

Realce del color y fusión de información para la valoración cualitativa de factores de desertación en una región semiárida del sureste de España

E. Vives Ruiz de Lope y M. Chica Olmo

Departamento Geodinámica

Universidad de Granada

RESUMEN

Las técnicas de realce del color satisficieron el objetivo de producir una imagen, lista para su interpretación visual, que contiene el máximo de información sobre algunos factores de desertización. El realce más efectivo de la imagen se consiguió cuando la composición TM realizada se fusionó con una imagen SPOT PAN para mejorar la resolución espacial de la imagen resultante. En general las técnicas basadas en el Análisis de Componentes Principales dieron los mejores resultados tanto para realce de color como para fusión de datos. La imagen resultante fue interpretada desde puntos de vista geomorfológico y ecológico.

ABSTRACT

Colour enhancement techniques satisfied the objective of producing a single image ready for visual interpretation containing maximum information on a number of desertification factors. The final and most effective enhancement of the image was obtained when a TM colour enhanced composite was merged with SPOT Pan data to improve the spatial resolution of the image. In general techniques based on Principal Component Analysis gave the best results for both colour enhancement and data merging of the imagery. The result image was interpreted from the geomorphic and ecological points of view.

Introducción

El objetivo de este estudio fue el tratamiento de imágenes LANDSAT Thematic Mapper para obtener una única imagen realizada lista para su interpretación visual. Esta imagen debe ser reconocida intuitivamente al mismo tiempo que dar una visión global y clara de algunos de los factores geológicos, geomorfológicos y biológicos relacionados con procesos de desertización.

El requisito de una aproximación global significó que el máximo posible de información tenía que estar contenido en la imagen final. En este sentido, técnicas es-

táandar, tales como "directed differencing", índices o análisis de componentes principales dieron resultados pobres o confusos, más adecuados para el estudio de un objetivo concreto. Además la información relacionada con el relieve, muy importante en los estudios de desertización, se deteriora notablemente al utilizar estas técnicas. Por otro lado las técnicas de realce del color satisficieron este requisito y fueron escogidas para una investigación más profunda. De igual modo una serie de técnicas de fusión de imágenes fueron escogidas para incrementar la información espacial de las imágenes LANDSAT TM.

Los datos

Los datos utilizados en este estudio corresponden a una subescena de una imagen LANDSAT TM (Orbit/Frame: 199/34, fecha: 19-7-84) y una subescena de una imagen SPOT Pancromática (no se dispone de información de cabecera) del sureste de España, en concreto entre las poblaciones de Albox y Huerca-Overa (Almería).

El área de estudio

El área de estudio corresponde a una cuenca sedimentaria Neógena que limita al norte con la Sierra de las Estancias y al sur con la Sierra de los Filábres. El sustrato de la cuenca son materiales metamórficos que pertenecen a la zona interna de las cordilleras Béticas. Los materiales que rellenan la cuenca son conglomerados, margas y areniscas cenozoicas. Los conglomerados fueron depositados en los bordes de la cuenca y las margas en las partes más internas. Las margas y conglomerados del Mioceno inferior están fuertemente plegadas mientras que las margas del Mioceno superior y los depósitos del Plioceno y Cuaternario están menos deformados. Las facies margosas son más arenosas hacia los bordes de la cuenca y más salinas (yesíferas) hacia el centro. Las margas están compuestas principalmente de arenas y limos que se desmenuzan fácil y rápidamente durante intensas precipitaciones que afectan el área. También se endurecen, rompen y están sujetas a formación de costras cuando están secas. Comparadas con los conglomerados, las margas tienen menores volúmenes de almacenaje de agua debido a su tamaño de grano más fino y su menor porosidad (Gílman y Thorne, 1985). En general, los suelos del área de estudio tienen una textura arenosa con un contenido bajo en materia orgánica. Tienen bajas conductividades eléctricas, aunque en algunas zonas tienen altos niveles de sulfatos. Los suelos más propensos de tener una erosión más fuerte son aquellos con bajo contenido en partículas tamaño arcilla y alto contenido en carbonato cálcico. También los suelos con alto contenido en sulfatos o carbonatos activos tienen problemas de erosión debido a la ausencia de cubierta vegetal (Garrido, 1992).

