

SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS DE DENSIDAD DE VEGETACIÓN EN ZONA ÁRIDA Y SUS IMPLICACIONES SOBRE LA DEGRADACIÓN DEL SUELO

A. AFANA, G. DEL BARRIO, J. PUIGDEFÁBREGAS

Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA). C/ General Segura, 1, 04001, Almería. Ashraf@eeza.csic.es.

Abstract. The density and spatial structure of vegetation cover are relevant properties for the assessment of land degradation at different scales. The basic problem of whether landforms control the distribution of vegetation cover density is approached in this work through three elements: a Digital Elevation Model and a set of derived topographic variables, vegetation index (NDVI) and a regionalization process. The Tabernas basin (ca. 1100 km²) was selected as a representative study area under semi-arid climate. The results show that vegetation density decreases along slope catena, with higher values on divides and upper hillslopes and lower values on footslopes. This trend is independent of altitude. The general analytic result was confirmed by a field campaign.

Key words: Digital Elevation Model (DEM), topographic variables, vegetation index, regionalization.

Resumen. La densidad y estructura espacial de la cubierta vegetal son propiedades relevantes para la valoración de la degradación de la tierra a distintas escalas. El problema de cómo afectan las formas del relieve a la distribución espacial de la cubierta vegetal es abordado en este trabajo mediante tres elementos: un Modelo Digital de Elevaciones y un conjunto de variables topográficas derivadas, un índice de vegetación (NDVI) y un proceso de regionalización. La cuenca de Tabernas fue seleccionada como área representativa de un clima semiárido, con una superficie de aproximadamente 1100 km². Las relaciones entre densidad de la cubierta vegetal y clases de terreno fueron examinadas mediante métodos estadísticos. Los resultados indican que la cubierta vegetal disminuye a lo largo de las secuencias de ladera, siendo mayor en las divisorias y laderas altas que en los fondos de valle, y que esta tendencia es independiente de la altitud. El resultado analítico general fue confirmado tras una visita al campo.

Palabras claves: Modelo Digital de Elevación (MDE), variables topográficas, índice de vegetación, regionalización.

INTRODUCCIÓN

La degradación de la tierra es un proceso destructivo que afecta a la estructura física, química y biológica del suelo y también a los procesos hidrológicos relacionados al suelo. Este fenómeno resulta en una reducción general de la productividad de los recursos del suelo (Verstraete y Schwartz, 1990). Por ello, es necesario desarrollar procedimientos que permitan el seguimiento de los procesos de degradación.

La densidad de la cubierta vegetal y su estructura espacial son propiedades sugerentes para su utilización como índices con fines de seguimiento, ya que por un lado, son muy dinámicas y experimentan cambios a escalas de tiempo parecidas a la desertificación, y por otro, son relativamente fáciles de registrar por técnicas de teledetección una vez que los protocolos han sido establecidos (Puigdefábregas, 2001). El estudio actual intenta desarrollar procedimientos para detectar la evolución temporal de la densidad y estructura espacial de la cubierta vegetal y sus implicaciones sobre la degradación de la tierra, en áreas extensas, utilizando técnicas de teledetección (Puigdefábregas, 2000). Concretamente, el trabajo se concentra en la detección geomática de relaciones entre densidad de vegetación y topografía en un momento dado de una secuencia temporal. Por lo tanto el objetivo general de este trabajo es cuantificar de forma objetiva: cómo afectan las formas del relieve a la distribución espacial del la cubierta vegetal en un paisaje árido.

