

# Seguimiento y análisis de tendencias temporales del funcionamiento ecosistémico mediante técnicas de teledetección en PN Alhucemas y SIBE Tres Forcas (Rif Oriental, Marruecos)



**Juan Francisco Martínez Utrera**

Grado en Ciencias Ambientales

Convocatoria de Julio 2014

Directores: Cecilio Oyonarte Gutiérrez y Andrés Reyes Díez



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



CAESCG

## Índice

● <a href="#"><u>Resumen/Abstract</u></a> .....	3
● <a href="#"><u>Introducción</u></a> .....	4
● <a href="#"><u>Material y métodos</u></a> .....	6
● <a href="#"><u>Resultados</u></a> .....	15
● <a href="#"><u>Discusión</u></a> .....	31
● <a href="#"><u>Conclusiones</u></a> .....	34
● <a href="#"><u>Referencias</u></a> .....	35

## **Resumen**

El actual escenario de cambio global a nivel mundial exige el diseño de estrategias destinadas a adaptarse y a mitigar los cambios motivados por este fenómeno. Por ello, el monitoreo y seguimiento del funcionamiento ecosistémico es un pilar fundamental sobre el que asentar dichas estrategias, valiéndose de técnicas de teledetección como lo son los índices verdes. Además, permite evaluar las políticas de gestión actuales mediante el seguimiento en áreas protegidas y en otras no protegidas, así como en diferentes usos del suelo. Consecuentemente, la finalidad del presente estudio es la caracterización del funcionamiento ecosistémico en 2 áreas protegidas del norte de Marruecos y la comparación de los datos con el SE semiárido ibérico, así como sentar las bases para un sistema de seguimiento del funcionamiento de estos parques.

Para el seguimiento ecosistémico se ha caracterizado la dinámica estacional de una serie de descriptores del funcionamiento (media, coeficiente de variación, máximos y mínimos) a partir del índice EVI de MODIS, el cual es un subrogado de la PPN; y se ha realizado un análisis de las tendencias que siguen estos atributos para el periodo 2001-2013, y su distribución en el espacio. Por último, y con un potencial empleo en la gestión, se determinaron las anomalías espaciales del atributo media para 4 usos del suelo (bosque, cultivos, matorral denso y matorral disperso).

Los resultados mostraron que la metodología empleada resulta útil para establecer la dinámica estacional de los ecosistemas. Las áreas analizadas muestran un patrón temporal similar pero con una mayor productividad para Tres Forcas, aunque se destaca una mayor variación estacional para Alhucemas. En ambos casos se observaron claras tendencias a un incremento de la productividad, afectando una parte importante de la superficie. Es el parque de Alhucemas el que presentó una mayor superficie con tendencias positivas y con una significación más alta. Apenas se encontraron zonas de tendencias negativas, en este caso predominantemente en Tres Forcas. Finalmente, en el análisis de anomalías se registró un mayor porcentaje de píxeles anómalos en Tres Forcas, dentro de la alta estabilidad de ambos parques.

## **Abstract**

The current world's scenario of global change requires the development of strategies to adapt and mitigate the changes brought by this phenomenon. Therefore, the monitoring and tracking of ecosystem functioning is a fundamental pillar to build such strategies through remote sensing techniques like vegetation indexes. Moreover, it allows evaluating current management politics by means of tracking both protected and non-protected areas, as well as different land covers too. Consequently, the purposes for the present study is the characterization of ecosystem functioning in 2 protected areas in north Morocco and data comparison with semiarid Iberian SE, as well as establish a base for an ecosystem functioning monitoring system for such 2 parks.

For ecosystem functioning's tracking we characterized the seasonal dynamics for some functioning descriptors (mean, seasonal coefficient of variation, maximum and minimum) using MODIS's EVI index, which is a NPP's surrogate; and we also carried out a trend analysis for these attributes in 2001-2013 period, and its spatial distribution too. Finally, and focused in a potential use in management, we determined the spatial anomalies for

the mean attribute in 4 land covers (forest, crops, dense shrublands and sparse shrublands).

Results showed that the used methods are useful to establish ecosystem seasonal dynamics. Analyzed areas had a similar temporal pattern but with a greater productivity in Tres Forcas, although it's remarkable a higher seasonal variation in Alhucemas. Both sites registered clear increasing trends in productivity, but Alhucemas was the one with a higher positive trends surface and higher significant trends. There we almost couldn't find any negative trend, which were predominant in Tres Forcas. Last but not least, anomalies analysis showed a greater percentage of anomalous pixels in Tres Forcas, but taking count that both parks were very stable.

## **Introducción**

El escenario actual a nivel mundial de cambio global hace necesario un mayor conocimiento de los procesos ecosistémicos que podrían ver modificado su patrón de comportamiento, a fin de poder generar estrategias y medidas destinadas a mitigar y adaptarse a tales cambios. Esto comporta unas mayores exigencias de información por parte de los gestores a la hora de la toma de decisiones, lo cual ha dado lugar a que la ecología pase de un enfoque en las variables estructurales para el estudio de los ecosistemas (tamaño de poblaciones e individuos) a un estudio centrado en el funcionamiento de los ecosistemas ([Cabello et al. 2012a](#)).

El funcionamiento del ecosistema es el resultado de las actividades colectivas de los organismos y sus acciones vitales (producción, consumo y excreción) y los efectos de estas actividades en el estado de su entorno ([Virginia et al. 2001](#)). Este nuevo enfoque tiene parte de su razón en las exigencias de los gestores, que tiene su fundamento en el hecho de que parte de las funciones de los ecosistemas sirven de servicios para el ser humano, por lo que un mayor conocimiento de éstos a través del funcionamiento del ecosistema es de gran importancia para los gestores a la hora de conseguir una gestión sostenible de los recursos, apoyo a la toma de decisiones y a la planificación del paisaje ([Meyerson et al. 2005](#)).

Para el análisis del funcionamiento del ecosistema la ecología se vale de atributos funcionales que son descriptores del intercambio de energía y masa entre la biota y la atmósfera en escala de ecosistemas ([Valentini et al., 1999](#); [Virginia et al., 2001](#)), y pueden contribuir a satisfacer esas necesidades dado que muestran una respuesta más rápida a los cambios ambientales que a los estructurales ([Mcnaughton et al. 1989](#); [Milchunas y Lauenroth 1995](#)).

Además, los atributos funcionales son relativamente fáciles de monitorizar, de forma cuantitativa y cualitativa, utilizando cualquier índice de vegetación derivado de la detección por satélite para obtener subrogados de la productividad, la estacionalidad y la fenología de la ganancia de carbono([Alcaraz Segura et al. 2011](#)).

Los índices espectrales de la vegetación y las imágenes satelitales derivadas de ellos tienen la capacidad para convertir la señal producida por la radiación absorbida por la vegetación a determinadas longitudes de onda en magnitudes cuantificables, permitiendo el análisis del funcionamiento ecosistémico. Estos índices calculan la parte de radiación incidente

sobre la superficie terrestre que es absorbida por la vegetación (fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida o fRFAA) a partir de calcular la diferencia entre la radiación total incidente útil para la vegetación (Radiación Fotosintéticamente Activa o RFA) entrante y la reflejada detectada por el sensor que es devuelta al espacio. Esta Radiación Fotosintéticamente Activa se compone de las regiones del espectro del visible (vis), infrarrojo cercano (IRc), e infrarrojo medio (IRm) ([Paruelo et al. 2014](#)).

Con estas variables, existen varios tipos de índices de vegetación, como el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI, Índice de Diferencia Normalizado), el *Enhanced Vegetation Index* (EVI, Índice de Vegetación Normalizado) o el *Perpendicular Vegetation Index* (PVI, Índice de Vegetación Perpendicular). Estos índices son considerados como subrogados de la PPN, la cual es el mejor descriptor del funcionamiento de un determinado ecosistema ([Monteith 1972](#)).

Por todo esto, en los últimos años se ha producido un incremento lento pero progresivo en el uso de estos índices para el análisis de innumerables cuestiones ambientales (Petorelli, 200x), muchos de ellos dirigidos al estudio del funcionamiento del ecosistema ([Cabello et al. 2012a](#)). Algunos de estos estudios se han realizado en ecosistemas similares al nuestro en otras zonas de Marruecos ([Höpfner et al. 2011](#); [Jarlan et al. 2013](#)), u otra zonas áridas del área mediterránea ([Oyonarte et al. 2010](#); [Paruelo et al. 2005](#)).

Derivado del estudio de atributos funcionales, podemos extraer información acerca de la dinámica espacio-temporal de los ecosistemas, tendencias dentro de un determinado periodo de tiempo y establecer anomalías en el funcionamiento. Toda esta información puede servir de soporte para implantar un sistema de alerta temprana acerca de cambios en la dinámica del ecosistema ([Oyonarte et al. 2010](#); [Cabello et al. 2011](#)) que ayude a los gestores a la toma de decisiones.

A pesar de las ventajas que supone el seguimiento de atributos funcionales, también presenta inconvenientes. En concreto, en zonas áridas y semiáridas como las que se refiere nuestro estudio, encontramos dificultades como la lenta dinámica y alta variabilidad de los ecosistemas y, como consecuencia, es necesario una adecuada elección de las variables a estudiar que resuelvan dichos obstáculos ([Paruelo et al. 2005](#)). Otro gran inconveniente que nos encontraremos es que debido al reciente desarrollo de las técnicas de teledetección comentado anteriormente la disponibilidad de datos para una evaluación temporal es muy pequeña, lo cual se agrava en determinadas zonas del globo donde este tipo de programas de seguimiento no están muy desarrollados y la carestía de datos es más elevada.

A pesar del inconveniente de una serie temporal de datos corta, es imperativo evaluar la tendencia que sigue el índice verde durante el periodo seleccionado, ya que esto permitirá conocer la evolución del ecosistema, detectando cambios y cómo de relevantes son éstos en el índice de vegetación a nivel de píxel en el área de estudio.

Otro factor a tener en cuenta en el funcionamiento ecosistémico es el uso del suelo, el cual influye de forma decisiva en el funcionamiento de los ecosistemas, ejerciendo un control sobre los mismos incluso superior al del clima o el tipo de suelo ([Paruelo et al., 2001](#)). Los cambios más drásticos, sobre todo en este ambiente mediterráneo, son los que tienen origen antrópico. Los cambios inducidos por el ser humano en la estructura y dinámica de

la vegetación tienen una fuerte influencia en los balances de agua y energía, así como en el ciclo del carbono, afectando a la estabilidad y dinámica del ecosistema ([Telesca & Lasaponara 2006](#)).

Por un lado, el bosque (de escasa área debido a que son ecosistemas semiáridos y, sobre todo, por la deforestación) representa al ecosistema maduro y climático que en algún momento dominó la región y supone un nivel de antropización mínimo. La elevada mediterraneidad del ambiente hace que la vegetación sea de tipo perenne, por lo que la dinámica anual de las ganancias de carbono no tendrá una estacionalidad muy marcada.

En el lado opuesto, los cultivos suponen una influencia humana máxima, dado que se intercalan épocas de verdor máximo con épocas sin respuesta en los índices de vegetación debido a la roturación o a coincidir con etapas de barbecho. Por ello, la dinámica anual es altamente estacional, variando según el tipo de cultivo.

Los matorrales simbolizan las etapas intermedias entre los cultivos que se abandonan y el desarrollo de la vegetación hacia un bosque. Estas etapas están representadas por el matorral disperso en los primeros estadios de abandono, avanzando hacia un matorral denso como precursor de un bosque maduro. El clima semiárido hace que el matorral presente tenga una dinámica de EVI ganancias de carbono muy poco estacional al tratarse de plantas perennifolias y de bajo índice debido a sus adaptaciones a la aridez. Aún así, el matorral denso posee una curva algo con una estacionalidad más intensa que el matorral disperso.

Por tanto, con estos 4 usos tendremos una caracterización completa del ecosistema: cómo se comportaba y comporta en sus etapas climáticas, cuánto le afecta la acción humana sobre él y su capacidad de resiliencia ante estos cambios una vez es abandonada la actividad humana.

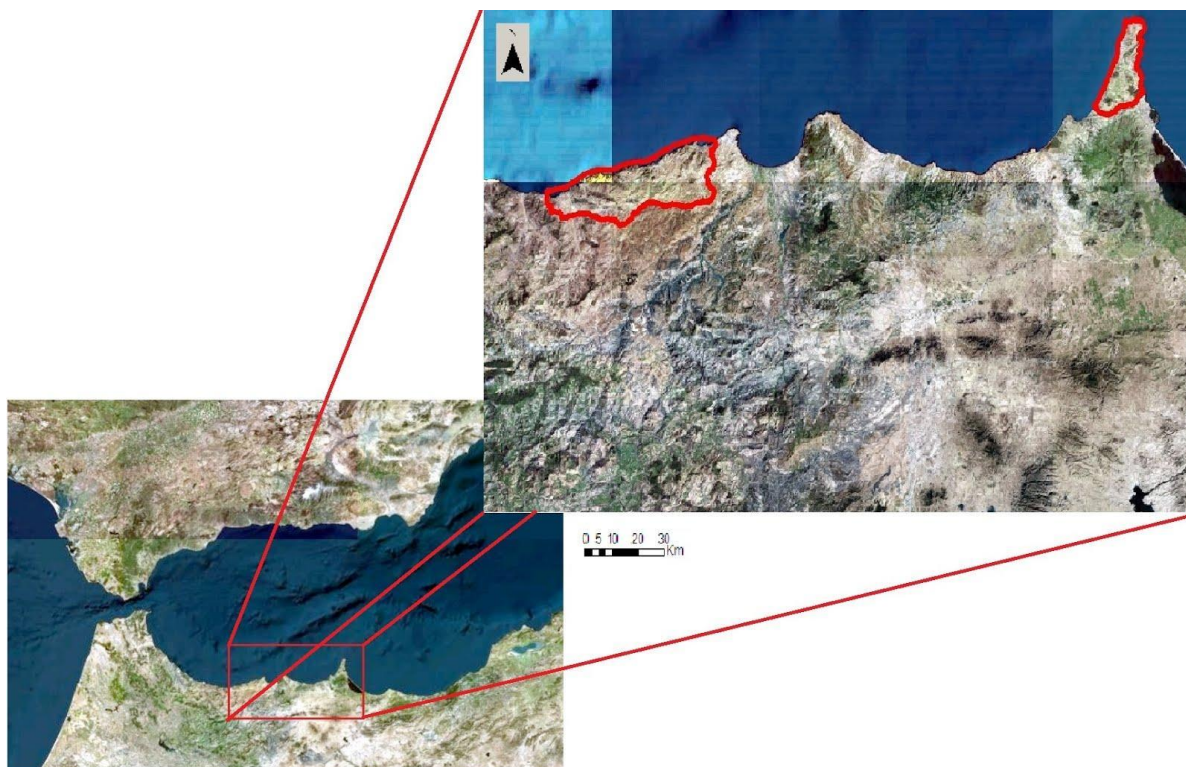
Este trabajo tiene como objetivo general utilizar información de índices de vegetación disponible para el análisis de la dinámica temporal del funcionamiento ecosistémico de dos zonas protegidas en el norte de Marruecos, y establecer la base para un sistema de seguimiento en la zona. Como objetivos concretos nos marcamos: (a) caracterización de la dinámica estacional de atributos funcionales, (b) analizar las tendencias temporales a nivel de píxel en una serie temporal y (c) identificar áreas con un comportamiento anómalo en relación a su uso (anomalías espaciales).

