

APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN PARA LA INTEGRACIÓN DE ASPECTOS FUNCIONALES EN LA CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES AMBIENTALES

P. Durante Hernández ¹, D. Alcaraz Segura ², C. Oyonarte Gutiérrez ¹ y J. Cabello Piñar ²

¹ Dpto. Edafología y Química Agrícola. Edif CITE II-B. Universidad de Almería. 04120-ALMERÍA (España). Correo electrónico: pdurante@ual.es

² Dpto. Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Almería. 04120-ALMERÍA (España)

Resumen

La incorporación de atributos relacionados con el funcionamiento de las unidades ambientales permite una mejor clasificación del territorio, a la vez que facilita su seguimiento mediante teledetección, al detectar con mayor rapidez los cambios, y aporta información relevante para su manejo. La integral anual del Índice Verde Normalizado (NDVI-I), como estimador de cambios de productividad, y el rango relativo del mismo (RREL), que expresa estacionalidad, obtenidos de imágenes de satélite pueden ser empleados en este sentido. Incorporando estos atributos a las unidades ambientales identificadas mediante una clasificación jerárquica del territorio en función del relieve, el bioclima y los usos del suelo, analizamos: (1) la variación espacial del NDVI-I y su estacionalidad, como herramienta para validar el esquema jerárquico empleado; y (2) caracterizamos la dinámica intraanual de las unidades mediante estos parámetros para establecer su funcionamiento estacional.

Palabras clave: *Clasificación jerárquica, Ecosistemas mediterráneos, Índice Verde Normalizado (NDVI), Dinámica estacional*

INTRODUCCIÓN

La ordenación y planificación territorial basada en el desarrollo sostenible precisa disponer de inventarios que consideren entidades espaciales integradas que incluyan un amplio rango de características bióticas y abióticas, reflejándose su integración e interacción en el paisaje global (FORMAN & GODRON, 1986). Los esquemas de clasificación de tierras permiten la identificación y ordenación de la información en unidades de tierra, o ambientales, que hacen referencia a una zona con características (factores), funcionamiento y manejo homogéneo (BAILEY et al., 1978). El desarrollo de un sistema de este tipo encuentra dificultades sobre todo

en lo que se refiere a la integración de los componentes estructurales (bióticos y abióticos) y funcionales.

La integración de aspectos del funcionamiento ecosistémico en la caracterización ambiental del territorio muestra claras ventajas frente a las basadas exclusivamente en atributos estructurales, ya que aquéllos responden con mayor rapidez a los cambios ambientales (MILCHUNAS & LAUENROTH, 1995) y permiten su seguimiento mediante teledetección (PARUELO et al., 2004). Entre estos aspectos funcionales, MCNAUGHTON et al. (1989) señalan la importancia de la Productividad Primaria Neta Aérea Anual (PPNAA) como indicador integrador del funcionamiento ecosistémico. En este sentido, la integral anual

del Índice Verde Normalizado (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI), correlacionado con la PPNAA (BOELMAN et al., 2003), constituye junto a la estacionalidad (VALENTINI et al., 1999), una buena medida sustitutiva del funcionamiento ecosistémico.

Basándonos en el NDVI como indicador del funcionamiento ecosistémico, y a partir de la clasificación jerárquica estructural del territorio que desarrollamos en la zona de estudio, nos planteamos: 1) analizar la variación espacial del NDVI en relación con diferentes componentes estructurales del ecosistema, como herramienta para validar el esquema de clasificación estructural propuesto; 2) caracterizar la dinámica intraanual de las unidades ambientales consideradas, aportando una información relevante desde el punto de vista de su gestión y seguimiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolla en el ámbito de la Hoja topográfica de Pozo Alcón (949), a escala 1:50000, y se caracteriza por presentar un fuerte contraste climático y paisajístico al englobar áreas de montaña de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas (Jaén) con extensas masas forestales, y áreas de la Depresión Guadix-Baza (Granada) de ambiente árido y muy antropizadas.

