

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE EL USO CONJUNTO DE SIG, TELEDETECCIÓN Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO. APLICACIÓN AL BARRANCO DE TIRAJANA (GRAN CANARIA)

HERVÁS DE DIEGO, Javier. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Directorate General Joint Research Centre, European Commission, 21020 Ispra (VA), Italia.
BARREDO CANO, José Ignacio. Space Applications Institute, Directorate General Joint Research Centre, European Commission, 21020 Ispra (VA), Italia.

RESUMEN

Se propone un método indirecto de evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos dentro de un SIG, que integra factores condicionantes de la inestabilidad de laderas, algunos de ellos extraídos a partir del análisis de imágenes de satélite multiespectrales y multitemporales, y técnicas de evaluación multicriterio basadas en jerarquías analíticas y sumas lineales ponderadas de pesos de factores y clases. Este método se ha aplicado a la depresión del Barranco de Tirajana (Gran Canaria), que está cubierta en su mayor parte por depósitos derivados de grandes deslizamientos principalmente traslacionales y rotacionales, desarrollados originalmente en coladas de lava y brechas volcánicas. El método permite evaluar cuantitativamente la consistencia en la asignación de pesos, con lo que se reduce la subjetividad inherente a ésta, que es típica de los métodos de indexación. Dicho método se considera especialmente útil para la evaluación de la susceptibilidad a escalas intermedias (1:25.000 y 1:50.000) en zonas donde apenas existen datos geotécnicos e hidrogeológicos, y en las que además no es factible realizar muestreos estadísticos adecuados, como en la depresión de Tirajana.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diversos métodos de evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos a través de SIG. Soeters y van Westen (1996), Aleotti y Chowdhury (1999) y Guzzetti et al. (1999), entre otros autores, proporcionan una amplia visión de los más utilizados, entre los que se incluyen principalmente los estadísticos, determinísticos, de indexación y de evaluación directa de la susceptibilidad. La aplicabilidad de cada método a una zona determinada depende sobre todo de las características y extensión de dicha zona, del tipo y extensión de los deslizamientos existentes, de los datos geotécnicos e hidrogeológicos disponibles y de la escala de trabajo.

Para la cartografía regional de susceptibilidad a escalas intermedias, del orden de 1:25.000 y 1:50.000, frecuentemente no se dispone de suficientes datos que permitan el uso de métodos determinísticos, siendo éstos además poco apropiados para tales escalas. El uso de métodos estadísticos, generalmente más adecuados en estos casos, puede comportar sin embargo un gran esfuerzo de recogida de datos. Cabe también destacar que estos últimos no son aplicables en zonas donde predominan los deslizamientos respecto a las áreas estables. Por otra parte, el empleo de métodos tanto de evaluación directa de la susceptibilidad como de evaluación indirecta mediante el uso de índices, implica generalmente una gran subjetividad, por lo que los criterios de evaluación son difícilmente extrapolables a otras zonas. Una aplicación más adecuada de los métodos de evaluación indirecta requiere la utilización de algún procedimiento que disminuya la subjetividad en la asignación de pesos o que normalice analíticamente el criterio con el que éstos se asignan a los diferentes factores condicionantes de deslizamientos considerados.

El método que se presenta en esta comunicación pertenece a esta última categoría. En éste se integran en un SIG diversos factores condicionantes de la inestabilidad de laderas, algunos de ellos obtenidos por teledetección, y se evalúa la susceptibilidad a los deslizamientos en general mediante técnicas de evaluación multicriterio. La metodología se aplica finalmente a la depresión del Barranco de Tirajana, en la isla de Gran Canaria.

2. METODOLOGÍA

El método empleado para la evaluación de la susceptibilidad requiere en primer lugar la creación de la base de datos mediante la elección y cartografía de los factores del terreno condicionantes de la inestabilidad. Para ello se utilizan técnicas tradicionales, como la fotointerpretación y el reconocimiento directo de campo, junto con otras de tratamiento digital de imágenes de satélite, de interpretación de imágenes de satélite tridimensionales (Hervás y Rosin, 2001) y de imágenes de sombreado del relieve a partir de modelos de elevación del terreno (MDE) de alta resolución. Asimismo se han digitalizado y actualizado algunos mapas ya existentes. Estos factores, una vez homogeneizados en cuanto a contenido, escala y formato gráfico, se integran en un SIG.