## **Material y Métodos**

### **Área de estudio**

El área de estudio se encuentra localizada en la costa mediterránea del Norte de Marruecos y se compone de los espacios protegidos del Parque Nacional de Alhucemas y el SIBE del Cabo de Tres Forcas (Figura 1).





**Figura 1.** Localización del Parque Nacional de Alhucemas y del SIBE del Cabo de Tres Forcas.

Ambos parques pertenecen a la región del Rif Oriental, con un clima semiárido a árido mediterráneo con influencia sahariana. Se destaca una fuerte continentalidad, que lleva a inviernos fríos y veranos muy cálidos, irregularidad en las precipitaciones, con frecuencia de episodios torrenciales y un acumulado anual que ronda los 300 mm (Tabla 1); una evapotranspiración bastante fuerte que se lleva consigo gran parte de las tormentas de verano-otoño; y violentos vientos que limitan el crecimiento vegetal (López García, B. y Berriane, M. 2004).

**Tabla 1.** Datos climáticos de las áreas. La variabilidad viene determinada por la desviación estándar para las temperaturas y por el coeficiente de variación para las precipitaciones por defecto desde la fuente de los datos (Fuente: Hijmans R.J., Cameron S., and Parra J. (Museum of Vertebrate Zoology) WorldClim-Global Climate Data Obtenido en 09/06/2014 <http://www.worldclim.org>).

Variable	Media		Variabilidad	
	Alhucemas	Tres Forcas	Alhucemas	Tres Forcas
Precip. media (mm)	354.06	283.29	65	64
Temp. media (°C)	17	18	46	46
Temp. máx. (°C)	22.28	22	5.5	4.98
Temp. mín. (°C)	11.96	13.72	4.44	4.7

**Parque Nacional de Alhucemas:** Se trata de un Parque Nacional marítimo-terrestre que cuenta con dicha calificación desde el año 2004. Es el único Parque Nacional en la costa mediterránea de Marruecos. Se sitúa en el Norte de Marruecos, al Oeste de la población que le da nombre (UICN 2012).

Con una superficie de unos 310 km<sup>2</sup>, de los cuales 285 corresponden a su parte terrestre, su costa se compone en su mayoría de abruptos acantilados de naturaleza calcárea de fuerte desnivel salpicados por playas que a menudo coinciden con las desembocaduras de los barrancos del parque. El interior del Parque tampoco está exento de fuertes pendientes que van desde las cumbres más altas hasta los fondos de los valles, resultando en un rango altitudinal de 0 -747 msnm. La geología es predominantemente caliza debido a la presencia de una dorsal calcárea, si bien al sur del parque se localiza un complejo de tipo metamórfico (flysch).



Las bajas precipitaciones ( $\approx 300$  mm anuales, Tabla 1) propias de este clima mediterráneo semiárido hace que los cursos fluviales en este Parque sean muy escasos o nulos, y solo portan agua cuando se dan los fenómenos torrenciales. Esta torrencialidad también afecta a la erosión de los suelos, haciendo que el Rif sea una de las regiones más erosionadas del mundo con un 70% de sus suelos afectados. En cuanto a las temperaturas, la mínima de 12°C y la máxima de 22°C, con una temperatura media de 17°C (Tabla 1).

*Panorámica costera del Parque Nacional de Alhucemas.*

La fuerte influencia humana durante un periodo de tiempo muy continuado ha llevado a que gran parte del Parque se encuentre deforestado. Los enclaves forestales mejor conservados se asocian a la presencia de enterramientos que se consideran sagrados (“*marabouts*”), por lo que esos lugares se mantienen casi inalterados ([MedMPA 2004](#)). Entre las especies vegetales destacan *Olea europaea* var. *sylvestris*, *Pistacia lentiscus*, *Chamaerops humilis*, *Ceratonia siliqua*, *Tetraclinis articulata* y rodales de *Pinus halepensis* fruto de tareas de repoblación. En el fondo de los valles también encontramos vegetación propia de estos ambientes como el género *Tamarix* o *Nerium oleander*.

En cuanto a fauna destacan la presencia de *Pandion haliaetus* e *Ichthyaetus audouinii* ([Grijalbo 2011](#)).

La ocupación del suelo está determinada por el uso agrícola y ganadero que desde el Neolítico se ha venido haciendo en esta zona de Marruecos, abundando las zonas con malezas y áreas con suelo altamente erosionado o con escasa vegetación. Por otro lado, la agricultura de secano juega un papel importante a lo largo del límite sur del parque, debido a la escasez de agua, aunque también existen de forma mucho más minoritaria actividades ligadas al aprovechamiento forestal.

**SIBE Tres Forcas:** Península declarada SIBE (Sitio de Interés Biológico y Ecológico, figura de protección nacional) en el año 1996 y sitio Ramsar (figura de protección internacional) en el año 2005 ([Moumen A & Melhaoui M. 2010](#)), dada su importancia como lugar de



descanso de las aves en sus migraciones África-Europa. Éste último sólo ocupa 5000 hectáreas de la extensión total de la península.

Con unos 98 km<sup>2</sup> de extensión, está situada a unos 10 kilómetros al Noroeste de Melilla, en el Rif oriental, penetra en el mar de Alborán destacando sobre el resto de costa marroquí. Su orografía es suave en la costa aunque en el interior de la península se alcanzan alturas máximas que rondan los 500 msnm. Posee un sustrato volcánico (anfíbolitas y riolitas sobre todo) con enclaves calizos, vinculada al volcanismo del Mar de Alborán. Los acantilados son las zonas más abruptas del cabo, pudiendo llegar a los 200 metros de altura. También destaca la escasa longitud de sus cursos de agua, los cuales no superan los 6 kilómetros.



*Panóramica de la costa del SIBE del Cabo de Tres Forcas.*

Su climatología es de tipo mediterránea semiárida seca, lo que resulta en precipitaciones anuales escasas de unos 284 mm anuales (Tabla 1) y que a menudo se dan de modo torrencial. Esto lleva a que los recursos hídricos superficiales sean nulos, unido a la ausencia casi total de acuífero superficial. Las temperaturas se sitúan entre mínimas de 14°C y máximas de hasta 22°C, con una temperatura media de 18°C (Tabla 1).

Actualmente se encuentra fuertemente deforestado. Esta ausencia de vegetación, sumado al efecto erosivo de los vientos, hace que en gran parte del territorio del Parque la cubierta edáfica sea casi nula, siendo la roca desnuda la tónica general. Por esto último, destaca la presencia de especies rupícolas como *Asteriscus maritimus* o *Frankenia corymbosa*. Esta pérdida de suelo de los lugares elevados se traduce en una acumulación de suelo en los valles, que da lugar a su aprovechamiento agrícola extensivo, permitiendo su convivencia con rodales de *Tetraclinis articulata* o *Ceratonia siliqua* ([MedWetCoast 2003](#)).

Dentro de su avifauna podemos encontrar *Parus major*, *Streptopelia decaocto*, *Ardea purpurea* o *Fulica atra* ([Grijalbo 2010](#)). También es de destacar que fue el último hábitat de *Monachus monachus* en el Mediterráneo occidental.

Al igual que en Alhucemas, esta área sufre de una fuerte deforestación a causa del sobrepastoreo y la tala para cubrir la demanda de leña, teniendo graves problemas de erosión. Sin embargo, conserva cerca de su límite sur 2 extensiones de bosque denso, así como un fuerte dominio del matorral denso en la zona norte. Por otro lado, la agricultura

de secano está fuertemente presente en el parque, aunque en su mayoría se trata de parcelas salpicadas con vegetación en mosaico.

## Material

### El producto MOD13Q1. Descarga y pre-procesado.

Se han utilizado Imágenes Espectrorradiométricas de Media Resolución (MODIS, Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) obtenidas por el satélite Terra para la serie 2001-2013. Realizamos la descarga del producto MOD13Q1 (Índices de vegetación (VI)) desde el sitio web [https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_products\\_table/mod13q1](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod13q1), el cual ofrece información mediante agregados de 16 días con una resolución espacial de 250x250 metros y una proyección de tipo Sinusoidal, propia de los productos de MODIS.

El producto MOD13Q1 posee 12 bandas que incluyen la siguiente información:

- 2 bandas con índices de vegetación NDVI y EVI.
- La banda QA (*Quality Assessment*, evaluación de la calidad) detallada, que contiene información acerca de las condiciones en las que se llevó a cabo la adquisición de los datos. Esto incluye un valor de utilidad del EVI para un determinado píxel, presencia/ausencia de nubes, aerosoles, contaminación..., el efecto del agua y la nieve y zonas de sombra causadas por la orografía. Toda esta información se encuentra codificada en un código binario de 16 dígitos.
- 5 bandas con información acerca de la reflectancia de las diferentes longitudes de onda del espectro (rojo, azul, infrarrojo cercano e infrarrojo medio), las cuales permiten el cálculo de los índices de vegetación diarios.
- 3 bandas que aportan información sobre ángulos de visión del satélite, de incidencia del sol y del ángulo del acimut.
- Una banda con el día juliano al que corresponde la medida de EVI y que permitirá su ordenación de forma cronológica.
- Una banda resumen de confianza que tiene un determinado píxel en función de su calidad.

Las bandas utilizadas en este estudio fueron la de EVI y la capa QA. El índice EVI es calculado a partir de la siguiente expresión:

$$EVI = 2,5x(IRc - R)/(IR + C1xR - C2xA + L)$$

donde A, R e IRc son las reflectancias corregidas de las regiones del azul, el rojo y el infrarrojo cercano respectivamente; L es un ajuste e acuerdo al sustrato y C1 y C2 son coeficientes relacionados con la presencia de aerosoles ([Paruelo et al. 2014](#)).

Una vez disponibles en el servidor todas las imágenes de la serie temporal (23 compuestos por año para el período 2001-2013), fueron filtradas por calidad empleando la capa de calidad que incluyen todas las imágenes codificadas en binario. Utilizando un script en IDL (*Interactive Data Language*, Lenguaje de Datos Interactivo), se filtran las imágenes de modo que sólo empleamos en el posterior análisis aquellos píxeles que tengan una buena calidad, descartando los píxeles con presencia de nubes o aerosoles o datos deficientes que pudiesen afectar al resultado del análisis.

Por esto último, y por la diferenciación del estudio en varias coberturas, escogimos 4 usos del suelo presentes en los parques de Marruecos para evaluar la diferente respuesta que presenta EVI de cada uno y lo que esto supone a nivel de funcionamiento ecosistémico. Por esto último, los 4 usos a analizar son los que mejor representan un determinado nivel de influencia humana y, por tanto, de potencial degradación de las funciones del ecosistema.

Para la identificación de los usos del suelo empleamos una capa de coberturas que elaborada dentro del proyecto Transhábitat de Desarrollo Sostenible del Espacio Transfronterizo Red Natura 2000 y Hábitats de Interés Común Andalucía-Marruecos ([Mullor J. & Oyonarte C. 2014](#)). Organiza la información en 4 niveles según el detalle con el que estén definidos los diferentes usos del suelo. En nuestro caso, empleamos el nivel 3 puesto que era el que contenía los usos de bosque, cultivo y matorral disperso y denso objetivo de nuestro estudio por usos.







Dado que los píxeles que emplea MODIS representan cuadrículas espaciales de 250 metros de lado, el volumen de datos a procesar si empleamos todos los píxeles disponibles sería muy grande. Por ello, buscamos una selección de píxeles uniformemente distribuidos por usos del suelo a estudiar que nos genere un volumen de datos más reducido. Esta selección se empleará para la caracterización funcional mediante el índice EVI de los distintos usos del suelo y de las tendencias, para obtener valores de referencia que extrapolar al total de píxeles de cada uso para el estudio de las anomalías.

La selección aleatoria se llevó a cabo de forma manual en el software ArcGIS mediante superposición de capas siguiendo una serie de criterios. Por un lado, nos aseguramos de que los píxeles elegidos se encontraron dentro del uso del suelo correspondiente, de forma que no hubiera confusión posible. Para ello evitamos los “píxeles-frontera” que pueden estar o verse alterados por la presencia de 2 o más usos en sus límites.

Además, comprobamos que los valores de EVI fueran coherentes, ya que al estudiar regiones costeras, cabe la posibilidad de que aquellos píxeles más cercanos a la costa estén afectados de algún modo por el mar, por lo que se seleccionaron píxeles teniendo en cuenta una franja de unos 3 píxeles (750 metros aproximadamente) de exclusión a lo largo de la costa.

La selección final constó de 20 píxeles para el bosque y 25 para cultivos, matorral denso y matorral disperso en Alhucemas, mientras que en Tres Forcas se seleccionaron 20 píxeles para bosque, cultivos y matorral denso y solamente 10 para el matorral disperso.



	Alhucemas	Tres Forcas
Bosque		
Cultivos		
Matorral disperso		

*Ejemplos de algunos de los usos del suelo empleados en el estudio.*

## Procesamiento

### Cálculo de las variables funcionales.

Una vez filtradas las imágenes se ha procedido al cálculo de un conjunto de variables que permiten describir el funcionamiento de los ecosistemas. Los atributos funcionales a analizar son los mismos que los analizados por [Oyonarte et al. 2010](#): la media de la curva estacional, los máximos y los mínimos y el coeficiente de variación estacional.

La media consiste en una media aritmética de los diferentes valores de EVI en las zonas. En este estudio realizamos 3 tipos de medias: una primera a los compuestos que nos

reportará la curva del año medio de la serie temporal; el atributo medio extraído de esta curva estacional media; y una media del valor de EVI para los píxeles del territorio, denominada media espacial. Con este atributo se estima la fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida ([Sellers et al. 1996](#)) y, por tanto, la Productividad Primaria Neta ([Paruelo et al. 1997](#); [Sellers et al. 1992](#); [Tucker et al. 1985](#)) a través del modelo de [Monteith 1972](#):

$$PPN(g \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}) = RFA(MJ \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}) \times fRFAA \times EUR(gMS \cdot MJ^{-1})$$

donde RFA (Radiación Fotosintéticamente Activa) es la radiación total entrante en una determinada localidad; fRFAA (Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida) es la fracción de RFA que efectivamente absorbe la vegetación; y EUR (Eficiencia del Uso de la Radiación) es un término relacionado al tipo de vegetación que absorbe la radiación y mide la eficiencia de conversión de la radiación en biomasa ([Paruelo et al. 2014](#)).