La erosión de los materiales mencionados anteriormente depende de varios factores: i) las características del regolito generado a partir de los materiales subyacentes; ii) composición química; iii) estructura y situación topográfica de los materiales. Además esta región presenta actividad neotectónica y su sistema de drenaje no está en equilibrio sufriendo por ello activos procesos de erosión. La erosión hídrica es responsable de los principales rasgos erosivos que se pueden observar: erosión en surcos, erosión en lámina, piping, cárcavas y movimiento de masas.

La cubierta vegetal de las colinas correspondientes a los conglomerados miocenos va desde chaparral a phrygana. En sus valles donde los suelos son más profundos hay cultivos de árboles. Los llanos formados por margas y arenas miocenas están cubiertos por matorral bajo o cultivos de almendros y olivos. Estos cultivos están condicionados por el espesor del material coluvial que recubre las margas y la posibilidad de irrigación. Las margas en avanzado estado de erosión están desnudas. En las terrazas más bajas de los ríos o ramblas, donde es posible la irrigación a partir de los acuíferos detríticos de su lecho, hay cultivos intensivos de cítricos y huerta. Aunque los diferentes tipos de vegetación presentes en el área puedan diferir poco en biomasa, la diferencia de porcentaje de cobertura es bastante marcada. Experimentos sobre valores de erosión han puesto de manifiesto el papel fundamental del porcentaje de cobertura en la protección del sustrato (Francis & Thornes, 1990). La distribución de la vegetación natural esta relacionada a la topografía y controla la distribución de los procesos morfogénéticos acelerados causados por el agua (Hidalgo et al, 1990; Alexander y Calvo, 1990).

Metodología

Enmascarar áreas que no van a ser objeto de estudio tiene dos ventajas principales: i) las máscaras evitan confusión en realces orientados a un objetivo; ii) las máscaras pueden reducir el rango original de números digitales ND. El realce de este nuevo rango utilizando todo el rango dinámico del monitor puede mejorar la discriminación visual.

En este caso de estudio las máscaras fueron definidas mediante digitalización basada en la experiencia del interprete y/o información auxiliar, y de una manera semi-automática utilizando técnicas orientadas a la detección de un objetivo (índices y ACP). Ambos métodos se emplearon para enmascarar las áreas vegetadas de modo que el realce de la litología pudiera ser más efectivo. Igualmente la máscara puede ser utilizada para separar la litología y realzar la vegetación.

Puesto que el objetivo de este estudio es poder identificar en una sola imagen el mayor número de factores, la composición de color más útil es aquella en la que la

información que aportan las bandas no es redundante, i.e. cuando las tres imágenes que forman la composición de color están poco correlacionadas entre sí. En este estudio se utilizó un método estadístico, el Índice de Selección del Triplete Óptimo (IOBS) (Liu and Moore, 1989).

Para obtener imágenes llenas de color es necesario exagerar selectivamente la parte más correlacionada de la información. Esto se consigue realizando la saturación del color (componente cromática), independientemente de la intensidad del color (componente acromática). Las composiciones color realizadas de esta manera tienen la ventaja de poder ser fácilmente relacionadas con las imágenes originales y las propiedades reflectivas de la superficie.

El realce convencional del contraste tiene como resultado la expansión de la intensidad, pero no del rango de colores. Además la efectividad de esta técnica está condicionada por el grado de correlación entre bandas. La expansión de la decorrelación y el realce después de la transformación HSI, son técnicas que al expandir tanto la intensidad como la saturación, expanden de manera más efectiva los datos en el espacio del color RGB.

A veces, la información relevante sobre un área es recogida por diferentes sensores remotos. La integración de datos para utilizar información que se complementa es una componente importante en el tratamiento digital de imágenes. Un ejemplo de conjunto de datos que puede ser utilizado para maximizar la información y mantener el volumen de datos al mínimo es integrar las bandas 1, 4, 5 del LANDSAT TM de 30 m. de resolución espacial con la banda SPOT Pancromática de 10 m. de resolución espacial. La integración de datos de diferentes sensores consta de dos pasos fundamentales. El primero hace referencia al registro geométrico de los datos. El segundo conlleva la integración de la información. En este estudio se evalúan tres métodos para fusionar conjuntos de datos. Dos están basados en transformaciones de sistemas de coordenadas: transformación RGB-HSI y análisis de componentes principales ACP (Chavez et al, 1991). El tercero HPF (Schowengerdt, 1980) genera la imagen final a partir de la suma de componentes de alta frecuencia (información espacial de SPOT) y componentes de baja frecuencia (información espectral de TM).

