

# Estudio de las zonas propensas a sufrir deslizamientos en los Concejos de Oviedo y Mieres (Asturias) a partir de una imagen LandsatTM y de un Modelo Digital de Elevaciones

C. Recondo\*, C. Menéndez\*, P. García\*\*, R. González\* y E. Sáez\*

Correo electrónico: [crecondo@relay.etsimo.uniovi.es](mailto:crecondo@relay.etsimo.uniovi.es)

\* Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Oviedo

\*\* Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT). Universidad de Oviedo. C/ Independencia, 13. 33004 Oviedo

## RESUMEN

Este trabajo pretende establecer una metodología para obtener zonas propensas a sufrir deslizamientos, utilizando únicamente información procedente de una imagen de satélite y de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). El método está pensado para zonas donde se carece de otro tipo de información del terreno (datos de campo geológicos, de vegetación, etc.). La aplicación del método a dos Concejos asturianos (Oviedo y Mieres), para los que existe bastante información de campo, nos servirá para validarlo. Del MDE se obtienen tres de los mapas base: el de pendientes, el de flujo acumulado y el de curvatura. De una imagen Landsat-TM son elaborados los otros dos mapas base: el de lineamientos y el de vegetación. Combinando estos cinco mapas se elabora el de susceptibilidad a sufrir deslizamientos. Para el caso de Oviedo este mapa es capaz de localizar en sus dos últimas categorías (susceptibilidad alta y muy alta) el 84% de los deslizamientos producidos en este Concejo.

**PALABRAS CLAVE:** Deslizamientos, Landsat-TM, lineamientos, vegetación, MDE, Asturias.

## ABSTRACT

This paper tries to establish a methodology for the obtainment of landslide-prone areas, using only a remote sensing image and a Digital Elevation Model (DEM). The method has been thought for zones where land information is poor (for example, geological and vegetation data). The method will be applied to two councils of Asturias (Oviedo and Mieres), where there is sufficient land information, in order to validate it. Three basis maps will be obtained from the DEM: the slopes, the accumulated flow and the curvature map. The other two basis maps will be elaborated from the Landsat-TM image: the lineaments and the vegetation map. Combining these five maps the landslide-prone areas map is elaborated. For Oviedo, this map localizes in their two last classes (high and very high susceptibility) the 84% of the landslides produced in this council.

**KEY WORDS:** Landslides, Landsat-TM, lineaments, vegetation, DEM, Asturias.

## INTRODUCCIÓN

De todos los riesgos geológicos que potencialmente se pueden producir en Asturias, son los deslizamientos los que presentan el mayor riesgo máximo estimado, del 37%, frente a otros como el de costas (29%), el de inundaciones (26%) o el de erosión (8%) (Gutiérrez-Claverol y Torres-Alonso, 1995). Las pérdidas económicas generadas por deslizamientos en esta región son considerables: la previsión para el periodo 1991-2001 es de unos 11.000

millones (González Moradas y Lima de Montes, 1999). Este problema tiene visos de aumentar en zonas cada vez más pobladas, como los Concejos de Oviedo y Mieres, ya que la actuación humana modifica la topografía natural y desencadena fenómenos de inestabilidad. El fenómeno de los deslizamientos es mucho más dramático en otros

países, como los situados a lo largo de los Andes, donde los desastres no son sólo económicos, sino también humanos: en Perú, entre 1962 y 1983, murieron unas 29.634 personas por deslizamientos; en Colombia, sólo en 1985, lo hicieron unas 22.000; las lluvias anuales en Venezuela produjeron deslizamientos que afectaron en 1994 a 900.000 personas, al quedar muy dañado el sistema de abastecimiento de aguas (Gómez *et al.*, 1999). A pesar de que es un problema reconocido, el fenómeno de los deslizamientos ha sido poco estudiado en estos países y también en nuestra región, al menos desde un punto de vista predictivo.

Aunque a veces se identifica deslizamiento con cualquier movimiento del terreno, este último término es más amplio e incluye al primero. Siguiendo a Gutiérrez-Claverol y Torres-Alonso

(1995), los movimientos del terreno en Asturias se pueden clasificar (atendiendo a sus características *in situ*) en tres grandes tipos: desprendimientos (caída de bloques, vuelcos y pandeos), hundimientos (por lavado y arrastre, por disolución y por subsidencia minera) y corrimientos (reptaciones, coladas, deslizamientos traslacionales y deslizamientos rotacionales). De entre los corrimientos, las reptaciones y coladas son poco representativas en Asturias, y se ha atajado su progresión construyendo escolleras. Los deslizamientos son definidos por estos autores como "movimientos que se producen en laderas y taludes afectando masas de suelos, rocas blandas y competentes por superar su resistencia al esfuerzo cortante. Los enmarcan límites bien definidos: superficies inclinadas (deslizamientos traslacionales) o semicirculares (deslizamientos rotacionales)". Los deslizamientos rotacionales son los más frecuentes en Asturias, tanto en laderas naturales como en taludes.

Uno de los métodos más tradicionales para el análisis de deslizamientos ha sido estudiar la estabilidad de la ladera, a través de su factor de seguridad ( $f$ ). Este factor se define como el cociente entre la suma de las fuerzas resistentes a la quiebra de la ladera y la suma de las fuerzas perturbadoras, de forma que si  $f > 1.0$  la ladera es estable y si  $f < 1.0$  es inestable. Pero en el cálculo de este factor sólo se han tenido en cuenta tradicionalmente factores internos de la ladera, tales como la fuerza de ruptura de los suelos, la geometría de la ladera, la presión ejercida por el agua en los poros o fuerzas de filtración y las condiciones de carga y medioambientales de la ladera. Este método ha tenido éxito con medidas *in situ* o a través de análisis de suelos en laboratorio, pero requiere un trabajo muy laborioso y lento. Además, otros autores (Cooke and Doornkamp, 1997; Gómez *et al.*, 1999) sugieren que este tipo de análisis fallarían en la predicción, al no tener en cuenta otros muchos parámetros externos que también pueden influir en la estabilidad de la ladera y en los parámetros internos de ésta. Entre éstos se podrían citar (Gómez *et al.*, 1999): la cobertura vegetal, los lineamientos, el ángulo de pendiente y la humedad del suelo. Otro parámetro podría ser la morfología de la ladera.

Nuestro trabajo pretende estudiar, siguiendo a Gómez *et al.* (1999), cómo afectan estos parámetros externos a la hora de predecir zonas propensas a sufrir deslizamientos. Estos parámetros se han obtenido para dos Concejos asturianos, Oviedo y Mieres, a través de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y de una imagen Landsat-TM. A partir del MDE se elaboran los mapas de pendientes, de flujo acumulado y de curvatura; de la imagen se obtienen los mapas de vegetación y de lineamientos. Estos últimos mapas son validados con mapas de campo (de vegetación y geológico, respectivamente), existentes para ambos Concejos.