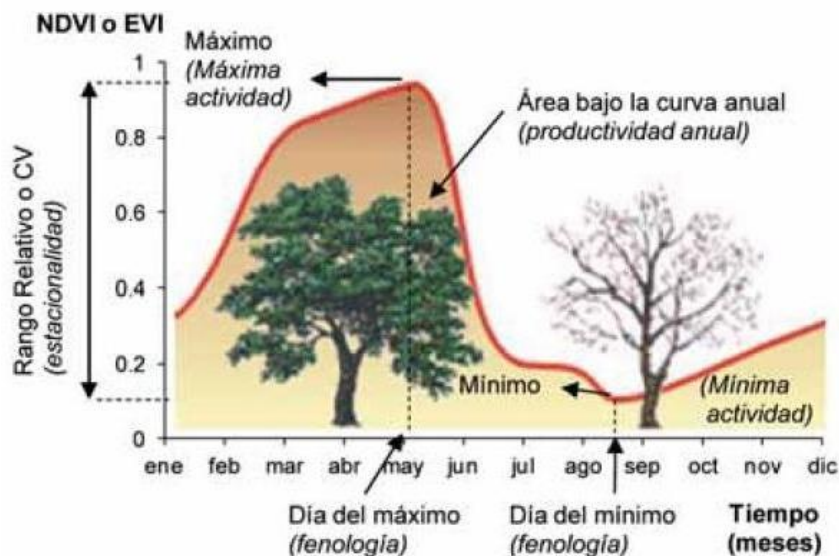
Sin embargo, no tiene en cuenta la variación estacional ni la variabilidad que subyace en los distintos usos del suelo.

Con los máximos y mínimos pretendemos saber los valores pico que alcanza el índice como indicador de los límites en los que se mueve la actividad fotosintética de los ecosistemas estudiados.

Por último, el coeficiente de variación estacional supone un indicador de la estacionalidad de la actividad fotosintética y de cómo varía la absorción de carbono entre las etapas de crecimiento y no crecimiento ([Paruelo and Lauenroth 1995](#)), estandarizando entre 0 y 1 las diferencias entre máximos y mínimos.

Primero calculamos la curva anual media o “año medio”, resumiendo en una sola las 13 curvas anuales de la serie temporal. El resultado fueron 23 compuestos medios, que representan el valor medio de EVI para un determinado compuesto a lo largo de la serie temporal (Figura 2). Esta curva anual media muestra la dinámica estacional media, y a partir de su parametrización se generan los atributos descriptores del funcionamiento ecosistémico. Además, los atributos funcionales se calcularon también para cada año.





**Figura 2.** Curva anual del índice espectral de vegetación (NDVI o EVI) y sus descriptores funcionales derivados. El uso de estos descriptores como indicadores y su significado biológico están ampliamente reconocidos (Pettorelli et al., 2005) (modificada de G. Baldi; <http://lechusa.unsl.edu.ar>).

### Análisis de tendencias

Para el cálculo de las tendencias de los atributos extraídos de la curva estacional del índice EVI se empleó el método Sen (Sen 1968), un método no-paramétrico que proporciona la pendiente de regresión para un determinado parámetro en un punto de muestreo sin que el mismo se vea afectado por la presencia de covariantes, como la regresión paramétrica.

Por otro lado, el p-valor de cada pendiente de Sen se calculó empleando el test de Mann-Kendall estacional para tendencias, un test no paramétrico y basado en rangos que es robusto frente a la estacionalidad, la no-normalidad, la heterocedasticidad, los valores perdidos y la autocorrelación, tanto inter como intraanual (Hirsch & Slack 1984; Van Belle & Hughes 1984). El test calcula la tendencia monótona de cada estación del año, basándose en el estadístico  $\tau$  de Kendall, sumando el número de veces que un determinado año tiene un valor de EVI más bajo o más alto que cualquier año previo. Con esto, lleva a cabo un test de heterogeneidad para comprobar si la pendiente es consistente a través de todas las estaciones (Alcaraz Segura et al. 2008).

Tanto el método de Sen como el test de Mann-Kendall se llevaron a cabo dentro del software estadístico R (<http://www.R-project.org/>) mediante el paquete de funciones “[wg](http://cran.r-project.org/package=wg)” (<http://cran.r-project.org/package=wg>).

Una vez aplicado el script de tendencias a las imágenes obtenidas anteriormente de atributos y año medio por compuestos y años, el resultado fueron 3 archivos en formato “.tiff”, 2 de ellos con el valor de tendencia (uno en valor absoluto y otro en valor relativo o porcentaje) y un tercer archivo que contiene el p-valor de las tendencias calculadas. Este último nos permitió discernir entre aquellas pendientes de Sen que se consideren significativas y las que no lo son.

Atendiendo a la bibliografía consultada ([Alcaraz Segura et al. 2008](#); [Alcaraz Segura et al. 2009b](#); [Alcaraz Segura et al. 2010a](#); [Alcaraz Segura et al. 2010b](#)) se estableció el límite a partir del cual clasificar las pendientes de Sen en “significativas” o “no significativas” en 0,05, siendo aquellas pendientes con un p-valor inferior a 0,05 significativas y por el contrario las que lo superan o igualan son no significativas. Además, aquellas pendientes de Sen no significativas fueron eliminadas (Pendiente de Sen=0) del resultado final del análisis.

### **Anomalías espaciales**

Para identificar zonas con un comportamiento anómalo, en relación a su uso, se realiza un análisis de anomalías espaciales del valor de la media de EVI. Para este análisis seguimos la metodología seguida en [Oyonarte et al. 2010](#), empleando como indicador subrogado de la productividad los valores de EVI en lugar de los de RFAA.

Con la muestra de píxeles seleccionados previamente (según lo indicado en la sección de pre-procesamiento) determinamos la media espacial del valor de EVI para cada uso y parque. Al mismo tiempo, también calculamos la desviación estándar de estos valores, de forma que dispusimos de 8 pares de valores (media y desviación estándar) para generar los intervalos. Con ellos se establecieron 3 categorías: ausencia de anomalía o valores “normales”, comportamiento anómalo negativo (valores por debajo del intervalo) o comportamiento anómalo positivo (valores por encima del intervalo).

Estos intervalos vienen determinados por: media de los valores medios de EVI  $\pm$  una desviación estándar, de forma que obtuvimos 2 valores límite por encima y por debajo de la media. Con estos valores extraídos de los píxeles-control, extrapolamos en R al resto de píxeles teniendo en cuenta el parque y el uso del suelo al que pertenecen, clasificándolos según la anomalía espacial que muestren.

Los resultados de los análisis antes descritos se representaron en forma de gráfico a través del paquete “[ggplot2](#)” (<http://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>) de R, en mapas usando el software de análisis espacial ArcGIS; o mediante tablas a través de Microsoft Excel.

## **Resultados**

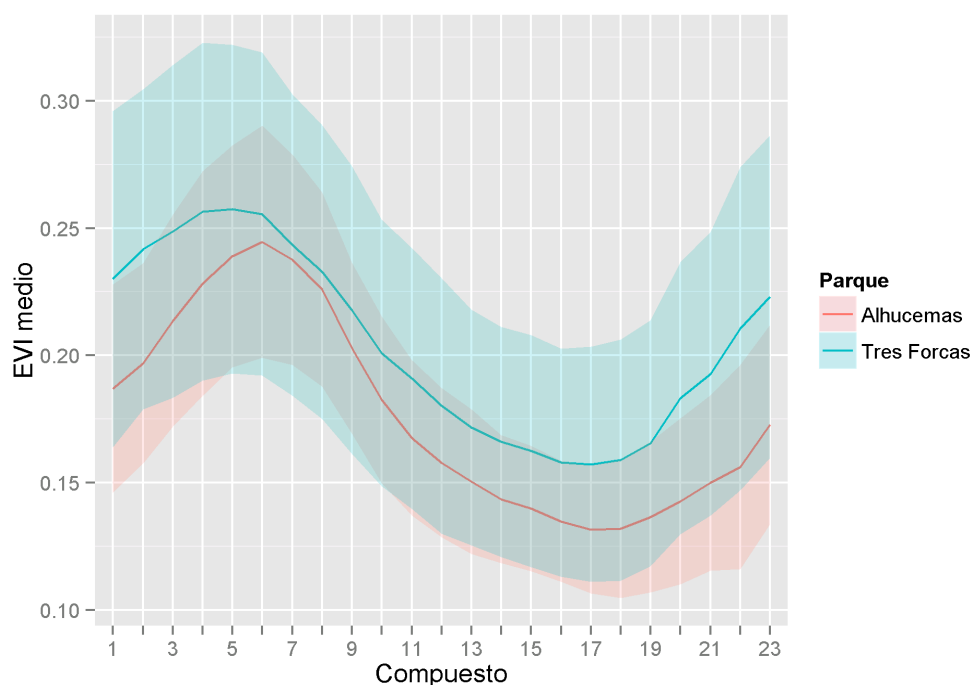
Los resultados se presentan por un lado para la totalidad de la superficie de las áreas, y realizando el análisis considerando exclusivamente cada píxel de forma individual. Para el análisis de los usos del suelo se selecciona parte de la superficie, y el análisis se realiza a nivel de píxel (tendencias temporales) o comparando el valor de estos respecto a los de su clase (anomalías espaciales)

### **1. Dinámica espacio-temporal de la curva estacional y los atributos funcionales**

#### **1.1. Curvas estacionales**

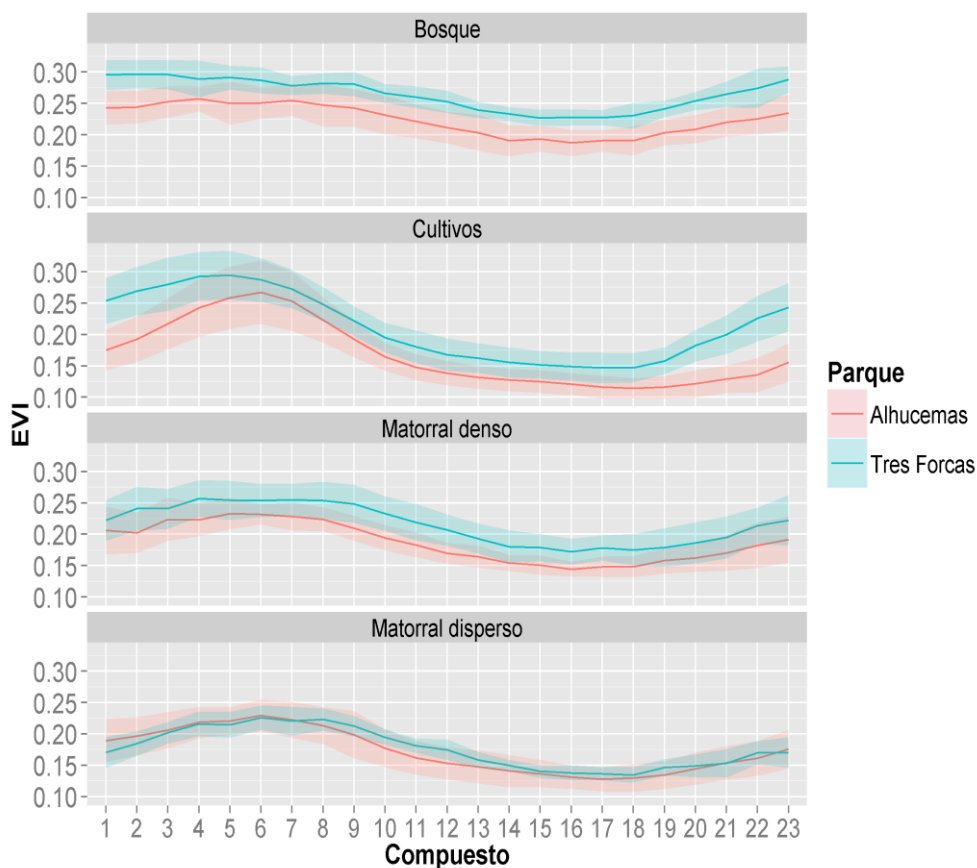
Las curvas estacionales de ambos parques (Figura 3) oscilan entre 0,13 (primera mitad de septiembre) y 0,24 (finales de marzo) para Alhucemas y 0,16 y 0,26 (ambos se dan aproximadamente al mismo tiempo que en Alhucemas) en Tres Forcas, teniendo este último una mayor desviación estándar que la registrada en Alhucemas. Aunque la curva de

Alhucemas nunca se posiciona por encima de la de Tres Forcas, los compuestos 6, 7 y 8 (segunda mitad de marzo y el mes de abril) casi solapan. En cambio, para los compuestos 20 al 23, correspondientes a los meses de noviembre y diciembre, las curvas alcanzan los puntos de mayor diferencia entre sí, llegando a diferencias de 0,05 en el índice EVI.



**Figura 3.** Dinámica estacional media de EVI del periodo 2001-2013 del PN Alhucemas (rojo) y el SIBE Tres Forcas(azul), considerando la totalidad de su superficie. La zona sombreada representa la desviación estándar de cada curva. Los compuestos marcan la secuencia temporal, desde Enero (1) a Diciembre (23).

Las curvas estacionales por usos (Figura 4), elaboradas con la selección de píxeles, siguen una dinámica similar pero con valores de EVI más altos en Tres Forcas para los usos de bosque, cultivos y matorral denso. Existe una diferencia casi constante en las curvas a lo largo del año, exceptuando el periodo de crecimiento en los cultivos (compuestos 1 al 5, coincidiendo con los meses de invierno) donde la diferencia se hace más grande que el resto del año. La dinámica y los valores para el matorral disperso fueron prácticamente idénticos para ambas zonas, diferenciándose únicamente en una mayor dispersión de los datos entre años de los datos en Alhucemas, diferencia que también se da en el resto de usos. Los máximos de las curvas (alrededor de 0,3) se dieron en el bosque y en el cultivo, mientras los mínimos se recogieron en los cultivos, con un índice EVI de 0,15 o algo menor.



**Figura 4.** Dinámica estacional media de EVI de cada uso del suelo del periodo 2001-2013 del PN Alhucemas(rojo) y el SIBE Tres Forcas (azul), considerando los píxeles-control seleccionados. La zona sombreada representa la desviación estándar de cada curva. Los compuestos marcan la secuencia temporal, desde Enero (1) a Diciembre (23).