MATERIAL Y MÉTODOS

Un sitio de 1100 km² en el SE de España, que incluye la Cuenca de Tabernas, fue seleccionado como área de trabajo representativa de un clima mediterráneo semiárido. El índice de vegetación NDVI fue calculado utilizando las bandas 3 y 4 del

satélite Landsat TM después de la corrección geométrica y radiométrica para la descripción de la vegetación en el área de estudio. El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) fue calculado a 30 m de resolución en el área seleccionada usando curvas de nivel con equidistancia de 20 m, procedentes de un mapa topográfico 1:50,000. De este MDE 9 variables topográficas fueron derivadas, que indican procesos relevantes como la re-distribución de agua y sedimentos en el paisaje (indicadores para la degradación de la tierra y la valoración de la erosión del suelo) (Moore *et al.*, 1991, Felicísimo, 1994, Burrough *et al.*, 1998). Estas variables son: pendiente (SLO) calculado como el gradiente más inclinado en una ventana de celdas (3X3); orientación (ASP), calculada como el azimut de la máxima pendiente en una ventana de celdas (3X3); tamaño de cuenca (SIZ), calculado como la superficie drenada de ladera arriba de cada celda, utilizando un algoritmo de drenaje; curvatura de plano (PLC), calculada como la primera derivada de la orientación; curvatura de perfil (PFC), calculada como la primera derivada del ángulo de la pendiente; índice de humedad (ATB), derivado de la siguiente fórmula: $ATB = \ln(SIZ / \tan SLO)$; distancia al cauce más próximo (STRD), mediante reclasificación de la variable SIZ a partir de un valor umbral para general canales principales, y luego calcular la distancia a ellos; factor de longitud de ladera (LSF), derivado de la siguiente fórmula: $LSF = (n+1) * (SIZ * 22.13)^n (\sin SLO / 0.0896)^m$, donde n y m son constantes de 0.6 y 1.3 respectivamente. Estas variables junto con el DEM fueron utilizadas para generar un conjunto de clases que representan configuraciones topográficas del terreno (clases fisiográficas). Para ello se aplicaron métodos multivariantes a las variables topográficas (Del Barrio *et al.*, 1996). Dicha regionalización fue obtenida a través de una clasificación no jerárquica de las variables, produ-

TABLA 1: Complejos de relieve formados por clases de terreno, agrupados según sus valores de NDVI, contraste de Tukey para comparaciones múltiples.

Clases de terreno	Mediana del NDVI	Grupos de homogeneidad					
		1	2	3	4	5	6
FOT	0.255469	****					
AZO	0.259001	****					
SFO	0.268830	****	****				
LSC	0.270967	****	****				
CMI	0.276341		****				
HSS	0.289237	****	****	****			
PCM	0.300425			****		****	
PCH	0.303685	****	****	****	****	****	****
HAU	0.306199		****	****	****	****	
LAD	0.332259				****		****
USC	0.333386				****	****	****
çHAD	0.356443						****