Discusión

La composición RGB de las bandas TM5, TM4, TM1, mostró claramente los afloramientos de rocas metamórficas y sus límites con la cuenca sedimentaria. Esta diferencia entre rocas metamórficas y sedimentarias no sólo se debe a su diferente reflectancia, sino también a diferencias geomorfológicas que resultan en una textura de la imagen diferente. También basado en estas dos propiedades, claras diferencias en

la reflectancia y textura, todos los cultivos hortícolas que limitan con la cuenca del río Almanzora fueron incluidos en la máscara definida manualmente.

El siguiente paso llevó consigo el crear una máscara que fuera capaz de aislar terrenos con cubierta vegetal de terrenos desnudos y añadir estas áreas a la primera máscara creada manualmente. Este fue un proceso semi-automático en el que hubo que tenerse en cuenta que: i) si no se aplican correcciones radiométricas ha de considerarse errores introducidos por efectos de la calibración del sensor, path radiance, atmósfera, topografía, albedo e iluminación; ii) hay un umbral de cubierta vegetal entre el 25 y el 35% por debajo del cual el suelo es el principal atributo al que corresponde la respuesta espectral global (Tueller, 1987). También la naturaleza de los suelos afecta la cantidad de vegetación estimada a partir de índices de vegetación; iii) en estas áreas y especialmente en la época del año a la que corresponde esta imagen (julio), hay grandes cantidades de vegetación senescente, que juega un papel importante en la protección del suelo y no se detecta mediante índices de vegetación; iv) los ND suprimidos tras la aplicación de máscaras no tienen por qué coincidir con los extremos del rango de ND. Es necesario una inspección de la forma del histograma de la imagen y según ésta tomar decisiones sobre la manera en que se aplicarán los posteriores realces; v) la máscara sufre un proceso "cosmético", en este caso un filtro de moda, para reducir el ruido producido por la ocurrencia de valores correspondientes a un tipo de cubierta que se encuentran aislados dentro de otra clase. Esta máscara y las imágenes resultantes después de su aplicación son más sencillas de interpretar pero algunos pixels serán incorrectamente clasificados, distorsionando los resultados estadísticos.

Las tablas 1.a. y 1.b. muestran los estadísticos de las imágenes originales comparadas con las imágenes que después de la aplicación de la máscara representan terreno cubierto por vegetación, y terrenos desnudos. Tras aplicar la máscara hubo una reducción del rango de ND, aunque no tan significativa como se deseaba. Como se esperaba, la mayor reducción se obtuvo para la región de los ND con valores muy bajos correspondientes al efecto de las sombras de la región montañosa. Las imágenes que representan terrenos con cubierta vegetal muestran la mayor reducción del rango de ND. Posteriores realces fueron más efectivos en esta imagen.

(a) Banda TM	ND Mínimo		ND Máximo		Media		Desviación estándar	
	Original	Máscara	Original	Máscara	Original	Máscara	Original	Máscara
1	91	108	255	252	131	138	11.3	9.2
2	40	51	152	136	65	70	7.7	6.1
3	41	55	189	168	80	88	11.3	8.8
4	36	55	162	143	77	83	9.6	7.2
5	49	60	255	186	119	119	18.8	13.1
6	145	145	196	192	174	177	6.4	4.1
7	25	36	185	118	67	68	11.9	8.8

(b) Banda TM	ND Mínimo		ND Máximo		Media		Desviación estándar	
	Original	Máscara	Original	Máscara	Original	Máscara	Original	Máscara
1	91	107	255	255	131	135	11.3	10.1
2	40	50	152	152	65	69	7.7	7.1
3	41	56	189	189	80	86	11.3	9.9
4	36	48	162	162	77	79	9.6	8.5
5	49	62	255	255	119	124	18.8	15.9
6	145	145	196	192	174	176	6.4	4.1
7	25	33	185	185	67	71	11.9	10.4

Tabla 1

Estadísticos de las imágenes que representan l.a) terrenos vegetados y l.b) terrenos desnudos

La composición de color más útil fue la que se obtuvo al utilizar tres de las bandas menos correlacionadas: TM1, TM4, TM5. Este triplete tiene la ventaja de incluir TM4, banda que muestra claramente la vegetación y TM5 una banda adecuada para la discriminación litológica. Para producir una composición de color intuitiva, i.e. que la vegetación aparezca en tonos verdes, y la litología en tonos de marrón, TM5 se visualizó como rojo, TM4 como verde y TM1 como azul.