### 1.2. Atributos funcionales

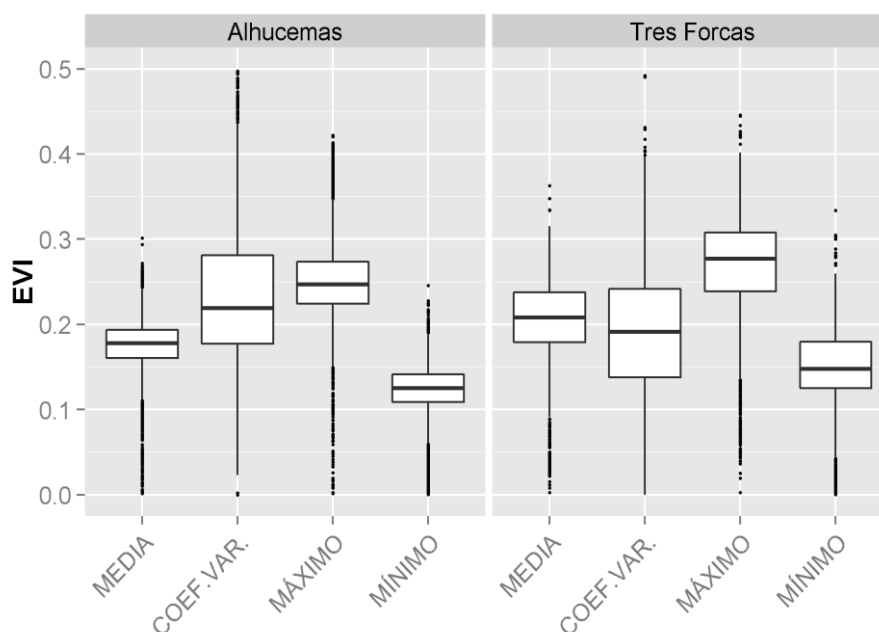
Los atributos funcionales, en líneas generales, presentan unos valores medios más altos en el parque de Tres Forcas que Alhucemas, rondando en más de  $\frac{3}{4}$  de su extensión el valor de 0,175 (Figuras 5 y 7), mientras en Alhucemas este valor se sitúa entre 0,1-0,15. En ambos casos, la respuesta de la media de EVI aumenta según nos alejamos de la costa, ya que esta franja rara vez representa valores de EVI superiores a 0,1 (Figuras 5 y 8).

Sin embargo, el coeficiente de variación estacional sigue patrones diferentes en cada parque, ya que mientras en Tres Forcas sigue un ligero gradiente positivo costa-interior, en Alhucemas este patrón se revierte, siendo las zonas frontera las que mayor variación presentan. Las medianas y la diferencia entre los percentiles 50 y 75 fueron bastante similares en ambas zonas (mediana en torno a 0,2 y rango intercuartílico (percentil 75-percentil 25) alrededor de 0,1).

Los máximos también tienen a las zonas costeras como representantes de los valores más bajos. En el resto de sus áreas, Tres Forcas posee una mayor extensión con valores de 0,3 o mayores, mientras que en Alhucemas estas zonas son mucho menores en relación a la extensión del parque. En éste último se encuentra algún enclave en el límite sur donde los

máximos no llegaron a 0,2, coincidiendo con valores de la media muy bajos en esa misma zona.

Por último, los mínimos fueron muy homogéneos en Alhucemas, moviéndose entre 0-0,15 en la mayoría de su superficie. En Tres Forcas existe una mayor heterogeneidad y valores más altos, llegando en enclaves muy concretos a valores de 0,3, aunque el valor más repetido se mueve entre 0,1 y 0,2.



**Figura 5.** *Dispersión de valores de los atributos funcionales del PN Alhucemas y el SIBE Tres Forcas considerando toda su superficie. La caja representa la mediana (línea central) y los percentiles 25 y 75 (líneas externas) de la muestra. Los “bigotes” indican los valores máximo y mínimo de la distribución mientras los puntos señalan los “outliers” o valores anómalos.*

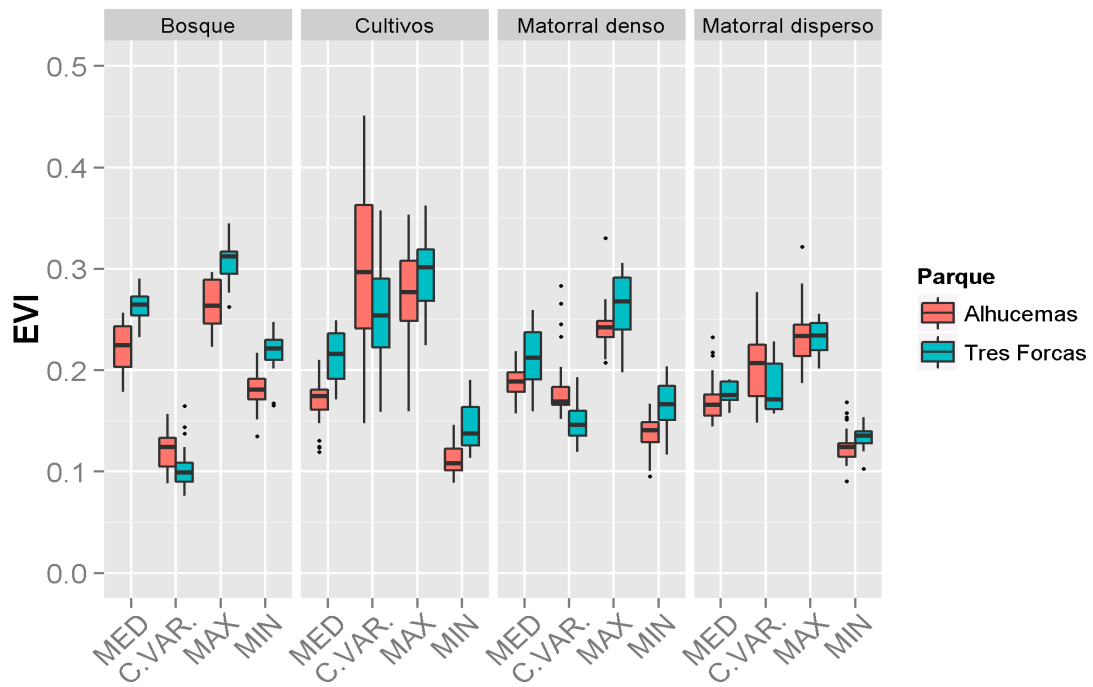
Por usos del suelo (Figura 6) la media de EVI de todos los usos fue más alta en Tres Forcas, alcanzándose la mayor diferencia para este atributo entre los parques en los cultivos. Las medias más altas se registraron en los bosques, mientras las más bajas se dieron en el matorral disperso y en los cultivos de Alhucemas.

El cultivo presentó los valores más altos de coeficiente de variación y de dispersión para este atributo con bastante diferencia respecto al bosque, que mostró la menor variación interestacional. Este atributo tuvo valores más altos en todas las coberturas en Alhucemas.

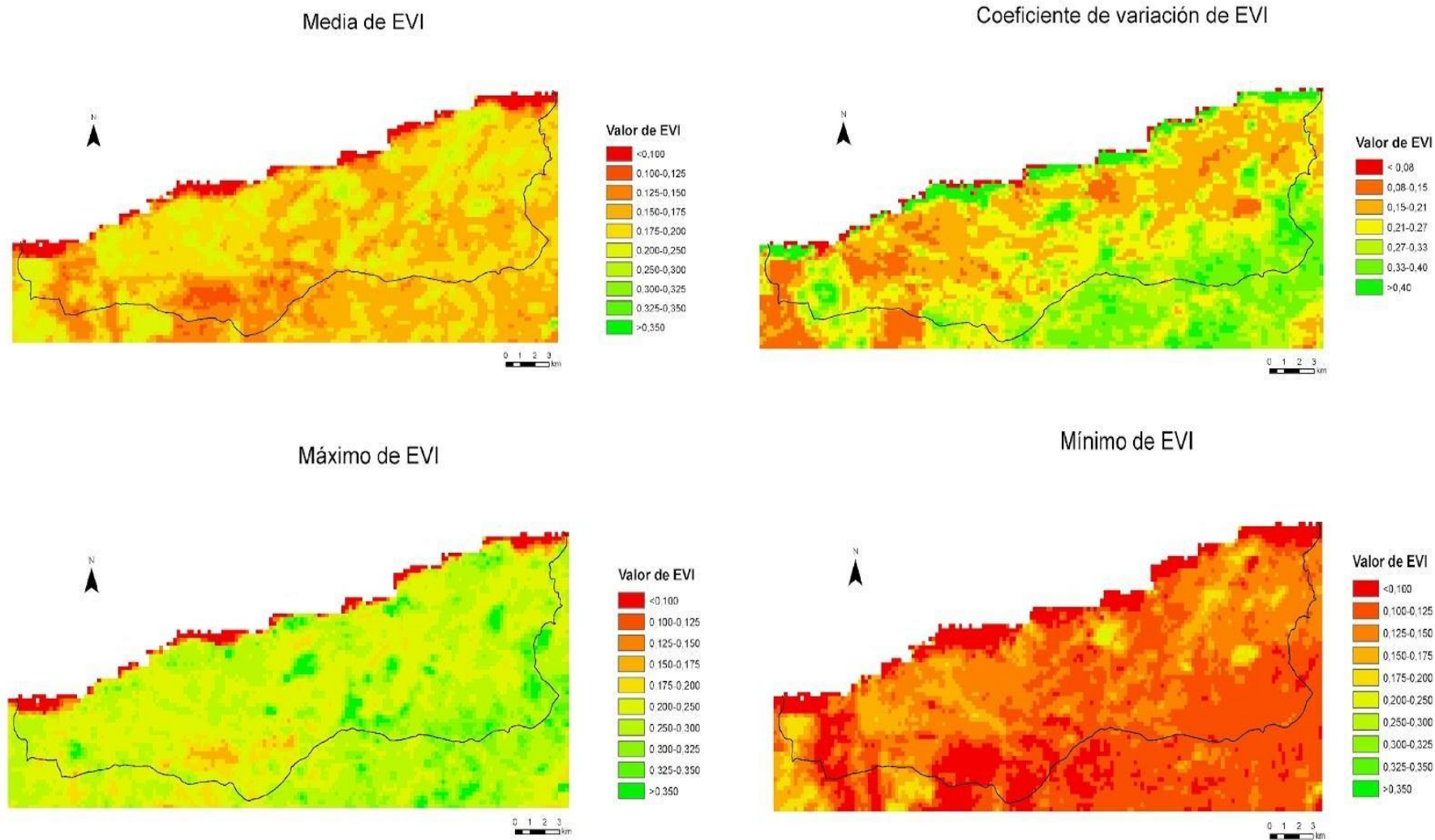
El atributo máximo también muestra medianas más altas para Tres Forcas salvo para el matorral disperso, en el que ambos parques coinciden tanto en la mediana como en el percentil 75. La respuesta es bastante similar por parques para el bosque y el cultivo, reportando éste último una mayor dispersión de los valores en ambos parques.

Por último, los mínimos más altos corresponden al bosque mientras que los más bajos los comparten el matorral disperso y los cultivos, éste último como consecuencia de su alta variabilidad. De nuevo el parque de Tres Forcas está por encima de Alhucemas en todos los usos analizados.

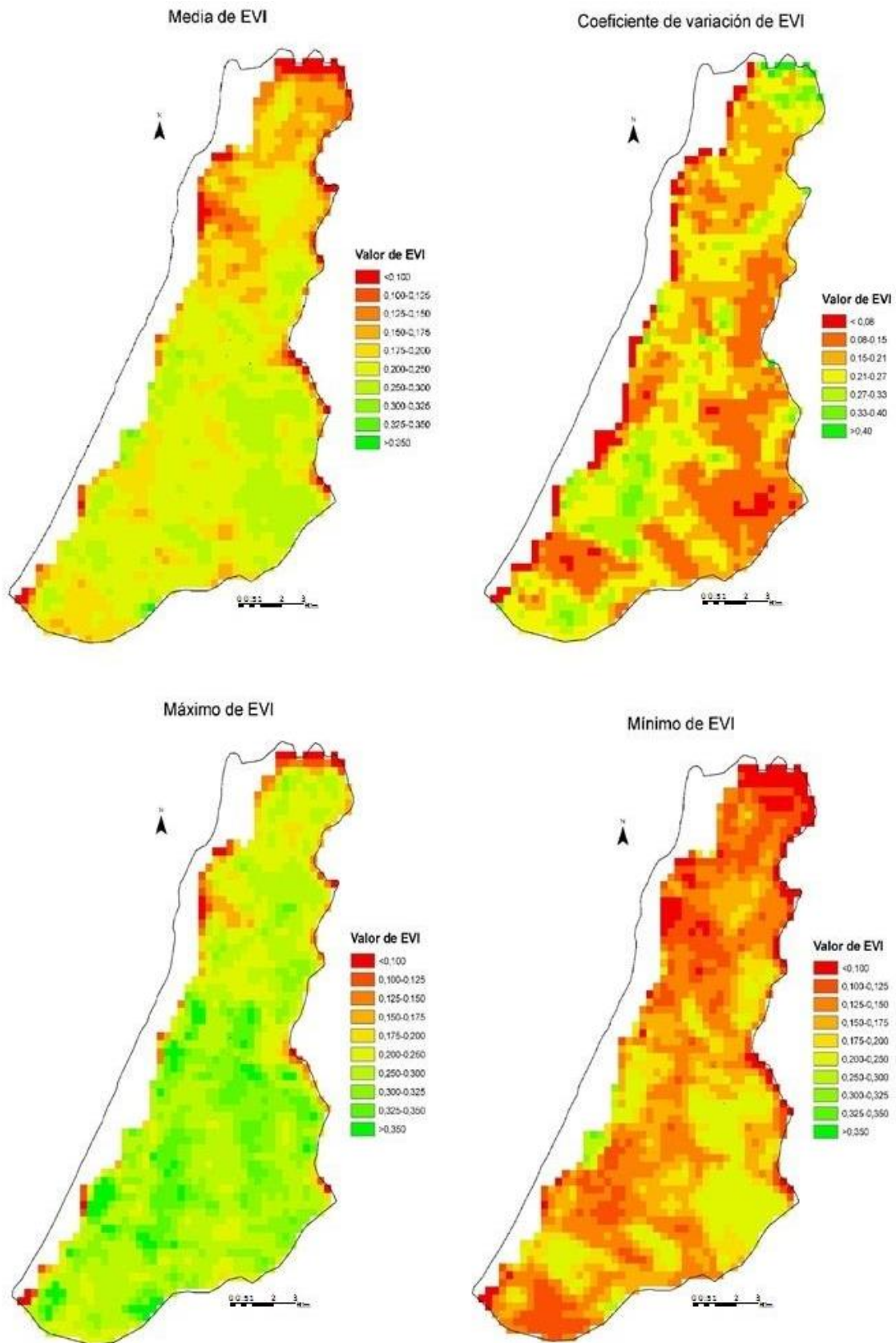




**Figura 6.** *Dispersión de valores de los atributos funcionales (MED=Media; C. VAR.=Coeficiente de variación; MAX= Máximo; MIN= Mínimo) de los parques clasificados por usos del suelo a partir de los píxeles-control. La caja representa la mediana (línea central) y los cuartiles 25 y 75 (líneas externas) de la muestra. Los “bigotes” indican los valores máximo y mínimo de la distribución mientras los puntos señalan los “outliers” o valores anómalos.*



**Figura 7.** Distribución espacial de valores de los atributos media, coeficiente de variación, máximo y mínimo del índice EVI en el PN de Alhucemas para la serie temporal 2001-2013. En color rojo se representan los valores más bajos mientras que el verde indica valores más altos.

