

TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN EN EL ESPECTRO ÓPTICO PARA EL RECONOCIMIENTO Y CONTROL DE DESLIZAMIENTOS

HERVÁS DE DIEGO, Javier. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Directorate General Joint Research Centre, European Commission, 21020 Ispra (VA), Italia.
ROSIN, Paul L. Department of Computer Science, Cardiff University, Gran Bretaña.

RESUMEN

En este trabajo se presentan diversos métodos semiautomáticos de tratamiento digital de imágenes ópticas espaciales y aéreas, de diferente resolución espacial y cobertura espectral, para el reconocimiento de deslizamientos de diverso tipo y dimensiones en varias regiones. Se incluyen métodos de segmentación textural de imágenes, basados en su espectro de textura, para la detección principalmente de flujos de tierra y deslizamientos rotacionales, así como otros de realce textural de escarpes y bordes de deslizamientos, de realce espectral para la diferenciación de cuerpos deslizados, y de visualización tridimensional.

También se presenta un nuevo método para el control indirecto de deslizamientos sobre áreas extensas, basado en la detección automática de cambios en la superficie del terreno producidos por movimientos de ladera y el cálculo de umbrales en imágenes ópticas multitemporales de alta resolución espacial. Este método se aplica al análisis de la reactivación del gran deslizamiento de Tessina, en los Alpes orientales italianos, usando para ello imágenes pancromáticas de 1 m de resolución. Se clasifica de este modo el deslizamiento en sectores, según su actividad durante el período abarcado por las imágenes.

1. INTRODUCCIÓN

La gran proliferación de sensores espaciales y aéreos de teledetección, unido a la constante mejora en sus prestaciones y al progreso de las técnicas de tratamiento digital de imágenes, hace que la teledetección se esté convirtiendo progresivamente en un importante complemento de las técnicas geotécnicas, geodésicas (incluido el GPS), geofísicas y de fotointerpretación en el reconocimiento y control de deslizamientos en áreas extensas.

La utilidad de los diversos sensores remotos que operan en el campo óptico (visible-infrarrojo) del espectro para la detección y control de deslizamientos está en función no sólo de la resolución espacial, cobertura y resolución espectral de las imágenes y la frecuencia de

su adquisición, sino del tipo de deslizamiento, sus dimensiones, su actividad, su expresión geomorfológica y el tipo de cobertura del suelo, incluido el grado de desarrollo estacional de la vegetación. En general, no se puede considerar un único sensor ni un único método de tratamiento digital de imágenes que sirva para detectar la existencia de un deslizamiento, sea activo o no, o para controlar su movimiento, en cualquier entorno geomorfológico o medioambiental. Asimismo, el reconocimiento de deslizamientos de diverso tipo en una zona puede requerir la aplicación de más de una técnica orientada a la localización de sus rasgos superficiales más característicos.

En este trabajo se presentan, por una parte, varias técnicas semiautomáticas de tratamiento de imágenes, tanto espaciales como aéreas, para el reconocimiento de diferentes tipos de deslizamientos, fundamentalmente flujos de tierra, barro y detritos, y deslizamientos rotacionales simples y múltiples, según la clasificación de Varnes (1978), en varias regiones con diferentes entornos geológicos, geomorfológicos y de usos del suelo. Por otra parte, se presenta también una técnica para el control de deslizamientos en una región alpina italiana, utilizando imágenes multitemporales de alta resolución espacial.

2. RECONOCIMIENTO DE DESLIZAMIENTOS

Algunos sensores ópticos espaciales proporcionan imágenes estereoscópicas, que se pueden analizar para el reconocimiento de deslizamientos mediante sistemas informáticos que combinan la capacidad de visualización tridimensional con técnicas de correlación. Hay que destacar, sin embargo, que a menudo no existen en los archivos pares estereoscópicos espaciales sobre determinadas zonas, y que sus propiedades pueden no ser muy adecuadas a los objetivos propuestos. Así, pueden tener una cobertura espectral limitada frecuentemente al visible o una resolución espacial insuficiente para discriminar pequeños pero importantes deslizamientos (por ejemplo, en las imágenes SPOT HRV). El hecho de que algunos sistemas tomen el par desde distintas órbitas, y por lo tanto en fechas diferentes, puede dificultar enormemente la aplicación de técnicas automáticas de correlación de imágenes, si se han producido cambios estacionales en la ocupación del suelo entre ambas tomas o, más raramente, cambios geomorfológicos notables de origen antrópico o por deslizamientos. En estos casos es necesario aplicar técnicas de tratamiento digital a imágenes no estereoscópicas.

