

Fernández, T., Jiménez, J., Pérez, J.L., Delgado, J., Cardenal, F.J., Irigaray, C. y Chacón, J. (2010): Identificación de escarpes de movimientos de ladera mediante técnicas de teledetección. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 818-829. ISBN: 978-84-472-1294-1

IDENTIFICACIÓN DE ESCARPES DE MOVIMIENTOS DE LADERA MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

Tomás Fernández¹, Jorge Jiménez², José Luis Pérez, Jorge Delgado¹, F. Javier Cardenal¹, Clemente Irigaray² y José Chacón²

(1) Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Escuela Politécnica Superior de Jaén. Campus de las Lagunillas s/n, Edificio A-3. Universidad de Jaén. 23071 Jaén. tfernan@ujaen.es, jlperrez@ujaen.es, jdelgado@ujaen.es, jcardena@ujaen.es.

(2) D Departamento de Ingeniería Civil. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Campus de Fuentenueva, s/n. Universidad de Granada. 18071 Granada. jp@ugr.es, clemente@ugr.es, jchacon@ugr.es

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de técnicas de teledetección a la identificación de escarpes de movimientos de ladera en macizos rocosos de las Cordilleras Béticas. Se han aplicado varias técnicas para hacer una primera aproximación visual, desde realces y filtrados texturales de las imágenes pancromáticas, hasta composiciones en color real y falso, fusiones, índices de vegetación (NDVI) y análisis de componentes principales a imágenes multispectrales, correspondientes a diferentes sensores (Landsat ETM, Spot 5 e Ikonos). A través de un análisis SIG, se han calculado estadísticos básicos de las imágenes completas y de los píxeles correspondientes a diferentes tipologías de movimientos de ladera (desprendimientos, deslizamientos y corrientes de derrubios) y además se ha determinado el coeficiente de Kolmogorov-Smirnov para estimar la correlación entre imágenes y movimientos. Se han observado algunas correlaciones, siendo además la signatura espectral diferente dependiendo de la tipología. Los desprendimientos aparecen en las zonas más oscuras de las imágenes, mientras los deslizamientos y las corrientes de derrubios aparecen en las zonas más claras. De esta manera, la clasificación digital permite identificar los escarpes de los movimientos, pero parcialmente mezcladas con otras ocupaciones del suelo como suelos, roca fresca y materiales aluviales. El empleo de filtros texturales, que presentan valores elevados en zonas movilizadas resuelve esta ambigüedad. La conclusión es la necesidad de combinar la clasificación digital con los análisis texturales para identificar los escarpes de los movimientos de ladera.

Palabras Clave: identificación, escarpes, movimientos de ladera, teledetección.

ABSTRACT

In this work we present the results of an analysis applied to identification of landslides features using remote sensing techniques in rock masses at the Betic Cordilleras. Several techniques are used to facilitate an approach to landslide identification, from enhancement and textural filtering of panchromatic images, to colour compositions and fusions, vegetation index (NDVI), and principal component analysis of multi-spectral

imagery, corresponding to different sensors (Landsat ETM, Spot 5 and Ikonos). By means a GIS analysis, we compute basic statistics of whole images and pixels corresponding to different landslides typologies (rock falls, rock slides and debris flows) and in addition Kolmogorov-Smirnov coefficient to estimate the correlation between images and movements. Some correlations are observed, being besides the spectral signature different depending on landslides typology. Rock falls appear in darker zones of images while rock slides and especially debris flows appear in clearer zones. In this way, digital classification allows identify landslides scarps, but partially mixed with other land-uses such as soils, fresh rock and alluvial materials. The employment of textural filters, that present higher values in landslides zones, resolves this confusion. The conclusion is the need of combining digital classification and textural analysis to identify landslide features or mobilized areas.

Key Words: identification, scarps, landslides ,remote sensing.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de teledetección han sido ampliamente utilizadas desde los años 90 en la investigación sobre movimientos de ladera (Chacón et al., 2006; Metternich et al., 2005). Las técnicas empleadas van desde la fotointerpretación e inventario de grandes deslizamientos al análisis de factores determinantes, la restitución fotogramétrica de movimientos o la detección automática mediante análisis texturales y otros.

Los límites irregulares y la morfología superficial de los movimientos de ladera producen frecuentemente texturas en la imagen que pueden ser analizadas mediante análisis textural. En este sentido, se han utilizado filtros de realce de bordes como el Sobel y laplaciano (Eyers et al., 1995; Mason et al., 1995) para identificar la masa deslizada, el pie, el escarpe y la coronación del movimiento, u otras técnicas más sofisticadas como la entropía GLCM (Grey-Level Co-occurrence Mean entropy) y el espectro textural (Wang & He, 1990), por su capacidad para discriminar entre superficies suaves y rugosas (Rosin, 1996, 2001; Hervás et al., 1996, Whitworth et al., 2001, 2005). Se han aplicado a imágenes de resolución alta (ATM, Ikonos, Quickbird) y media (Landsat, Spot y Aster), las últimas con menor detalle en la detección de elementos, pero también con un menor ruido (Hervás & Rosin, 2001).