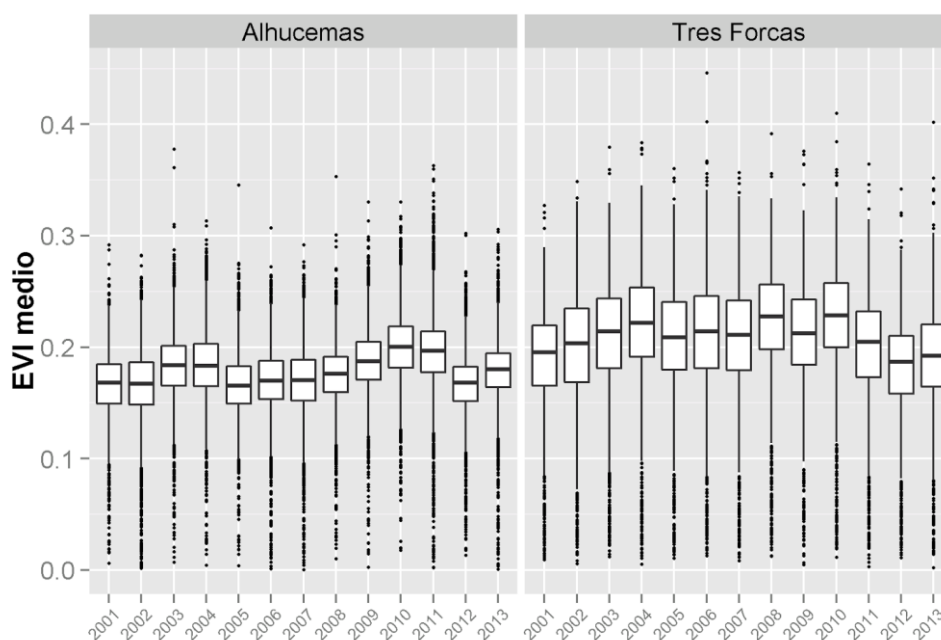


**Figura 8.** Distribución espacial de valores de los atributos media, coeficiente de variación, máximo y mínimo del índice EVI en el SIBE de Tres Forcas para la serie temporal 2001-2013. En color rojo se representan los valores más bajos mientras que el verde indica valores más altos.

### 1.3. Variabilidad en la serie temporal

La curva descrita por las medianas de las cajas de la Figura 9 presenta patrones diferentes para cada parque. Tres Forcas describe una campana con los valores más altos (0,2 de EVI para el año 2010) durante el periodo 2004-2010, situado en el centro de la serie. Mientras, en Alhucemas estos máximos se desplazan más adelante hacia los años 2009, 2010 y 2011, alcanzando valores de 0,22 aproximadamente en el año 2010, coincidiendo con el momento del máximo de Tres Forcas. Los mínimos de la serie se situaron en 0,17 para Alhucemas y en 0,18 para Tres Forcas, coincidiendo también ambos datos en el año 2012.

El tamaño de las cajas y la longitud de los bigotes indican una mayor variabilidad de los valores para Tres Forcas. Los "outliers" ambos parques tienen una elevada densidad por debajo del percentil 25, mientras que los "outliers" por encima son muy escasos en Tres Forcas. En ambos parques estos puntos llegan a valores de EVI que rondan o superan 0,4.



**Figura 9.** Diferencias interanuales del EVI medio para cada parque y año de la serie temporal 2001-2013. La caja representa la mediana (línea central) y los percentiles 25 y 75 (líneas externas). Los "bigotes" indican los valores máximo y mínimo de la distribución, mientras los puntos señalan los "outliers" o valores anómalos.

## **2. Análisis de tendencias**

### 2.1. Tendencias de los atributos

El mapa de la Figura 10 señala que Alhucemas mostró para el atributo media pendientes positivas en casi todo su territorio, ya que únicamente se hallan pendientes menores que -0,004 en la zona costera. El valor predominante en un 75% aproximadamente del parque se situó entre 0 y 0,002, con regiones que superan este último valor y pueden alcanzar 0,004. Por su parte, en Tres Forcas (Figura 11) se localizan pendientes de hasta -0,004, situándose las pendientes positivas en el extremo más nororiental con valores de 0,002, aunque se reparten en un 50% aproximadamente del territorio para negativas y positivas.

Para el coeficiente de variación existió mucha más heterogeneidad espacial en Alhucemas, aunque las pendientes positivas tuvieron mayor peso (en torno a 0,002 la mayoría de pendientes positivas), mientras en Tres Forcas la tónica es la contrario con predominancia de los valores negativos entre -0,002 y -0,01.

En las tendencias de los máximos se denota la misma situación que para el atributo de la media, potenciándose las tendencias positivas en Alhucemas con mayoría de píxeles con valores que superan el 0,004, localizados en tres áreas a lo largo del límite sur del parque. En el resto del área del parque de nuevo se encontró bastante heterogeneidad pero con predominancia de tendencia ligeramente positivas, entre 0 y 0,002. En Tres Forcas destaca una región alargada en la costa occidental con pendientes fuertemente negativas, cambiando estas a fuertemente positivas si avanzamos en sentido sur. También se dio un efecto “salpimentado” en el resto del parque sin destacar ningún rango de valores en particular.

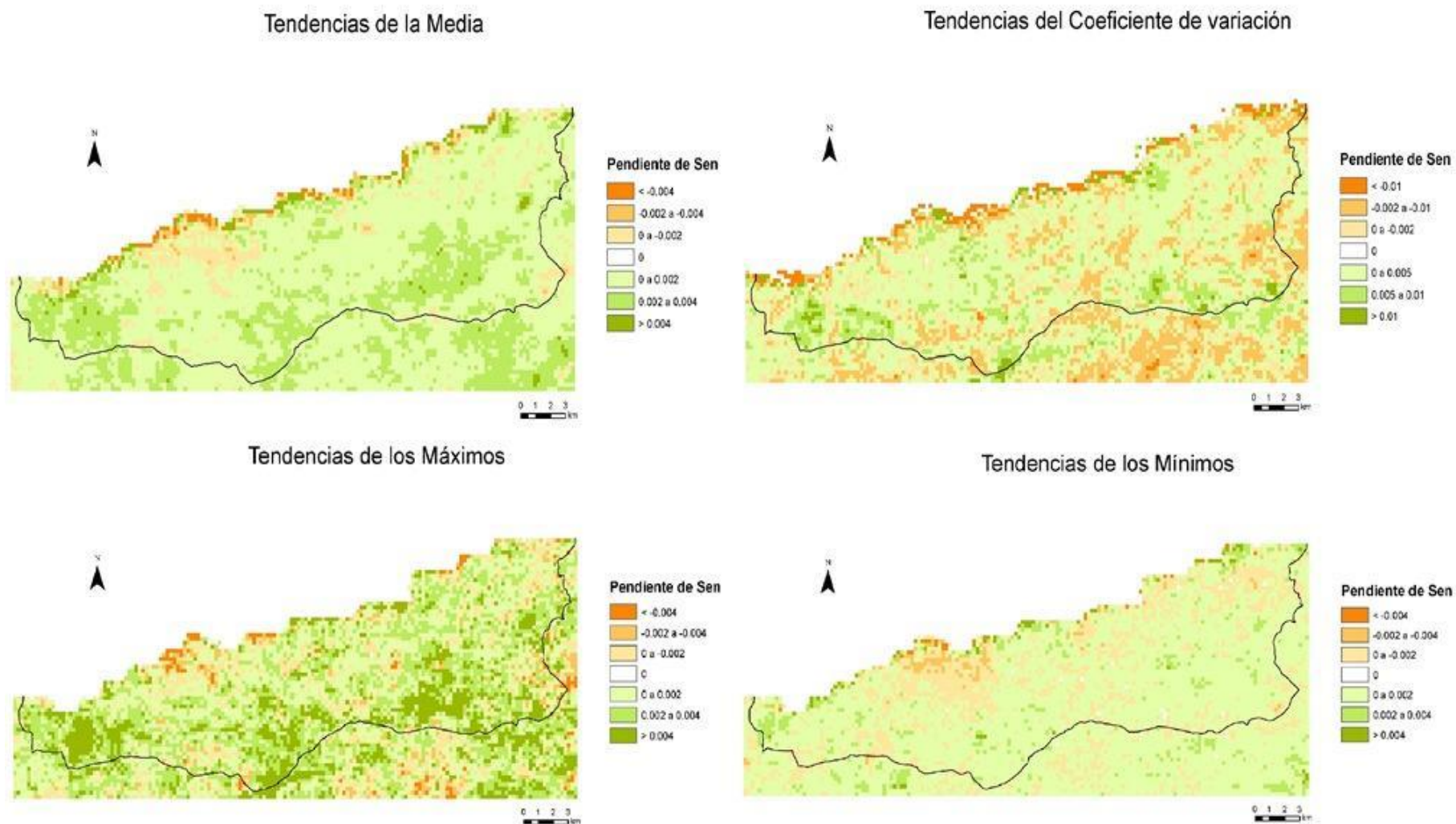
Por último, en el atributo de s mínimos destacan en ambos parques por su escasa pendiente, siendo positiva (entre 0 y 0,002) en Alhucemas y negativa (entre 0 y -0,002) en Tres Forcas para cerca del 90% de los píxeles en ambos. En Alhucemas se destacan las pendientes negativas en una región costera cercana al límite occidental del parque. Para Tres Forcas las tendencias siguen un patrón norte-sur, pasando las pendientes de positivas a negativas.

Los aspectos significativos de las Figuras 10 y 11 se confirman en la Tabla 2, de la que destacan la notable diferencia de tendencias significativas entre parques en favor de Alhucemas y la mayor presencia de pendientes positivas significativas en Alhucemas y de negativas en Tres Forcas, siendo esta predominancia más notable en Alhucemas. También sobresale que para Tres Forcas, dentro de la predominancia de tendencias negativas el atributo mínimo registró mayor número de tendencias significativas positivas que negativas (44 frente a 28).

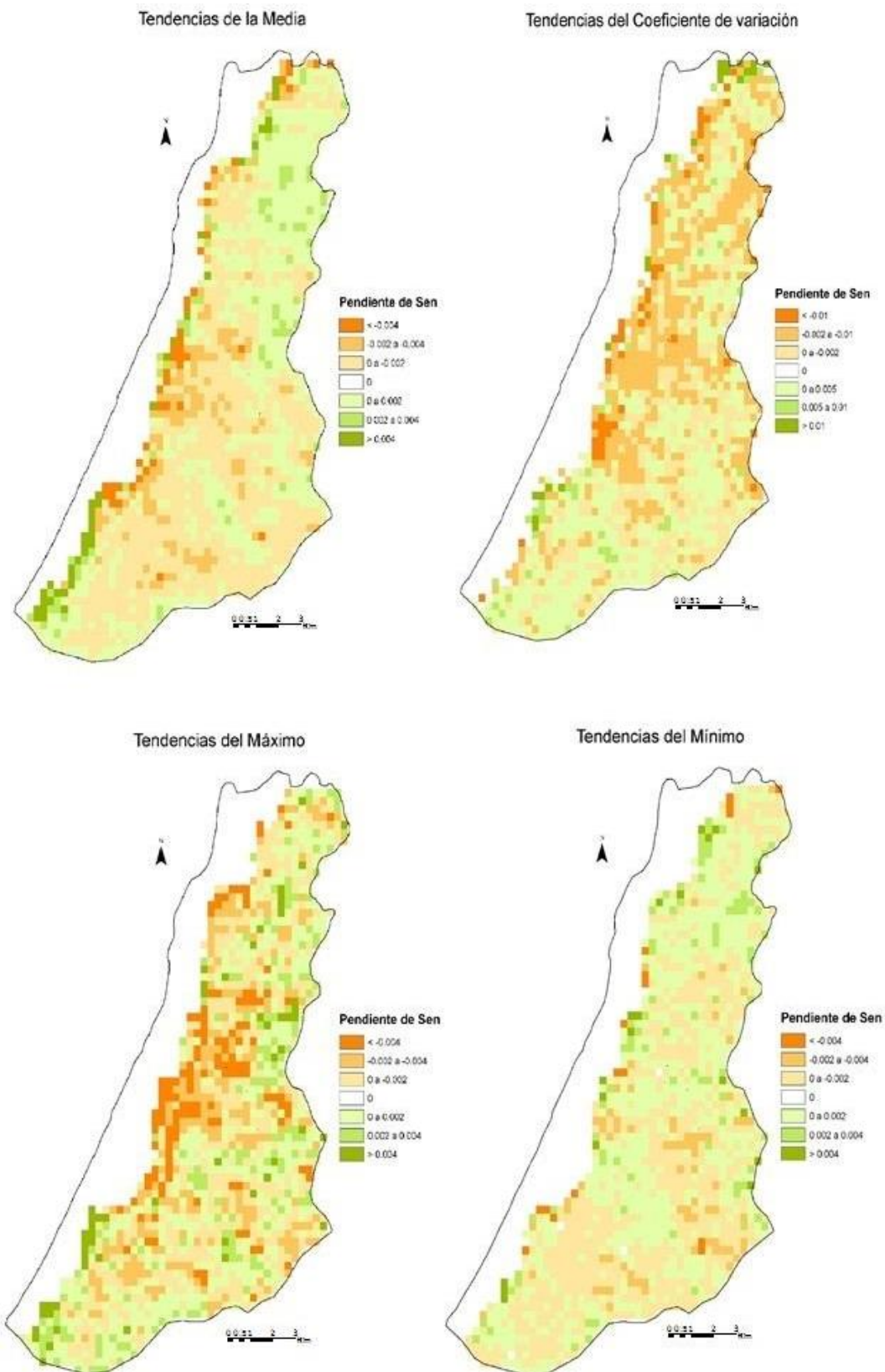
**Tabla 2.** Tabla resumen de las pendientes significativas totales para los atributos funcionales media, coeficiente de variación, máximo y mínimo de ambos parques. Se detallan tanto pendientes positivas (+) y negativas (-) como la suma de ambas de forma absoluta y relativa, en relación al total de píxeles de cada parque.