2.1 Segmentación textural de imágenes

La segmentación de imágenes consiste en dividir las zonas o regiones con atributo similar. Un atributo de gran utilidad para el reconocimiento y cartografía de deslizamientos es la textura, que representa la distribución espacial de los valores de intensidad de los píxeles dentro de cada banda de la imagen. En zonas con laderas inestables, la textura de la imagen responde frecuentemente a ciertas formas del terreno o a patrones de discontinuidad de la cubierta vegetal, producidos por deslizamientos de diversa tipología.

Con el fin de detectar en las imágenes zonas con laderas onduladas originadas por flujos de tierra o barro o por deslizamientos de tipo rotacional (simples o múltiples), se ha desarrollado

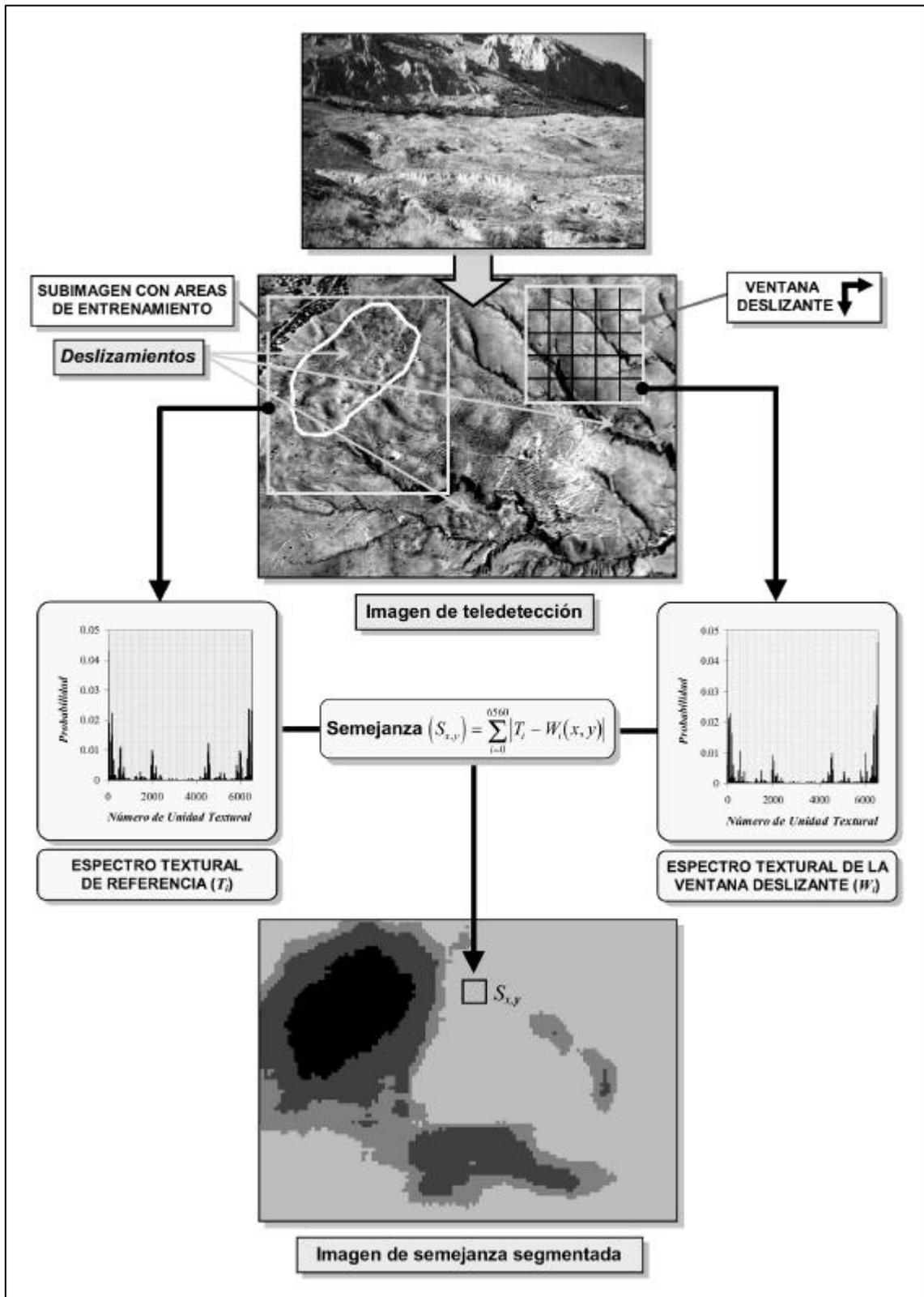


Figura 1. Diagrama del método de segmentación de imágenes basado en el espectro textural. En la imagen se observan flujos de tierra y deslizamientos rotacionales.