A continuación se subdivide cada factor en clases, a las que asignan pesos en función de su influencia relativa en la inestabilidad. Posteriormente se determina analíticamente el peso relativo de cada factor con respecto a los demás, usando para ello el método de evaluación multicriterio de las jerarquías analíticas (Saaty, 1980, 1994; Eastman et al., 1995). Éste utiliza una estructura jerarquizada de criterios (los factores del terreno en nuestro caso) junto con la comparación de criterios por parejas para establecer sus pesos. Con este método se crea primero una matriz cuadrada, en la que el número de filas y columnas viene definido en nuestro caso por el número de factores de inestabilidad. A cada elemento de la matriz se le asigna un valor que representa la importancia relativa del factor de su fila con respecto al de su columna en cuanto a posible inestabilidad. Saaty (1980) propone en otros casos de evaluación multicriterio que se asignen valores comprendidos entre 9 ("mucho más importante que"), 1 ("igual de importante que") y 1/9 ("mucho menos importante que"). En nuestro caso aplicamos una valoración más sencilla, comprendida entre 4 y 1/4. El autovector principal de la matriz, que representa el orden de prioridad de los factores, determina entonces

los pesos de éstos, mientras que a partir del autovalor máximo se puede obtener una medida cuantitativa de la consistencia de los valores asignados en la comparación entre pares de factores, como es la razón de consistencia (consistency ratio o CR). Valores de CR inferiores a 0,10 indican que los valores asignados son satisfactorios. En el caso de que CR fuera igual o superior a 0,10, éstos deberán ser evaluados nuevamente.

Una vez obtenidos los pesos de los factores, se obtiene finalmente un índice de susceptibilidad a los deslizamientos mediante la suma lineal ponderada (Voogd, 1983) de pesos de factores y clases, según la expresión:

$$I = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

siendo I el índice de susceptibilidad, w_j el peso del factor j , y x_{ij} el peso de la clase i del factor j . Finalmente se clasifican los índices en unos pocos intervalos iguales de susceptibilidad, más estandarizados y de interpretación intuitiva.

El procedimiento de las jerarquías analíticas da mayor preponderancia al peso establecido en los criterios sobre los valores asignados a las alternativas en el proceso de toma de decisiones (Barredo, 1996). Esto significa en nuestro caso que el índice de susceptibilidad obtenido depende fundamentalmente del peso asignado a los factores (evaluado mediante la razón de consistencia), y en menor medida de la asignación de pesos a cada clase dentro de un factor, por lo que la subjetividad y ausencia de control inherentes a éste último proceso no influye sobremanera en el cálculo del índice final.

Paralelamente a la evaluación analítica de la susceptibilidad, la visualización tridimensional de algunos de los mapas de factores condicionantes de la inestabilidad, e incluso de imágenes de satélite multiespectrales de alta resolución espacial (Hervás y Rosin, 2001), mediante su superposición a un MDE de alta resolución, permite ayudar tanto al propio analista como a las autoridades a una mayor comprensión de la influencia que dichos factores, ya sea individualmente o combinados entre sí, puede ejercer sobre las condiciones de estabilidad de la zona.

3. APLICACIÓN AL BARRANCO DE TIRAJANA

El método descrito se ha aplicado en la evaluación de susceptibilidad de deslizamientos en la depresión de Tirajana, en el centro de la isla de Gran Canaria (Figura 1). Esta depresión tiene una extensión de 48 km², con laderas de hasta 900 m de desnivel, estando bordeada por escarpes y cantiles que alcanzan 350 m de altura. Dicha depresión se ha originado por la erosión fluvial y el deslizamiento de series volcánicas subhorizontales, compuestas principalmente por brechas, ignimbritas y coladas de lava de composición variable, depositadas a partir del Mioceno durante diversos ciclos de vulcanismo (Lomoschitz y Corominas, 1997). Estos autores distinguen en la zona al menos 28 grandes deslizamientos, principalmente de tipo traslacional de rocas, deslizamientos de derrubios y, en menor proporción, flujos de detritos, con extensiones longitudinales que llegan a superar los 3 km y volúmenes de hasta más de 1 km³. Los depósitos de deslizamientos ocupan más del 60 % de

la depresión, habiendo comenzado a formarse a partir del Pleistoceno y reactivándose posteriormente de forma parcial en diversas épocas hasta el siglo pasado, originando así cuerpos de deslizamiento diferenciados de los formados inicialmente. Las sucesivas reactivaciones han dado lugar a una progresiva fragmentación y alteración de los materiales implicados en el movimiento.