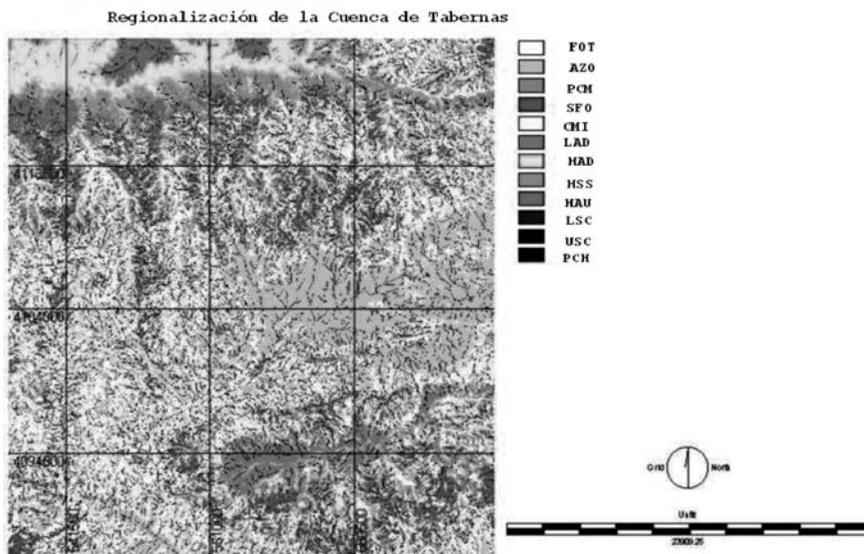


FIGURA 1: Clases de terreo formados por el proceso de regionalización. Las abreviaturas indican: 1(FOT) laderas bajas, 2(AZO) zonas aluviales, 3(PCM) laderas medias planares o ligeramente convexas, 4(SFO) laderas bajas de fuerte pendiente, 5(CMI) laderas medias cóncavas, 6(LAD) divisorias bajas, 7(HAD) divisorias altas, 8(HSS) laderas altas en solana con pendiente fuerte, 9(HAU) laderas altas de pendiente media, 10(LSC) tramos bajos de cauces, 11(USC) tramos altos de cauces, 12(PCH) canales principales.

ciendo 26 clases iniciales que fueron agrupadas posteriormente mediante un dendrograma, el cual fue cortado a cierto nivel para la definición de las 12 clases finales de terreno (Figura 1). A continuación, la clasificación topográfica, el NDVI, y los datos de campo fueron añadidos al SIG. El análisis estadístico fue dividido en dos partes: análisis del área en conjunto y análisis por niveles altitudinales. Para el análisis de toda el área del trabajo se muestreó sobre las imágenes del SIG un conjunto de 5000 puntos elegidos según un diseño aleatorio estratificado, que representan todas las clases topográficas junto con la densidad de la cubierta vegetal.

RESULTADOS

El análisis de Kruskal-Wallis ha mostrado la existencia de claras diferencias en densidad de vegetación entre algunas clases de terreno ($p=0.000$) (Figura 1). Sin embargo, un análisis adicional de Tukey para comparaciones múltiples señaló que dichas diferencias no se reparten por igual entre todas las clases topográficas, existiendo ciertas combinaciones homogéneas. Esta homogeneidad es mostrada en la tabla (2) donde aparecen 6 grupos o complejos de relieve. Cada complejo tiene varias clases topográficas que muestran cierta afinidad en la densidad de vegetación. La tabla muestra una relación entre las posiciones topográficas de las clases

según una catena ideal y la densidad de vegetación en cada clase. Las clases topográficas asociadas a segmentos inferiores de ladera tienden a mostrar menor valor de NDVI (como en el grupo 1), las clases medias de ladera tienen valor medio de NDVI (como los grupos 2 y 3), y finalmente, las clases relacionadas con posiciones altas en ladera muestran valores altos de NDVI (como los grupos 4, 5 y 6). Estos resultados muestran que las relaciones entre densidad de vegetación y las clases del terreno no son aleatorias, lo cual sugiere la existencia de una distribución sistemática de la densidad de vegetación respecto a las clases topográficas.

Un examen de los complejos de relieve (los grupos homogéneos) muestra las clases de terreno ordenadas según el valor medio del NDVI. Al representar estas clases en una catena (Figura 2), hemos elegido las más selectivas, es decir, aquellas que aparecen no más de tres veces en cada grupo de homogeneidad (FOT, AZO, LSC, CMI, HSS, PCM, LAD, USC y HAD).

El esquema refleja que la tendencia en el paisaje estudiado consiste en que las posiciones altas en la catena tienen más densidad de vegetación que las medias y bajas.

Para poder discernir entre posición en la ladera y altitud, el procedimiento estadístico fue repetido en tres rangos altitudinales, cada uno con un intervalo de 700 m (el primero se extiende desde 100 hasta 800, el segundo desde 800 hasta 1500, y el último

TABLA 2: Correlación entre densidad de vegetación (NDVI) y variables topográficas (ATB,... ver abreviaciones en el texto).