un método de segmentación textural supervisado (Hervás y Rosin, 1996), basado en el espectro textural de la imagen (Wang y He, 1991). El método conlleva en primer lugar la selección de una zona patrón en la imagen ("subimagen" en la Figura 1) que incluye, al menos, un área de entrenamiento correspondiente a un deslizamiento característico de la zona, previamente identificado. A continuación se extrae el espectro textural de dicha zona, denominado de referencia, y el de una ventana de la imagen que se desliza a través de toda ella. Se calcula entonces la distancia de correspondencia (la semejanza) entre ambos espectros para cada pixel de la imagen. Los valores resultantes, posteriormente normalizados de 0 a 255 en la escala de gris, componen una imagen que se puede dividir en intervalos que representan el grado de probabilidad de pertenencia genérica al tipo de deslizamiento de referencia.

Éste método se ha aplicado a imágenes aéreas multispectrales Daedalus ATM de 3 m de resolución, con 11 bandas en las regiones espectrales del visible e infrarrojo próximo y térmico, y a imágenes de satélite pancromáticas IRS-1C PAN y SPOT P, de 5 y 10 m de resolución respectivamente, en una zona semiárida con materiales fundamentalmente calcáreos y arcillosos subbéticos, en la comarca de Los Vélez, en Almería (Figura 2). A fin de poder comparar los resultados, las diferentes imágenes han sido previamente corregidas radiométrica y geoméricamente. Este proceso es sobre todo indispensable en el análisis de las imágenes Daedalus ATM, que presentan normalmente una marcada distorsión panorámica y una gran variación de los valores de radiancia de los pixels por efectos angulares de visión, en la dirección de las imágenes perpendicular a la trayectoria del avión (Hervás et al., 1996).

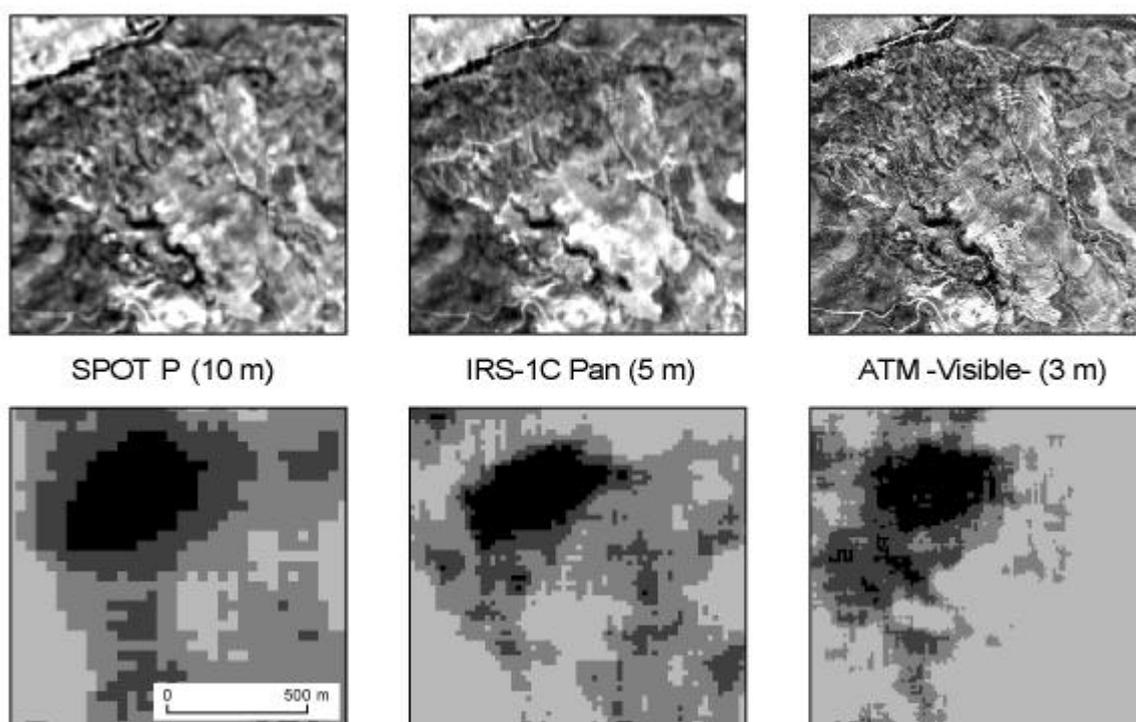


Figura 2. Comparación entre diversas imágenes de teledetección en el espectro visible (fila superior) y la segmentación de su espectro textural (fila inferior). Las zonas más oscuras indican mayor probabilidad de presencia de deslizamientos. En paréntesis, la resolución espacial. Proximidades de Vélez Rubio (Almería).