Posteriormente se analiza la conexión existente entre estos parámetros externos y los deslizamientos reales producidos y finalmente se elabora el mapa de susceptibilidad a sufrir deslizamientos.

## MAPAS OBTENIDOS A PARTIR DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE)

Nuestros MDE (uno para Oviedo y otro para Mieres) son imágenes raster obtenidas del mapa topográfico a escala 1:25.000 y equidistancia 20 m. En concreto, el MDE para Oviedo es una composición de las hojas 28-II, 28-IV, 29-III, 52-II y 53-I, y para Mieres una composición de las cuatro hojas 53 (53-I, 53-II, 53-III y 53-IV). Ambos MDE abarcan una zona bastante mayor que su correspondiente Concejo. El tamaño de pixel elegido para los MDE fue de 30 m, igual al de la imagen Landsat-TM. Su rango de alturas dentro de los Concejos está entre 72-710 m y 158-1147 m para Oviedo y Mieres, respectivamente.

### Mapa de pendientes

Para calcular la pendiente de cada punto ( $x,y$ ) del MDE hemos calculado separadamente  $p =$  la pendiente de cada punto en sentido  $x$  ( $O-E$ ) y  $q =$  la pendiente de cada punto en sentido  $y$  ( $S-N$ ), de forma que la pendiente total será  $(p^2 + q^2)^{1/2}$ . El cálculo de  $p$  y  $q$  puede hacerse de forma sencilla mediante filtros 3x3 (Recondo *et al.*, 1999; 2000) que tengan en cuenta los 8 vecinos más próximos al punto problema ( $x,y$ ), de forma que los filtros serían, para  $p$ :

|        |   |       |
|--------|---|-------|
| -1/180 | 0 | 1/180 |
| -1/180 | 0 | 1/180 |
| -1/180 | 0 | 1/180 |

y para  $q$ :

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 1/180  | 1/180  | 1/180  |
| 0      | 0      | 1/180  |
| -1/180 | -1/180 | -1/180 |

siendo  $180 = 6$  vecinos  $\times$  resolución espacial del MDE (30 m en nuestro caso).

Obtenidas las imágenes raster  $p$  y  $q$  calculamos la pendiente total:  $(p^2 + q^2)^{1/2}$ . Finalmente, para la obtención de los mapas de pendientes, cortamos estas imágenes según los Concejos y las reclasificamos en las cinco categorías usuales en estudios de deslizamientos: pendientes entre 0-5 %, 5-10 %, 10-20%, 20-40 %, y >40 %. Todo el proceso de aplicación de filtros y obtención de los mapas se ha realizado con el programa IDRISI (los filtros no funcionan bien en ER Mapper 6.0).

### Mapa de flujo acumulado

Dos de los parámetros externos que pueden influir en la estabilidad de la ladera son la humedad del suelo y la morfología de la ladera. El mapa de flujo acumulado en cada punto, aunque simula la humedad superficial del suelo (la escorrentía superficial), simula sobre todo la morfología de éste en cuanto a su encauzamiento. Así, este mapa nos servirá en este estudio no como un mapa de humedad (ya que la humedad que afecta a la estabilidad de la ladera es la del interior del suelo, no la superficial), sino como un mapa de encauzamiento, que fundamentalmente distingue lo que son laderas de cumbres (encauzamiento nulo) o de fondos de valles o cauces de ríos (gran encauzamiento).

Para crear un mapa de flujo acumulado se genera primero una línea de flujo para cada punto del MDE, siendo ésta el trayecto que, a partir de un punto inicial, sigue la línea de máxima pendiente. Posteriormente cada elemento del modelo toma el valor del número de líneas de flujo que pasan por él, siendo su valor final proporcional a su área subsidiaria, es decir, al número de puntos que drenan hacia él desde las zonas de mayor altitud. La mayoría de los puntos tendrán valores bajos, especialmente los de las cumbres y crestas y, en menor medida, los constituyentes de las laderas. En cambio, los flujos convergerán en los fondos de los valles y el valor irá aumentando progresivamente aguas abajo hasta alcanzar el valor máximo en el punto que ejerce de sumidero de la cuenca (Felicísimo, 1994). Este modelo se conoce también como el de caudales máximos (MDF), al representar el caudal máximo potencial en cada punto, ya que éste es proporcional al área subsidiaria.

Los modelos de flujo acumulado de Oviedo y Mieres se han realizado con el programa ARC/INFO. Ambos son imágenes ras ter de 30 m de resolución, al igual que los MDE de los que derivan. Los mapas finales fueron reclasificados en 5 categorías, elegidas por la forma del histograma (caída exponencial): zonas a las que nodrena ninguna celda, a las que drenan los vecinos cercanos (entre 1-10 celdas), y a las que drenan entre 10-100, 100-1000 y más de 1000 celdas, respectivamente. Se observa en ellos que las zonas de la primera clase (0 celdas drenando hacia ellas) coinciden con las cumbres y crestas del MDE, mientras que las de la última clase (más de 1000 celdas) coinciden con los ríos principales. En las tres clases restantes se distribuyen el resto de las zonas, que son la mayoría: zonas poco, bastante y muy encauzadas, respectivamente.

### Mapa de curvatura

Otro parámetro que hemos considerado relacionado con la morfología de la ladera es la curvatura de cada punto del terreno, es decir su convexidad o concavidad, calculada a partir de la derivada de

segundo grado de la altitud. El cálculo de esta derivada (Felicísimo, 1994) se realiza fácilmente aplicando el filtro conocido como laplaciano sobre el MDE:

|   |   |   |
|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 4 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |

En realidad, el cálculo exacto de la curvatura en un punto implica esta operación sobre los vecinos de un pixel dividida por  $d^2$ , donde  $d$  sería la distancia de un pixel a otro, en nuestro caso 30 m. Pero como los valores así obtenidos suelen ser muy pequeños, se suelen multiplicar posteriormente por un factor adecuado. Al no efectuar la división, nuestros valores son razonables y corresponden a la *curvatura x d<sup>2</sup>*

En los mapas de curvatura en un punto las zonas convexas tendrán valores negativos, las planas valor cero y las cóncavas valores positivos, como corresponde a la definición matemática de la derivada segunda de una función según su convexidad.