	N	Spearman R	T(N-2)	p-level
NDVI & ATB	1991	0.001552	0.069197	0.944840
NDVI & LSFL	1991	0.164700	7.447035	0.000000
NDVI & SIZ	1991	0.110333	4.950869	0.000001
NDVI & SLO	1991	0.138160	6.221336	0.000000

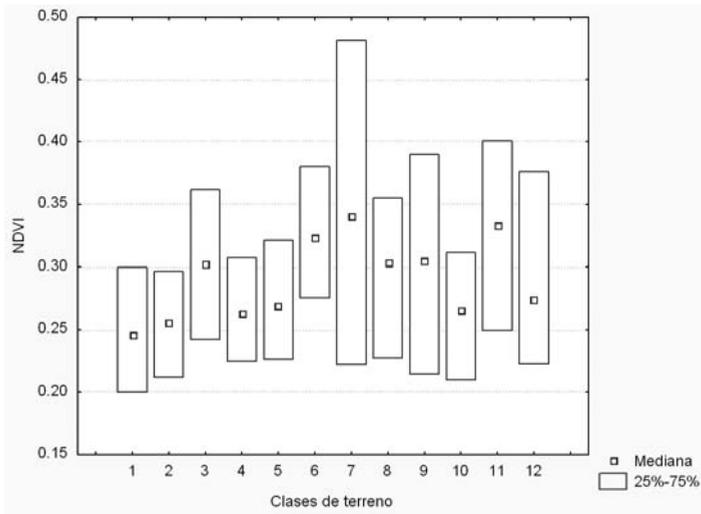


FIGURA 2: Mediana del NDVI para las clases del terreno.

desde 1500 hasta 2200 m s.n.m.). Los resultados coinciden con los iniciales, lo cual permite rechazar la posibilidad de que la mayor densidad de vegetación observada en zonas altas esté relacionada principalmente con el incremento de precipitación debido a la altitud.

Con posterioridad a estos análisis, se realizó una visita al campo para comprobar qué tipos de vegetación están asociados a las tendencias detectadas, especialmente los valores máximos de NDVI que han aparecido en algunas clases de terreno en el análisis espacial. La visita ha mostrado, en los 60 sitios visitados, que dichos valores extremos son cambios artificiales debidos a la explotación humana del paisaje natural. Los mayores cambios en el paisaje aparecen asociados a la incorporación de áreas naturales al uso agrícola. La representatividad de los datos de la campaña de campo respecto al conjunto del territorio, en términos de NDVI, fue establecida utilizando el contraste de la U de Mann-Whitney ($p=0.84127$). El tipo de vegetación encontrado en el campo, junto con los valores de NDVI medidos por la satélite, se muestran en la Figura 3.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el área de estudio el agua es un factor limitante en el crecimiento de la vegetación: la precipitación es menor que la evaporación y la conductividad hidráulica es difícil de predecir. En estas condiciones, la densidad de la cubierta vegetal muestra una distribución sistemática, por lo cual las posiciones altas del terreno tienen mayor densidad de vegetación que las posiciones bajas.

Una posible interpretación viene del conocimiento de que, en un clima semiárido, el contenido del agua del suelo no aumenta siempre hacia la base de la ladera (Puigdefábregas *et al.*, 1998). La saturación de las capas sub-superficiales es rara, y la transferencia de agua ocurre principalmente mediante escorrentía superficial en las laderas. Por lo tanto, la conectividad hidráulica de los elementos de ladera sólo se establece ocasionalmente y la distribución del agua sigue patrones impredecibles en las capas profundas del suelo (Puigdefábregas *et al.*, 1998). Estos resultados se confirman al buscar posibles correlaciones entre diversas variables topográficas (ATB, LSFL, SLO, SIZ) y el