La depresión de Tirajana, de clima semiárido, está tapizada por suelos semidesnudos, matorral y herbazal, con cultivos de regadío en laderas aterrazadas, pequeños centros urbanos, pinares en las partes más altas, palmerales en las bajas y afloramientos rocosos en escarpes. Los arroyos que drenan la depresión son de flujo estacional, destacando el Barranco de Tirajana.

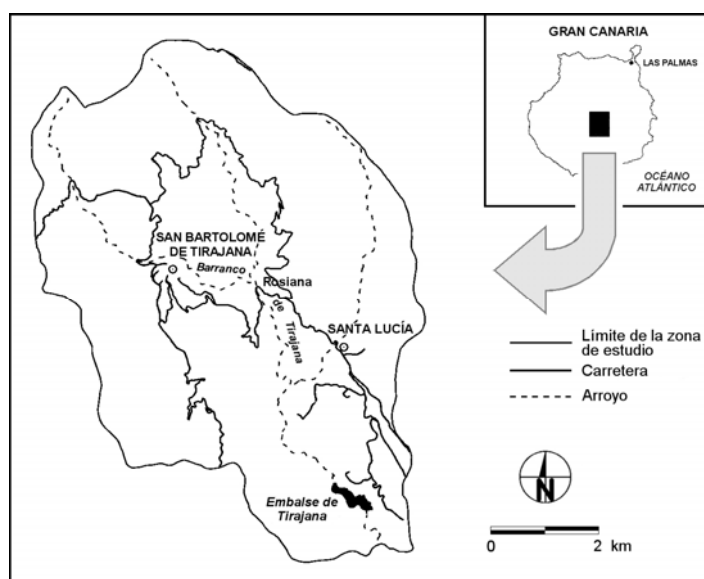


Figura 1. Localización de la zona de estudio

3.1 Contribución de la teledetección a la evaluación de la susceptibilidad

Algunos mapas temáticos utilizados frecuentemente como factores de inestabilidad en estudios a escalas intermedias, tales como los de usos del suelo, litológicos, de lineamientos y de drenaje, e incluso el MDE para el mapa de pendientes, se pueden obtener en muchos casos a partir de imágenes de teledetección (Rengers et al., 1992). En la depresión de Tirajana, no obstante, y en ausencia de grandes discontinuidades lineales, se han utilizado imágenes Landsat TM sólo para la obtención del mapa de cambios recientes de usos del suelo, integrado posteriormente en la base de datos de factores condicionantes de deslizamientos. Para ello se han utilizado dos imágenes de 4-7-84 y 4-8-95, realizándose los siguientes procesos:

- *Pretratamiento de las imágenes.* Antes de clasificar una secuencia de imágenes multispectrales es necesario corregir en cada una de ellas las distorsiones geométricas, los efectos radiométricos anómalos del sensor, los de iluminación (y por tanto sombreado) diferencial de las laderas en cada imagen y los de la atmósfera en el momento de cada adquisición. El resultado de cada uno de estos procesos se muestra en la Figura 2. Se ha generado así una imagen de reflectividad para cada una de las imágenes de la secuencia.

