

Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión.

D. Alcaraz-Segura^{1,2,3}, G. Baldi^{3,4,5}, P. Durante⁶, M.F. Garbulsky^{3,7,8}

(1) Environmental Sciences Department, University of Virginia. 22903. Charlottesville, Virginia, USA.

(2) Dpto. de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Almería. 04120. La Cañada, Almería, España.

(3) Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección – IFEVA y Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires y CONICET. C1417DSE Buenos Aires, Argentina.

(4) Grupo de Estudios Ambientales - IMASL, Universidad Nacional de San Luis and CONICET. D5700HHW San Luis, Argentina.

(5) Dpto. de Geología, Universidad Nacional de San Luis. Argentina.

(6) Dpto. de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Almería. 04120. La Cañada, Almería, España.

(7) Cátedra de Forrajicultura, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Argentina.

(8) Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF). Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra, Barcelona. España.

➤ Recibido el 27 de julio de 2008, aceptado el 17 de septiembre de 2009.

Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., Garbulsky, M.F. (2008). Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 17(3):108-117.

Las series temporales de imágenes de satélite constituyen una excelente herramienta para analizar los cambios en diferentes aspectos del funcionamiento de la vegetación y, por lo tanto, para el conocimiento y la gestión de áreas protegidas. En este trabajo mostramos tres aproximaciones para evaluar cambios en el promedio anual, la estacionalidad, y la inestabilidad de la dinámica temporal (cambios abruptos) de la capacidad fotosintética de la vegetación en tres zonas de estudio: las áreas protegidas de Sudamérica, los parques nacionales españoles, y dos parques naturales andaluces. Para cada análisis se emplearon sendas bases de datos del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), un índice espectral estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación. Las áreas protegidas de Sudamérica y los parques nacionales de España mostraron tendencias significativas en la dinámica del NDVI que variaron en magnitud y sentido en función de su situación geopolítica y biogeográfica. Los parques naturales andaluces mostraron de qué manera diferentes manejos históricos han ocasionado una disminución en la estabilidad de la dinámica temporal del NDVI de determinados ecosistemas. En conjunto, estas evaluaciones revelan cómo las políticas de conservación de la biodiversidad en áreas protegidas no pueden basarse en situaciones estáticas o promedio, ya que el funcionamiento de sus ecosistemas varía en diferentes aspectos. Asimismo, estas aproximaciones proporcionan información valiosa para establecer prioridades en conservación, al ser capaces de responder a preguntas tales como ¿qué biomas, países o parques están sufriendo mayores cambios? o ¿qué medidas de manejo proporcionan mayor estabilidad al ecosistema?

Palabras clave: cambio global, España, manejo, seguimiento, Sudamérica, teledetección, tendencias.

Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., Garbulsky, M.F. (2008). Analysis of the NDVI temporal dynamics in protected areas: three study cases at different spatial, temporal, and management scales. *Ecosistemas* 17(3):108-117.

Data records of satellite images are a great tool to analyze changes in different aspects of vegetation functioning. Temporal analyses of these images are of great interest for the study and management of protected areas. In this work, we show three approaches that aim to evaluate changes in the mean, seasonality, and instability of the temporal dynamics (abrupt changes) of the photosynthetic capacity of vegetation in three study areas: the South American network of protected areas, the Spanish network of national parks, and two Andalusian natural parks. For each analysis, we used different data records of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), a spectral index related to the fraction of photosynthetically active radiation intercepted by vegetation. The South American protected areas and the Spanish national parks showed significant trends in the NDVI dynamics that varied in magnitude and direction depending on their geopolitical and biogeographical situation. The Andalusian parks showed how different historical managements have led to a decrease in the stability of the NDVI temporal dynamics in particular ecosystems. As a whole, the three evaluations revealed how biodiversity conservation policies in protected areas cannot be based on static or mean situations since the functioning of protected ecosystems is changing in multiple aspects. Additionally, these approaches provide valuable information for the establishment of priorities in conservation, being capable of responding to questions such as, what biomes, countries or parks are experiencing the greatest changes?, or what management practices provide a greater stability to the ecosystem?