Ya que la creación de este mapa sólo supone aplicar el filtro anterior sobre el MDE se ha realizado fácilmente en IDRISI para los Concejos de Oviedo y Mieres. Para efectos de presentación hemos reclasificado los mapas en 5 clases (la elección de las clases se ha hecho atendiendo a su histograma, de forma gaussiana): valores <-10, entre -10 y -4, entre -3 y 3, entre 4 y 10 y valores >10.

## MAPAS OBTENIDOS A PARTIR DE LA IMAGEN LANDSAT-TM

La imagen Landsat-TM (7 bandas) que tenemos fue tomada el día 10 de setiembre de 1987 a las 10<sup>h</sup> 33<sup>m</sup> 52<sup>s</sup> TU. En ese momento la elevación del Sol sobre el horizonte era  $h = 46.072$  y su acimut topográfico  $\theta = 141.32^\circ$ , ambos referidos al centro de la escena ( $\varphi = 43^\circ 10' 18''$  N,  $\lambda = 5^\circ 53' 41''$  W). La imagen está bastante libre de nubes en las zonas de nuestro estudio, los Concejos de Oviedo y Mieres.

Las imágenes de satélite requieren unas correcciones radiométricas y geométricas estándares previas a la realización de cualquier proceso sobre ellas. La nuestra ha sido corregida atmosféricamente (no existen otro tipo de problemas radiométricos) y, posteriormente, georreferenciada a la proyección U.T.M.

La corrección atmosférica se ha realizado por el sencillo método de Chávez (Campbell, 1987), que consiste en restar del histograma de cada banda de la imagen su valor mínimo, asumiendo que este mínimo es causado por dispersión atmosférica (fundamentalmente dispersión Rayleigh, que afecta más a longitudes de onda más cortas). Los valores mínimos son 51, 14, 10,4, 1, (32) y 1 para las bandas 1, 2, 3,4, 5, (6) y 7, respectivamente. Se

observa que para las bandas ópticas (todas excepto la 6) este valor decrece con la longitud de onda (( aumenta de la banda 1 a la 7), lo cual es consistente con lo esperado de la dispersión Rayleigh.

La georreferenciación de la imagen se ha realizado buscando puntos comunes entre la imagen y distintos mapas vectoriales en proyección U.T.M. Elegidos estos puntos se usa un polinomio de ajuste lineal en X e Y (polinomios de grado más alto no mejoran el resultado) y el método del vecino más próximo para obtener el Nivel Digital (ND) de los nuevos píxeles. Todo ello se ha realizado con el programa ER Mapper. En una primera fase se georreferenció toda la imagen (que es una escena completa) basándonos sobre todo en un mapa vectorial a escala 1:25.000 con todos los ríos asturianos, que se distinguían con facilidad, obteniendo un error cuadrático medio de  $r.m.s = 0.522$  con 135 puntos de control. Al centrarnos en los Concejos se necesitó una segunda georreferenciación más precisa, para la cual se utilizó como base vectorial fundamentalmente el mapa topográfico a escala 1:25.000 y  $E = 20 m$  de Asturias, usando sólo puntos de control en el Concejo de estudio. Para Oviedo esta segunda georreferenciación se hizo con 27 puntos de control y se obtuvo un  $r.m.s. = 0.6$ . Para Mieres los puntos de control fueron 140 y el  $r.m.s = 1.210$ .

De lo anterior se deduce que la georreferenciación para Oviedo necesita menos puntos de control y el  $r.m.s.$  obtenido es mejor, debido al menor relieve que presenta esta zona frente a la de Mieres. Por ello creemos que la georreferenciación podría ser mejorada (en zonas de gran relieve como Asturias) y se necesitarían menos puntos de control si se incluyese también la Z en los polinomios de ajuste, lo cual no se contempla actualmente en los programas comerciales usados en este trabajo, IDRISI y ER Mapper. Además, en general para toda Asturias, una buena georreferenciación de la imagen es fundamental para poder realizar estudios de clasificación de las cubiertas, ya que en esta región la cubierta vegetal está muy fragmentada, existiendo muchos píxeles de borde.

A partir de la imagen corregida atmosféricamente y georreferenciada a la proyección U.T.M. hemos realizado el mapa de lineamientos como explicaremos en la siguiente sección. Para la obtención de un mapa de vegetación a partir de métodos de clasificación sobre la imagen se necesita además otra corrección radiométrica (necesaria en zonas de gran relieve), que es la corrección topográfica de la imagen. Esto será tratado con detalle más adelante.

### Mapa de lineamientos

Los lineamientos geológicos se pueden definir como hechos lineales cartografiados, simples o compuestos, cuyas partes se alinean de forma rectilínea o ligeramente curvilínea, diferenciándose

notablemente de los hechos adyacentes, y las cuales presumiblemente reflejan un fenómeno subsuperficial (O'Leary *et al.*, 1976). Los fenómenos subsuperficiales son fallas, grietas u otras discontinuidades en la roca subyacente, los cuales pueden producir zonas de debilidad al alterarse su permeabilidad. A este respecto, Greenbaum *et al.* (1995) encuentran una alta probabilidad de que los deslizamientos se originen en la vecindad de lineamientos.

Siguiendo a Gómez *et al.* (1999) usamos la banda 3 de la imagen LandsatTM para realizar este análisis de lineamientos. A esta banda se le aplica primero un filtro de paso bajo (de media 3x3) para bloquear su alto detalle en frecuencia espacial. Suavizada la banda, se le aplican independientemente cuatro filtros 5x5 de realce de bordes, con el objeto de generar las cuatro componentes direccionales (N-S, NW-SE, W-E y SW-NE) de los lineamientos. Visualizados éstos, se vectorizan por encima como líneas (con cuidado de evitar las líneas que corresponden a ríos, carreteras, etc.). Los filtros se han aplicado en IDRISI y la visualización y vectorización en ER Mapper. Los filtros direccionales son:

| N-S |    |    |    |    | NW-SE |    |    |    |    |
|-----|----|----|----|----|-------|----|----|----|----|
| -1  | -1 | 4  | -1 | -1 | 4     | -1 | -1 | -2 | 3  |
| -2  | -2 | 8  | -2 | -2 | -1    | 8  | -2 | -3 | -2 |
| -3  | -3 | 12 | -3 | -3 | -1    | -2 | 12 | -2 | -1 |
| -2  | -2 | 8  | -2 | -2 | -2    | -3 | -2 | 8  | -1 |
| -1  | -1 | 4  | -1 | -1 | -3    | -2 | -1 | -1 | 4  |

| W-E |    |    |    |    | SW-NE |    |    |    |    |
|-----|----|----|----|----|-------|----|----|----|----|
| -1  | -2 | -3 | -2 | -1 | -3    | -2 | -1 | -1 | 4  |
| -1  | -2 | -3 | -2 | -1 | -2    | -3 | -2 | 8  | -1 |
| 4   | 8  | 12 | 8  | 4  | -1    | -2 | 12 | -2 | -1 |
| -1  | -2 | -3 | -2 | -1 | -1    | 8  | -2 | -3 | -2 |
| -1  | -2 | -3 | -2 | -1 | 4     | -1 | -1 | -2 | -3 |

Los mapas vectoriales de lineamientos en cada una de las cuatro direcciones se superponen finalmente en un mapa vectorial total de todos ellos (Figura 1).