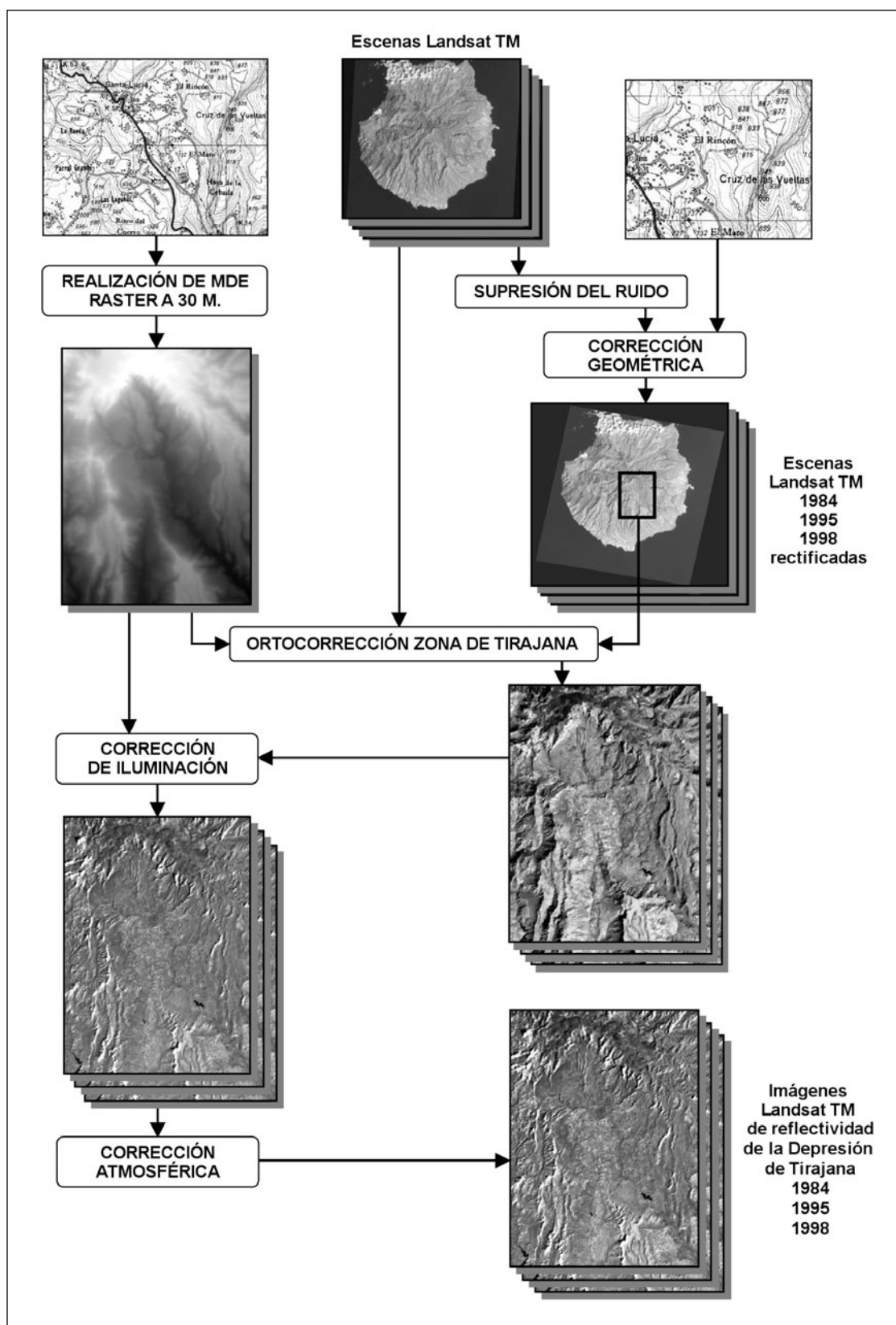


Figura 2. Secuencia de pretratamiento de las imágenes Landsat TM. (Original en color)

En los procesos de ortocorrección y corrección de los efectos de iluminación diferencial de las imágenes se ha utilizado un MDE de 30 m de malla (igual al tamaño del pixel de las imágenes Landsat TM). Este se ha generado básicamente a partir de curvas de nivel en formato vectorial a intervalos de 5 m, creando un modelo TIN (triangulated irregular network) con el software ARC/INFO, seguido por la creación de una malla de alturas por interpolación y un remuestreado raster a 30 m. El modelo TIN obtenido a partir de dichas curvas ha servido también para la producción de otros MDE raster de mayor resolución, que se han utilizado para la simulación de imágenes y de mapas tridimensionales.

- *Clasificación de usos del suelo.* A continuación se ha clasificado cada imagen de reflectividad en función de los usos del suelo, mediante un algoritmo supervisado de máxima probabilidad. En este proceso se evalúa la separación espectral a priori entre pares de clases utilizando un índice de divergencia transformada. Se han establecido de este modo 19 clases de usos del suelo en base exclusivamente a criterios espectrales, obteniéndose una precisión en la clasificación del 84% y 82% respectivamente para cada imagen.
- *Detección de cambios de usos del suelo.* A partir de un proceso de tabulación cruzada de las imágenes anteriormente clasificadas, se han obtenido las clases de cambios de usos del suelo, que posteriormente se agrupan en cinco clases de mayor significado en relación con la inestabilidad de laderas, componiendo así el mapa final de cambios.

3.2 Factores condicionantes de la inestabilidad

Como factores condicionantes de la inestabilidad se han seleccionado la pendiente del terreno, el tipo de materiales, la actividad de los movimientos de ladera, los cambios de usos del suelo, y las proximidades a fondos de barrancos y a embalses (Figura 3). A las clases que componen cada factor se les asignan pesos en una escala de 0 a 100, según la influencia estimada en la inestabilidad.