Los resultados indican que, en general, a mayor resolución espacial de la imagen, mejor discriminación de las zonas con deslizamientos, si bien a costa de generar mayor ruido. Cabe resaltar también que la información contenida en las imágenes multispectrales varía según la banda. Así, la Figura 3 muestra que la banda térmica (8,5-13 μm) de la imagen diurna ATM, al ser más sensible al calentamiento solar que una en el visible, refleja mejor que ésta las pequeñas diferencias topográficas locales debidas a formas características de muchos deslizamientos. En estas imágenes se han llegado a detectar automáticamente deslizamientos con dimensiones en superficie del orden de 100 m, si bien no se ha podido distinguir el tipo específico de deslizamiento dentro del grupo anteriormente descrito.

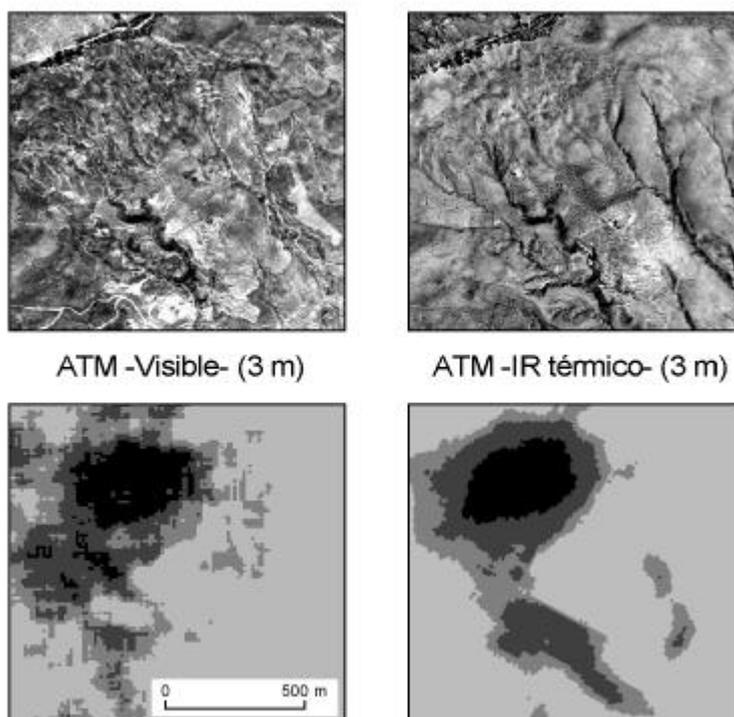


Figura 3. Igual que la Figura 2, pero representando dos bandas diferentes del sensor Daedalus ATM. La zona oscura superior corresponde a un flujo de tierras en sustrato arcilloso.

Por otra parte, aunque en algunos casos resulta difícil diferenciar automáticamente las formas producidas por deslizamientos de algunas originadas por simple erosión, este método produce en general mejores resultados que otros de extracción de medidas de textura (no supervisada), al utilizar texturas patrón de una zona determinada.

2.2 Realce textural y espectral de imágenes

El realce textural de la imagen, empleando principalmente filtros laplacianos isotrópicos, es de gran utilidad para resaltar estructuras lineales (rectilíneas o curvilíneas) y, por lo tanto, escarpes y bordes de deslizamientos. Otra de las propiedades de la imagen más utilizada para el reconocimiento de deslizamientos es el contraste espectral que existe en muchos casos entre

la superficie de un deslizamiento y las zonas adyacentes, a causa del afloramiento de materiales más frescos, o a la pérdida de la cubierta vegetal, o a la superposición de materiales o formaciones con diferentes características espectrales. En este caso, si se dispone de imágenes multispectrales, conviene aplicar técnicas de realce espectral. Así, en un trabajo anterior, Eyers et al. (1998) han utilizado diferencias de bandas de imágenes Landsat TM (de 30 m de resolución), en el valle del río de Aguas (Sorbas, Almería), para diferenciar grandes masas de yesos miocénicos formando deslizamientos rotacionales y flujos de derrubios. En esa zona, la fusión de imágenes Landsat TM y SPOT P (de 10 m de resolución) permitió la identificación de deslizamientos de ambos tipos, de al menos 250 m de anchura. Estos autores utilizaron asimismo una imagen en color del sensor aeroportado Daedalus ATM, de 7,5 m de resolución compuesta por combinaciones aritméticas de bandas espectrales en el visible, infrarrojo próximo e infrarrojo térmico, combinadas con filtros laplacianos, para resaltar la distribución espacial de detritos yesíferos en laderas margosas, fácilmente interpretables como flujos de detritos, de dimensiones netamente menores.

