificial Neural Networks*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press.

- IFRC (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies) (2000) World Disasters Report 2000. Disponible en: <http://www.ifrc.org>
- MCCULLAGH, M. (1988) Terrain and surface modelling systems: theory and practice. *Photogrammetric Record*, 12 (72), 747 – 779.
- PACK, R., TARBOTON, D. and GOODWIN, C. (1998), "The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping," In: 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada 21-25 September 1998.
- QUINTANA, A. and LOMOSCHITZ, A. (2000) "Landslides as a determining geomorphologic factor of the Barranco de Tirajana basin", *Gran Canaria. JAG*, 2 (1), 3 – 8.
- Schalkoff, R. (1997) *Artificial Neural Networks*. New York: The McGraw Hill Companies, Inc.
- SCHUSTER, R. (1996) "Socioeconomic significance of landslides". In A. Turner and R. Schuster (eds), *Landslides: Investigation and Mitigation: Special Report 247*. Transportation Research Board, National Research Council. Washington D.C: National Academic Press, 12 – 36.
- SELBY, M. (1993) *Hillslope Materials and Processes*. Oxford: Oxford University Press.
- SIDDLE, H., JONES, D. and PAYNE, H. (1991) Development of a methodology for landslip potential mapping in the Rhondda Valley. In R. Chandler (ed.), *Slope Stability Engineering*. London: Thomas Telford.
- SOETERS, R. and VAN WESTEN, C. (1996) *Slope stability: Recognition, analysis, and Zonation*.
- IN A. K. TURNER and R. L. SCHUSTER (eds), *Landslides: Investigation and Mitigation: Special Report 247*. Transportation Research Board, National Research Council. Washington D.C: National Academic Press, 129 – 177.
- TERZAGHI, K. (1950) Mechanism of landslides. In S. Paige (ed.) *Application of Geology to Engineering Practice*. New York: Geological Society of America, 83 – 123.
- VAN WESTEN, C. (1993) "Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation". ITC Publication No. 15. Enschede, Netherlands: ITC.
- VARNES, D. (1978) Slope movement types and processes. In R. Schuster and R. Krizek (eds), *Landslides: Analysis and Control: Special Report 176*. Washington, D.C.: National Research Council, 11 – 33.
- YOUNG, A. (1972) *Slopes*. Edinburgh: Oliver and Boyd.