Las técnicas óptimas de realce del color fueron Balanced Colour Enhancement Techniques (Liu and Moore, 1989), el realce tras la transformación HSI y decorrelation stretch. BCETP realza la información a un rango y media especificado, sin modificar la forma del histograma y por lo tanto conservando la información. Aunque los BCET se incluyen dentro de los realces convencionales de la intensidad, además de realzar la intensidad tienen la ventaja de equilibrar el color produciendo un rango más amplio de tonos (hue).

El realce después de la transformación HSI y "decorrelation stretch" fueron más efectivos para discriminación de superficies. El realce después de la transformación HSI tiene dos ventajas fundamentales: primero, no realza el ruido y segundo, el cam-

bio de espacio de coordenadas esta basado en una transformación que es independiente de los estadísticos de la escena. A pesar de esto, el decorrelation stretch basado en análisis de componentes principales (ACP) dio mejores resultados y éstos fueron utilizados en la interpretación final. La mejor diferenciación entre distintas superficies se consiguió cuando la técnica fue aplicada a un triplete formado por imágenes poco correlacionadas. Es importante no expandir en exceso el histograma de las imágenes CP, ya que puede llevar a la saturación de la información cuando los datos se proyectan desde el espacio de coordenadas formado por las componentes principales al espacio de coordenadas RGB. Esta transformación depende de los estadísticos de la imagen, y así teóricamente los resultados del método pueden variar de subescena a subescena. No hay variación apreciable en la capacidad de discriminación cuando la técnica fue aplicada a diferentes subáreas dentro del área de estudio. Uno de los problemas del método de decorrelation stretch es el realce del ruido. En este estudio aparecía contenido en la imagen de la CP3. El problema fue solucionado de forma efectiva comprimiendo la imagen CP3 en un rango muy reducido de ND.

Tanto decorrelation stretch como realce después de la transformación HSI tienen un inconveniente: tonos originalmente similares pueden convertirse en otros muy diferentes después del realce si los datos originales no están centrados alrededor de el eje de igual intensidad del espacio RGB. Mediante realce después de la transformación HSI el tono, saturación e intensidad pueden ser realzados independientemente de modo que si el tono no se realza se evita el problema de obtener valores diferentes, aunque esto puede resultar en imágenes poco útiles para su interpretación. La distorsión del tono durante el realce puede ser eliminada o reducida, ecualizando los valores medios de los datos originales antes de la transformación.

Tres técnicas de fusión de datos se utilizaron para integrar la resolución espectral de LANDSAT TM y la resolución espacial de datos SPOT PAN. Dos de ellos, la transformación HSI y el ACP integran el total de la información SPOT, mientras que el tercer método HPF, en un intento de reducir la distorsión espectral sólo integra la información de alta frecuencia de los datos SPOT.

La correlación entre las imágenes de la CP1 y de la componente I derivadas del triplete original TM5, TM4, TM1, y la imagen SPOT PAN fue calculado para estudiar la posible sustitución de la imagen PC1 o la imagen I por la imagen SPOT PAN. CP1 y la I muestran una coeficiente de correlación similar con la imagen SPOT (SPOT PAN/PC1 0.467 y SPOT PAN/I 0.489), así que teóricamente tanto para el método HSI como el APC se obtendrían resultados similares. Se observa que los valores de correlación son bajos debido a varias razones: i) diferentes condiciones de iluminación bajo las que las imágenes LANDSAT y SPOT fueron adquiridas; ii) diferente

detalle del relieve; iii) errores introducidos debido al proceso y/o precisión del registro geométrico de la imagen LANDSAT a la imagen SPOT; iv) diferencias entre las ventanas espectrales registradas por SPOT PAN y las bandas TM4 y TM5. Para comprobar cómo se mantuvo o distorsionó la información espectral que proporcionaban los datos LANDSAT TM antes de la fusión, se calcularon imágenes diferencia. Las bandas resultantes de integrar (utilizando los métodos HSI, ACP y HPF) SPOT con cada una de las bandas de la composición color óptima realizada son sustraídas de sus correspondientes bandas en la composición color realizada original. La tabla 2 muestra las desviaciones estándar y el porcentaje de pixels con una diferencia de 1 ó 0 ND en las imágenes diferencia. Cuanto menor es la desviación estándar, y mayor es el porcentaje de 0 y 1 ND pixels en las imágenes diferencia, mayor es la similitud entre imagen original y fusionada. Las estadísticas muestran valores altos de desviación estándar y bajos porcentajes de pixels con ND 0 o 1, lo que implica que hay un cambio notable después de la fusión de la información. Este resultado era de esperar debido a la baja correlación entre la información original y la que se iba a sustituir. Las imágenes fusionadas utilizando el método HPF retuvieron mejor la información espectral de la composición color original. El método HPF también realizó la textura, ayudando a la discriminación entre superficies.