Otras aproximaciones son las técnicas de realce y mejora de imágenes, especialmente las composiciones en color (tanto real como falso) y las fusiones, que aprovechan la mayor resolución espectral de las imágenes multiespectrales y la mayor resolución espacial de las pancromáticas (Nichol and Wong, 2005; Nichol et al., 2006). Los mejores resultados se obtienen en las zonas con una vegetación espesa, afectadas de corrientes o deslizamientos de derrubios, donde se produce un fuerte contraste entre las zonas movilizadas (con pérdida de la cobertura de vegetación) y no movilizadas (que la conservan), especialmente en las composiciones donde se integra la banda del Infrarrojo Próximo (NIR). En estas técnicas espectrales, otros elementos con similares propiedades a los escarpes de movimientos de ladera, (carreteras, caminos, cauces fluviales, escombreras, etc) se han de eliminar mediante la aplicación de filtros lineales (corredores) o de pendiente (Haeberling et al., 2004).

La determinación de índices de vegetación (Chang and Liu, 2004) u otros índices como el NDMIDIR (Vohora & Donohue, 2004; Zhang et al., 2005) entre el infrarrojo cercano y medio y el análisis de firmas espectrales, producen resultados similares a los de las composiciones en color. Así, el índice de vegetación normalizado (NDVI) ha sido muy útil para la identificación de corrientes de derrubios en zonas con una densa cobertura vegetal. El análisis de componentes principales también ha sido empleado en clasificaciones y en interpretación visual (Whitworth et al., 2005) por medio de composiciones en falso color.

El análisis 3D y, sobre todo, el estereoscópico permiten una buena interpretación de los movimientos de ladera a través del reconocimiento de rasgos morfológicos como escarpes, zonas de acumulación, pies, etc. Se han empleado desde simples vistas pseudo-3D sobre un MDT (Hervás and Rosin, 2001; Haeberling et al., 2004) hasta técnicas fotogramétricas como la restitución o elaboración de MDTs (Zhihua, 2005; Weirich and Blesius, 2006). Finalmente, se han de mencionar técnicas multitemporales para estudiar la actividad de los movimientos, como las de detección de cambios en píxeles (Rosin and Hervás, 2003) y otras. Las referencias en el texto se harán indicando el apellido del autor seguido de la fecha de publicación entre paréntesis: Mosselman (1965), Laurini y Thompson (1992), o Vidal et al. (1994). También pueden agruparse entre paréntesis el autor o autores y la fecha de publicación: (Laurini y Thompson, 1992; Vidal et al., 1994).

(1 líneas en blanco)

ZONA DE ESTUDIO

Es un área proclive a la inestabilidad del terreno debido a una combinación de un relieve abrupto y una configuración geológica con una alta susceptibilidad a los movimientos de ladera. Se trata de una región de unos 600 Km², localizada en la provincia de Granada, entre Sierra Nevada y la costa mediterránea. Es un área rural con pequeñas poblaciones diseminadas por toda la región y comunicadas por carreteras comarcales. El relieve es abrupto, con un desnivel cercano a los 3000 m y con laderas de fuertes pendientes. La red de drenaje es muy densa y organizada, con una gran cantidad de barrancos y arroyos tributarios del Río Guadalfeo que atraviesa la zona de Este a Oeste.

Desde el punto de vista geológico, el área está localizada en las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas, entre los dominios Alpujárride y Nevado-Filábride. El primero está formado por macizos rocosos tanto metapelíticos como carbonatados, mientras que el segundo está integrado casi exclusivamente por metapelitas. En medio de ambos afloran conglomerados, arenas, margas y arcillas, de edad Neógena y Cuaternaria.

El clima es típicamente mediterráneo excepto en las zonas por encima de 1800 metros. Las temperaturas medidas varían desde 12 hasta 18 °C y las precipitaciones medias anuales oscilan entre 600 y 800 mm, pero con regímenes irregulares, con años húmedos por encima de 1000 mm y otros secos por debajo de 500 mm. La vegetación es variable con zonas donde hay una densa cobertura (bosques de pinos y de encinas-robles, matorral denso y zonas de hierba) y otras con una cobertura escasa de vegetación (matorral y eriales).