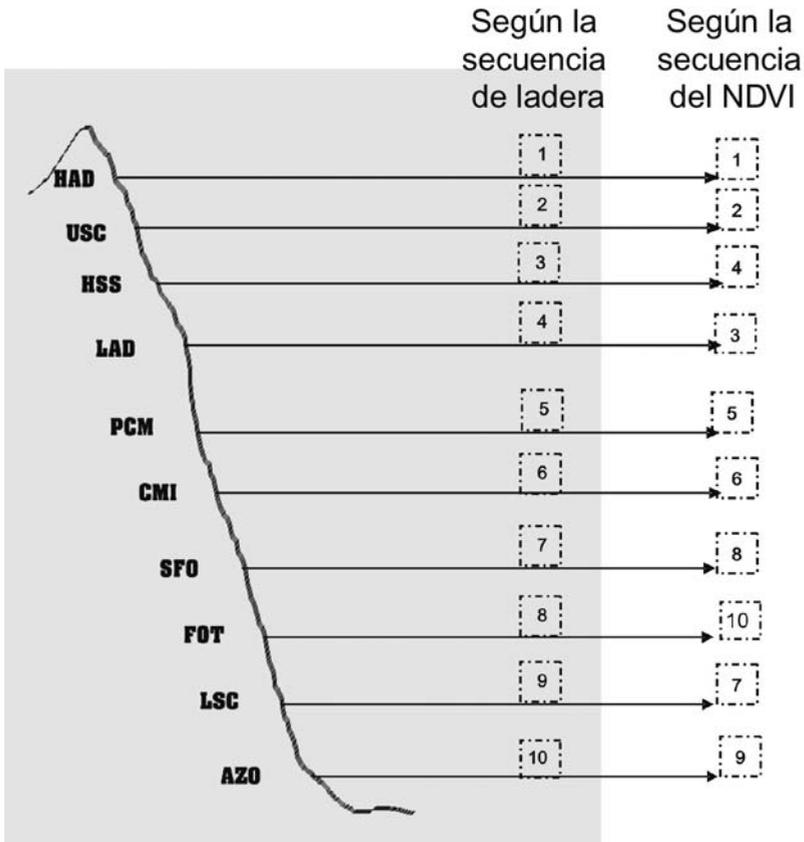


FIGURA 3: Secuencia de las clases de terreno según sus posiciones en una catena ideal y valor mediana correspondiente del NDVI; el numero 1 indica al valor más alto de NDVI, y 10 el valor más bajo, los demás estando distribuidos entre estos dos valores.

NDVI que resultan en asociación en los casos del LSFL, SLO y SIZ (Tabla 2).

Varios factores ayudan a interpretar el caso, siempre dentro del contexto de las clases del terreno. En primer lugar, las propiedades del suelo, principalmente la profundidad y el tipo del suelo. Los suelos poco profundos que ocupan la parte alta del terreno permiten una saturación completa, sin embargo los suelos profundos favorecen la infiltración rápida y por tanto la pérdida de agua superficial. En cuanto al tipo del suelo, el hecho de que la potencia sedimentaria suele ser mayor en la base de las laderas (Boer, 1999), dificulta la disponibilidad de

agua freática en sustratos arenosos, por otra parte muy frecuentes en la zona de estudio.

Un factor añadido es: bajo condiciones de aridez y dentro de una resolución espacial de 30-100 m, la redistribución de la humedad del suelo tiene lugar probablemente dentro de un píxel de resolución. Por lo tanto, nuestro MDE fue afectado por este factor.

Como conclusión final, el experimento actual ha mostrado que las formas del relieve en el paisaje semiárido estudiado controlan una tendencia clara en la distribución espacial de la cubierta vegetal, según la cual las posiciones altas del terreno tienen más