(a) Desviación Estándar

	TM5, TM4, TM1 (D.S.) menos TM5, TM4, TM1 (D.S.) tras fusión HSI con SPOT	TM5, TM4, TM1 (D.S.) menos TM5, TM4, TM1 (D.S.) tras fusión ACP con SPOT	TM5, TM4, TM1 (D.S.) menos TM5, TM4, TM1 (D.S.) tras fusión HPF con SPOT
TM5 (D.S.)	52.51	32.55	20.68
TM4 (D.S.)	58.38	31.09	24.46
TM1 (D.S.)	43.86	22.37	20.77

(b) Porcentaje de pixels con diferencias de 1 ó 0 ND

	TM5, TM4, TM1 (D.S.) menos TM5, TM4, TM1 (D.S.) tras fusión HSI con SPOT	TM5, TM4, TM1 (D.S.) menos TM5, TM4, TM1 (D.S.) tras fusión ACP con SPOT	TM5, TM4, TM1 (D.S.) menos TM5, TM4, TM1 (D.S.) tras fusión HPF con SPOT
TM5 (D.S.)	0.98	2.95	5.29
TM4 (D.S.)	1.29	3.21	3.66
TM1 (D.S.)	1.17	4.49	4.71

Tabla 2

a) Desviaciones estándar y (b) porcentaje de pixels con una diferencia de 1 ó 0 ND para la diferencia entre el triplete TM original y el triplete fusionado con datos SPOT

Resultados

El triplete TM5, TM4, TM1 realzado con decorrelation stretch fusionada con la imagen SPOT cuya información textural fue realzada previamente se consideró como la imagen óptima para la discriminación de factores geomorfológicos y biológicos relacionados con la desertización. La interpretación de esta imagen, que está condicionada por la escala, se hizo desde el punto de vista geomorfológico y ecológico (Brown et al, 1990), i.e. las imágenes se usaron para la identificación de litologías, formas del terreno, cubierta vegetal y la relación de éstos con la desertización.

Para comprobar la capacidad de discriminación litológica de la imagen resultante se comparó con un mapa publicado del área (IGME, 1980). Se observó que había una coincidencia de límites litológicos, y que todas las formaciones que aparecían en el mapa podían ser reconocidas en la imagen realzada. La imagen también parecía permitir una diferenciación dentro de algunas de las formaciones distinguidas en el mapa. Estos nuevos límites fueron contrastados con información geológica de campo detallada reciente (Guerra, A., 1992) que confirmó su existencia. Es de destacar que la mejor diferenciación se obtuvo para las formaciones margosas, los materiales más importantes debidos a su susceptibilidad a la erosión.

En la composición color, materiales similares aparecen con el mismo aspecto independientemente de su edad y posición en la serie estratigráfica. Todas las formaciones de conglomerados están caracterizadas por tonos marrones, y magenta cuando el contenido de componentes de grano fino es elevado. El tamaño de los cantos que forman los conglomerados y la presencia de una matriz fina determinan la erosión, esta propiedad se refleja en las imágenes por el relieve de los conglomerados. Formas de relieve suave corresponden a conglomerados con alto contenido de material fino (arenas y limos) que son más susceptibles a la erosión. La siguiente litología más abundante en el área son las margas. Aparecen con tonos de amarillo a blanco, pero cuando contienen mayor cantidad de intercalaciones detríticas de gravas y arenas presentan un color ligeramente púrpura. Estos son los materiales con los mayores valores de erosión y muestran un relieve de lomas suaves. Los depósitos aluviales del Pleistoceno aparecen en la imagen en tonos azules. Presentan relieves planos reflejo de su morfología tabular. Están formados por materiales detríticos de origen metamórfico provenientes de la Sierra de las Estancias.

Las formas de erosión hídrica reconocidas en la imagen son debidas a procesos de acarreamiento, erosión en lámina y fenómenos de caída de bloques por socavamiento de su base.