El mapa de pendientes se ha realizado a partir del DEM con malla de 30 m, utilizado también en la corrección de las imágenes Landsat TM. En éste se asignan los pesos de forma lineal a los valores de pendiente, correspondiendo el 0 y el 100 a las pendientes mínimas (0%) y a las máximas (171%), respectivamente.

Dada la relativa homogeneidad del sustrato rocoso con respecto a la inestabilidad y la predominancia de depósitos de deslizamientos sucesivos, el mapa de materiales se ha realizado fundamentalmente en base a su grado de fragmentación y alteración. En éste, los depósitos de deslizamiento se han diferenciado según su fase de reactivación, asignándose el mayor peso a los últimos de la secuencia (los más fragmentados y alterados), así como a los canchales al pie de cantiles.

Se han establecido asimismo tres clases en relación con la actividad de deslizamiento, según observaciones de campo: activos, que abarcan zonas con desprendimientos actuales, deslizamientos recientes y sectores de laderas con grietas al pie de algunos deslizamientos; inactivos, compuestos por todos los demás depósitos de deslizamientos, y sin deslizamientos.

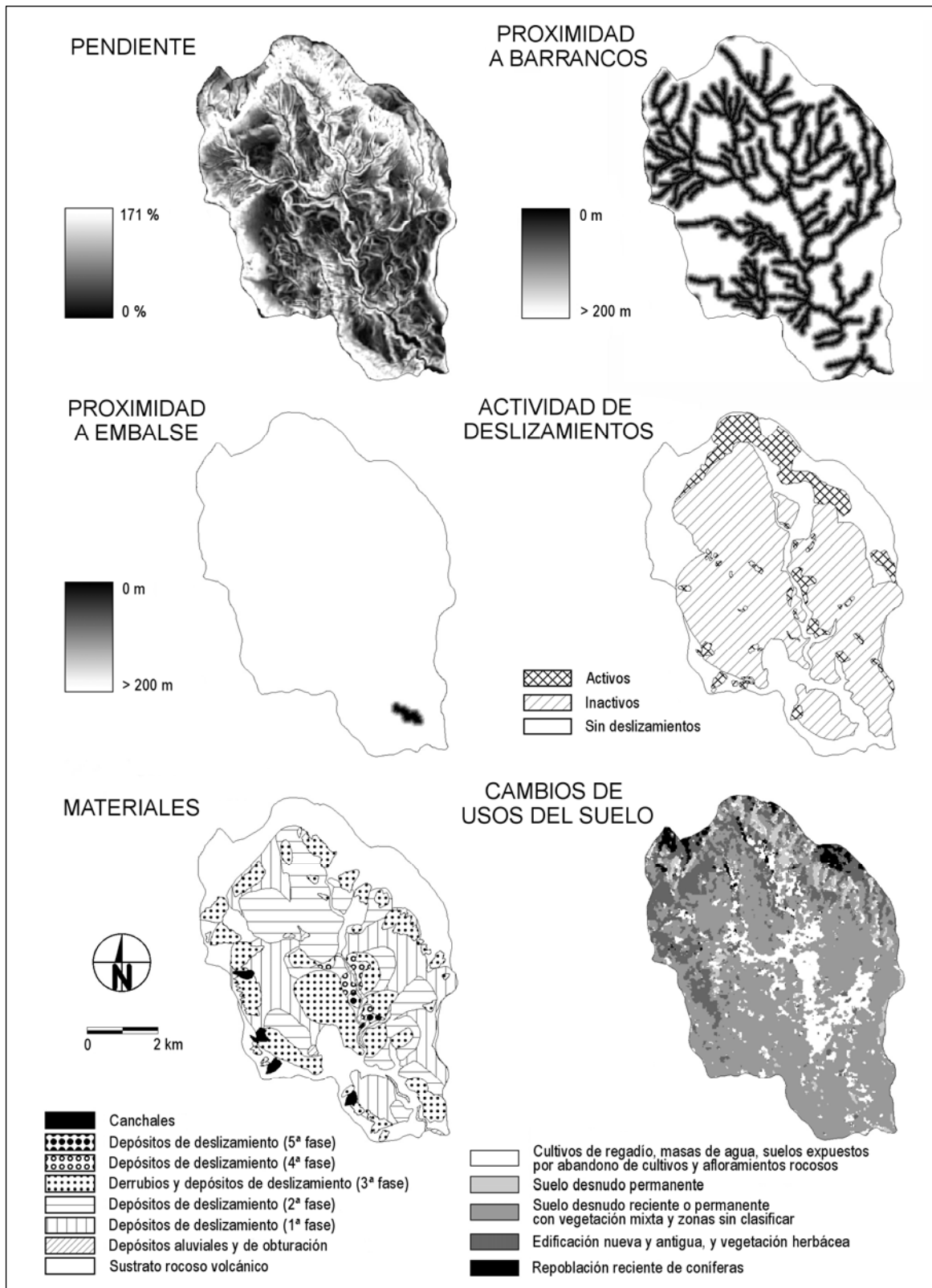


Figura 3. Factores condicionantes de la inestabilidad en la depresión de Tirajana. Los pesos de las clases se distribuyen en cada leyenda proporcionalmente de menor a mayor, de abajo a arriba.