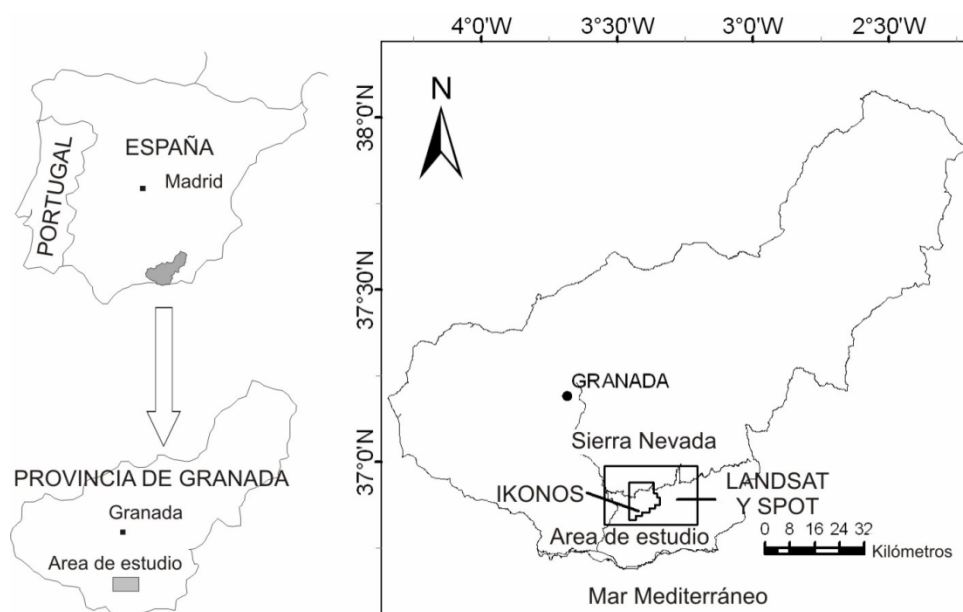


Figura 1 Localización del área de estudio

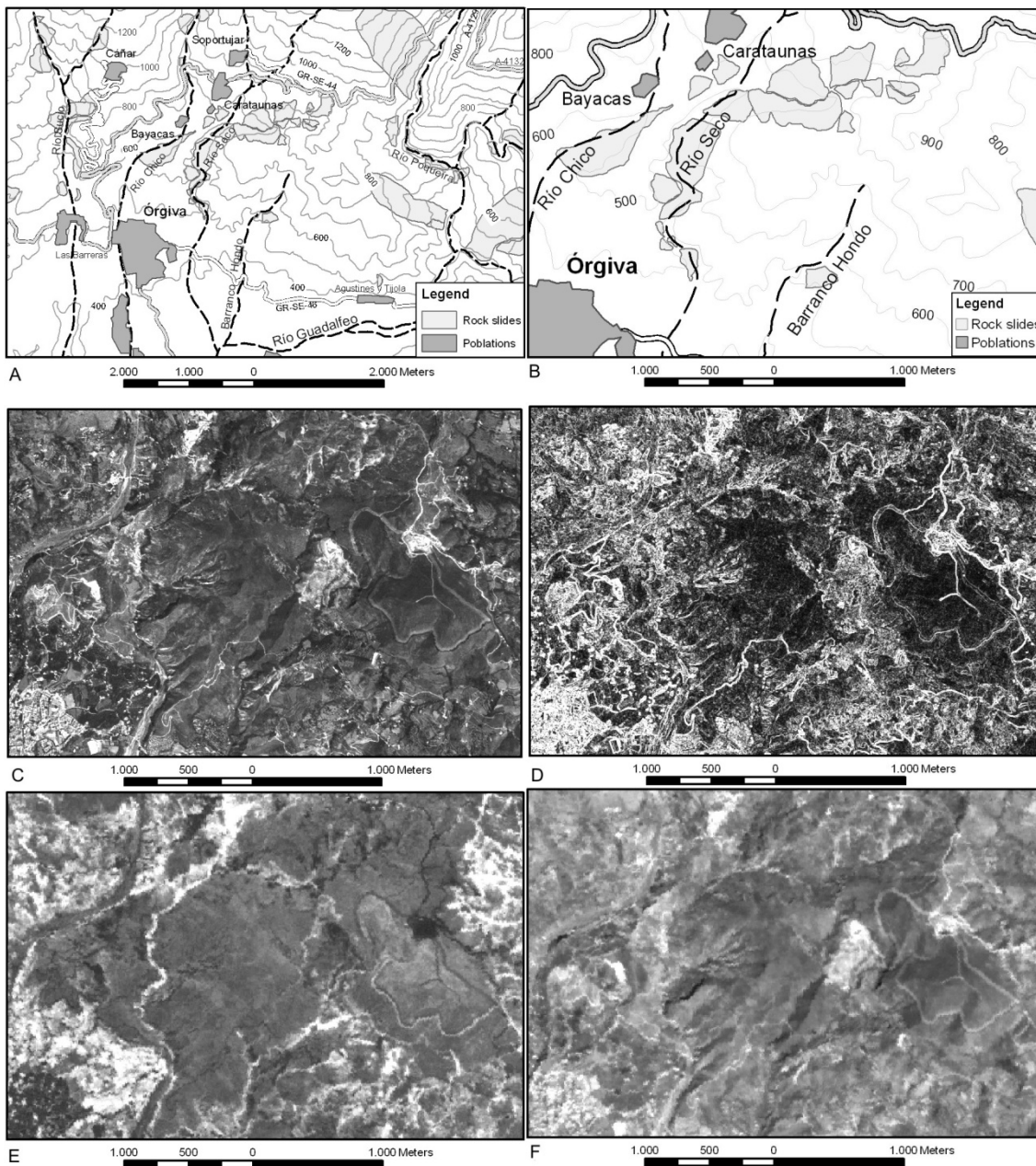
IMÁGENES UTILIZADAS

Se han utilizado imágenes procedentes de distintos sensores, tanto en modo pancromático como multiespectral con resoluciones entre alta y media. Las propiedades de los sensores empleados se resumen en la tabla 1 y su distribución espacial se muestra en la figura 1.