Al comparar los mapas de lineamientos obtenidos a partir de la imagen Landsat-TM con los mapas geológicos de campo existentes para Oviedo y Mieres, pudimos observar que la mayoría de los lineamientos seguían la dirección de los contactos geológicos o eran perpendiculares a ellos. Con respecto a la geología estructural (ver el ejemplo de Oviedo en la Figura 2), la relación es todavía más clara: muchos de los lineamientos coinciden con fallas o pliegues existentes y no se han detectado lineamientos donde no existen estas estructuras. El hecho de que se detecten más lineamientos que fallas y pliegues es normal (Gutiérrez-Claverol, 1993), ya que en el campo pueden no ser lo suficientemente superficiales para verlos; en general parecen estar asociados a las principales fallas y pliegues, como marcando una zona de debilidad alrededor de éstos.



Figura 1. Mapas vectoriales de lineamientos para los Concejos de Oviedo (izquierda) y Mieres (derecha).

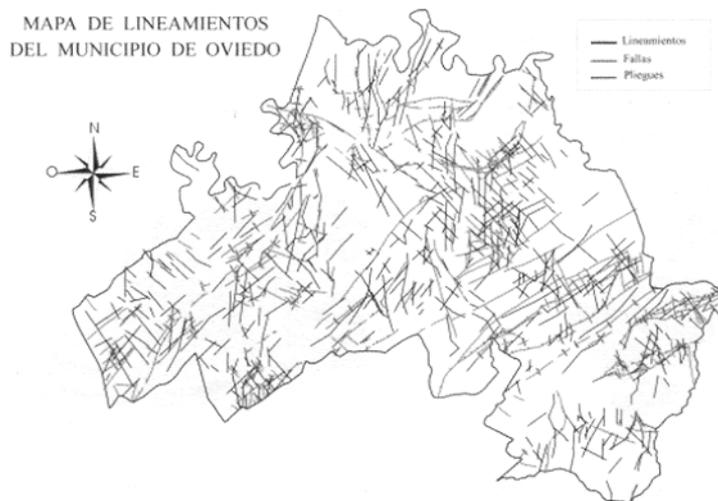


Figura 2. Comparación entre los lineamientos detectados y la geología estructural (Concejo de Oviedo).

La rasterización de los mapas vectoriales de lineamientos nos da imágenes cuyos pixels sólo pueden tener 4 valores: 0 cuando no pasa ningún lineamiento por ese pixel, y 1, 2, 3 o 4 según pasen uno, dos, tres o cuatro lineamientos de distintas direcciones por él. En nuestro caso sólo tenemos valores de 0 a 3. En un estudio de deslizamientos, el problema con este mapa es que nos indica exclusivamente dónde se localizan los lineamientos, sin tener en cuenta el hecho de que éstos no sólo afectan a la zona concreta donde se encuentran, sino que producen una zona de debilidad más amplia en torno a ellos. Para introducir esto, hemos creado en cada una de las cuatro imágenes raster de lineamientos direccionales, una zona de influencia de 120 m (3 vecinos adyacentes) a cada lado de los lineamientos, de forma que el valor del pixel vaya decreciendo progresivamente a medida que nos alejamos del lineamiento. Esto lo hemos hecho en IDRISI (módulo BUFFER). La suma de las cuatro imágenes raster con zonas de influencia es todavía un mapa muy fragmentado, por lo que posteriormente se le aplicó un filtro de media 27x27 para suavizarlo. El tamaño del filtro (27 pixels) corresponde aproximadamente a la mitad

del tamaño y de la distancia entre las distintas agrupaciones de lineamientos que se distinguen visualmente. Por último, este mapa se reclasificó en 5 categorías con un número igual de clases cada una (Figura 3): zonas donde el número o frecuencia de lineamientos es muy baja, baja, media, alta y muy alta, respectivamente.

### Mapa de vegetación

El mapa de vegetación se pretende obtener como resultado de aplicar métodos de clasificación supervisada sobre la imagen Landsat-TM, de forma que las distintas clases obtenidas se caractericen por valores similares de radiancia o nivel digital (ND). En zonas montañosas, la topografía hace que las laderas cuya superficie está más expuesta al Sol tengan valores de ND más altos que aquellas menos expuestas, incluso aunque se trate del mismo tipo de cubierta. Por ello, previamente a la clasificación, ha de realizarse una corrección topográfica de la imagen, para que no se clasifiquen como distintas cubiertas iguales (con diferente ND por su distinta iluminación). El efecto de la corrección topográfica es, por tanto, disminuir apropiadamente

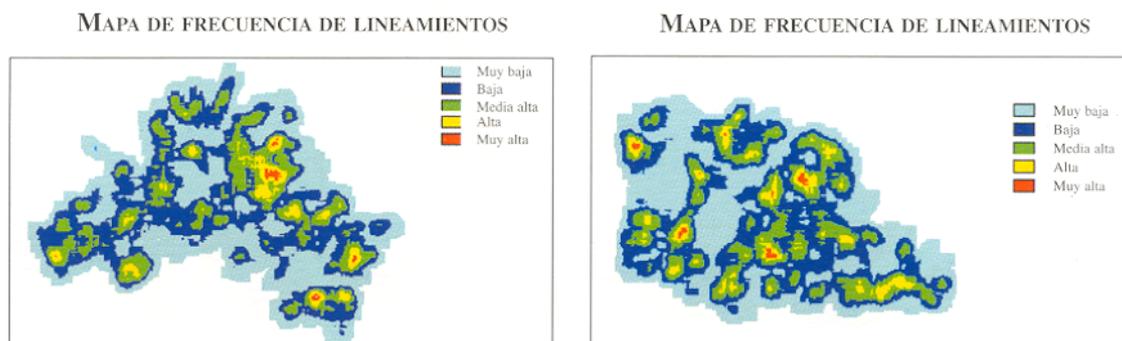


Figura 3. Mapas de frecuencia de lineamientos para los Concejos de Oviedo (izquierda) y Mieres (derecha).

damente el ND de las zonas más iluminadas y aumentarlo en las de menor iluminación, es decir, convertir de alguna forma una región montañosa en "llana".