La interpretación de la vegetación fue más complicada debido a la confusión con su sustrato. Gran parte del área de estudio está o estuvo cultivada, como se deduce a partir del patrón de los campos de cultivo que se reconoce en la imagen. Los tipos de cubierta vegetal que se distinguen se pueden agrupar en cuatro grandes grupos: cultivos de regadío asociados a los acuíferos detríticos de las ramblas, cultivos intensivos sobre los abanicos aluviales, vegetación natural que aparece en gran parte sobre los conglomerados y zonas de escasa o nula vegetación relacionadas a las formaciones margosas.

En las figuras 1a. y 1b. las litologías que aparecen son los Conglomerados Rojos (a) y Conglomerados Grises (b) del Tortoniense inferior, las Margas Amarillas (c) y las Margas Abigarradas (d) del Tortoniense inferior, las Margas Amarillas (e) y las Margas Lívidas (f) del Tortoniense superior. De los cuatro tipos diferentes de formaciones margosas que pueden ser reconocidas, las más resistentes son las Margas Abigarradas debido a su mayor contenido en intercalaciones detríticas. Las menos resistentes son las Margas Amarillas del Tortoniense superior que siempre están afectadas por procesos de acarcavamiento, excepto donde están protegidas por una cobertera de depósitos pleistocenos. Como se aprecia en la figura 1.b. los contactos entre margas, ej. entre las Margas Amarillas y las Margas Lívidas del Tortoniense superior, son fáciles de reconocer por los cambios en el color, la estratificación y su expresión en el relieve. Sobre las margas se encuentran los abanicos aluviales (g) del Pleistoceno. En las zonas donde están más erosionados se observa el contacto de estos materiales, que tienen una estructura tabular horizontal, con los materiales plegados del Mioceno. En puntos como éstos se aprecian fenómenos de caída de bloques, ya que las margas en la base de los conglomerados muy cementados que forman los abanicos son socavadas con mucha facilidad. Aunque los fenómenos de acarcavamiento están presentes en todas las litologías del área, afectan de manera más acusada a las Margas Amarillas (e) y Lívidas (f) del Tortoniense superior y los Conglomerados Grises (b) y las Margas Abigarradas (d) del Tortoniense inferior. La erosión en lámina es más patente en los abanicos aluviales del Pleistoceno (g). Los afloramientos carbonatados (carbonatos arrecifales) (h) y travertinos (i), son las zonas más resistentes a la erosión y presentan un relieve más fuerte.

En cuanto a la vegetación, los afloramientos de conglomerados presentan una vegetación natural, que contrasta con las zonas de agricultura intensiva asociadas a las ramblas o pequeños núcleos de población. Sobre los abanicos aluviales se desarrolla una agricultura extensiva, principalmente almendros. Donde las prácticas agrícolas son más constantes o intensivas se impide el desarrollo de la red de drenaje. Las zonas no vegetadas coinciden con los afloramientos margosos, que muestran las fases más avanzadas de erosión con un fuerte desarrollo de cárcavas en las pendientes de estos materiales.