Tabla 1. Propiedades de las imágenes utilizadas

Satélite	Bandas	Resolución	Número de	Radiometría
Ikonos	Pancromática	1	1	2048
	Visible	4	4	2048

Spot 5	Pancromática	2.5	1	256
	Visible-IR próximo (NIR)	10	3	256
	Infrarrojo medio (SWIR)	20	1	256
Landsat ETM+	7 Pancromática	15	1	256
	Visible-IR próximo (NIR) v	30	6	256
	Infrarrojo térmico (TIR)	60	1	256



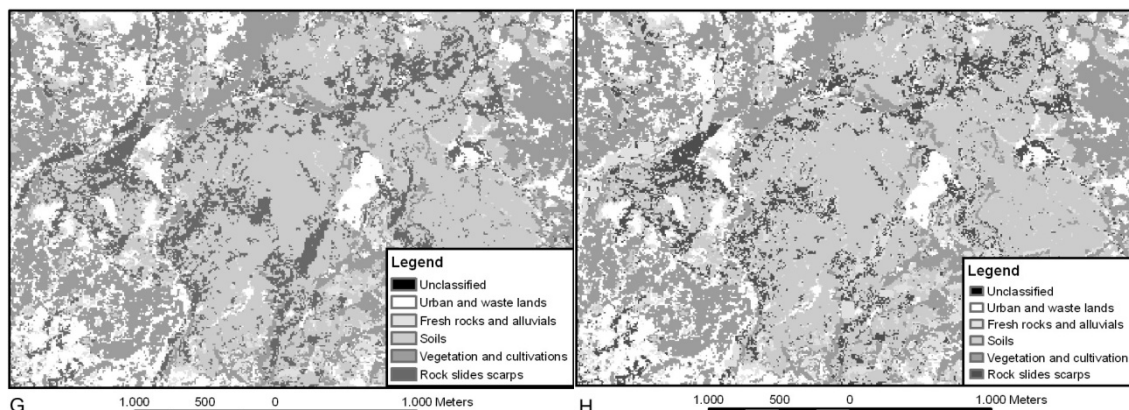


Figura 2. Imagen Spot 5: A. Localización. B: Inventario. C: Imagen pancromática. D: Filtro de varianza. E: Índice de vegetación normalizado. F: CP-1. G: Clasificación supervisada. H: Clasificación modificada.

PROCESADO DE LAS IMÁGENES

La metodología seguida para el procesado de las imágenes en este trabajo incluye varias técnicas, desde el pre-proceso hasta la clasificación digital, pasando por diversos tipos de realce y mejora de las imágenes (Fernández et al., 2008).

Pre-proceso

Aquí se incluyen las técnicas que permiten convertir las imágenes en productos cartográficos y que las preparan para otros análisis. Primero, las imágenes han de ser corregidas geoméricamente y georreferenciadas en la proyección UTM. La corrección se ha llevado a cabo con puntos de control y modelos implementados específicamente para cada sensor (Ikonos, Spot, etc.) en el software ERDAS 9.1, sobre un MDT de 10 m de resolución. A continuación se ha de aplicar la corrección radiométrica mediante el método de Chávez, para eliminar los efectos de la dispersión atmosférica.

Realce y composiciones en color

Tras el pre-proceso, las imágenes han sido realzadas mediante una expansión lineal de los histogramas (figura 2c), excepto las de Ikonos, donde se ha aplicado una expansión logarítmica para tratar de mitigar los efectos de las fuertes zonas de sombra que aparecen en estas imágenes, y que dificultan su interpretación y tratamiento (Roberts, 2005). Por otra parte, se han elaborado distintas composiciones en color a partir de las bandas de las imágenes corregidas, tanto en color real como en falso color. En estas, mediante la inclusión de la banda del infrarrojo próximo (NIR), se puede distinguir claramente entre zonas con vegetación (aunque sea escasa) y sin vegetación, lo que puede ser un indicador de escarpes de movimientos de ladera. Otras composiciones con inclusión del infrarrojo medio (SWIR) son útiles para detectar cambios litológicos o en los suelos. Finalmente, en aquellas composiciones donde intervienen las bandas del visible y del infrarrojo próximo (NIR), se han realizado fusiones entre la imagen multispectral y la pancromática que cubre la región del Visible-Infrarrojo (VNIR). Estas fusiones, realizadas mediante técnicas de pan-sharpening, proporcionan composiciones con la resolución espacial de las imágenes pancromáticas (Nichol and Wang, 2005).

Filtros

Se han aplicado diferentes filtros sobre las imágenes pancromáticas. En primer lugar, se han empleado filtros de realce de bordes como el laplaciano o Sobel, para detectar elementos lineales de los movimientos. En segundo lugar, se han aplicado filtros texturales como el de la varianza (figura 2d), distancia media euclidiana (MEUC) y entropía GLCM, con los que se calcula la variabilidad de un píxel respecto a su vecindad. Estos filtros permiten detectar morfologías irregulares como las que se producen en los movimientos de ladera (Hervás y Rosin, 2001; Whitworth et al., 2003, 2005).