### Corrección topográfica de la imagen. Modelo de superficies de Minnaert

Uno de los modelos más usados para la corrección del efecto topográfico es el modelo de superficies de Minnaert, que considera que las superficies no son lambertianas o perfectamente difusoras, de forma que su brillo aparente no es igual en todas las direcciones de vista. Este modelo no-lambertiano, en concreto, considera que la radiancia que recibe el sensor procedente de una superficie depende de tres parámetros: el coseno del ángulo de incidencia solar ( $\cos i$ ), definido como el ángulo entre la normal a la superficie y el vector solar; el coseno del ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de visión del sensor ( $\cos e$ ); y de una constante que depende de la longitud de onda, conocida como la *constante de Minnaert*  $k(\lambda)$ .

La radiancia (o equivalentemente, los valores de ND) recibida por el sensor según este modelo sería (Minnaert, 1941; Smith *et al.*, 1980):

$$L(i, e, \lambda) = C(\cos i)^{k(\lambda)} (\cos e)^{k(\lambda)-1} \quad (1)$$

(la reducción al caso lambertiano se obtendría haciendo  $k(\lambda) = 1$ ).

Linearizando esta ecuación puede obtenerse directamente el valor de  $k(\lambda)$  hallando la pendiente de la regresión lineal entre  $\ln(\cos i \cos e)$  y  $\ln(ND \cos e)$ :

$$\ln(ND \cos e) = \ln C + k \ln(\cos i \cos e) \quad (2)$$

donde ND sería en cada caso el valor digital de cada una de las 7 bandas de la imagen Landsat-TM, de forma que se obtendría un valor de  $k(\lambda)$  para cada banda, ya que ésta depende de la longitud de onda en la que opera cada banda.

Los valores de  $\cos i$  y  $\cos e$  pueden obtenerse fácilmente a partir de un MDE (a través de las pendientes  $p$  y  $q$  en cada punto  $(x, y)$  vistas en la subsección "Mapa de pendientes") y conociendo el ángulo vertical ( $V$ ) y el acimut topográfico ( $\theta_s$ ) del Sol (ver denominador de la ecuación 4). Más detalles sobre la formulación pueden encontrarse en Recondo *et al.* (1999; 2000).

La corrección de la radiancia de una superficie inclinada ( $L_i$ ) a la radiancia de la correspondiente superficie horizontal proyectada ( $L_H$ ) puede expresarse:

$$\tau = \frac{L_H}{L_i} = \frac{L(i_H, 1, \lambda)}{L(i, e, \lambda)} = \frac{(\cos i)_H^k}{(\cos i)_i^k (\cos e)^{k-1}} \quad (3)$$

que, sustituyendo los valores de  $\cos i$  y  $\cos e$ , queda:

$$\tau = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{1+p_s^2+q_s^2}}\right)^k}{\left(\frac{1-pp_s-qq_s}{(\sqrt{1+p^2+q^2})(\sqrt{1+p_s^2+q_s^2})}\right)^k \left(\frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}}\right)^{k-1}} \quad (4)$$

donde  $P_s =$  componente  $x$  (O-E) del vector solar =  $\sin \theta_s \tan V$ ;  $q_s =$  componente  $y$  (S-N) del vector solar =  $\cos \theta_s \tan V$ . el numerador se simplifica al ser  $p = q = 0$  y  $\cos e = 1$  para una superficie horizontal.

El parámetro  $\tau$  (en cada punto puede ser menor que 1 (orientación preferente hacia el Sol,  $i_i < i_H$ ), igual a 1 (horizontal,  $i_i = i_H$ ) o mayor que 1 ( $i_i > i_H$ )). Calculado éste, la corrección topográfica de la radiancia (o ND) observada por el sensor en cada una de las bandas de la imagen Landsat-TM puede calcularse mediante:

$$ND_{\text{corregido}} = ND_{\text{observado}} \tau \quad (5)$$

Aplicando (5) el ND observado para cada pixel en cada banda de la imagen Landsat se disminuye (en las zonas más iluminadas) o aumenta (en las menos iluminadas) proporcionalmente al efecto topográfico estimado a partir del MDE. Con ello se pretende que los diferentes valores de ND en la

imagen resultante no se deban a la topografía, sino al hecho de tratarse de cubiertas distintas.

Para la aplicación práctica del modelo de Minnaert de corrección topográfica hemos usado los MDE para Oviedo y Mieres comentados en la *segunda sección* y el programa IDRISI. Los valores obtenidos para la constante  $k(\lambda)$  son 0.27, 0.35, 0.38, 0.40, 0.50, (0.17) y 0.54 para Mieres y 0.35, 0.43, 0.46, 0.48, 0.56, (0.17) y 0.59 para Oviedo, para las bandas 1, 2, 3, 4, 5, (6) y 7, respectivamente. Se observa que en el espectro óptico (todas las bandas excepto la 6),  $k(\lambda)$  crece con la longitud de onda; sin embargo, en todos los casos difiere del valor lambertiano  $k(\lambda) = 1$ .

Hay que tener en cuenta que el parámetro  $\ddot{U}$  debe ponerse a cero en aquellos pixels que están en sombra (con  $\cos i \leq 0$ ), para los que el ND corregido ha de ser también nulo (serán pixels que no se tengan en cuenta en la clasificación). Además de éstos, también deben aparecer en la imagen resultante como nulos aquellos pixels que sufren ocultamiento topográfico por otros con suficiente altura para interceptar al vector solar. En nuestro caso tanto los pixels en sombra como los ocultos (hallados con el programa ARC/INFO) son muy pocos y se localizan todos ellos fuera de los Concejos de Oviedo y Mieres.

#### **Clasificación supervisada de la imagen. Método de máxima probabilidad.**

Corregida topográficamente la zona de la imagen Landsat TM (año 87) de Oviedo y Mieres, realizamos clasificaciones supervisadas sobre ella usando todos los métodos que contempla el programa ER Mapper: mínima distancia, máxima probabilidad (con filtros 3x3, 5x5 y 7x7), paralelepípedos y el de Mahalanobis. Los dos primeros son los que dan mejores resultados, así que nos centraremos en ellos. Las clasificaciones resultantes de ambos fueron comparadas con un mapa de vegetación de campo realizado por el INDUROT (años 95-96), para ver el acuerdo entre ellos.