Keywords: global change, management, monitoring, remote sensing, South America, Spain, trends

Introducción

Las áreas protegidas concentran actualmente los mayores esfuerzos en protección de la biodiversidad a nivel mundial. Por lo tanto, saber si la estructura y el funcionamiento de los sistemas que albergan se mantienen a lo largo del tiempo y poder cuantificar los eventuales cambios contribuiría al establecimiento de prioridades para su conservación (Barber et al. 2004). Para ello, es necesario desarrollar métodos cuantitativos para el diagnóstico y seguimiento de las áreas protegidas que sean aplicables a bajo coste y que, bajo una aproximación común, faciliten la comparación entre diferentes áreas y escalas espaciales de análisis y de gestión. Como resultado, estas evaluaciones deberían poder identificar qué áreas, ecosistemas, biomas e, incluso, países están sufriendo los mayores cambios, y qué medidas de manejo resultan más efectivas para su conservación (Leverington y Hockings 2004). Además, el diagnóstico de las condiciones de base del funcionamiento y la estructura de los ecosistemas protegidos y su seguimiento en el tiempo, cumplirían la importante función de proporcionar un sistema de referencia para evaluar el efecto que los cambios ambientales (por ejemplo, cambio de uso del suelo, contaminación) producen en sus entornos no protegidos (Garbulsky y Paruelo 2004).

El análisis de atributos funcionales de los ecosistemas (es decir, la dinámica del intercambio de materia y energía) muestra algunas ventajas sobre el uso de los clásicos atributos estructurales (como la riqueza de especies o la fisonomía de la vegetación). La respuesta más rápida a las perturbaciones (Milchunas y Lauenroth 1995) y el poder usar teledetección para monitorear grandes áreas bajo una aproximación común (Mildrexler et al. 2007) son dos de sus ventajas más interesantes. Así, el análisis de bases de datos de imágenes de satélite de largo plazo constituyen una excelente herramienta para analizar los cambios en diferentes aspectos del funcionamiento de los ecosistemas con interés para el conocimiento y la gestión de áreas protegidas (Duro et al. 2007). Uno de los índices espectrales más usados para evaluar las respuestas ecológicas frente a cambios ambientales (Paruelo 2008, en este número) es el "Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada" (NDVI, por sus siglas en inglés). El NDVI tiene un gran valor en términos ecológicos, ya que es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fPAR) (el control principal de las ganancias de carbono; Monteith 1981) y la productividad primaria (Paruelo et al. 1997; Tucker et al. 1985), una variable integradora del funcionamiento del ecosistema (Virginia y Wall 2001). Las series temporales de NDVI con alta resolución temporal (por ejemplo, NOAA/AVHRR, MODIS, etc.) permiten monitorear diferentes indicadores sintéticos de la dinámica de la intercepción de radiación por parte de la vegetación terrestre, tales como el promedio anual, la estacionalidad, la fenología del ecosistema, y la estabilidad, con los que caracterizar y monitorear diferentes aspectos del funcionamiento de los ecosistemas.

En este trabajo mostramos tres evaluaciones en áreas naturales protegidas a tres escalas espaciales y de gestión (**Tabla 1**) en los que la teledetección constituye una poderosa herramienta para evaluar los cambios en diversas variables relacionadas con su funcionamiento ecosistémico. En la primera, evaluamos la tendencia temporal (1982-1999) en el promedio anual del NDVI en las áreas protegidas de los países y biomas más extensos de Sudamérica (WDPA Consortium 2006; Olson et al. 2001) para conocer si los cambios en su funcionamiento están controlados por los tipos de biomas y las fronteras políticas. En la segunda, usamos siete parques de la Red Española de Parques Nacionales para, más allá de detectar cambios en el promedio anual, analizar las tendencias en la forma de la curva anual del NDVI en los ecosistemas de estos parques que estén relacionados con cambios en su estacionalidad y fenología en el periodo 1981-2006. Por último, comparamos dos parques naturales andaluces contiguos para evaluar los efectos del manejo sobre la dinámica temporal del NDVI, ya que estos dos parques presentan una topografía, clima y vegetación potencial similares, pero han estado sometidos a un pastoreo histórico muy diferente.

Material y Métodos

Las tres evaluaciones se basaron en series temporales de imágenes de satélite para el NDVI (**Tabla 1**), un índice espectral calculado a partir de la reflectancia en el rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR) y relacionado con la biomasa verde de la vegetación: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ (Tucker y Sellers 1986).