En el factor de cambios de usos del suelo, obtenido a partir de imágenes Landsat TM, se han considerado los cambios producidos entre 1984 y 1995 sobre la base de las imágenes existentes de Gran Canaria tomadas en una misma época del año. En éste factor se asigna el máximo peso a zonas con regadíos en terrazas artificiales, al embalse y a zonas con cultivos abandonados. Por el contrario, a las repoblaciones recientes de coníferas se les asigna el mínimo peso.

En el factor de proximidad a barrancos, los cuales conllevan generalmente notables procesos de erosión, se considera un buffer de 200 m de anchura a cada lado del fondo, en el que se asignan de forma lineal los pesos dentro de la escala definida anteriormente, con el máximo valor en el fondo del barranco.

La proximidad al embalse viene considerada separadamente, en función de la inestabilidad ligada a posibles variaciones de las presiones intersticiales en los materiales deslizados sobre los que reposa, fuertemente fragmentados y alterados, en caso de rápido vaciado del embalse. Al igual que para los barrancos, se le asignan pesos linealmente en un área de influencia de 200 m a partir del nivel medio de sus orillas.

Finalmente, la visualización tridimensional de mapas como el de usos actuales del suelo, combinado con el inventario de deslizamientos, permite ilustrar el peligro que ciertas acciones antrópicas puede provocar en la reactivación local de deslizamientos ya existentes, así como el riesgo que ésta última implicaría sobre áreas edificadas e infraestructuras (Figura 4).

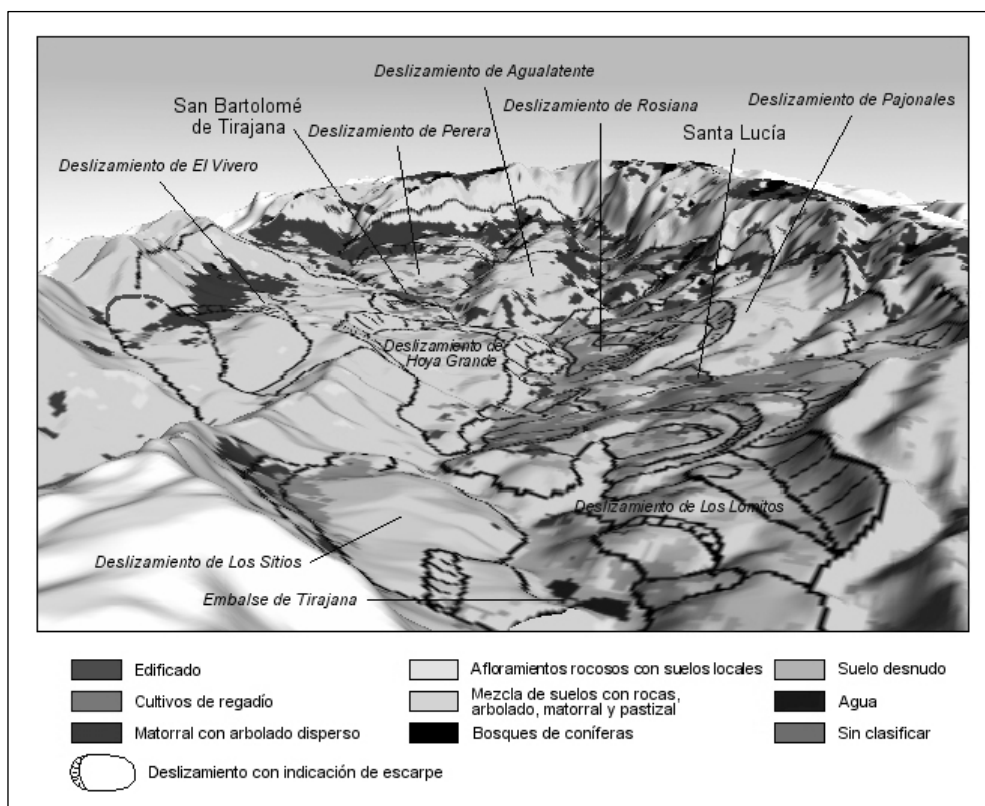


Figura 4. Vista en perspectiva de los mapas de deslizamientos y usos actuales del suelo en la depresión de Tirajana. (Original en color)