Por otra parte, se ha utilizado una composición en falso color de tres bandas del sensor Daedalus ATM, de 3 m de resolución, previamente transformadas mediante la técnica de realce de decorrelación de las bandas (Gillespie et al. 1986), y seleccionadas en función de la varianza a través de un procedimiento estadístico, para localizar antiguos deslizamientos complejos en la zona de Los Vélez (Almería), que aparecen enmascarados por procesos erosivos e intensa meteorización. Dicha técnica aumenta la saturación de los colores de la imagen y consiguientemente su diferenciación, conservando a la vez el sombreado del relieve. Este proceso, unido a la aplicación de un filtro laplaciano de 3×3 , con kernel central de 17 y -1 en los 8 restantes, ha permitido identificar masas calcáreas de dimensiones variables, inmersas en materiales arcillosos por deslizamiento, y delinear parcialmente los bordes superficiales de los cuerpos deslizados.

En imágenes multispectrales de alta resolución espacial se pueden extraer índices de vegetación, suelo y humedad para ayudar a identificar el grado de actividad de deslizamientos (Eyers et al., 1998). En las imágenes Daedalus ATM de Los Vélez, sin embargo, no ha sido posible localizar variaciones locales de la humedad del suelo que pudieran relacionarse con movimientos de ladera, por lo que en parte se deduce que, en el momento del vuelo, los distintos deslizamientos no eran activos. En imágenes ópticas, tanto multispectrales como pancromáticas, es aconsejable utilizar en este caso técnicas de detección de cambios superficiales del terreno a partir de imágenes multitemporales, como se describe en el capítulo 3. No obstante, una simple imagen de diferencia de dos fechas (previamente registradas geométricamente entre sí), acompañada por un realce de bordes, puede permitir también la identificación de flujos de barro y de detritos ocurridos durante el período transcurrido entre ambas fechas, puestos de manifiesto por el aumento de los valores de intensidad de pixel. Estos reflejan normalmente nuevos afloramientos de roca o suelo más frescos, consiguientemente con mayor albedo que los materiales originalmente aflorantes o, sobre todo, que la vegetación original (Mason et al., 1998). Este método es sin embargo mucho más efectivo si se complementa con otras técnicas, como se demuestra más adelante.

2.3 Simulación tridimensional de imágenes

Se han identificado también deslizamientos de ladera mediante la simulación tridimensional en color de imágenes de satélite multispectrales, superpuestas a modelos de elevación del terreno (MDE) de alta resolución. En la Figura 4 se ilustra una perspectiva simulada de la zona central de la isla de Gran Canaria, obtenida a partir de un MDE de 4 m de malla y de la fusión de una imagen Landsat TM (bandas 4, 5 y 3 en rojo, verde y azul, respectivamente, en la imagen original en falso color), de 30 m de resolución, y una imagen pancromática de 2 m de resolución, tomada por la cámara KVR-1000 desde un satélite Cosmos, usando para ello un método basado en el análisis de componentes principales (Pohl y van Genderen, 1998). De este modo se han creado imágenes tridimensionales en color de 4 m de resolución, abarcando el espectro visible e infrarrojo próximo y de onda corta, las cuales se pueden visualizar interactivamente en pantalla de ordenador desde cualquier punto de vista virtual, simulando además la dirección de iluminación solar (en acimut y elevación) más adecuada para resaltar las formas del relieve. Ello ha permitido delinear escarpes y bordes de grandes deslizamientos de diverso tipo (principalmente rotacionales-traslacionales en rocas, deslizamientos de derrubios y flujos de detritos) en materiales volcánicos, en la depresión de Tirajana (Gran Canaria), contribuyendo además en dicha zona a diferenciar fases sucesivas de reactivación de deslizamientos (Hervás y Barredo, 2001). Las imágenes tridimensionales se pueden componer asimismo en secuencias animadas utilizando software comercial, simulando así vuelos que ilustran las características geomorfológicas y la cobertura del suelo de amplias zonas inestables.



Figura 4. Vista parcial simulada de la depresión de Tirajana (Gran Canaria) a partir de la fusión de imágenes Landsat-TM y KVR-1000 y de un MDE. (Original en color).