Parque	Nº de píxeles	Atributo	Píxeles significativos (+)		Píxeles significativos (-)		% píxeles significativos
			Nº	%	Nº	%	
Alhucemas	5250	Media	1038	19.77	5	0.10	19.87
		Máximo	313	5.96	9	0.17	6.13
		Mínimo	454	8.65	8	0.15	8.80
		sCV	92	1.75	23	0.44	2.19
Tres Forcas	1980	Media	26	1.31	36	1.82	3.13
		Máximo	15	0.76	32	1.62	2.37
		Mínimo	44	2.22	28	1.41	3.64
		sCV	12	0.61	58	2.93	3.54





**Figura 10.** Distribución espacial de las pendientes de Sen de los atributos media, coeficiente de variación, máximo y mínimo del índice EVI en el PN de Alhucemas para la serie temporal 2001-2013. En color naranja se representan las pendientes negativas mientras que el verde indica pendientes positivas.



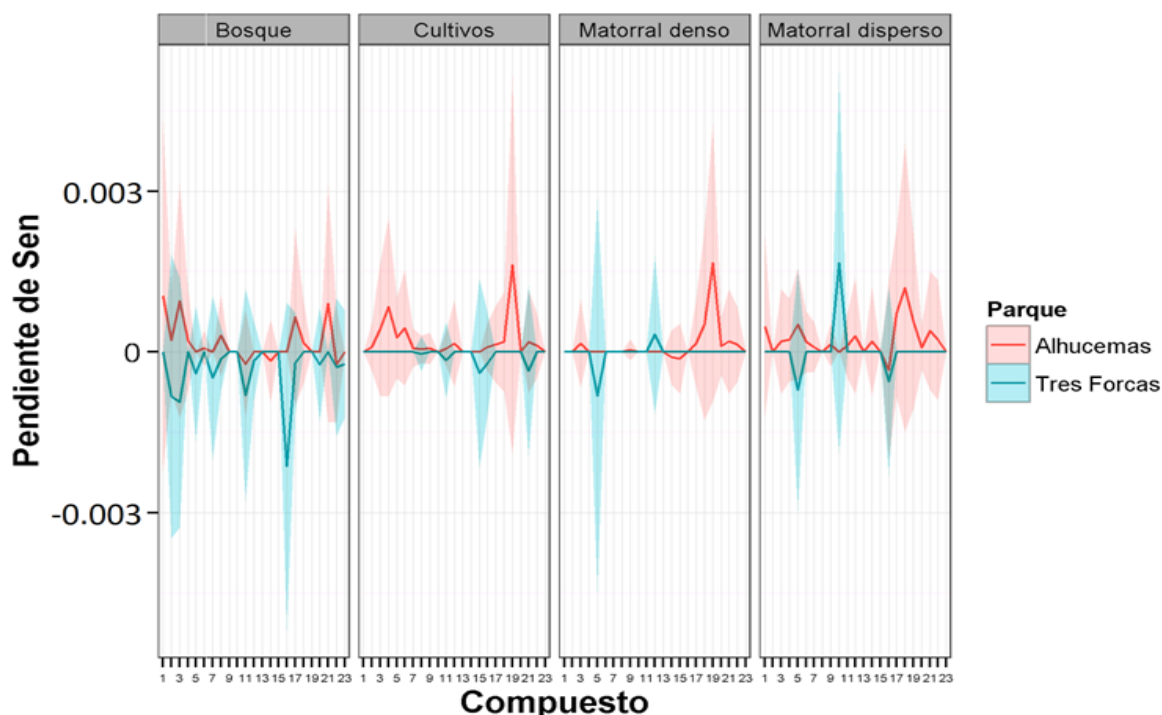
**Figura 11.** Distribución espacial de las pendientes de Sen de los atributos media, coeficiente de variación, máximo y mínimo del índice EVI en el SIBE de Tres Forcas para la serie temporal 2001-2013. En color naranja se señalan las pendientes negativas mientras que el verde indica aquellas pendientes que fueron positivas.

## 2.2. Tendencias de las curvas estacionales

En el gráfico de la Figura 12 se observa una dicotomía en el tipo y número de tendencias de cada parque. Alhucemas es claramente dominado por pendientes positivas y presenta mayor número de tendencias, mientras que en Tres Forcas abundan las negativas y el número de píxeles con tendencias es menor (Tabla 2). La mayor desviación estándar en Alhucemas indica una mayor dispersión de los datos de tendencias. En general, las tendencias en Alhucemas se concentran en 2 periodos que comprenden los compuestos del 1 al 10 (enero a abril) y del 17 al 23 (octubre a diciembre), coincidiendo con las etapas de fin de crecimiento y decrecimiento y de crecimiento respectivamente.

Para el resto del año medio presencia de ligeras pendientes, destacando las negativas que tienen lugar en el compuesto 16 para los matorrales justo antes del comienzo del periodo de crecimiento. Los usos de bosque y cultivos tienen mayor cantidad de pendientes positivas en estos periodos, mientras el matorral denso apenas cuenta con pendiente en la primera mitad del año. Por último, el matorral disperso posee pendientes positivas a lo largo de todo el año, sobresaliendo el pico que tiene lugar en el compuesto 18, coincidiendo con el inicio de la etapa de crecimiento y el otoño. Este pico se repite también en los usos de cultivos y matorral denso, donde es mucho más fuerte. Estos 2 usos son los que mayor porcentaje de píxeles positivos significativos poseen, con 27,66% y un 25,06% respectivamente (Tabla 3).

En Tres Forcas, solo el matorral disperso y el bosque siguen la distribución de pendientes de Alhucemas, destacando una pendiente negativa en cada periodo para el matorral y un número de tendencias relativamente similar en el uso del bosque. Los cultivos sólo presentan pendientes negativas muy débiles en la segunda mitad del año (compuestos 15 y 21), mientras el matorral denso hace lo propio en la primera mitad del año (compuesto 5). Por su parte, el bosque presenta tendencias negativas a lo largo de todo el año, destacando 2 picos en los compuestos 3 y 17. Sin embargo, la Tabla 3 nos indica que en cuanto a significancia sólo existe una pendiente significativa negativa (3) más que las positivas (2).



**Figura 12.** Gráfico de las pendientes de la curva estacional media de los píxeles-control para los usos del suelo en cada parque. La línea de color representa la pendiente de la curva anual y la zona sombreada señala la desviación estándar de ésta. Los compuestos marcan la secuencia temporal, desde Enero (1) a Diciembre (23).

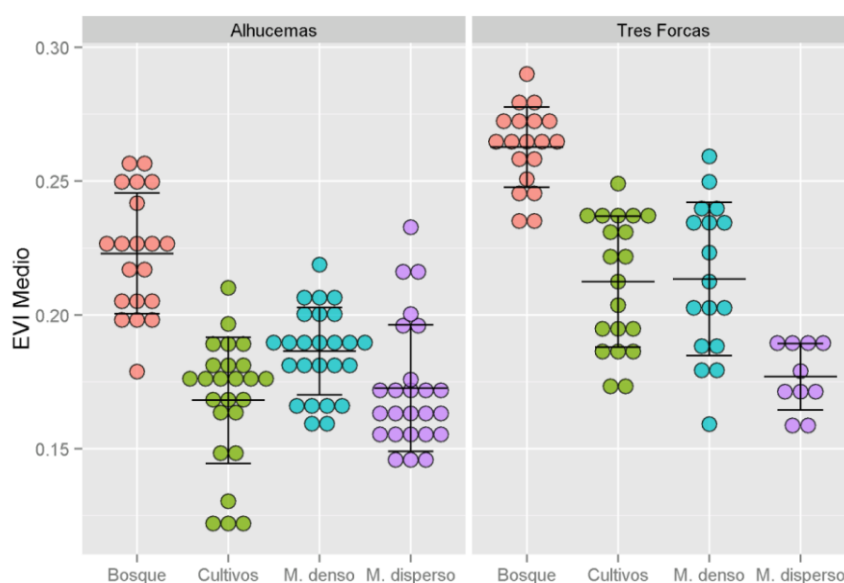
**Tabla 3.** Tabla resumen de las pendientes significativas totales para los usos del suelo de ambos parques. Se detallan tanto pendientes positivas (+) y negativas (-) como la suma de ambas de forma absoluta y relativa, en relación al total de píxeles de cada uso, apuntando también la superficie absoluta y relativa de cada uso respecto al total del parque.

Parque	Uso del suelo	Nº de píxeles por uso	% de píxeles	Píxeles significativos (+)		Píxeles significativos (-)		% píxeles significativos
				Nº	%	Nº	%	
Alhucemas	Bosque	118	2.25	16	13.56	0	0.00	13.56
	Cultivos	1229	23.41	340	27.66	0	0.00	27.66
	M. denso	944	17.98	54	5.72	0	0.00	5.72
	M. disperso	893	17.01	224	25.08	0	0.00	25.08
	Total	3184	60.65	634	72.03	0	0.00	72.03

Parque	Uso del suelo	Nº de píxeles por uso	% de píxeles	Píxeles significativos (+)		Píxeles significativos (-)		% píxeles significativos
				Nº	%	Nº	%	
Tres Forcas	Bosque	165	8.33	2	1.21	3	1.82	3.03
	Cultivos	357	18.03	0	0.00	2	0.56	0.56
	M. denso	128	6.46	1	0.78	0	0.00	0.78
	M. disperso	64	3.23	0	0.00	0	0.00	0.00
	Total	714	36.06	3	1.99	5	2.38	4.37

## 2. Anomalías de la Media de EVI

El comportamiento de la media de EVI por usos, que nos va a permitir establecer el comportamiento “normal” de la clase, se muestra en la Figura 1. El gráfico muestra una dispersión de valores bastante constante en Alhucemas, mientras en Tres Forcas destaca una fuerte reducción de esta dispersión para bosque y matorral disperso. También es destacable el comportamiento casi análogo de los cultivos y el matorral disperso en este parque. En ambos casos, el bosque es el uso con la media más alta (0,22 en Alhucemas y 0,26 en Tres Forcas), mientras las medias más bajas las marcan los cultivos en Alhucemas y el matorral disperso en Tres Forcas, con valores en torno a 0,17 de EVI en ambos casos. Comparando por usos, salvo el matorral disperso para el cual hay mayor desviación en Alhucemas pero un valor de la media similar, los usos en Tres Forcas responden de forma más elevada, con una diferencia en torno a 0,05 en el índice EVI.



**Figura 13.** Anomalías espaciales de EVI medio de los píxeles-control para cada uso y parque en la serie temporal 2001-2013. Cada punto se corresponde con un píxel, mientras las líneas determinan el valor de medio de cada muestra de píxeles (líneas internas) y el resultado de calcular la media  $\pm$  una desviación estándar (líneas externas).

Observando la Tabla 4 y los mapas (Figuras 14 y 15) se detecta una alta estabilidad (gran cantidad de píxeles no anómalos) para casi todos los usos en ambas zonas, puesto que a excepción de los matorrales de Tres Forcas el resto de usos superan el 60% de píxeles que no muestran anomalía, alcanzando el matorral disperso de Alhucemas el 80% de píxeles no anómalos.

En cuanto a la distribución espacial, el bosque en Alhucemas se distribuye en 3 manchas de escasa superficie. Dos de éstas, situadas en el extremo occidental, presentan estabilidad por un lado y anomalía negativa en más del 75% de píxeles para la otra mancha. Por contra, la región de bosque localizada al este del parque es relativamente positiva, pues también existen píxeles no anómalos. En Tres Forcas el panorama es muy similar, variando la localización, posicionándose la mayor agregación de píxeles negativos al suroeste, mientras que la mancha estable lo hace al sureste, seguida hacia el norte por la región con anomalía positiva.



Los cultivos siguen un patrón de cambio de anomalía oeste-este en Alhucemas desde negativa a positiva, con gran densidad de píxeles sin anomalía en el extremo oriental. La cercanía al mar también parece influir positivamente, ya que 2 regiones situadas a una misma longitud difieren en sus anomalías, siendo más positiva la región situada a una latitud más septentrional y cercana al mar. Por su parte, en Tres Forcas se observa una región de cultivos muy dispar en las anomalías al sureste, aunque la mancha más extensa localizada en el centro del parque muy estable. La costa influye de forma positiva en la costa occidental mientras lo hace negativamente en la fachada marítima oriental.

En Alhucemas el matorral denso destaca por su alta estabilidad, sobre todo en la mitad occidental. Aquí las anomalías negativas se posicionan en los límites del parque, ocupando las positivas el interior del parque. En la mitad oriental se detecta una mayor heterogeneidad de las anomalías, aunque con predominio de los píxeles no anómalos. En Tres Forcas existe un ligero patrón de cambio de anomalía de positivas a negativas en sentido sur-norte, siendo un cambio progresivo con píxeles estables de por medio.