3.3 Determinación de la susceptibilidad de deslizamientos

Aplicando el método de las jerarquías analíticas, se ha creado la matriz con los juicios de valor relativos entre pares de factores condicionantes de la inestabilidad (Tabla 1), obteniéndose de este modo un peso para cada factor. La razón de consistencia resultante es de 0,02, lo que indica que la comparación es coherente. El índice de susceptibilidad, calculado mediante la suma lineal ponderada de pesos de factores y clases, se ha dividido finalmente en 5 clases de susceptibilidad a los deslizamientos en general (Figura 5).

	Pendiente	Proximidad a barrancos	Proximidad a embalses	Cambios de usos del suelo	Materiales	Actividad de deslizamientos	Peso
Pendiente	1						0,24
Proximidad a barrancos	1/4	1					0,06
Proximidad a embalses	1/2	2	1				0,13
Cambios de usos del suelo	1/3	2	1/2	1			0,09
Materiales	1/2	2	1	2	1		0,14
Actividad de deslizamientos	2	4	3	3	2	1	0,33

Tabla 1. Matriz de comparación de los factores condicionantes de la inestabilidad en Tirajana

3.4 Discusión de los resultados

Cabe destacar en primer lugar que los pesos de los factores actividad de deslizamientos y pendiente resultan los más elevados, mientras que el de proximidad a fondos de barrancos, el más bajo. El mapa de susceptibilidad resultante muestra los valores mayores en algunos cantiles y en canchales que cubren parcialmente grandes escarpes de deslizamientos antiguos. Existe también una alta susceptibilidad en las acumulaciones de derrubios existentes en algunas laderas de barrancos con cuerpos de deslizamiento recientes. Ambos movimientos corresponden fundamentalmente a desprendimientos. La susceptibilidad de deslizamientos superficiales, localmente en depósitos de deslizamientos cubiertos por cultivos de regadío en terrazas, resulta ser moderada. Por otra parte, dada la carencia de datos en profundidad, no se ha podido evaluar la susceptibilidad de posibles grandes deslizamientos profundos. Se estima, sin embargo, que ésta es muy baja.

El mapa de susceptibilidad obtenido se ha comparado con otro de la misma zona, realizado mediante observación directa del grado de susceptibilidad a deslizamientos, combinando

ambos en un SIG (Barredo et al., 2000). En ese estudio, el primer mapa muestra una generalización mayor, al usar los mismos pesos en todas las zonas con los mismos factores. Asimismo se puede afirmar que la suma ponderada de pesos de factores y clases tiende a suavizar la influencia de los valores extremos de los pesos en el cálculo del índice de susceptibilidad. Otro elemento que puede producir importantes diferencias con el mapa generado por observación directa es el criterio utilizado en la subdivisión de dicho índice en intervalos.