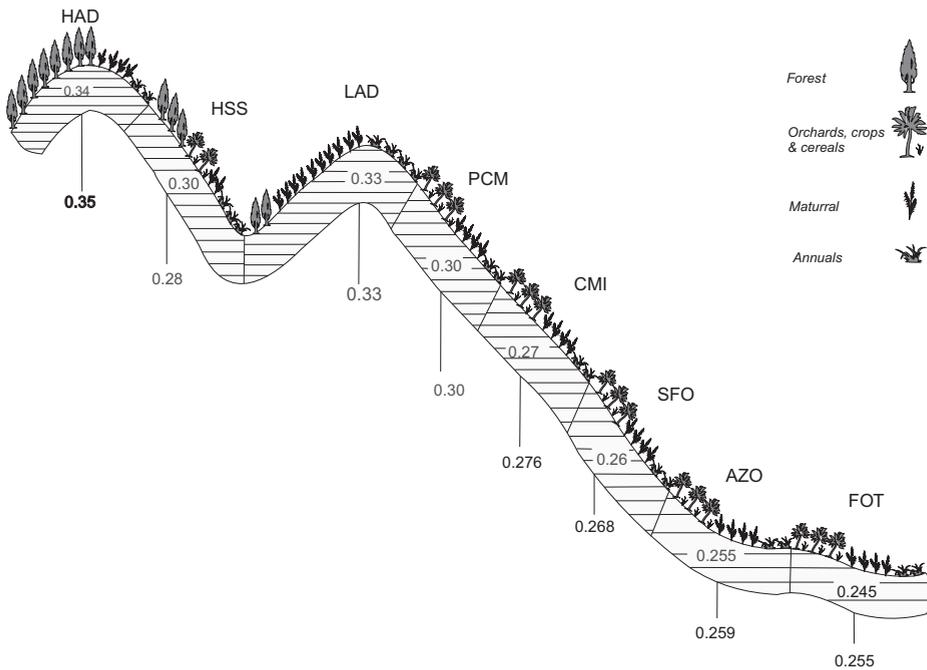


FIGURA 4: Formaciones vegetales en el área de estudio. Los valores de NDVI correspondientes al muestreo de campo aparecen dentro de las líneas, y los valores medidos medios para cada clase se indican debajo con una flecha.

vegetación que las posiciones medias y bajas. El análisis por niveles altitudinales ha mostrado que esta tendencia no es un resultado de las diferencias en la cantidad de precipitaciones asociadas a la altitud. Además, la campaña de campo ha revelado que los valores extremos de densidad de cubierta vegetal que existen en zonas bajas están asociados al uso del suelo y no son extensiones del paisaje natural.

Esta conclusión confirma que las formas del relieve son factores importantes en la formación de la cubierta vegetal y su estructura espacial. Además, la relación entre las formas del relieve del paisaje y la distribución de la vegetación en el mismo nos permite construir nuevos modelos de relaciones del cambio de la vegetación a distintas escalas y, al mismo tiempo, configurar sistemas de vigilancia en este paisaje.

REFERENCIAS

- Del Barrio, G., Boer, M., Puigdefábregas, J. (1996). Selecting representative drainage basins in a large research area using numerical taxonomy on topographic and climatic raster overlays. Rumor, M., Mc Millan, R. y Ottens, H. F. L. Eds. IOS Press, Amsterdam. En: *Geographical Information, from Research to Application through Cooperation*, 1: 398–407.
- Matthias, M.B. (1999). Assessment of Dry Land Degradation: Linking Theory and Practice through Site Water Balance Modelling. Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht, 1999.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. and Ladson, A.R. (1991), *Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomor-*

- phological and Biological Applications, Hydrological Processes. Vol. 5, 3, 30 (1991).
- Puigdefábregas, J. Del Barrio, G. Boer, M.M. Gutiérrez, L. and Solé, A. (1998). Differential Responses of Hillslope and Channel Elements to Rainfall Events in a Semiarid Area. *Geomorphology*. 23: 337–351.
- Puigdefábregas, J. y Del Barrio, G. (eds.) (2000). A Surveillance System for Assessing and Monitoring of Desertification (SURMODES). Project 909 at the Expo 2000-Hannover. CDROM, CSIC, Almería, Spain.
- Puigdefábregas, J. (2001). *Determinación la densidad y estructura espacial de la cubierta vegetal en zonas árida*. Protocolo de tesis master. Estación Experimental de Zonas Áridas Almería, España.
- Verstraete, M.M., Schwartz, S.A. (1991). *Vegetation and Climate Interactions En: Semi-arid Regions*. Henderson-Sellers, A., Pitman, A.L. (Ed). Kluwer Academic Publisher, Netherlands. pp 3-13.
- Felicísimo, A.M. (1994). Modelos Digitales del Terreno: Introducción y Aplicaciones en las ciencias ambientales. Universidad de Oviedo. Oviedo, España.
- Burrough. P.A, McDonnell, R.A. (1998). Principles of Geographic Information Systems. Oxford University Press Inc., New York, USA.