3. CONTROL DE DESLIZAMIENTOS

Se ha desarrollado un método para el control indirecto de deslizamientos mediante el análisis de cambios producidos en la superficie del terreno debidos al movimiento, utilizando imágenes ópticas multitemporales (Hervás et al., in press). El método comprende cinco fases:

- En primer lugar, se realiza la ortocorrección de cada una de las imágenes que componen la serie multitemporal, utilizando para ello un MDE y puntos de control, seguida por la normalización radiométrica de las imágenes a los valores de intensidad de pixel de una de ellas, tomada como referencia, usando un procedimiento de regresión lineal. Las imágenes así obtenidas son comparables entre sí geométrica y radiométricamente (Figura 5).
- A continuación se crean imágenes de diferencia de cada par anteriormente resultante.
- Después se generan las imágenes de "cambios reales" mediante la segmentación de cada imagen de diferencia en dos clases de "cambio" y "sin cambio" a partir de un umbral, definido por el valor de intensidad de pixel correspondiente al punto del histograma (generalmente unimodal) de máxima distancia a la secante del máximo y mínimo de la distribución. Ello permite eliminar gran parte del ruido en la imagen, el cual es supuestamente debido principalmente a efectos residuales de la ortocorrección y la normalización radiométrica.
- En cada imagen segmentada se separan y codifican diferentemente los cambios positivos y negativos de intensidad de pixel, que en imágenes de partida pancromáticas corresponden respectivamente a un aumento y disminución del brillo o radiancia de los pixels. Esto permite diferenciar tres clases en este tipo de imágenes: la primera, formada por los suelos y sustrato rocoso más frescos (y por lo tanto con mayor radiancia en la imagen posterior al movimiento), que pueden haber aflorado bien sea por deslizamiento del material suprayacente o por deslizamiento con "runout" de aquellos sobre materiales in situ; la segunda comprende materiales aflorantes o cubiertas del suelo más o menos invariables entre las fechas de adquisición del par de imágenes; la tercera incluye las áreas cuya radiancia ha disminuido, lo que puede ser debido al crecimiento de la vegetación sobre deslizamientos anteriores durante un periodo de estabilidad, o a un aumento de la humedad del suelo.
- Finalmente, se eliminan los clusters de pixels contiguos de forma rectangular mediante un filtro apropiado, a fin de suprimir gran parte de las posibles variaciones de origen antrópico que aún puedan permanecer en la imagen después de los procesos anteriores, tales como cambios en parcelas de cultivo, nuevas casas y segmentos rectilíneos de nuevas carreteras o caminos, que son en general ajenos a los efectos producidos en la imagen por deslizamientos.

Este método se ha aplicado al gran deslizamiento de Tessina, en los Alpes orientales italianos. Este es un deslizamiento complejo activo, con movimientos rotacionales en su cabecera y flujos de barro en el resto, con una longitud total de casi 3 km y una anchura máxima de 500 m, habiéndose desarrollado en un flysch Eoceno compuesto por alternancias de margas y areniscas, parcialmente cubiertas por depósitos glaciares y coluviales. A fin de controlar los