La clasificación territorial de la que partimos (CAPARRÓS et al., 2003), estuvo basada en la aplicación de un esquema jerárquico de tres niveles: el primero respondía a criterios geomorfológicos, el segundo a una clasificación bioclimática que integraba parámetros bioclimáticos y edafoclimáticos; y el tercero incorporaba los usos del suelo (Mapa de Usos y Coberturas Vegetales del Suelo de Andalucía, Junta de Andalucía 1999). La incorporación a un SIG (ArcView 3.2a) de la distribución espacial de los factores considerados y de las unidades ambientales resultantes de la clasificación, permite su superposición con otras capas de información. Para validar el valor discriminante de estos factores, y el orden de la estructura jerárquica, evaluamos la homogeneidad funcional de las clases obtenidas.

La incorporación de caracteres funcionales (NDVI) se basó en el análisis de imágenes procedentes del satélite IRS-WIFS proporcionadas

por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Éstos consistieron en un compuesto mensual de resolución espacial 180 m, desde abril de 1996 hasta septiembre de 2002. Tras importar las imágenes a ERDAS 8.4, se calcularon los valores de NDVI real y se agruparon en una imagen de 12 bandas para cada año. Posteriormente se calcularon las medias para cada mes y se agruparon en una nueva imagen con las curvas estacionales del NDVI para el año medio. A partir de ésta se derivaron NDVI-I, un estimador de la productividad, y el rango relativo (RREL) de la estacionalidad, ambos con clara significación biológica. Mediante ArcGis 8.3 se obtuvo para cada píxel el porcentaje que contenía de cada unidad ambiental, incorporándolo a una base de datos junto a la curva estacional, el NDVI-I y el RREL. A partir de los píxeles puros para las unidades ambientales obtenidas en todas las clasificaciones evaluadas y, mediante un test ANOVA (Statgraphics Plus v4.0), se establecieron las relaciones y diferencias en términos de productividad y estacionalidad de éstas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la variabilidad del NDVI en las unidades ambientales y validación funcional de la clasificación jerárquica estructural

Los resultados obtenidos permiten comparar el funcionamiento entre las unidades ambientales de los tres niveles jerárquicos, de acuerdo con su productividad (NDVI-I) y estacionalidad (RREL).

Cuando el territorio fue clasificado con criterios geomorfológicos (Figura 1), las clases obtenidas se comportaron como grupos diferentes. Mientras que *Lomerío* y *Altiplanicie*, con la productividad más baja (0,27) pertenecieron al mismo grupo de NDVI-I, *Valle* (0,31) y *Montaña* (0,45) fueron las más productivas, con diferencias entre sí y frente a las clases de paisaje anteriores.

Bajo criterios bioclimáticos, las clases resultantes representaron también grupos distintos para NDVI-I y RREL. Los valores medios muestran un incremento de la productividad con la altura, lo que estaría relacionado con la mayor

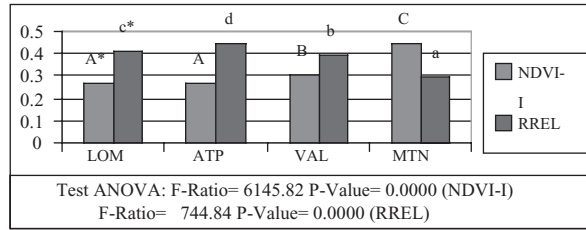


Figura 1. Valores medios de NDVI-I y RREL por paisajes (A* = grupos estadísticamente homogéneos respecto a NDVI-I; c* = grupos estadísticamente homogéneos respecto a RREL)

disponibilidad hídrica en las zonas más elevadas. Sin embargo, esta tendencia no se mantiene en la clase *Oromésica*, donde a pesar de las mayores precipitaciones la productividad disminuye respecto al *Supramésico*. Esto sugiere que las temperaturas, más bajas en esas áreas, representan el factor limitante de la productividad, desplazando a la disponibilidad de agua. Este fenómeno ha sido puesto de manifiesto en otras montañas mediterráneas (OYONARTE et al., 1993).

Los resultados obtenidos para las clases de geoformas y bioclima, consideradas independientemente, muestran diferente funcionamiento en términos de productividad y estacionalidad, lo que sugiere que resultan adecuados los criterios para identificar unidades ambientales en el territorio. Cuando ambos son utilizados conjuntamente para obtener el segundo nivel de la clasificación territorial (combinación de paisaje y bioclima), y en las clases obtenidas se comparan los valores de NDVI-I y RREL, se obtienen respectivamente 6 y 7 grupos diferentes (Figura 2). Los valores oscilaron entre 0,23-0,46 para productividad, y 0,22-0,51 para estacionalidad. Se puede establecer que la interacción entre paisaje

y clima mejora la discriminación de unidades ambientales funcionalmente diferentes.