	Áreas protegidas de Sudamérica	Red Española de Parques Nacionales	Dos parques naturales andaluces
Pregunta en biología de la conservación	¿Qué biomas o países están sufriendo los mayores cambios?	¿Qué parques y ecosistemas de una red están sufriendo los mayores	¿Cómo afecta el manejo de un área protegida a su estabilidad?

		cambios?	
Objeto de conservación	Biomás del mundo	Ecosistemas de un país o región	Formaciones vegetales de un parque
Nivel de gestión	Continental / Global	Regional / Nacional	Local
Escala espacial	1:5.000.000	1:500.000	1:50.000
Descriptorios del funcionamiento ecosistémico evaluados	Promedio anual del NDVI	Dinámica estacional del NDVI	Estabilidad en la dinámica temporal del NDVI
Imágenes empleadas	AVHRR FASIR	AVHRR GIMMS	MODIS MOD13Q1v4
- Resolución espacial	8x8 km	8x8 km	232x232 m
- Periodo	1981-1999	1981-2006	2000-2006
- Resolución temporal	10 días	2 imágenes por mes	16 días
Limitaciones de las imágenes	Resolución espacial baja, pero adecuada a la escala de análisis	Resolución espacial demasiado baja y no adecuada a la escala	Periodo muy corto, aunque actualizable hasta el presente
Tipo de análisis estadístico	Tendencia lineal significativa del promedio anual del NDVI mediante test <i>t</i> de dos colas	Tendencia Mann-Kendall de la dinámica estacional del NDVI	Salto en la curva Método de Webster, indicador de discontinuidades en la estabilidad del NDVI
Ventajas del análisis	Sintetiza en un simple análisis los mayores cambios en una gran red de áreas protegidas	No paramétrico. Busca cambios que puedan ocurrir en cualquier momento del año	Permite comparar entre los diferentes tipos de vegetación dentro de un parque
Limitaciones del análisis	Sólo puede aplicarse a áreas protegidas muy extensas	Debe aplicarse a áreas protegidas muy extensas y sobre un número reducido de las mismas	Factible sólo para comparar pocas áreas y tipos de vegetación. Inmanejable a escala continental o regional
Resultados	Cambios direccionales a largo plazo en el comportamiento promedio	Cambios a largo plazo en la magnitud, estacionalidad, y fenología de la dinámica estacional	Cambios en la respuesta a corto plazo de la vegetación frente a las condiciones climáticas

Tabla 1. Síntesis de las tres evaluaciones presentadas en este artículo

Una evaluación a escala continental: áreas protegidas de Sudamérica

La red de áreas protegidas de Sudamérica, que incluye una extraordinaria heterogeneidad de ambientes, representa un marco excelente para evaluar los cambios en el funcionamiento ecosistémico en distintos biomas y países. Analizamos los píxeles completamente incluidos en áreas protegidas de las categorías I (Reserva Natural Estricta/Área Natural Silvestre) y II (Parque Nacional) de la IUCN (1998). Se utilizó la serie temporal de imágenes NOAA/AVHRR-FASIR (Fourier-Adjusted, Solar zenith angle corrected, Interpolated Reconstructed, versión 4.13; (Los Comunicación personal; Los et al. 2000) (**Tabla 1**) debido a su mejor precisión y coherencia espacial para Sudamérica (Baldi et al. 2008). FASIR corrige algunos de los problemas de la anterior serie PAL (James y Kalluri 1994). Empleamos el valor máximo de NDVI de cada mes para reducir el efecto del ruido y los posibles errores que aún quedarán. Por último, se analizó la tendencia (1982-1999) mediante regresiones lineales del promedio anual del NDVI de cada píxel frente al tiempo. Las pendientes significativamente distintas de cero (valor $P < 0.1$) se obtuvieron mediante test de *t* de dos colas que ha demostrado ser sencillo y exitoso en numerosos trabajos relacionados (Slayback et al. 2003; Paruelo et al. 2004; Hüttich et al. 2007).