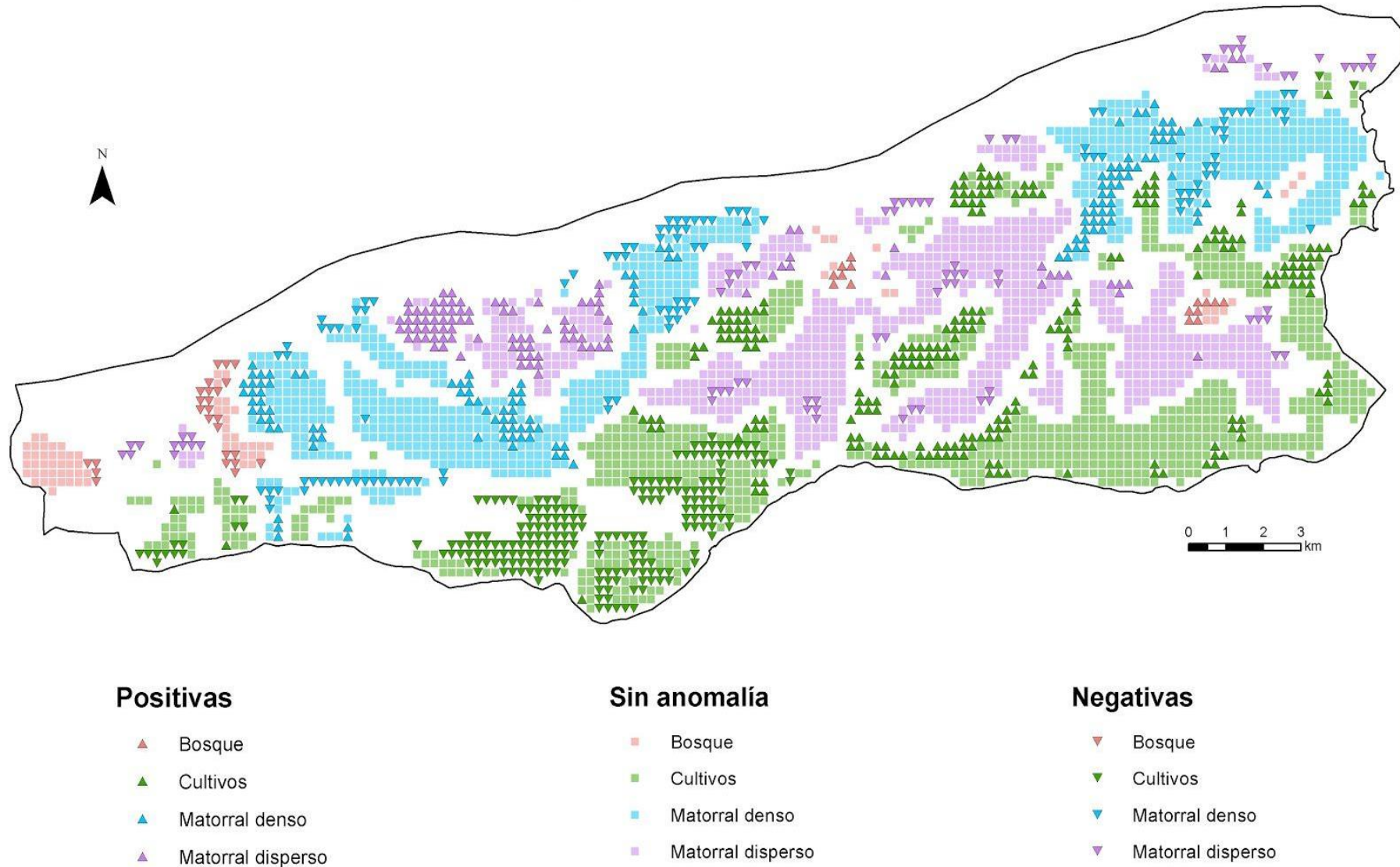
Por último, el matorral disperso es altamente estable en el interior de Alhucemas, localizando la mayoría de anomalías a lo largo de la costa. Éstas no siguen un patrón en particular, ya que las regiones más próximas a los límites y a la costa son más negativas, exceptuando una región limítrofe con la costa que es altamente positiva al acumular la mayoría de los píxeles positivos del matorral disperso. En Tres Forcas se repite el patrón sur-norte del matorral denso, aunque dada la escasa presencia de este uso en esta zona y más concretamente de anomalías positivas (<10%) no podemos confirmar esta tendencia.

**Tabla 4.** Tabla resumen de anomalías espaciales. Se detalla el número de píxeles (Nº de píx.) que presentan o no anomalía en cada uso y parque y su peso en porcentaje (% de píx.) en relación al total de píxeles de ese uso en cada parque.

Parque	Uso del suelo	Anomalía	Nº de píx.	% de píx.
Alhucemas	Bosque	Positiva	15	12.71
		Sin anomalía	78	66.10
		Negativa	25	21.19
		<b>Total</b>	<b>118</b>	<b>100.00</b>
	Cultivos	Positiva	242	19.71
		Sin anomalía	763	62.13
		Negativa	223	18.16
		<b>Total</b>	<b>1228</b>	<b>100.00</b>
	Matorral denso	Positiva	137	14.72
		Sin anomalía	687	73.79
		Negativa	107	11.49
		<b>Total</b>	<b>931</b>	<b>100.00</b>
	Matorral disperso	Positiva	101	11.31
		Sin anomalía	717	80.29
		Negativa	75	8.40
		<b>Total</b>	<b>893</b>	<b>100.00</b>
Tres Forcas	Bosque	Positiva	19	11.66
		Sin anomalía	110	67.48
		Negativa	34	20.86
		<b>Total</b>	<b>163</b>	<b>100.00</b>
	Cultivos	Positiva	72	20.75
		Sin anomalía	223	64.27
		Negativa	52	14.99
		<b>Total</b>	<b>347</b>	<b>100.00</b>
	Matorral denso	Positiva	19	16.52
		Sin anomalía	63	54.78
		Negativa	33	28.70
		<b>Total</b>	<b>115</b>	<b>100.00</b>
	Matorral disperso	Positiva	6	9.68
		Sin anomalía	28	45.16
		Negativa	28	45.16
		<b>Total</b>	<b>62</b>	<b>100.00</b>

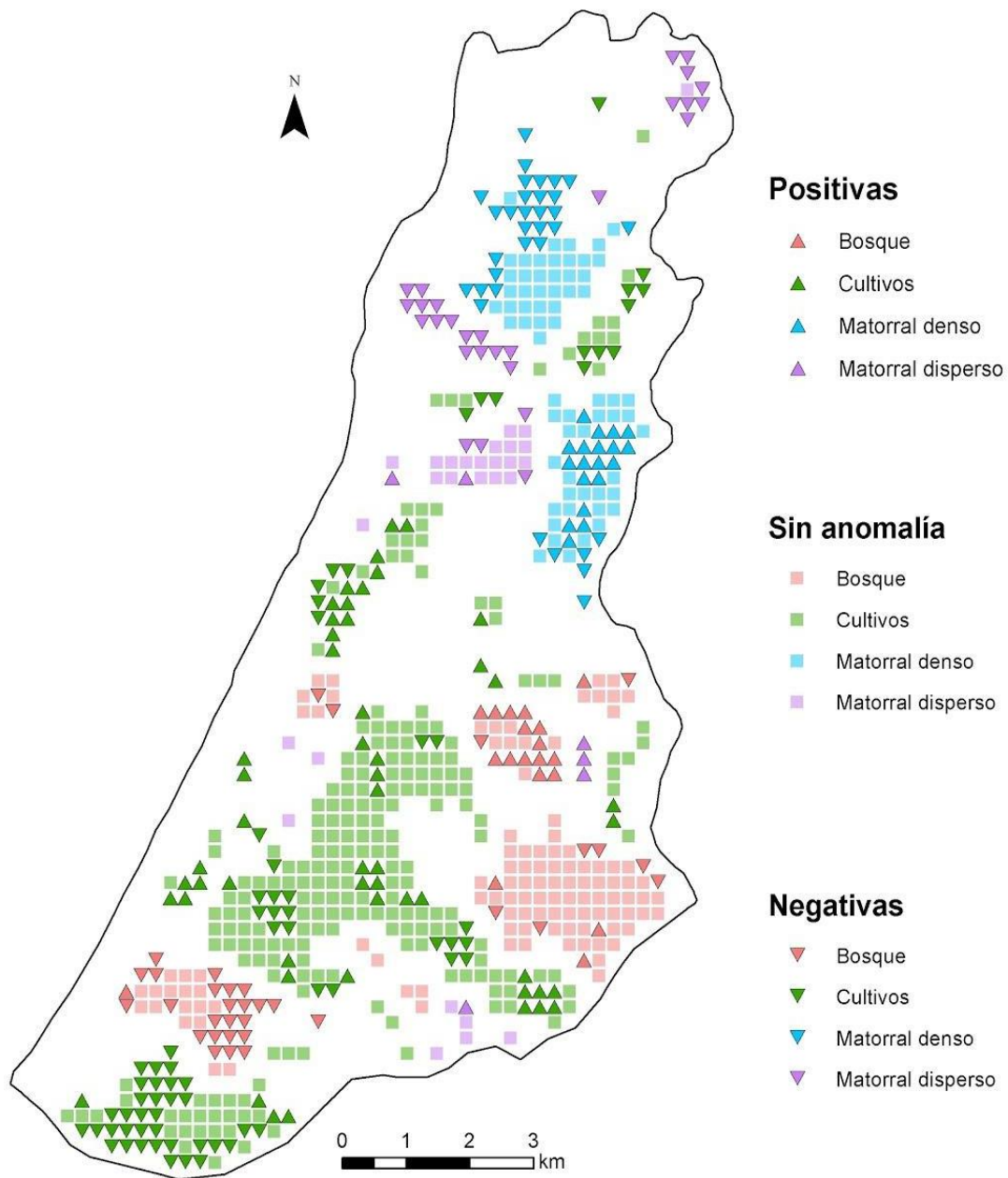


# Anomalías espaciales en Alhucemas



**Figura 14.** Distribución espacial de las anomalías de la media de EVI para el periodo 2001-2013 en el PN de Alhucemas. Los triángulos representan píxeles con anomalía positiva (triángulo apuntando hacia arriba) o negativa (triángulo apuntando hacia abajo), mientras los cuadrados señalan aquellas zonas que mostraron un comportamiento dentro del intervalo definido como "normal".

## Anomalías espaciales en Tres Forcas



**Figura 15.** Distribución espacial de las anomalías de la media de EVI para el periodo 2001-2013 en el SIBE de Tres Forcas. Los triángulos representan píxeles con anomalía positiva (triángulo apuntando hacia arriba) o negativa (triángulo apuntando hacia abajo), mientras los cuadrados señalan aquellas zonas que mostraron un comportamiento dentro del intervalo definido como "normal".

### Discusión

Las curvas estacionales resultantes del análisis del índice EVI siguieron una dinámica muy similar a las registradas por [Höpfner et al. 2011](#) para el noroeste de Marruecos, lo cual

indica una similitud entre las fachadas atlántica y mediterránea de la costa marroquí y es corroborado en [Sobrino et al. 2000](#), que detecta una dinámica muy similar (incluso ligeramente superior para la costa mediterránea) en el periodo Septiembre 1992-Agosto 1993. Esta curva es la típica de los ambientes semiáridos del mediterráneo occidental, con un máximo que se alcanza a final de invierno y comienzo de primavera y un mínimo localizado en los meses de Agosto y Septiembre. La etapa de crecimiento se corresponde con el periodo de Octubre a Diciembre e incluso Enero y la etapa de decrecimiento se sitúa en los meses de Abril, Mayo, Junio y Julio.

Dentro de esta similitud destaca que en ambos ambientes el bosque registra momento del máximo de actividad fotosintética relativamente largo y en el cual la media de EVI se estabiliza (Enero-mediados de Marzo)

En comparación con zonas semiáridas del sureste ibérico ([Cabello et al. 2012b](#)) también resulta en una buena relación de las curvas de ambos lugares. Esta dinámica corresponde a la característica de las zonas semiáridas del Mediterráneo occidental, con el momento del máximo localizado a finales de invierno y principio de la primavera, como se demuestra para las zonas semiáridas del sureste ibérico en [Alcaraz Segura et al. 2006](#) y en [Martínez et al. 2009](#).

En lo que se refiere a las curvas estacionales, que la curva de Tres Forcas posea valores más altos que la de Alhucemas puede estar relacionado con el grado de degradación/recuperación y el momento en el que se produjeron estos impactos, y al mismo tiempo estar relacionados con las actuales tendencias del funcionamiento del ecosistema. Esta particularidad también explicaría la mayor presencia de tendencias positivas en Alhucemas que en Tres Forcas, por una mayor lejanía del parque del óptimo ecosistémico.

Para los atributos funcionales los datos se ajustan bastante a los registrados por [Alcaraz Segura et al. 2009a](#) para los matorrales semiáridos mediterráneos del sureste de la península Ibérica, con valores medios de EVI rondando 0,2, máximos en torno a 0,25-0,3 y mínimos localizados en 0,15. Sólo el atributo del coeficiente de variación difiere respecto a los registrados en este trabajo, lo cual también se constata en [Alcaraz Segura et al. 2006](#), lo que sugiere una mayor estacionalidad de la vegetación para el ambiente semiárido ibérico. Esto puede ser debido a los diferentes periodos estudiados (1981-1999 y 2001-2013) o bien a un cambio en los usos del suelo en el sureste semiárido ibérico.

Es de destacar la coincidencia en ambos parques del momento del máximo absoluto (2010) y del mínimo absoluto (2012). Esta coincidencia puede estar asociada a la fuerte anomalía positiva en las precipitaciones dadas para el trimestre Enero, Febrero y Marzo de 2010 como se indica en el trabajo de [Ezzine et al. 2014](#) a través del índice *Standardized Precipitation Index* (SPI, Índice de Precipitación Estandarizado). Esta relación también se observa para años como 2005 y 2001 en los que se dieron mínimos relativos que coinciden con trimestres de anomalías negativas en el SPI.

Lo expuesto anteriormente contradice parcialmente lo expuesto en [Cabello et al. 2012b](#), donde se sugiere que un incremento en las precipitaciones no se traduce en aumento de la media del índice NDVI, aunque establece que esto sólo es observable en determinados sustratos.

En cambio, el mínimo de ambas zonas en 2012 no parece responder a este factor, ya que este año está catalogado como cercano a lo normal en cuanto a precipitación, sumado a la anomalía positiva que también se dio para el trimestre Abril, Mayo y Junio de 2011. Probablemente la temperatura, entre otros, fuese el factor más determinante para explicar este mínimo.

Llama también la atención el elevado porcentaje de tendencias positivas (aunque con escasa representación de tendencias estadísticamente significativas) encontradas en Alhucemas, lo que indica la consistencia del aumento de la productividad de los ecosistemas.

Respecto a estas tendencias también se establece una buena relación con el ambiente semiárido del sureste ibérico descrito por [Alcaraz Segura et al. 2006](#), con especial énfasis en las tendencias de Alhucemas. En ambas zonas las tendencias predominantes son de tipo positivo con valores situados entre 0 y 0,004. Por el contrario, el parque de Tres Forcas difiere de esta relación al no presentar un claro predominio de las tendencias positivas, siendo incluso más numerosas las negativas. Esto se puede explicar por lo apuntado en el apartado de las curvas estacionales acerca de que Tres Forcas puede estar más cerca del punto de equilibrio ecosistémico que Alhucemas, dando lugar a tendencias suaves negativas predominando sobre las positivas, aunque de nuevo hay que destacar que se tomaron periodos diferentes, por lo que a pesar de ser ambientes semiáridos el análisis temporal de momentos distintos por medio de tendencias puede recoger variaciones que hagan diferir los datos de ambos lugares.