El comportamiento de las clases bioclimáticas dentro de cada paisaje sigue el patrón general descrito anteriormente, sin embargo algunas no se comportan según lo esperado, como ocurre en el caso de *MTOR-MTMT* y *MTSU-LOSU*. Estas desviaciones del patrón deben ser explicados por otros factores de los ecosistemas, como podría ser el uso del suelo. Parece lógico introducir en las clasificaciones del territorio el uso que se hace del mismo, en la zona encontramos nueve tipos de uso del suelo (agrícolas y forestales). Analizados el valor de sus estimadores funcionales se comprueba que representan unidades funcionalmente diferentes, pudiéndose distinguir 8 grupos según NDVI-I y 6 atendiendo al RREL (Figura 3).

Como patrón general, se observa que NDVI-I aumentó desde 0,22 en los *Matorrales dispersos con pasto y roca*, hasta 0,51 en las Formaciones densas de coníferas. Por último, destaca el similar comportamiento de *Cultivos herbáceos en secano* y *Pastizales*, ambos con estacionalidad muy alta (0,6).

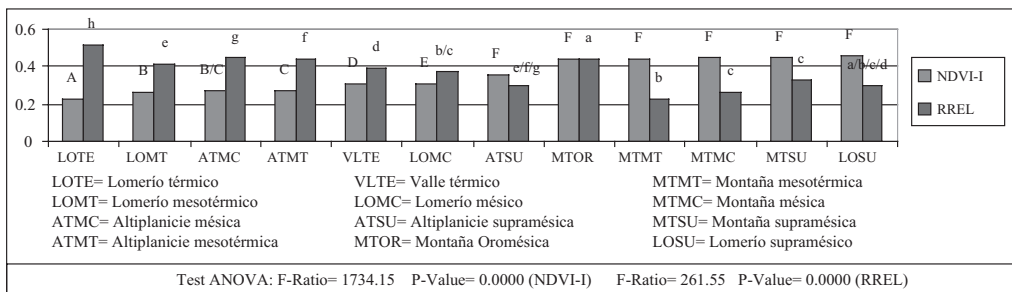


Figura 2. Valores medios de NDVI-I y RREL por clases de unidades de paisaje-bioclima (A* = grupos estadísticamente homogéneos respecto a NDVI-I; c* = grupos estadísticamente homogéneos respecto a RREL)

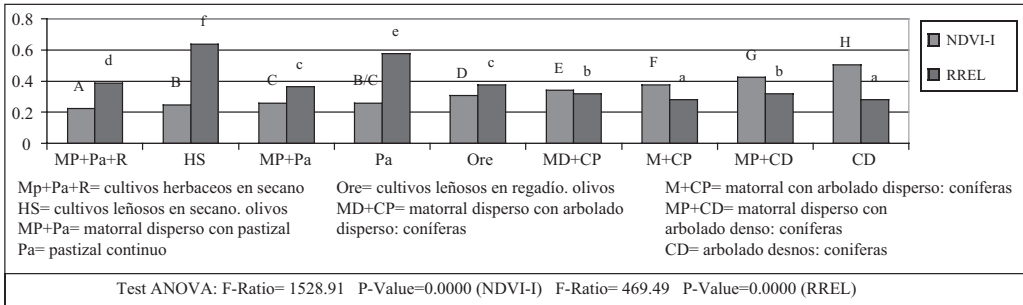


Figura 3. Valores medios de NDVI-I y RREL para usos del suelo (A* = grupos estadísticamente homogéneos respecto a los valores de NDVI-I; c* = grupos estadísticamente homogéneos respecto a los valores de RREL)

Si analizamos el tipo de uso en el contexto de la clasificación territorial propuesta (tercer nivel jerárquico), se comprueba que funcionalmente los usos no son independientes del conjunto de factores abióticos donde se desarrolla. Su comportamiento varía en función del paisaje, el clima o ambos. Esto ocurre, por ejemplo, en las *Formaciones de matorral con pinar disperso* (Figura 4) que muestran diferente funcionamiento según la unidad ambiental en que se localice. De nuevo se comprueba que la utilización de factores integrados en un esquema jerárquico permite establecer unidades ambientales más homogéneas y explicar mejor su comportamiento.