Una evaluación a escala nacional: Parques nacionales de España

Para esta evaluación se utilizó la serie temporal de imágenes NDVI de la base de datos NOAA/AVHRR-GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) (**Tabla 1**). La serie GIMMS incluye correcciones por calibración y degradación del sensor, deriva satelital, ángulo de captura, nubosidad, aerosoles volcánicos y otros efectos no relacionados con cambios en la vegetación (detalles en Tucker et al. 2005). El test de tendencias de Mann-Kendall se empleó para obtener las tendencias (1981-2006) de la curva anual del NDVI, es decir, la tendencia del NDVI en cada una de las 24 quincenas del año (**Tabla 1**). Este test es no-paramétrico, basado en rangos, robusto frente a valores perdidos, la no normalidad de los datos, y la autocorrelación temporal (Hirsch y Slack 1984; Van Belle y Hughes 1984). El test analiza la existencia de una tendencia temporal monótona en cada compuesto de imágenes quincenales considerando el número de veces que cada año tiene un NDVI mayor o menor que el año precedente. Posteriormente, para cada quincena, calculamos la media de las tendencias significativas (valor $P < 0.05$) en cada parque.

Una evaluación a escala local: Dos parques naturales andaluces bajo diferente manejo

Tres formaciones vegetales fueron muestreadas en los parques naturales de Castril y de Cazorla bajo condiciones ecológicas similares: pinar de baja montaña, matorral de media montaña (romeral-cervunal), y matorral espinoso de alta montaña (piornal). El P.N. de Castril sufre un sobrepastoreo histórico (Passera et al. 2001), mientras que el P.N. de Cazorla presenta un mejor estado de conservación (Araque 1997). Para cada una de las tres formaciones muestreadas en ambos parques, se construyeron las series temporales de NDVI (2000-2006) a partir de imágenes de la colección MODIS 4 (**Tabla 1**) tras ser filtradas en función de sus bandas de calidad. Sobre dichas series se eliminaron outliers, se interpolaron huecos con modelos autorregresivos, y se estandarizaron sus valores en función de su media y desviación típica. Para detectar cambios abruptos (discontinuidades) en la dinámica temporal del NDVI (tales como cambios en la estructura –amplitud o fase- de los ciclos, o presencia de saltos y puntos de corte), se utilizó el método de Webster para series univariantes (Legendre y Legendre 1998), una técnica basada en la función de distancia de Mahaloanobis empleada para localizar discontinuidades significativas en una variable a lo largo de un gradiente. Valores altos en la curva Webster (picos) manifiestan una baja dependencia correlacional entre los intervalos $[i-k, i]$ e $[i, i+k]$ de la serie temporal y, por tanto, indican la presencia de discontinuidades significativas en la dinámica temporal del NDVI en un período k alrededor de la fecha i . Por el contrario, valores bajos en la curva (valles) indican alta dependencia correlacional y ausencia de discontinuidades significativas. Aunque el valor de k suele ser 5, en nuestro caso se estimó como intervalo de cambio significativo el valor de $k=7$ (meses anteriores y posteriores a la fecha i). Dicho valor se obtuvo experimentalmente de forma que las curvas no presentaran un ruido excesivo (valores bajos de k) ni un suavizado que limitara la información de las discontinuidades (valores altos de k). Por último, se relacionaron estas discontinuidades con la dinámica temporal de las precipitaciones, para comparar entre los dos parques la respuesta que el NDVI presenta ante la precipitación.

Resultados

Áreas protegidas de Sudamérica

La superficie protegida con tendencias positivas en el promedio anual de NDVI resultó mucho mayor que la que experimentó tendencias negativas para la mayoría de países y biomas. A su vez, los mayores valores de pendiente en los modelos de regresión se encontraron en las áreas con tendencia negativa, lo que evidenciaría una mayor intensidad de estos cambios. Discriminando por países, las áreas protegidas de Paraguay, Bolivia y Argentina fueron las que presentaron el mayor porcentaje de su superficie con cambios negativos en el promedio anual de NDVI (PY, 27.3%; BL, 12.3%; AR, 4.8%) y las que presentaron una mayor pendiente en los modelos de regresión (PY, -0.007; BL, -0.01; AR, -0.001). La pendiente de los cambios positivos fue similar entre países, aunque Guayana Francesa, Colombia, Ecuador y Brasil fueron los países con mayor porcentaje con cambios positivos dentro de sus áreas protegidas (70.0%, 58.2%, 49.5% y 48.4%, respectivamente). Discriminando por biomas, en los bosques húmedos la superficie con tendencias positivas también fue mayor que la de las negativas, pero la pendiente de las tendencias negativas fue dos veces mayor que la de las positivas. En Colombia la superficie con cambios positivos significativos entre 1982 y 1999 fue mayor al 60% en estos sistemas (**Fig. 1**), mientras que, por ejemplo, en Argentina y Paraguay los bosques húmedos en áreas protegidas no presentaron cambios significativos. Los bosques secos, en cambio, presentaron una gran superficie de cambios negativos en Argentina, Bolivia y Paraguay, en los que la magnitud de las tendencias negativas también fue superior a la de las positivas. En los arbustales, pastizales y sabanas las tendencias positivas fueron mucho más extendidas, pero la magnitud promedio de las tendencias negativas fue similar a la de las positivas.