La leyenda del mapa de vegetación de referencia fue simplificada a 9 categorías generales, a saber: 1) Bosques (que incluye bosques maduros, prebosques, arbustos y las plantaciones de castaño), 2) Brezales (con los piomales, brezales y helechales), 3) Aulagares, 4) Prados (que incluye prados, jardines y parques del área urbana, cultivos hortícolas y formaciones herbáceas no pratícolas), 5) Vegetación dulceacuícola (no existe en Mieres), 6) Vegetación rupícola, 7) Pinares (plantaciones), 8) Áreas urbanas y suelo desnudo (hay grandes industrias que son explotaciones a cielo abierto) y 9) Ríos.

Una comparación entre el método de mínima distancia (MD) y el de máxima probabilidad (MP) con realce del vecino más frecuente en filtros de 3x3, 5x5 y 7x7, en función del % de acierto global (la columna) y la exactitud del productor para las

distintas categorías (columnas restantes) se muestra en la Tabla 1.

De la Tabla 1 se deduce que las cubiertas con muy poca representación (ver superficie en el mapa de campo en la última fila) en el Concejo de Mieres, como son los aulagares, los pinares y los ríos se clasifican mejor por el método de mínima distancia y peor a medida que se aplica un filtro mayor en el de máxima probabilidad, lo cual es lógico, ya que con la aplicación de filtros estas cubiertas son absorbidas por otras más representativas. Por el contrario, las categorías más predominantes en la zona como son los bosques, los brezales, los prados y las áreas urbanas y suelo desnudo se clasifican mejor por el método de máxima probabilidad y mejor cuanto mayor es el filtro aplicado. Por ello, el mejor acuerdo, un 59%, entre la clasificación y el mapa de vegetación de referencia lo da el método de máxima probabilidad con realce del vecino más frecuente en un filtro de 7x7. Para Oviedo, el método de MP es mejor que el de MD en todas las cubiertas excepto en los ríos. Además, en Oviedo, la MP funciona mejor con un filtro de 3x3 (acuerdo del 54%), debido a que en este Concejo las cubiertas están más fragmentadas que en Mieres.

Para el estudio de deslizamientos hemos simplificado un poco más tanto los mapas de vegetación de referencia como las mejores clasificaciones obtenidas, ya que hemos considerado que, a efectos de deslizamientos, son iguales bosques que pinares y brezales que aulagares. Así, la leyenda final de estos mapas (Figura 4) sólo tiene 5 categorías: Bosques (con pinares), Arbustos (con brezales, aulagares y vegetación rupícola), Prados, Área urbana y ríos (con vegetación dulceacuícola).

### **OBTENCION DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A SUFRIR DESLIZAMIENTOS**

Combinando los cinco mapas base de los Concejos de Oviedo y Mieres se obtiene el mapa final mostrándonos las zonas propensas a sufrir deslizamientos en cada Concejo. Como a priori no sabemos cuál es la mejor combinación para los mapas base, hemos usado el mapa de ubicación de deslizamientos existente sólo para Oviedo para establecer el método de combinación.

#### **Relación entre los mapas base y los deslizamientos de Oviedo**

Para establecer cómo influye cada mapa base (cada uno con 5 categorías) en la posibilidad de producirse deslizamientos, hemos relacionado cada uno de ellos con el de ubicación de deslizamientos de Oviedo (imagen raster con valores de 1 donde existen deslizamientos y 0 donde no hay), calculando el número de deslizamientos que caen en cada clase.

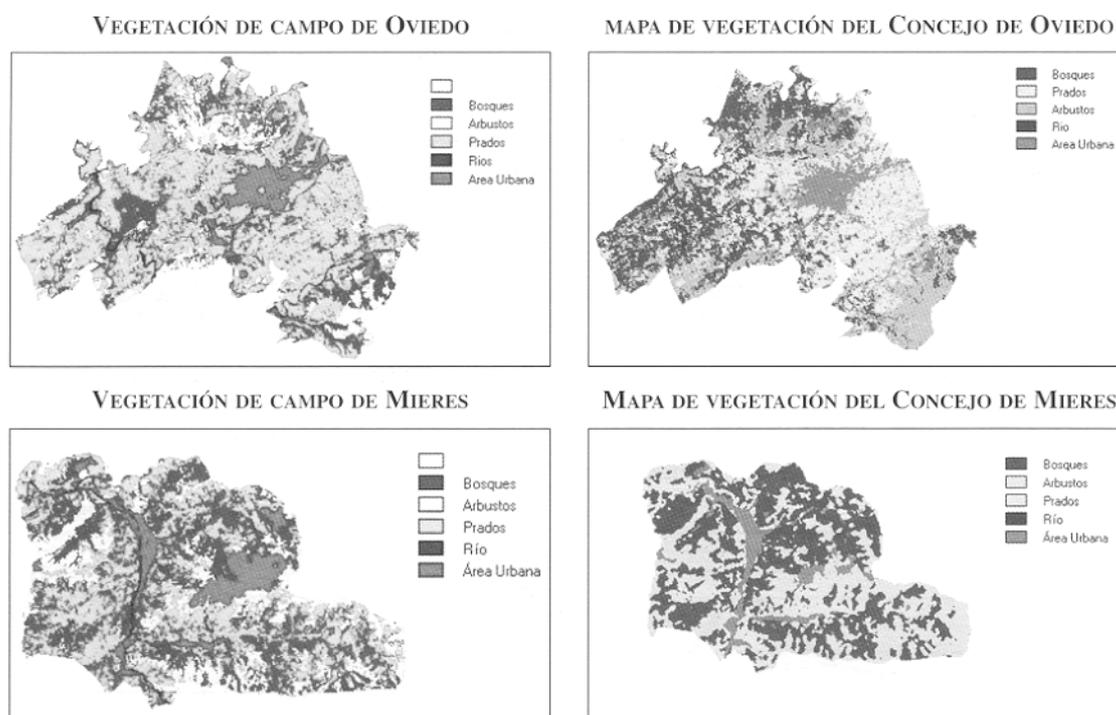
**CONCEJO DE OVIEDO**

| Método                   | %Total | Bosques | Brezales | Aulagar. | Prados | Dulce. | Rupic. | Pinares | Urbano | Ríos |
|--------------------------|--------|---------|----------|----------|--------|--------|--------|---------|--------|------|
| M.D.                     | 46     | 34      | 39       | 39       | 54     | 0      | 0      | 0       | 43     | 61   |
| MP3x3                    | 54     | 55      | 45       | 52       | 54     | 0      | 0      | 0       | 56     | 53   |
| MP5x5                    | 51     | 50      | 44       | 49       | 52     | 0      | 0      | 0       | 58     | 48   |
| MP7x7                    | 50     | 49      | 39       | 37       | 54     | 0      | 0      | 0       | 57     | 23   |
| <i>% Superficie Real</i> |        | 22      | 9        | 7        | 49     | 0.08   | 0.004  | 0.14    | 12     | 1    |