b) Caracterización de la dinámica intraanual de las unidades ambientales

Paisajes: Excepto *Montañas*, todos presentaron una dinámica estacional similar (Figura 5) con una estación de crecimiento entre el

otoño tardío y la primavera temprana, y máximos que oscilaron entre enero y marzo (*Lomerío-Altiplano-Valle*). Los Valles mostraron una curva de NDVI con valores ligeramente superiores a los *Lomeríos* y *Altiplanos*, destacando especialmente los de verano y otoño. Las *Montañas* presentaron una dinámica estacional bimodal con dos periodos de crecimiento, en verano y otoño. El periodo menos productivo se centró en el invierno y la primavera temprana. Las mayores diferencias entre paisajes ocurrieron en marzo, octubre y noviembre.

Bioclimas: Se diferencian tres grupos (Figura 6): 1) *Térmico* y *Mesotérmico*, con un periodo de crecimiento entre octubre y marzo; 2) *Mésico*, comportamiento parecido al grupo anterior, con máximo en enero y mínimo desplazado hacia agosto, pero con mayor productividad y estacionalidad menos acusa-

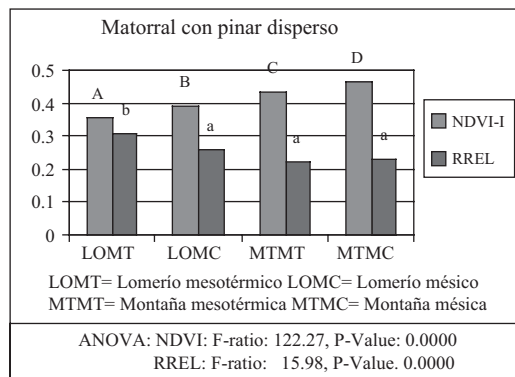


Figura 4. Valores medios de NDVI-I y RREL del Matorral con pinar denso (A* = grupos estadísticamente homogéneos respecto a NDVI-I; c* = grupos estadísticamente homogéneos respecto a RREL)

da; 3) *Supramésico* y *Oromésico*, con una dinámica opuesta a los dos grupos anteriores, mostraron la estación de crecimiento a lo largo del verano-otoño, con junio como mes con máximo absoluto, y septiembre (*Oromésico*) y octubre (*Supramésico*) los de máximo relativo. Su periodo menos productivo fue invierno-primavera. La mayor diferencia entre bioclimas se apreció entre los meses de junio y julio.

Paisaje-Bioclimas: Analizando la dinámica de las clases establecidas según el paisaje y el bioclima (segundo nivel jerárquico), se aprecian tres tipos de comportamiento (Figura 7): 1) *Lomerío térmico*, *Lomerío mesotérmico*, *Altiplanicie mesotérmica*, *Altiplanicie mésica*, *Lomerío mésico* y *Valle térmico*, con periodo de crecimiento centrado en el invierno y un periodo de menor crecimiento en verano. 2) *Altiplanicie supramésica* mostró una dinámica estacional intermedia y una curva bimodal, con un periodo de crecimiento invernal, mínimo absoluto en marzo, y un segundo periodo de crecimiento en primavera-verano con máximo relativo en junio. 3) El resto de unidades respondieron a una curva bimodal con periodos de crecimiento en verano y otoño. El mínimo absoluto tiene lugar en abril, excepto en la *Montaña oromésica* con mínimo en marzo. La máxima diferencia entre clases se apreció nuevamente en junio.

La dinámica intraanual de las unidades ambientales refleja la interacción entre los factores abióticos. Sin embargo el análisis de las clases en el segundo nivel parece indicar que el factor bioclima ejerce mayor influencia sobre la dinámica que el paisaje, lo que sugiere la necesidad de considerar el orden de los criterios utilizados en la clasificación anteponiendo el bioclima al tipo de paisaje. A pesar de esta tendencia general, se observan desviaciones como consecuencia de la combinación de otros factores ecosistémicos. Si incorporamos el elemento biótico (tercer nivel jerárquico), obtenemos mayor número de unidades ambientales de comportamiento más homogéneo. Siguiendo con el ejemplo de las *Formaciones de matorral con pinar disperso* (Figura 8) observamos su comportamiento variable.