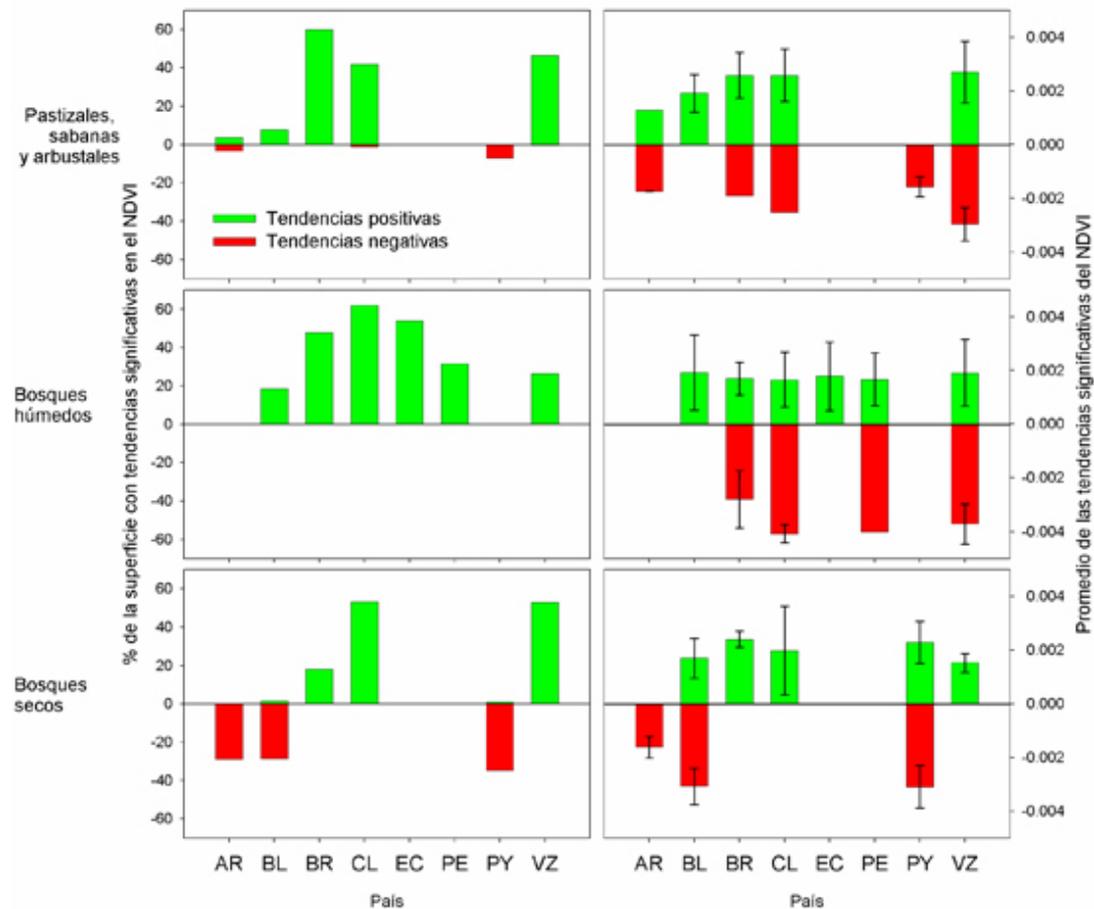


Figura 1. Tendencias temporales del NDVI promedio anual en áreas protegidas de Sudamérica ubicadas en tres biomas subtropicales y tropicales en los ocho países más extensos. Los tres gráficos de la izquierda muestran el porcentaje de la superficie protegida de cada bioma que presentó tendencias significativas (valor $P < 0.1$) en el NDVI (entre 1981 y 1999) y los de la derecha la magnitud promedio de la tendencia. Las barras de error muestran el desvío estándar en la tendencia promedio. Argentina (AR), Bolivia (BL), Brasil (BR), Colombia (CL), Ecuador (EC), Perú (PE), Paraguay (PY) y Venezuela (VZ).

Red Española de Parques Nacionales

Todos los parques mostraron píxeles con tendencias significativas en la curva anual del NDVI (**Fig. 2**). En toda la red dominaron las