**CONCEJO DE MIERES**

| Método                   | %Total | Bosques | Brezales | Aulagar. | Prados | Rupic. | Pinares | Urbano | Ríos |
|--------------------------|--------|---------|----------|----------|--------|--------|---------|--------|------|
| M.D.                     | 34     | 36      | 46       | 53       | 23     | 0      | 52      | 44     | 40   |
| MP3x3                    | 54     | 72      | 52       | 38       | 40     | 0      | 25      | 52     | 14   |
| MP5x5                    | 58     | 77      | 56       | 38       | 42     | 0      | 24      | 53     | 4    |
| MP7x7                    | 59     | 79      | 58       | 36       | 42     | 0      | 20      | 53     | 0.2  |
| <i>% Superficie Real</i> |        | 36      | 19       | 0.3832   | 32     | 0.06   | 0.63    | 11     | 0.51 |

**Tabla 1.** Comparaciones (fiabilidad global y exactitud del productor para las distintas categorías) entre los métodos de clasificación de Mínima Distancia (MD) y Máxima Probabilidad con distintos filtros (MP) con respecto al mapa de vegetación de campo. *NOTA: el 0% de exactitud que muestran algunas cubiertas en la tabla se debe a que en ese caso no se han introducido polígonos de entrenamiento para el/as, al ser muy pequeñas (ver superficie en la última fila).*



**Figura 4.** Mapas de vegetación empleados en el estudio de las zonas propensas a sufrir deslizamientos. A la izquierda se muestra el mapa de vegetación de campo y a la derecha el resultado de la clasificación de la imagen LandsatTM.

Para cada mapa base también se ha calculado el número de pixels que pertenecen a cada una de sus categorías. Todo ello se ha hecho en IDRISI. Así, la probabilidad de que se produzcan deslizamientos la hemos asociado al cociente entre el número de deslizamientos producidos en cada categoría y la superficie total de ésta (en unidades de pixel,  $30 \times 30 \text{ m}^2$ ). Este cociente o probabilidad para cada categoría de cada mapa base se muestra en la Figura 5 (en unidades de 10-4) frente a cada una de las categorías.

De los gráficos de la Figura 5 para Oviedo se deduce que la probabilidad de sufrir deslizamien-

tos aumenta con la pendiente, con la frecuencia de lineamientos (es el mapa que tiene la mayor probabilidad), con la curvatura hasta valores de 4-10 y con el flujo acumulado hasta valores de 100-1000 celdas. Con respecto a la cubierta vegetal, la mayor probabilidad se da en los bosques, seguidos de los prados y de los arbustos. A pesar de existir sólo un 54% de acierto entre el mapa de vegetación de campo y nuestra clasificación vemos que los resultados de la probabilidad son similares, siendo posible usar estas clasificaciones, en principio poco fiables, en este cálculo.

### Mapas de susceptibilidad resultantes

Los mapas base de cada Concejo (Oviedo y Mieres) fueron combinados (con IDRISI) de forma que cada clase de cada mapa tuviese el valor de su probabilidad calculada en el apartado anterior. Aunque estas probabilidades fueron calculadas para Oviedo (desconocemos los deslizamientos producidos en Mieres) creemos que también son perfectamente válidas para Mieres, dada la proximidad de ambos Concejos. Posteriormente, los cinco mapas se suman para obtener el de susceptibilidad a sufrir deslizamientos, reclasificado finalmente en 5 categorías, con una superficie similar cada una de ellas: zonas de susceptibilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta (Figura 6).

La validación de estos mapas se ha hecho calcu-

lando en qué clases se localizan los 75 deslizamientos que se conocen en el Concejo de Oviedo: en la clase de susceptibilidad muy baja no se localiza ninguno, en la de baja el 4%, en la de media el 12%, en la de alta el 13% y en la de muy alta el 71% de éstos. Esto supone que, con este mapa, sólo estudiando la última clase (un 20% de la superficie total), somos capaces de localizar el 71% de los deslizamientos producidos. Si tomamos las dos últimas categorías (un 44% de la superficie) localizamos el 84% de los deslizamientos. Estos resultados son empleando el mapa de vegetación resultado de la clasificación. Si empleásemos el mapa de vegetación de referencia los deslizamientos localizados en las dos últimas categorías aumentarían a un 88%.

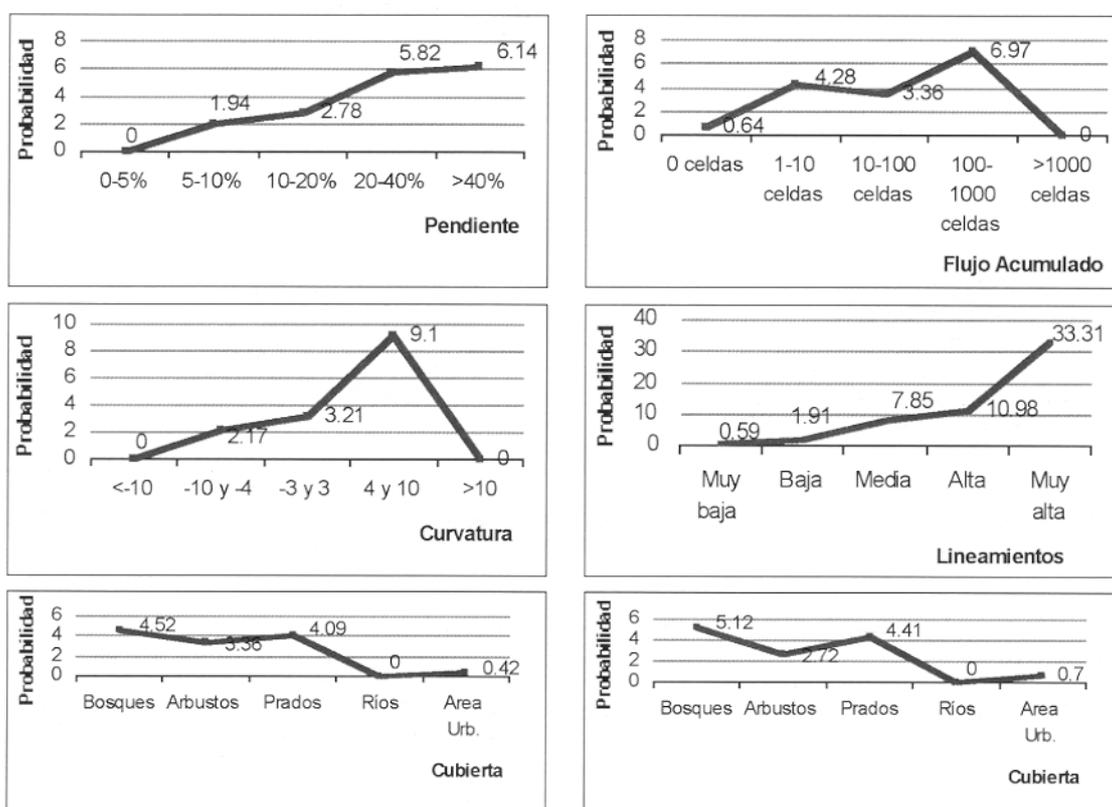


Figura 5. Probabilidad asociada a cada una de las categorías de los mapas base. (NOTA: La cubierta vegetal de la izquierda es la del mapa de vegetación de referencia y la de la derecha la obtenida de nuestra clasificación).