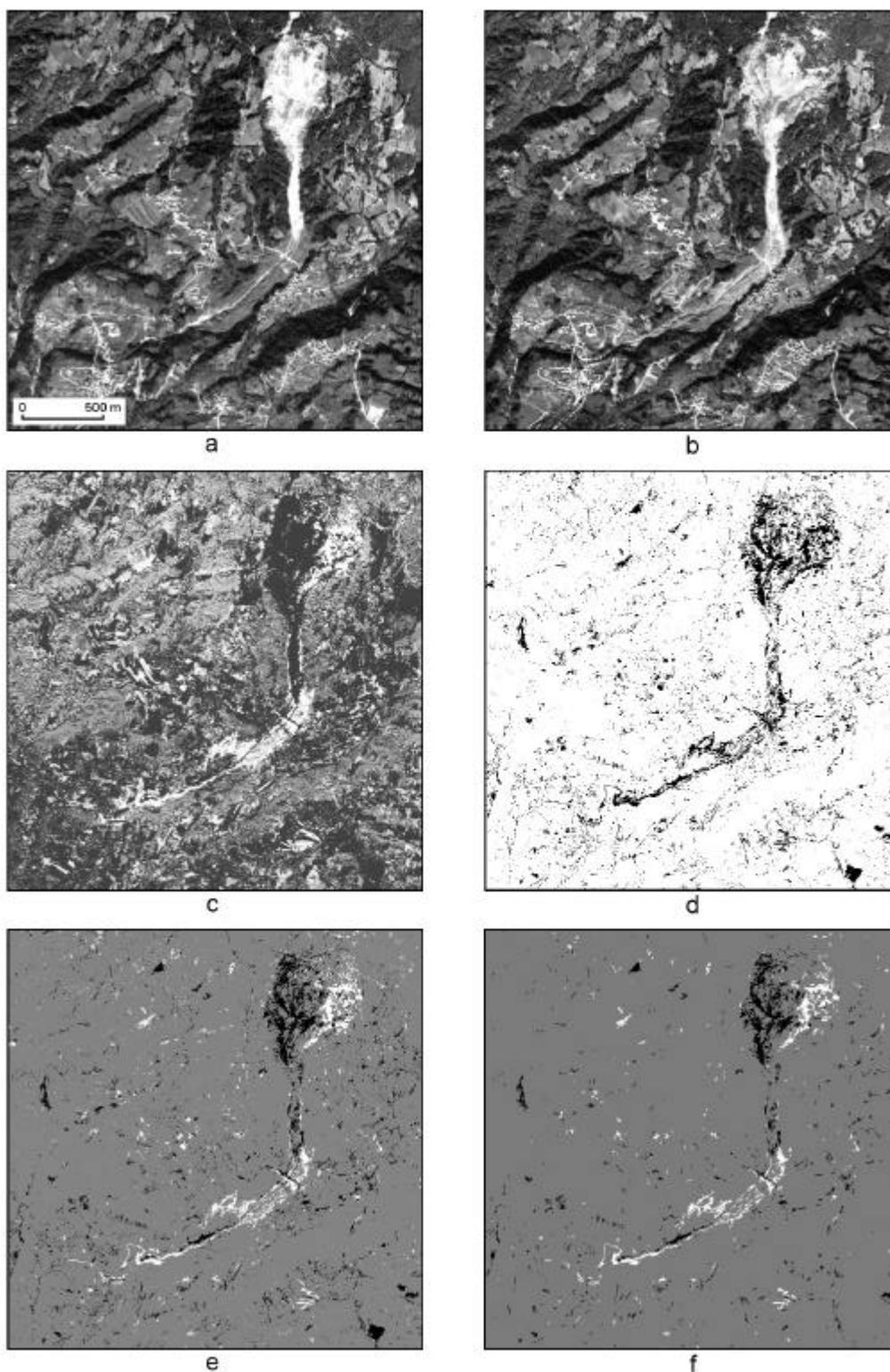


Figura 5. Detección de cambios en el deslizamiento de Tessina (Italia). a) Ortoimagen de 18-9-88. b) Ortoimagen de 7-10-94 normalizada. c) Imagen de diferencia. d) Imagen binaria de umbrales de cambio. e) Variación de intensidad de pixel: en blanco, aumento; en negro, disminución; en gris, sin variación. f) Filtrado de clusters rectangulares.

efectos de la gran reactivación del movimiento ocurrida en 1992 (Pasuto et al., 1993), se han usado fotografías aéreas en blanco y negro tomadas en 1988 y 1994, debidamente digitalizadas en pixels de 1 m, simulando así imágenes pancromáticas del nuevo satélite IKONOS.

Los resultados del proceso (Figura 5f) concuerdan con los efectos producidos por dicha reactivación, distinguiéndose principalmente dentro del cuerpo de deslizamiento un gran movimiento de materiales en la cabecera (zona más ancha en la imagen), así como la removilización de la colada de barro en la parte central y el runout de materiales, tanto lateralmente como al pie del deslizamiento, todos ellos representados por clusters de pixels de color blanco. Dentro del deslizamiento también, los clusters en negro representan principalmente sectores anteriormente deslizados, sobre cuyo suelo ha crecido la vegetación al haber permanecido más o menos estables durante el período estudiado. Hay que destacar, sin embargo, que tanto las variaciones de humedad del suelo como, sobre todo, el largo tiempo transcurrido desde la época del movimiento hasta la última imagen, introducen algunas incertidumbres en la interpretación de los cambios detectados. Por otra parte, en el resto de la imagen se observan áreas menores de cambio, relacionándose unas con cambios de usos del suelo y otras incluso con pequeños flujos superficiales.

Cabe destacar también que, a causa del largo intervalo de tiempo transcurrido entre las dos imágenes analizadas con respecto a los grandes desplazamientos ocurridos en sólo unos meses en este deslizamiento, no se ha podido investigar la velocidad del movimiento.

Este método se puede hacer asimismo extensivo a la cartografía de nuevos deslizamientos ocurridos durante un cierto período en zonas generalmente cubiertas por vegetación.

4. CONCLUSIONES

La idoneidad y eficacia en la aplicación de métodos semiautomáticos de reconocimiento preliminar de deslizamientos de ladera a partir de imágenes de teledetección, depende principalmente de factores tales como el tipo, actividad y dimensiones de los deslizamientos investigados, los usos del suelo en éstos y su entorno, y las propias características de las imágenes disponibles. Para este objetivo, se aconseja en general el uso de imágenes de resolución espacial igual o superior a 10 m y, si es posible, con bandas espectrales en el visible e infrarrojo próximo.