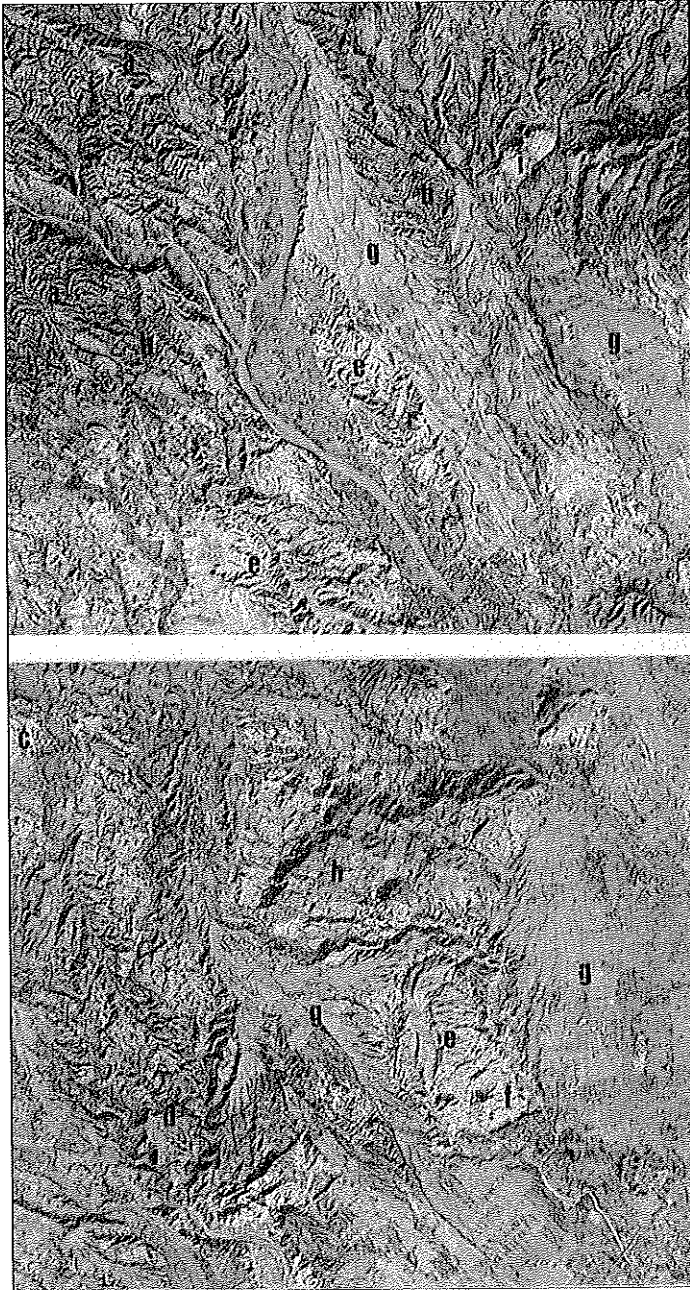


Figura 1a y 1b

Detalles del triplete TM5, TM4, TM1 tras decorrelación stretch y fusión con SPOT PAN. (A.91)

Resumen y conclusiones

Los métodos que se describen tienen como objetivo realzar una imagen hasta conseguir un único producto final listo para su interpretación visual de algunos de los factores geológicos y biológicos relacionados con la desertización. Para ello la imagen final debe contener tanta información como sea posible.

La aplicación de máscaras sobre las imágenes fue utilizada para (a) concentrarse en áreas especialmente problemáticas, y (b) reducir el rango inicial de números digitales ND de la imagen. La creación de una máscara que representara el terreno con cobertera vegetal presenta muchos problemas relacionados tanto con el proceso semiautomático de definición de la máscara como a la complejidad de la respuesta de la vegetación. El realce de imágenes sobre las cuales se ha aplicado este tipo de máscaras, no sólo debe depender de los nuevos mínimos y máximos ND, sino de la forma del histograma para evitar el efecto de unos cuantos pixels aislados.

Las técnicas de realce de color satisficieron los objetivos. Entre las funciones de realce convencional de la intensidad la Balanced Colour Enhancement Technique (BCET), se prefirió porque este método además de realzar la intensidad tiene la ventaja de equilibrar el color produciendo un rango más amplio de tonos (hue), especialmente cuando se aplica a tripletes compuestos por imágenes poco correlacionadas. En la práctica las imágenes obtenidas muestran una buena discriminación litológica y realzan las áreas cubiertas por vegetación, pero presentan serios problemas de saturación en algunas áreas haciendo difícil la discriminación entre formaciones margosas del Mioceno y abanicos aluviales del Pleistoceno.

Las técnicas de realce después de la transformación HSI y "decorrelation stretch" son más efectivas para discriminación de superficies. Decorrelation stretch basado en análisis de componentes principales (ACP) dio mejores resultados y éstos fueron utilizados en la interpretación final. La mejor diferenciación entre distintas superficies se consiguió cuando la técnica fue aplicada a un triplete formado por imágenes poco correlacionadas. Aunque esta transformación depende de los estadísticos de la imagen, y teóricamente los resultados del método pueden variar de subescena a subescena, al aplicar la técnica en áreas con características similares no hay variación apreciable en la capacidad de discriminación.

El realce final y más efectivo de la imagen se obtuvo cuando la imagen TM con el color ya realzado se fusionó con información del sensor pancromático del satélite SPOT, para mejorar la resolución espacial de la imagen. Los métodos ACP y HPF dan resultados menos distorsionados desde el punto de vista espectral. De estos dos el método HPF mantuvo mejor la información espectral original y realzó la textura

de la imagen, probando ser una ayuda para la discriminación litológica. Sin embargo para un resultado óptimo es necesario un registro muy preciso de la imagen SPOT a la LANDSAT para evitar un efecto borroso. El método de ACP mantiene satisfactoriamente la información espectral original e integra la información espacial. Una mejora textural de la imagen final se obtuvo cuando antes de la fusión a la imagen SPOT se le aplicó un realce de bordes.