Indices y transformaciones globales

Los índices de vegetación (figura 2e) son muy útiles para identificar escarpes de deslizamientos y corrientes de derrubios en zonas con una densa cobertura de vegetación (Chang and Liu, 2004). Además, disminuyen las diferencias radiométricas entre zonas de solana y umbría, muy evidentes en algunas imágenes, como las de Ikonos. El análisis de componentes principales (ACP) permite transformar una imagen original corregida en otra cuyas bandas estén poco correlacionadas. Las bandas de las componentes principales y las composiciones correspondientes muestran una mayor variabilidad que las originales, por lo que permiten detectar más claramente los distintos elementos. En la figura 2f se muestra la componente principal 1 de la imagen de Spot 5.

Clasificación digital

A partir de la imagen multispectral, se ha realizado una clasificación digital de tipo supervisado (figura 2g-h), discriminando entre cuatro tipos básicos de coberturas de usos del suelo y/o materiales, distinguibles en el área de estudio: zonas urbanizadas y descampados, zonas con vegetación (hierba, cultivos o bosques), zonas de suelo o matorral poco denso, y zonas de afloramiento del macizo rocoso o material aluvial (difíciles de separar radiométricamente). Aparte de estos usos/materiales, los movimientos de ladera en sus diferentes tipologías serán diferenciados como quinta clase. Así, deberán ser realizadas tres clasificaciones, para atender a las tres tipologías básicas de movimientos: desprendimientos, deslizamientos y corrientes de derrubios. Será necesario realizar un análisis de separabilidad con el fin de conocer si es posible distinguir entre los terrenos estables e inestables, así como entre las distintas tipologías.

Tabla 2. Análisis estadístico: Me: Media; Dt: Desviación típica; KS: Coeficiente de Kolmogorov-Smirnov.

Sensor	Imagen		Desprendimientos			Deslizamientos				
	Me	Dt	Me	Dt	KS	Me	Dt	KS	Me	Dt
Ikonos Pancromática	25	13	18	13	-0,28	26	14	0,04	23	15
Laplaciano	41	24	42	23	0,03	41	25	0,02	41	24
Varianza	117	26	106	34	-0,21	120	27	0,07	115	33
Multi - Azul	10	6	8	5	-0,24	12	7	0,07	11	8
Multi - Verde	17	10	13	10	-0,27	19	12	0,06	18	13
Multi - Roja	17	11	13	12	-0,28	19	13	0,05	18	14
Multi - IR próximo	35	19	24	18	-0,27	37	20	0,04	32	21
NDVI	171	22	166	22	-0,12	168	21	-0,05	164	23
Comp. Principal-PC1	30	15	21	16	-0,27	32	17	0,05	29	19
Clasificación	-	-	-	-	0,22	-	-	0,19	-	-
Clasificación modificada	-	-	-	-	0,25	-	-	0,25	-	-
Spot 5 Pancromática	31	10	27	8	-0,20	32	9	0,08	30	9
Laplaciano	40	23	40	21	0,02	40	26	0,02	40	25

Varianza	135	47	131	47	-0,07	139	47	0,07	139	47
Multi - Verde	29	8	27	7	-0,13	31	8	0,11	30	8
Multi - Roja	35	11	30	9	-0,19	35	10	0,07	34	10
Multi - IR próximo	50	11	42	11	-0,26	48	12	-0,10	47	11
Multi - IR medio	42	9	37	8	-0,23	42	8	0,04	41	9
NDVI	118	32	115	24	-0,10	112	30	-0,11	112	26
Comp. Principal-PC1	76	17	67	16	-0,22	77	15	0,05	74	17
Clasificación	-	-	-	-	0,38	-	-	0,25	-	-
Clasificación modificada	-	-	-	-	0,42	-	-	0,31	-	-
Landsat Pancromática	56	12	51	12	-0,21	58	12	0,05	55	13
Laplaciano	42	24	42	23	0,02	43	25	0,03	42	25
Varianza	141	28	149	30	0,13	148	26	0,11	152	30
Multi - Azul	50	12	48	9	-0,09	51	10	0,11	50	11
Multi - Verde	54	14	50	13	-0,14	56	12	0,07	54	14
Multi - Roja	69	23	62	21	-0,17	70	20	0,05	68	23
Multi - IR próximo	66	13	58	11	-0,25	67	16	0,10	63	15
Multi - IR medio 1	101	25	92	27	-0,17	101	23	-0,03	97	27
Multi - IR medio 2	70	20	66	22	-0,14	69	18	-0,03	68	21
NDVI	101	31	100	21	0,10	99	30	-0,04	100	28
Comp. Principal-PC 1	166	39	153	43	-0,18	167	36	0,04	161	43
Clasificación	-	-	-	-	0,15	-	-	0,08	-	-
Clasificación modificada	-	-	-	-	0,16	-	-	0,10	-	-

ANÁLISIS

Se han efectuado dos tipos de análisis: primero, la interpretación visual de las imágenes; segundo, análisis estadísticos mediante herramientas SIG, que se describen a continuación.

Análisis estadístico zonal

En este primer análisis, se obtiene un histograma o distribución de frecuencias de una imagen en las zonas definidas por otra imagen o capa vectorial. En nuestro caso, se determinará el histograma de las distintas imágenes en las zonas definidas por los movimientos de las distintas tipologías (desprendimientos, deslizamientos y corrientes de derrubios). Esa distribución se comparará con el histograma de la imagen completa en cada una de las bandas e imágenes consideradas.