Las Tablas 2 y 3 reflejan un número de tendencias significativas muy bajo (por debajo del 25%). Esta característica también se registró en el trabajo de [Martínez et al. 2009](#), con pocas tendencias significativas en el ambiente semiárido del sureste ibérico, localizándose éstas en zonas protegidas o de montaña. Esta similitud en los datos se ve reforzada por el empleo de un test para tendencias (Mann-Kendall estacional) y un p-valor (0,05) similares a los nuestros para determinar las tendencias significativas, aunque también emplea una serie temporal diferente. Además, en este mismo trabajo, señala esta falta de tendencias significativas como notable debido a que se trata de una zona muy modificada a lo largo del tiempo, lo cual coincide con el caso de Tres Forcas pero no así con el de Alhucemas. De esto se puede deducir una mejor respuesta ante las medidas de protección llevadas a cabo en Alhucemas respecto a Tres Forcas, pues la denominación de Parque Nacional de Alhucemas le da un grado de protección mayor que el de Tres Forcas.

Este grado de significación coincide con otras zonas, como en el caso del sureste de la península Ibérica donde [Cabello et al. 2012b](#), a pesar de fijar un p-valor más bajo ( $p=0,01$ ), obtuvo un número de píxeles con tendencia significativas muy bajo en relación a los píxeles totales. Esto le llevó a considerarla totalidad de las tendencias, y en nuestro caso a representar las tendencias significativas en forma de tablas dado que su representación en mapas no sería representativa.

Por el contrario, en el trabajo de [Oyonarte et al. 2010](#) en el cual se usa la “fracción de la radiación” en lugar del índice EVI para la serie 2001-2008 en el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar, se observa una presencia casi nula de tendencias significativas en los atributos media y máximo para un p-valor menor a 0,01 con el test de Mann-Kendall. Todo lo

contrario sucede para los atributos coeficiente de variación y mínimo, donde las pendientes significativas ocupan casi toda el área estudiada.

Debido a esta falta de píxeles significativos para los atributos funcionales y los usos del suelo se optó por realizar las Tablas 2 y 3, que resumen las tendencias significativas en ambos casos. Una situación parecida se planteó para [Cabello et al. 2012b](#), donde para una serie bastante similar (2002-2010) del índice NDVI situó el p-valor en  $<0,01$ . Con este dato sólo se obtuvieron un 50% de tendencias significativas con el test de Mann-Kendall estacional, por lo que para el análisis de tendencias decidieron considerar la totalidad de tendencias, tanto significativas como no significativas.

En cuanto a las anomalías espaciales solo existe el referente de [Oyonarte et al. 2010](#), que emplea la RFAA en lugar del índice EVI. Además, las anomalías solo se definieron para los usos de matorral denso y disperso, siendo éste último el único representado espacialmente. Salvando estas diferencias, en el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar se observaron un 61,9% de píxeles no anómalos, un 15,9% de anómalos negativos y un 22,9% de positivos. Estos porcentajes no encajan con ninguno de los parques estudiados aquí, ya que Alhucemas es bastante más estable (80% de píxeles no anómalos, Tabla 4) y Tres Forcas tiene un mismo porcentaje de píxeles negativos y no anómalos (45,16%) en cuanto a matorral disperso.

La elección del matorral disperso se debió a que es el que requiere de unas medidas de gestión más inmediatas. Con los datos de la Tabla 4 y las Figuras 14 y 15, y ante el potencial empleo de esta metodología en un sistema de alerta temprana, el matorral de Tres Forcas requeriría de medidas destinadas a su restauración. Sin embargo, dada su escasa superficie (3,23% de la superficie del parque).

## **Conclusiones**

Los resultados confirmaron la utilidad de la metodología propuesta para llevar a cabo el seguimiento ecosistémico con una adecuada sensibilidad, lo que incluye la caracterización estacional de la productividad y la detección de distintos patrones entre diferentes ecosistemas y usos del suelo.

La curva estacional anual de ambos parques se ajusta al modelo semiárido del mediterráneo occidental: bajos valores ( $<0,4$  en el índice EVI), máximo dado a finales de invierno/inicio de primavera y mínimo en Agosto/septiembre. Los valores de productividad más elevados registrados en Tres Forcas con similares condiciones climáticas a Alhucemas pueden ser explicados por un menor grado de degradación, o mayor resiliencia del parque respecto al de Alhucemas.

Existe una relación precipitación/EVI medio (productividad), la cual explica la coincidencia de los máximos con periodos anormalmente húmedos pero no así para los mínimos. Esto sugiere que otros factores como la temperatura también influyen en la dinámica del índice EVI.

El análisis de tendencias muestra un incremento en la productividad en Alhucemas, no apreciándose el mismo comportamiento en Tres Forcas. La significación de las tendencias también fue mayor en Alhucemas, dentro del bajo porcentaje de píxeles con tendencia



significativa encontrado en ambos parques. El efecto derivado de la declaración como Parque Nacional de Alhucemas desde el año 2004 puede estar repercutiendo de forma positiva en el funcionamiento del ecosistema (mayor número de píxeles con tendencia significativa positiva) respecto al menor grado de protección del que goza el SIBE de Tres Forcas.

Tanto la caracterización de la dinámica anual del índice EVI como el análisis de tendencias permitieron realizar comparaciones con el sureste semiárido ibérico y con la costa oeste de Marruecos y confirmar que las similitudes estructurales en cuanto a vegetación entre ambientes se traducen en el funcionamiento del ecosistema.

Por último, el análisis de anomalías sugiere una alta estabilidad para los usos del suelo, resaltando algunas anomalías negativas para el uso del bosque. Esto se puede deber a que los enclaves de bosque son muy pequeños y se encuentran muy dispersos entre sí. Por esto, este uso debería ser objeto de un mayor seguimiento mediante un sistema de alerta temprana y, en función de su evolución, tomar las medidas de gestión apropiadas.

## **Referencias**

Alan D. Jassby and James E. Cloern (2013) wq: Some tools for exploring water quality monitoring data. R package version 0.3-11. <http://cran.r-project.org/package=wq>

Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J. M. & Cabello, J. (2006) Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography*, 15, 200-212

Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J. M., & Delibes, M. (2008) Trends in the surface vegetation dynamics of the National Parks of Spain as observed by satellite sensors. *Applied Vegetation Science*, 11(4), 431-440

Alcaraz-Segura, D., Cabello, J. & Paruelo, J. (2009a) Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics. *Plant Ecology* 202: 13–29

Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J. M., & Delibes, M. (2009b) Use of descriptors of ecosystem functioning for monitoring a national park network: a remote sensing approach. *Environmental management*, 43(1), 38-48

Alcaraz Segura, D., Chuvieco, E., Epstein, H. E., Kasischke, E. S., & Trishchenko, A. (2010a) Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets. *Global Change Biology*, 16(2), 760-770

Alcaraz-Segura, D., Liras, E., Tabik, S., Paruelo, J., & Cabello, J. (2010b) Evaluating the Consistency of the 1982–1999 NDVI Trends in the Iberian Peninsula across Four Time-series Derived from the AVHRR Sensor: LTDR, GIMMS, FASIR, and PAL-II. *Sensors*, 10(2), 1291-1314

Alcaraz-Segura, D.; Berbery, E.H.; Lee, S.-J.; Paruelo, J.M. (2011) Use of ecosystem functional types to represent the interannual variability of vegetation biophysical properties in regional models. *CLIVAR Exchanges*, 17, 23–27

Cabello J, Alcaraz-Segura D y Lourenço P (2011) Funcionamiento de los ecosistemas de la Red de Parques Nacionales de España: detección de impactos recientes y desarrollo de un

sistema de seguimiento y alerta a partir de herramientas de teledetección Proyectos de investigación en parques nacionales: 2008-2011 MAGRAMA

Cabello, J., Fernández, N., Alcaraz-Segura, D., Oyonarte, C., Piñeiro, G., Altesor, A., ... & Paruelo, J. M. (2012a) The ecosystem functioning dimension in conservation: insights from remote sensing. *Biodiversity and Conservation*,21(13), 3287-3305

Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Ferrero, R., Castro, A. J., & Liras, E. (2012b) The role of vegetation and lithology in the spatial and inter-annual response of EVI to climate in drylands of Southeastern Spain. *Journal of Arid Environments*,79, 76-83

Ezzine, H. Bouziane A., Ouazar, D. (2014) Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 26: 36-48

Grijalbo (2010) Viaje a la Península de Tres Forcas (<http://javiergrijalbo.blogspot.com.es/2010/04/viaje-la-peninsula-de-tres-forcas.html>)

Grijalbo (2011) Parque Nacional de Alhucemas (<http://javiergrijalbo.blogspot.com.es/2011/04/parque-nacional-de-alhucemas-marruecos.html>)

Hirsch, R.M. & Slack, J. (1984) A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data with Serial Dependence. *Water Resources Research* 20: 727-732

Höpfner, C., Scherer, D., & Neftel, A. (2011) Analysis of vegetation and land cover dynamics in north-western Morocco during the last decade using MODIS NDVI time series data. *Biogeosciences*, 8(11)

Jarlan, L., Driouech, F., Tourre, Y., Duchemin, B., Bouyssié, M., Abaoui, J., Ouldbba, A., Mokssit, A. and Chehbouni, G. (2014) Spatio-temporal variability of vegetation cover over Morocco (1982–2008): linkages with large scale climate and predictability. *Int. J. Climatol.*, 34: 1245–1261. doi: 10.1002/joc.3762

López García, B. y Berriane, M. (dirs.) Atlas 2004 de la inmigración marroquí en España Madrid, Taller de Estudios Internacionales Mediterráneos de la UAM (2004)

Martínez, B. and Gilabert, M. A. (2009) "Vegetation Dynamics from NDVI Time Series Analysis Using the Wavelet Transform," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, No. 9, 2009, pp. 1823-1842

McNaughton, S., Oesterheld, M., Frank, D.A. y Williams, K.J. (1989) Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341, 142 – 144

MedWetCoast (2003) Projet de conservation des écosystèmes des zones humides et côtières de la Région méditerranéenne au Maroc. Phase diagnostic. Rapport de synthèse : Site du " Cap des 3 Fourches". Medwetcoast.:1-16

- Meyerson LA, Baron J, Melillo JM, Naiman RJ, O'Malley RI, Orians G, Palmer MA, Pfaff ASP, Running SW, Sala OE (2005) Aggregate measures of ecosystem services: can we take the pulse of nature? *Front Ecol Environ* 3:56–59
- Milchunas, D.G. y Lauenroth, W.K. (1995) Inertia in plant community structure: state changes after cessation of nutrient enrichment stress. *Ecol Appl* 5:1195–2005
- Monteith JL. (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9: 747–766
- Moumen A & Melhaoui M. (2010) Evaluation de la biodiversité et de l'abondance des espèces de flore et de faune et de leurs menaces principales dans le site du C3F. Rapport Intermédiaire. EUCCC/ABIPA. Juin 2010, 41 pages
- Mullor J. & Oyonarte C. (coms. Pers.) (2014) Proyecto Transhábitat de Desarrollo Sostenible del Espacio Transfronterizo Red Natura 2000 y Hábitats de Interés Común Andalucía-Marruecos
- Oyonarte C, Alcaraz-Segura D, Oyarzabal M, Paruelo JM, Cabello J (2010) Sistema de apoyo a la gestión de reservas de la biosfera basado en el monitoreo de la productividad primaria: ensayo en Cabo de Gata-Níjar (Almería-España). In: Araya P, Clüsener-Godt M (eds) *Reservas de la Biosfera: Su contribución a la provisión de servicios de los ecosistemas. Experiencias exitosas en Iberoamérica*, UNESCO, Paris, pp 119–140
- Paruelo JM, Lauenroth WK (1995) Regional patterns of Normalized Difference Vegetation Index in North American shrublands and grasslands. *Ecology* 76:1888–1898
- Paruelo JM, Epstein HE, Lauenroth WK, Burke IC (1997) ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* 78:953–958
- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., & Sala, O. E. (2001) Current distribution of Ecosystem Functional Types in Temperate South America. *Ecosystems* 4, 683-698
- Paruelo JM, Piñeiro G, Oyonarte C, Alcaraz-Segura D, Cabello J, Escribano P (2005) Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected and areas in southeastern Spain. *Appl Veg Sci* 8:93–102
- Paruelo José M. et al., Hemisferio Sur (2014) Percepción remota y sistemas de información geográfica : sus aplicaciones en agronomía y ciencias ambientales
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J. y Stenseth, N.C., (2005) Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20: 503-510
- R Core Team (2014) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria <http://www.R-project.org/>
- RAC/SPA/MedMPA/02/04 (2004) Lot n° 3-Elaboration of programmes for promoting public access, information and education for the following protected areas: Al Hoceima National Park (Morocco) and the Zembra and Zembretta National Park (Tunisia)

- Sellers PJ, Berry JA, Collatz GJ, Field CB, Hall FG (1992) Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sens Environ* 42:187–216
- Sellers PJ, Randall DA, Collatz GJ, Berry JA, Field CB, Dazlich DA, Zhang C, Collelo GD, Bounoua L (1996) A revised Land Surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: model formulation. *J Clim* 9:676–705
- Sen, P. K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379-1389
- J. A. Sobrino & N. Raissouni (2000) Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco, *International Journal of Remote Sensing*, 21:2, 353-366
- Soriano, A. & Paruelo, J. M. (1992) Biozones: vegetation units defined by functional characters identifiable with the aid of satellite sensor images. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 2, 82-89
- Telesca, L. & Lasaponara, R. (2006) Quantifying intra-annual persistent behaviour in SPOT-VEGETATION NDVI data for Mediterranean ecosystems of southern Italy. *Remote Sensing of Environment* 101: 95–103
- Tucker CJ, Townshend JR, Goff TE (1985) African land-cover classification using satellite data. *Science* 227:369–375
- UICN (2012) Atlas du Parc National d'Al Hoceima. Gland, Suisse et Malaga, Espagne: UICN-Centre de Coopération pour la Méditerranée
- Valentini, R., Baldocchi, D.D. & Tenhunen, J.D. (1999) Ecological controls on land–surface atmospheric interactions. Integrating hydrology, ecosystem dynamics and biogeochemistry in complex landscapes (ed. by J.D. Tenhunen and P. Kabat), pp. 105–116. John Wiley & Sons, Berlin
- Van Belle, G. & Hughes, J. (1984) Nonparametric tests for trend in water quality. *Water Resources Research* 20: 127-136
- Virginia RA, Wall DH, Levin SA (2001) Principles of ecosystem function. *Encyclopedia of biodiversity*. Academic Press, San Diego, pp 345–352
- Wickham H. *ggplot2: elegant graphics for data analysis*. Springer New York, 2009 (<http://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>)