El triplete TM5, TM4, TM1 realizado con decorrelation stretch fusionada con la imagen SPOT cuya información textural fue realizada previamente se consideró como la imagen óptima para la discriminación de factores de desertización. Debido a la resolución de las imágenes su interpretación se hizo desde el punto de vista geomorfológico y ecológico.

La resolución espacial sólo permitió la discriminación de un número restringido de formas de erosión indicadoras de desertización severa. Debe ser tenido en cuenta que esas formas de erosión pueden ser una herencia de tiempos pasados y así los procesos de desertización actuales pueden no ser tan extremos como pueden parecer en una primera evaluación de la imagen. La discriminación de formaciones litológicas fue similar a la que aparece publicada en el mapa geológico del área. Algunos límites entre formaciones que no aparecen en el mapa geológico pueden ser detectados en las imágenes. La expresión topográfica y los cambios de tono permiten la detección de cambios en la composición dentro de formaciones. Estos cambios parecen estar relacionados a la presencia y tamaño de partículas detríticas que condicionan la resistencia de la roca a la erosión.

La información ecológica observada en la imagen muestra que el área ha soportado un uso intensivo del suelo, que está decreciendo en la actualidad con el consiguiente riesgo de erosión que supone el abandono de las prácticas agrícolas. El riesgo de fuerte erosión está acentuado por el hecho de que los materiales más susceptibles de erosionarse, las margas, aparecen sin cubierta vegetal.

En resumen, algunos resultados de los procesos de desertización pueden ser observados mediante imágenes obtenidas por satélites, cuando éstas han sido tratadas con técnicas de realce adecuadas, posibilitando una valoración cualitativa más rápida que la proporcionada por trabajos de campo convencionales o interpretación de fotografía aérea.

Agradecimientos

Los resultados presentados en este trabajo forman parte del proyecto de MSc de E. Vives financiado por la Caja de Ahorros del Mediterráneo - British Council. Los autores agradecen la colaboración al Centre for Remote Sensing, Imperial College

London y Agencia del Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y permitírnos utilizar las imágenes que aparecen en esta comunicación.

Bibliografía

- Alexander, R. and Calvo, A.:** 1990. The influence of lichens on slope processes in some Spanish badlands. En *Vegetation and Erosion. Processes and environments*. Thornes J.B. (Ed.). John Wiley & Sons, 518 pp.
- Brown, A., Schneider, H. and Rice R.:** 1990. Remote sensing soil erosion: ATM data on soil variation in Mediterranean arable land in southern Spain. En *Proceedings of the NERC Symposium on Airborne Remote Sensing, Nottingham*. pp. 7-15.
- Chavez, P., Sides, S. and Anderson, A.:** 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 57, N°. 3. pp. 295-303.
- Francis, C.F. and Thornes, J.B.:** 1990. Runoff hydrographs from three Mediterranean vegetation cover types. En *Vegetation and Erosion. Processes and environments*. Thornes J.B. (Ed.). John Wiley & Sons. 518 pp.
- Garrido, S.:** 1992. *Use of sgeos data for land degradation mapping in Spain*. Interim report. Institute of Remote Sensing Applications, JRC. Ispra. 68 pp.
- Gilman, A. and Thornes, J.B.:** 1985. *Land-use and Prehistory in South-East Spain*. Allen & Unwin. London. 217 pp.
- Guerra, A.:** 1992. En Chica, M., Vives, E., Martín, A. and Guerra, A. *Study on mapping of soil erosion by remote sensing and GIS. An application study in Southeast Spain*. Interim report. Institute of Remote Sensing Applications, JRC. Ispra. 84 pp.
- Hidalgo, J.C., Pellicer, F., Sierralta, L. and Lopez M.V. 1990. Spatial distribution patterns of morphogenetic processes in a semi-arid region. En *Vegetation and Erosion. Processes and environments*. Thornes J.B. (Ed.). John Wiley & Sons. 518 pp.
- IGME:** 1980. *Mapa Geológico de España 1:50,000, Huerca-Overa 996*.
- Liu, J.G. and Moore, J.M.:** 1989. Colour enhancement and shadow suppression techniques for TM images. *Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary* p. 901.
- Schowengerdt, R.A.:** 1980. Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency content. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 46, N°. 10. pp. 1325-1334.
- Tueller, P.T.:** 1987. Remote sensing science applications in arid environments. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 23. pp. 143-154.