Coefficientes de correlación

Para determinar si una imagen puede ser útil para discriminar entre zonas estables e inestables (ocupadas por movimientos) se han calculado a partir de las distribuciones anteriores, el coeficiente de Kolmogorov-Smirnov (KS). Este coeficiente muestra las diferencias entre el histograma de la imagen completa y los histogramas de las muestras correspondientes a los movimientos de ladera. El coeficiente KS será mayor cuanto mayor sea la diferencia entre los histogramas. Los resultados se muestran en la tabla 2..

RESULTADOS

En términos absolutos, se observa que los valores del coeficiente KS son bajos en prácticamente todos los casos. Sin embargo, considerándolos en términos relativos, se pueden extraer una serie de observaciones para las distintas tipologías de movimientos.

Los desprendimientos son la tipología que muestra las mayores diferencias radiométricas con respecto a la imagen completa y los mayores valores absolutos de los coeficientes de correlación (que son negativos). Generalmente, tienen valores más bajos del Nivel Digital (ND) en las zonas de desprendimiento, más oscuras que la media de la imagen. Estas diferencias se pueden observar tanto en las imágenes pancromáticas y multiespectrales originales, como en las derivadas (filtros, NDVI y bandas de las CP). Por sensores, las mayores diferencias y coeficientes se observan en Ikonos.

Los deslizamientos tienen correlaciones mucho más pobres que las anteriores en la mayoría de los casos. A pesar de ello, se aprecia que los ND de la muestra de deslizamientos son relativamente más altos (más claros) que la imagen completa en la imagen pancromática, sus filtros, las bandas del visible y algunas de las bandas CP. Sin embargo, la banda del infrarrojo próximo (NIR), el NDVI y algunas CP presentan valores más bajos en las muestras.

Las corrientes de derrubios presentan los resultados más irregulares. En la imagen pancromática correspondiente al sensor Ikonos, los valores de la muestra son claramente más bajos que en la imagen completa, mientras que en las imágenes correspondientes a Spot, los valores llegan a ser similares. Por su parte, los filtros aplicados a las imágenes de Landsat presentan valores más elevados en las zonas correspondientes a las zonas movilizadas que la imagen completa. Respecto a la imagen multiespectral, la mayoría de las bandas presentan valores del ND menores en la imagen muestra, pero en algunas bandas del visible, los ND llegan a ser más elevados. Sin embargo, las bandas del infrarrojo y del NDVI siempre aparecen con ND más bajos en las zonas movilizadas que en la media de la imagen completa.

DISCUSIÓN

A partir de estos resultados y la interpretación visual de las imágenes, se observa en primer lugar que los desprendimientos están muy relacionados con las zonas de sombra en el área de trabajo y, por ello, presentan ND más bajos que la imagen completa. Las mayores correlaciones aparecen en la imagen de Ikonos, tomadas en invierno y con una mayor extensión de las zonas de sombra. Este es seguramente un efecto local, a causa de que en esta área los desprendimientos están localizados en la vertiente norte, muy

escarpada, de la Sierra de Lújar. En otras zonas, con desprendimientos localizados en acantilados orientados al Sur, los desprendimientos están asociados con valores relativamente más elevados de los ND, como ocurre con otras tipologías de movimientos.

Los escarpes de los deslizamientos son zonas que aparecen más claras que la media de la imagen, a causa de que la roca fresca (que aflora en estas zonas) generalmente presenta una mayor reflectancia en el visible que los suelos y las zonas cubiertas de vegetación. Los valores bajos del coeficiente KS se deben probablemente al uso de todo el movimiento y no sólo del escarpe en el análisis de correlación cruzado. También concuerda el hecho de que el NDVI presente valores inferiores en la muestra de deslizamientos, ya que en las zonas movilizadas se produce una pérdida de la vegetación.

Las corrientes de derrubios tienen relaciones complejas con la reflectancia, dependiendo de la iluminación solar, debido a que estos movimientos suelen estar localizados en barrancos o pendientes muy acusadas, que pueden estar irregularmente afectadas por las sombras. Por esta razón, las corrientes de derrubios presentan valores más bajos del coeficiente KS, no porque presentan valores del ND similares a las zonas que los rodean, sino porque aparecen tanto con valores superiores a la imagen media (zonas de solana) como con valores inferiores a la imagen completa (zonas de sombra). Ya que las imágenes están tomadas en distintas estaciones del año, se produce esta irregularidad en los valores de ND y en los coeficientes. No obstante, el comportamiento medio es más parecido a los deslizamientos (ND más altos en la muestra) que a los desprendimientos. Respecto al NDVI y la banda del IRp se puede decir lo mismo que en los deslizamientos.

El filtro laplaciano no muestra resultados significativos respecto a la imagen original en la zona de trabajo, por lo que es descartado. Sin embargo, el uso de los filtros texturales resulta muy interesante, observándose mayor contraste entre las zonas con movimientos y la imagen completa. La resolución espacial llega a ser bastante decisiva, resultando que la imagen en la que mejor se resaltan los elementos lineales es la de Landsat (las imágenes filtradas presentan mayores ND en las zonas movilizadas en todas las tipologías), ya que introduce menos ruido que las otras imágenes de mayor resolución, seguida de la de Spot.