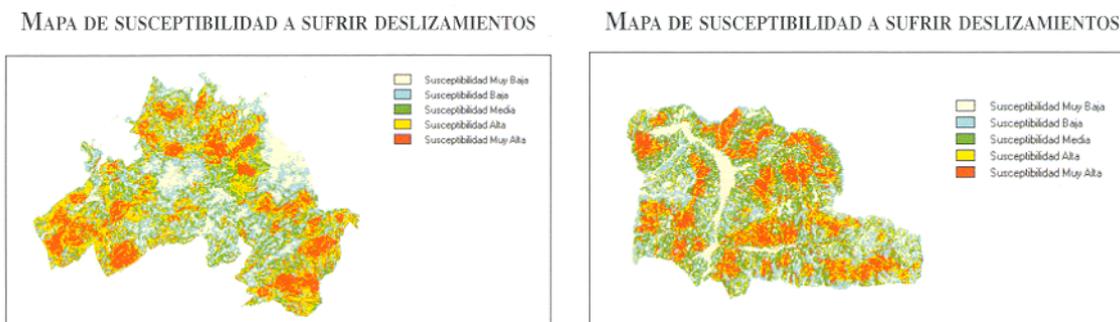


Figura 6. Mapas de susceptibilidad a sufrir deslizamientos para los Concejos de Oviedo (izquierda) y Mieres (derecha).

## CONCLUSIONES

Mapas de susceptibilidad a sufrir deslizamientos pueden obtenerse a partir simplemente de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y de una imagen de satélite (en este caso LandsatTM). Del MDE son calculados los mapas base de pendientes, flujo acumulado y curvatura. De la imagen se obtienen los mapas de lineamientos y de vegetación. Estos mapas base se suman una vez que se le ha asignado a cada categoría de cada mapa una determinada probabilidad. En este artículo hemos elaborado así los mapas para los Concejos de Oviedo y Mieres (Asturias). Con el mapa de Oviedo somos capaces de localizar en sus dos últimas categorías (susceptibilidad alta y muy alta) el 84% de los deslizamientos producidos en este Concejo.

Las principales ventajas del método son: la utilización de la imagen de satélite permite que la información necesaria esté al alcance de cualquier persona con bajo costo, además de permitir la periódica actualización de los datos, si es necesaria. Por otra parte, el trabajo en formato raster reduce considerablemente el tiempo empleado en este tipo de estudios.

La principal desventaja del método es la baja resolución de la imagen LandsatTM (30 m), que produce errores en los mapas deducidos, sobre todo en el de vegetación (sólo hay un acuerdo del 54% para Oviedo y del 59% para Mieres con respecto al mapa de campo). Para Oviedo, una mejora del 4% en la detección de los deslizamientos ha sido obtenida usando el mapa de vegetación de campo. Esto nos indica que los resultados mejorarían empleando sensores de mayor resolución.

## BIBLIOGRAFIA

CAMPBELL, J.C. 1987 *Introduction to Remote Sensing*. New York. The Guilford Press  
COOKE, R.U. & DOORNKAMP, J.C. 1997. *Geomorphology in environmental management. A new introduction*. Oxford University Press.  
FELICÍSIMO, A.M. 1994. *Modelos digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones a las Ciencias Ambientales*. Oviedo. Pentalfa Ediciones.

GÓMEZ, H., BRADSSHAW, R. P. & MATHER, P. M. 1999. Monitoring fue distribution of shallow landslideprone areas using remote sensing, DTM and GIS: a case study from fue tropical Andes of Venezuela. *Comunicación privada*.  
GONZÁLEZ MORADAS, R. y LIMA DE MONTES, Y. 1999. Aplicación de un SIG vectorial para generar y validar mapas de susceptibilidad a los deslizamientos. *Comunicación presentada en el congreso sobre "La evaluación de nuevas tecnologías de exploración del territorio, a través de Cartografía y Sistemas de Información Geográfica"*. Mérida, 1-3 diciembre de 1999.  
GREENBAUM, D. et al. 1995. Rapid methods of landslide hazard mapping: Papua New Guinea case study. *Technical Report WC/95/27*. Nottingham. British Geological Survey.  
GUTIÉRREZ CLAVEROL, M. 1993. *Compendio de Teledetección Geológica*. Universidad de Oviedo.  
GUTIÉRREZ CLAVEROL, M. y TORRES ALONSO, M. 1995. *Geología de Oviedo*. Universidad de Oviedo.  
MINNAERT, M. 1941. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysical Journal*. 93: 403-410.  
O'LEARY, D.W., FRIEDMAN, J.D. & POHN, H.A. 1976. Lineaments, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*. 87, (10): 1463-1469.  
RECONDO GONZÁLEZ, C., MÉNDEZ MORENO, A., GARCÍA MANTECA, P., GONZÁLEZ MORADAS, R. y SÁEZ GARCÍA, E. 1999. Corrección topográfica de imágenes LandsatTM por medio de filtros. Aplicación al Concejo de Mieres (Asturias) para la obtención de un mapa de vegetación. *Comunicación presentada en el congreso sobre "La evaluación de nuevas tecnologías de exploración del territorio, a través de Cartografía y Sistemas de Información Geográfica"*. Mérida, 1-3 diciembre de 1999.  
RECONDO GONZÁLEZ, C., MENÉNDEZ GARRIDO, C., GARCÍA MANTECA, P., GONZÁLEZ MORADAS, R. y SÁEZ GARCÍA, E. 2000: Un método sencillo para la corrección topográfica de imágenes de satélite. Aplicación a imágenes LandsatTM de los Concejos de Mieres y San Martín del Rey Aurelio (Asturias) para obtener mapas de vegetación. *Mapping*, en prensa.  
SMITH, J.A., LIN, T.L. & RANSON, K.J. 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 46 (9): 1183-1189.