Los métodos de reconocimiento presentados son complementarios de otros más tradicionales, entre los que destacan la fotointerpretación estereoscópica y la inspección de campo. Además del relativo automatismo de estas técnicas, aplicable en estudios previos de deslizamientos sobre áreas extensas, y de las características espectrales propias de diversos sensores remotos, el formato digital y las propiedades geométricas de sus imágenes permite una precisa integración de los resultados del tratamiento en mapas de base y temáticos.

El método de control indirecto de deslizamientos propuesto se considera útil en la cartografía preliminar de actividad de deslizamientos sobre áreas extensas, en una gran variedad de entornos geomorfológicos y medioambientales, siendo además complementario al control

puntual del desplazamiento realizado mediante técnicas de instrumentación de campo. Dicho método puede ser especialmente útil en zonas de montaña parcial o totalmente cubiertas de bosque, donde la aplicación de técnicas de interferometría diferencial de radar espacial, si bien más precisas en su medición, es bastante limitada.

Este método se puede aplicar tanto a imágenes espaciales como a fotografías aéreas debidamente digitalizadas, lo que en éste último caso permite estudiar con precisión cartográfica la aparición y evolución reciente de deslizamientos, antes de la existencia de sistemas comerciales de observación de la tierra de alta resolución espacial. En cualquier caso, un control periódico de deslizamientos por teledetección óptica más preciso que el utilizado en Tessina, requeriría el uso de imágenes de alta resolución adquiridas con mayor frecuencia, lo cual sólo es factible mediante imágenes de satélite, como las del IKONOS y otras misiones orbitales ya programadas. Con éstas se pueden cartografiar cambios superficiales del terreno a escala 1:10.000. Se considera, por otra parte, que aún es necesario un gran esfuerzo de investigación para poder cuantificar la velocidad de deslizamientos con gran deformación interna a partir de imágenes de satélite en general.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido en parte financiado por los proyectos RUNOUT y MUSCL, del IV y V Programa Marco de Investigación de la Unión Europea. Los autores agradecen la colaboración prestada por J.I. Barredo (JRC, Ispra, Italia), A. Pasuto (CNR-IRPI, Padua, Italia), F. Mantovani (Universidad de Ferrara, Italia), C. León (M^o de Fomento, España), A. Lomoschitz (Universidad de Las Palmas, España), y por el equipo de M.J. Gutiérrez de la Cámara (INTA, España), que ha suministrado las imágenes Daedalus ATM de Los Vélez.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Eyers, R., Moore, J.McM., Hervás, J., y Liu, J.G., (1998). "Integrated use of Landsat TM and SPOT panchromatic imagery for landslide mapping: case histories from southeast Spain". *Geohazards in Engineering Geology*; Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, No. 15, 133-140.

Gillespie, A.R., Kahle, A.B. y Walker, R.E. (1986). "Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 20, 209-235.

Hervás, J., Barredo, J.I., Rosin, P.L., Pasuto, A., Mantovani, F. y Silvano, S. (in press). "Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina Landslide, Italy". *Geomorphology*.

Hervás, J. y Rosin, P.L. (1996). "Landslide mapping by textural analysis of Daedalus ATM data". 11th Thematic Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Las Vegas, Nevada; ERIM, Ann Arbor, Michigan. Vol. 2, 394-402.

Hervás, J. y Barredo, J.I. (2001). "Evaluación de peligrosidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio". V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Madrid (in press).

Hervás, J., Rosin, P.L., Fernández-Renau, A., Gómez, J.A. y León, C. (1996). "Use of airborne multispectral imagery for mapping landslides in Los Vélez district, south-eastern Spain". In Chacón, J., Irigaray, C. y Fernández, T. (Eds) Landslides; Balkema, Rotterdam, 353-361.

Mason, P.J., Rosenbaum, M.S. y Moore, J.McM. (1998). "Digital texture analysis for landslide hazard mapping". Geohazards in Engineering Geology; Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, No. 15, 297-305.

Pasuto, A., Silvano, S., y Bozzo, G.P. (1993). "The Tessina landslide (Belluno, Italy)". In Panizza, M., Soldati, M. y Barani, D. (Eds) Proc. First European Intensive Course on Applied Geomorphology; Istituto di Geologia, Università degli Studi di Modena, Italia, 63-69.

Pohl, C. y van Genderen, J.L. (1998). "Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications". International Journal of Remote Sensing. Vol. 19, 823-854

Varnes, D.J. (1978). "Sope movement types and processes". In Schuster, R.L. y Krizek, R.J. (Eds), Landslides: Analysis and Control; Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. Special Report 176, 11-33.

Wang, L. y He, D.C. (1990). "A new statistical approach for texture analysis". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 56 (1), 61-66.