Con respecto a las clasificaciones supervisadas, en la figura 3 se muestran las firmas espectrales correspondientes a las tres clasificaciones obtenidas. En ellas se pueden observar las dificultades para distinguir entre los movimientos y algunos de los usos del suelo o materiales diferenciados. Los desprendimientos aparecen muy similares a los suelos, los deslizamientos son solo un poco más oscuros que la roca fresca/materiales aluviales y las corrientes de derrubios presentan un comportamiento intermedio entre suelos y roca fresca/material aluvial, aunque más cerca de los primeros.

Para discriminar entre las diferentes tipologías de movimientos de ladera y los usos del suelo con los que se confunden radiométricamente, se pueden combinar los resultados de las clasificaciones con la aplicación de los filtros texturales, especialmente la varianza, que muestra las mejores correlaciones con los movimientos. De esta manera, las zonas de escarpe de los deslizamientos presentan valores más altos de la varianza que la roca fresca y los materiales aluviales, mientras las zonas con corrientes de derrubios presentan valores de la varianza claramente más elevados que los suelos circundantes. En ambos casos, una simple aproximación matricial que combine las clasificaciones y el filtro de varianza permite modificar la clasificación para obtener una imagen final en la que estas tipologías de movimientos aparecen claramente separadas de los otros usos del suelo. Así, zonas previamente clasificadas de forma errónea como movimientos (figura 2 g y h), pasan ahora a ser suelos o roca fresca, por lo que los coeficientes de correlación aumentan (tabla 2).

Los resultados obtenidos en los distintos sensores presentan algunas diferencias entre los valores de los ND y los coeficientes KS. En general los resultados más significativos se producen en las imágenes de Spot, seguidas de Ikonos y Landsat. Quizá, la presencia de zonas de sombra en las imágenes de Ikonos hace que los resultados sean peores que los de Spot, cuya imagen está tomada en verano, libre de sombras. Sin embargo, los resultados de los filtros son mejores en Landsat, probablemente porque el tamaño de píxel en los otros sensores es demasiado pequeño para detectar elementos en una ventana de 3x3.

Finalmente, parece necesaria la realización de un post-proceso en las imágenes para eliminar algunos elementos como carreteras, escombreras, canteras, etc., confundibles radiométricamente con escarpes de movimientos. Estos elementos son claramente identificables y, consiguientemente, eliminables, mediante la utilización de corredores a lo largo de los elementos lineales y filtros de pendiente (Haerberling et al., 2004).

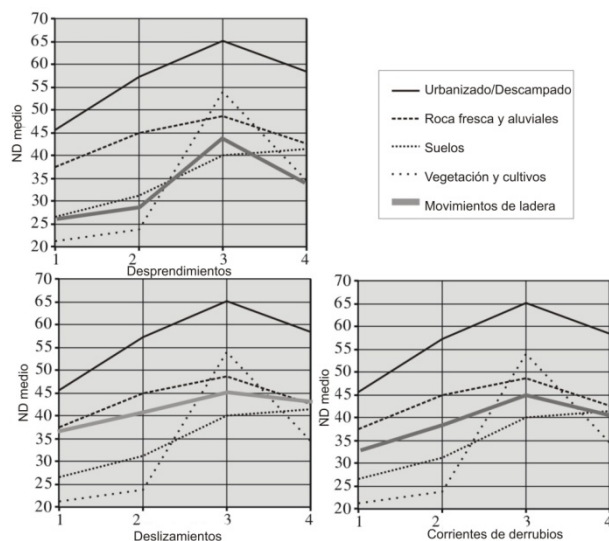


Figura 3. Signaturas espectrales de los usos del suelo, materiales y movimientos de ladera (Spot 5).

CONCLUSIONES

Hay muchas metodologías publicadas para el estudio de movimientos de ladera mediante técnicas de teledetección. Dependiendo de las características de la zona de estudio y las imágenes disponibles, las técnicas pueden ser diferentes, pero la mayoría están basadas en la utilización de información multispectral (composiciones en color, índices, ACP y clasificación digital) y análisis texturales (filtros y segmentación de imágenes).

En este estudio, ambos tipos de metodologías se combinan mediante la utilización de una clasificación digital supervisada y el empleo de filtros texturales (como la varianza). Previamente, un análisis estadístico y de correlación cruzada ha permitido establecer la correlación entre inventarios de movimientos de distintas tipologías y las imágenes, y también reconocer intervalos y valores medios de los ND en las distintas imágenes originales y derivadas, donde los movimientos de ladera se producen. De esta manera, los desprendimientos están relacionados con valores bajos (zonas oscuras) de las imágenes originales (efecto local), mientras que los deslizamientos y las corrientes de derrubios están relacionados con valores más altos (zonas más claras), especialmente los primeros.