CONCLUSIONES

Los índices funcionales fácilmente obtenidos por teledetección, NDVI-I y RREL, permiten determinar los elementos a considerar en el esquema de clasificación territorial así como su orden jerárquico, validando el sistema de clasificación utilizado en la caracterización ecosistémica del área de estudio.

La integración de parámetros funcionales a las unidades ambientales puramente estructurales posibilita el análisis y estudio de la distribución de la dinámica estacional de las mismas, aportando información relevante en el seguimiento y en la planificación de la gestión territorial.

BIBLIOGRAFÍA

- BAILEY, R.G.; PFISTER, R.D. & HENDERSON, J.A.; 1978. Nature on land resource classification: a review. *J. For.* 76: 650-655.
- BOELMAN, N.T., M. STIEGLITZ, H.M. RUETH, M. SOMMERKORN, K.L. GRIFFIN, G.R. SHAVER, & GAMON, J.A.; 2003. Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. *Oecologia*. 135: 414-421.
- CAPARRÓS, J.L.; DURANTE, P. Y OYONARTE, C.; 2003. Integración de parámetros climáticos en la clasificación jerárquica del territorio. *II Jornadas Ibéricas de Ecología del Paisaje*. Alcalá de Henares.
- FORMAN, R.T.T. & GODRON, M.; 1986. *Landscape Ecology*. John Wiley Ed. New York.
- MCNAUGHTON, S.J.; OESTERHELD, M.; FRANK, D.A. & WILLIAMS, K.J.; 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341: 142-144.
- MILCHUNAS, D.G. & LAUENROTH, W.K.; 1995. Inertia in plant community structure: State changes after cessation of nutrient enrichment stress. *Ecol. Appl.* 5: 1195-2005.
- OYONARTE, C., PEÑAS, J.; CABELLO, J. Y MOTA, J.F.; 1993. Climatic gradient and vegetational diversity in the Sierra the Gádor (Almería). *In: Proceeding 36th Symposium of the IAVS: Island and High Mountain vegetation:*

Biodiversity, Bioclimate and Conservation.
Tenerife.

PARUELO, J. M.; PIÑEIRO, G.; OYONARTE, C.; ALCA-
RAZ, D.; CABELLO, J. & ESCRIBANO, P.; 2005.
Temporal and spatial patterns of ecosystem
functioning in protected arid areas of Southe-
astern Spain. *Appl. Veg. Sci.* 8(1): 93-102.

VALENTINI, R.; BALDOCCHI, D.D. & TENHUNEN,
J.D.; 1999. Ecological controls on land-sur-
face atmospheric interactions. *In*: J. D.
Tenhunen & P. Kabat (eds.), *Integrating
hydrology, ecosystem dynamics and biogeo-
chemistry in complex landscapes*: 105-116.
John Wiley & Sons. Berlin.

APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN PARA LA INTEGRACIÓN DE ASPECTOS FUNCIONALES EN LA CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES AMBIENTALES