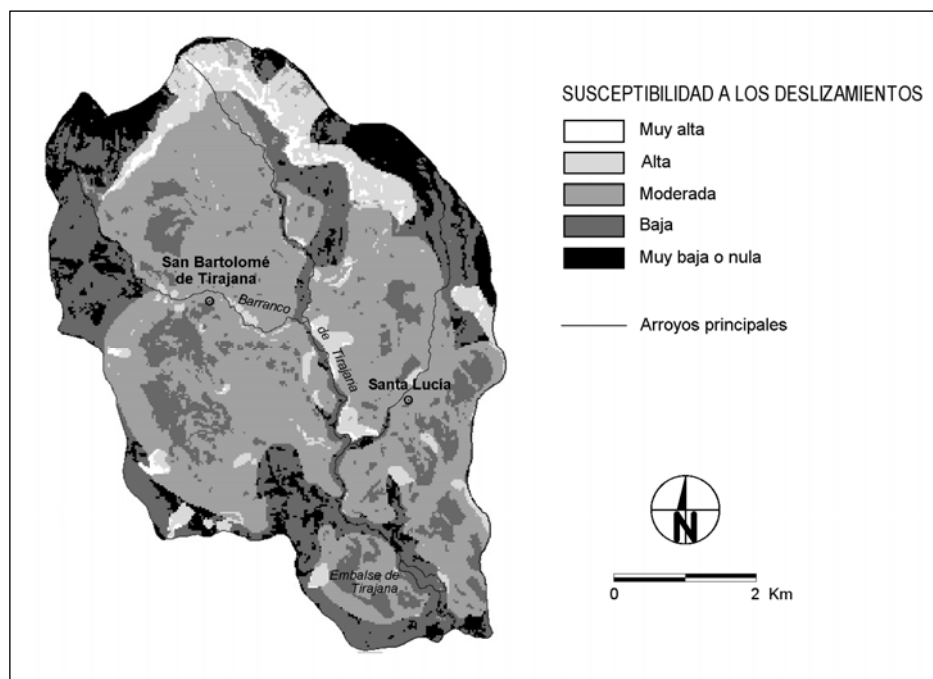


Figura 5. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de la depresión de Tirajana

4. CONCLUSIONES

El método propuesto, basado en técnicas de evaluación multicriterio implementadas dentro de un SIG, se considera eficaz para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos a escalas intermedias (1:25.000 y 1:50.000), en zonas donde no se dispone de datos geotécnicos o hidrogeológicos para la aplicación de métodos determinísticos. Dicho método constituye asimismo una alternativa a métodos estadísticos en zonas como la depresión de Tirajana, donde el predominio de laderas deslizadas impide el uso de técnicas de muestreo apropiadas, y donde la susceptibilidad está más relacionada con la reactivación de deslizamientos ya existentes que con la aparición de otros nuevos.

El uso de imágenes de teledetección multispectrales y multitemporales es de gran utilidad en la elaboración e integración en la base de datos del SIG de algunos factores condicionantes de inestabilidad, como el de cambios recientes de usos del suelo en zonas donde la precisión en su realización se considere importante.

La subjetividad implícita a este método a la hora de asignar pesos a clases y factores condicionantes de la inestabilidad, es generalmente inferior a la de otros métodos de indexación, al proporcionar una medida de consistencia en la asignación de pesos a los factores, siendo además el de éstos dominante con respecto al de las clases en la obtención del índice de susceptibilidad.

Dada la homogeneidad de los materiales y la escasez de deslizamientos recientes existentes en la depresión de Tirajana, sería deseable aplicar y validar el método propuesto en una zona con mayor variedad litológica, y por lo tanto con mayor variedad de movimientos, a fin de evaluar la susceptibilidad para cada tipo principal de deslizamientos por separado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto RUNOUT del IV Programa Marco de Investigación sobre Medio Ambiente y Clima de la Unión Europea (contrato nº ENV4-CT97-0527). Los autores agradecen a A. Lomoschitz y A. Quintana, de la Universidad de Las Palmas, su colaboración en dicho proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aleotti, P. y Chowdhury, R. (1999). "Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives". Bull. Eng. Geol. Env., Vol. 58, 21-44.

Barredo, J.I. (1996). "Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio"; Ra-Ma, Madrid.

Barredo, J.I., Benavides, A., Hervás, J. y van Westen, C.J. (2000). "Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain". Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 2, 9-23.

Eastman, J.R., Jin, W., Kyem, P.A.K. y Toledano, J. (1995). "Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions". Photogrammetric Engineering. & Remote Sensing, Vol. 61, 539-547.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. y Reichenbach P. (1999). "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy". Geomorphology, Vol. 31, 181-216

Hervás, J. y Rosin, P.L. (2001). "Tratamiento digital de imágenes de teledetección en el espectro óptico para el reconocimiento y control de deslizamientos". V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Madrid. En prensa.

Lomoschitz, A. y Corominas, J. (1997). "La depresión de Tirajana, Gran Canaria. Una macroforma erosiva producida por grandes deslizamientos". Cuaternario y Geomorfología, Vol. 11, 75-92.

Rengers, N., Soeters, R. y van Westen, C.J. (1992). "Remote sensing and GIS applied to mountain hazard mapping". *Episodes*, Vol. 15, 36-45.

Saaty, T.L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process"; McGraw-Hill, Nueva York.

Saaty, T.L. (1994). "Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process"; RWS Publications, Pittsburgh..

Soeters, R. y Van Westen, C.J. (1996). "Slope instability recognition, analysis and zonation". In Turner, K. y Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*; Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington DC, 129-177.

Voogd, H. (1983). "Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning"; Pion, Londres.