La clasificación digital a partir del análisis multispectral ha permitido establecer una clase para cada una de las tipologías, en las que, sin embargo, existe una cierta mezcla con otros usos del suelo o materiales (suelos, roca fresca/aluviales). En este punto, el análisis textural puede resolver algunas de las ambigüedades, discriminando de forma más efectiva las zonas movilizadas de los otros usos y haciendo más exacta la clasificación.

Por lo tanto, el uso de las técnicas de teledetección en este tipo de estudios preliminares se prueba como muy útil. Sin embargo, futuras investigaciones deberán estar encaminadas a mejorar el realce de las imágenes (para resolver problemas con las sombras y la iluminación), en el análisis textural (uso de las técnicas de segmentación) y en la combinación de estas técnicas con la fotogrametría y trabajo de campo en las escalas más grandes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado mediante el proyecto CGL2005-03332 del Plan Nacional de I+D+I, el proyecto de excelencia P06-RNM-02125 de la Junta de Andalucía y los Grupos TEP-213 y RNM 221 del Plan Andaluz de Investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chacon, J.; Irigaray, C., Fernández, T.; El Hamdouni, R. (2007). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull. Eng. Geol. & Env.*, 65, 341-411.
- Chang, R.T. & Liu, J.K. (2004). Landslide features interpreted by neural network method using high-resolution satellite image and digital topographic data. *Proc. ISPRS04*, Istanbul, Turkey
- Eyers, R., Moore, J. McM., Hervas, J. and Lui, J. G. (1995). Landslide mapping using digital imagery: a case history from south east Spain". *Proc. 31st Annual Conf. on Geohazards and Engineering Geology*, 379 – 388. 1995, Coventry, UK.
- Fernández, T.; Jiménez, J.; Fernández, P.; Cardenal, J.; Delgado, J.; Irigaray, C.; El Hamdouni, R. y Chacón, J. (2008). Automatic detection of landslide features with remote sensing techniques in the Betic Cordilleras (Granada, Southern Spain). *ISPRS08 Congress*, Beijing.
- Haeberlin, Y. ; Turberg, P. ; Retière, A. ; Senegas, O. & Parriaux, A. (2004). Validation of SPOT-5 satellite imagery for geological hazard identification and risk assessment for landslides, mud and debris flows in Matagalpa. *Proc. ISPRS04*, Istanbul, Turkey.
- Mason, P. J., Rosenbaum, M. S. and Moore, J. McM. (1995). "Texture analysis using multi-temporal digital data for landslide hazard mapping". *Proc. 31st Annual Conference on Geohazards and Engineering Geology*, 215 – 224, Coventry, UK.
- Hervas, J. and Rosin, P. L. (1996) "Landslide mapping by textural analysis of ATM data". *Proceedings Eleventh Thematic Conference Applied Geologic Remote Sensing*. 395 – 402.
- Hervás, J.; Rosin,P.L.; Fernández-Renau, A.; Gómez, J.A. and León, C. (1996). Use of airborne multispectral imagery for mapping landslides in Los Vélez district (south-eastern Spain). In Chacón, J., Irigaray, C. and Fernández, T.(1996) (Eds.) *Landslides*. Pp. 353-362. Ed.Balkema. Netherlands.
- 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 de Laderas y Taludes Inestables*.
- Metternicht, G. ; Hurni, L & Gogu, R (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98, 284 – 303.
- Nichol, J & Wong, M.S. (2005). Satellite remote sensing for detailed landslide. Inventories using change detection and image fusion. *Intern. Journal of Remote Sensing*, 26, 9, 1913–1926.
- Nichol, J.; Shaker, A. & Wong, M.S. (2006). Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment. *Geomorphology* 76, 68– 75.

- Roessner, S.; Hans-Ulrich Wetzel, W.; Kaufmann, H. & Sarnagoev, A. (2005). Potential of Satellite Remote Sensing and GIS for Landslide Hazard Assessment in Southern Kyrgyzstan (Central Asia). *Natural Hazards*, 35: 395-416.
- Rosin, P.L. and Hervás, J. (2005). Remote sensing image thresholding methods to determining landslide activity. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 6, 1075-1092.
- Vohora, V.K. and Donohue, S.L. (2004). Application of remote sensing data to landslide mapping in Hong Kong. *Proc. ISPRS04*, Istanbul, Turkey.
- Wang, L. and He, D. C. (1990). "A new statistical approach for texture analysis". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56 (1), 61 - 66.
- Weirich, F. and Blesius, L. (2006). Comparison of satellite and air photo based landslide susceptibility maps. *Gemorphology*, 87, 352-364. Elsevier, UK.
- Whitworth, M., Giles, D., Murphy, W. (2001). Identification of landslides in clay terrains using Airborne Thematic Mapper (ATM) multispectral imagery. *Proc. 8th Intern. Symp. Remote Sensing. SPIE Volume 4545*, 216 - 224.
- Whitworth, M. C. Z.; Giles, D. P. & Murphy, W. (2005). Airborne remote sensing for landslide hazard assessment: a case study on the Jurassic escarpment slopes of Worcestershire, United Kingdom. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(3), 285 - 300.
- Zhang, Z.; Gong, H.; Zhao, W.; Zhang, Y. (2005). Application of remote sensing to study of landslides. *IEEE*, 1546-1549