P. Durante Hernández, D. Alcaraz Segura, C. Oyonarte Gutiérrez y J. Cabello Piñar

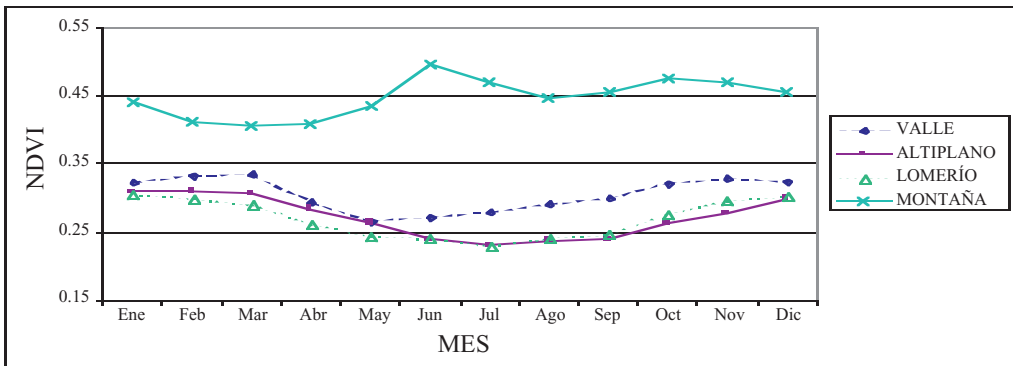


Figura 5. Dinámica estacional del NDVI para cada unidad paisajística

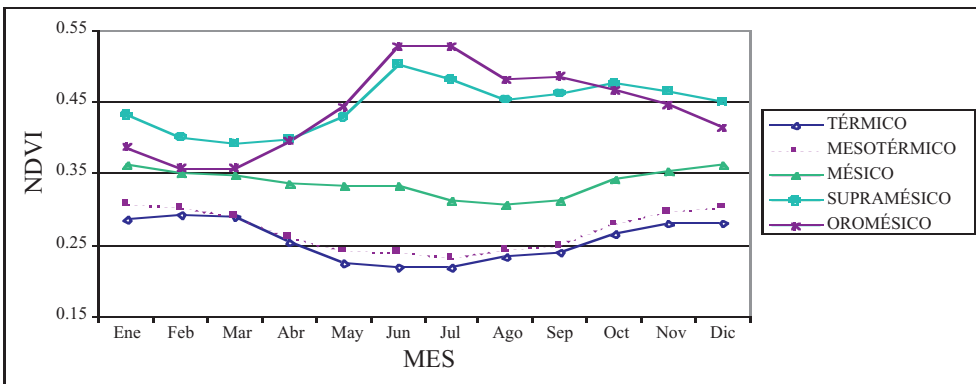


Figura 6. Dinámica estacional del NDVI para cada unidad bioclimática

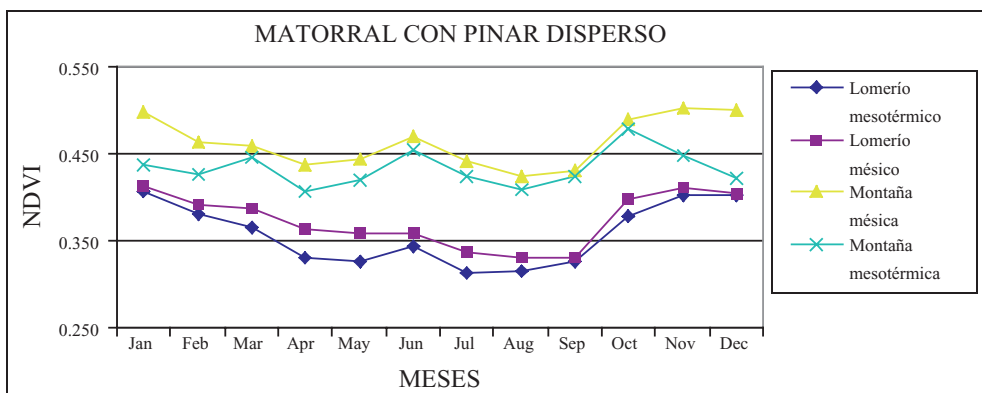


Figura 7. Dinámica estacional del NDVI para cada unidad de paisaje-bioclima

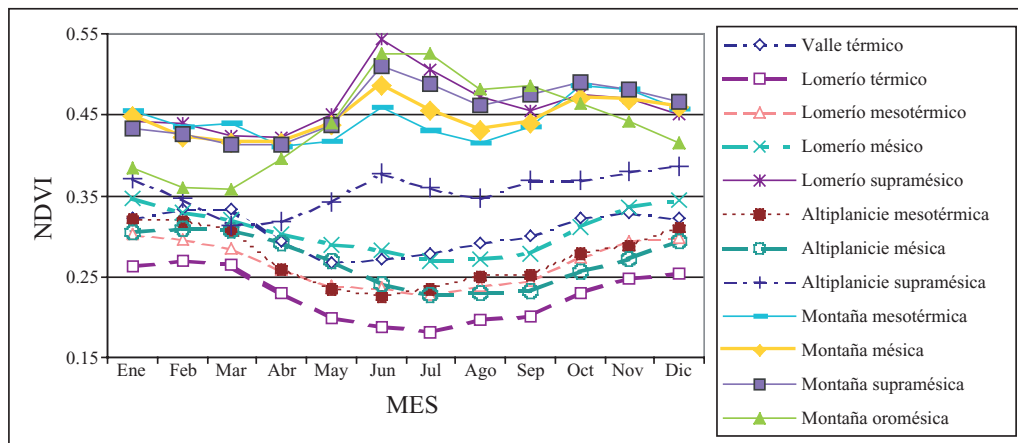


Figura 8. Dinámica estacional del NDVI para el Matorral con pinar denso