tendencias hacia un aumento del NDVI tanto en magnitud como en número de quincenas. El patrón estacional de las tendencias fue común entre los parques de una misma región biogeográfica: en los eurosiberianos, las tendencias positivas más importantes ocurrieron en primavera, al comienzo de la estación de crecimiento, mientras que las negativas tuvieron lugar en el verano, en mitad de la estación de crecimiento; en los parques mediterráneos, por el contrario, las tendencias positivas ocurrieron principalmente en otoño e invierno, durante el final del período de reposo y el comienzo de la estación de crecimiento, mientras que las tendencias negativas tuvieron lugar entre la primavera y el verano, durante el período de senescencia tras el máximo de NDVI.

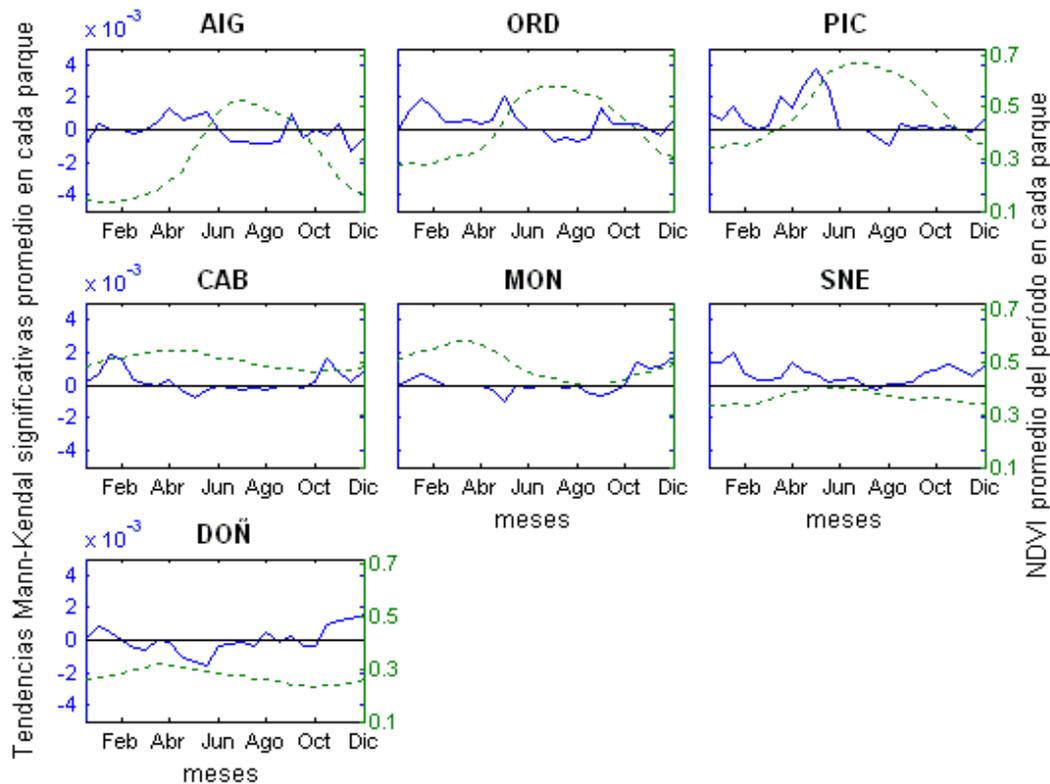


Figura 2. Comparación entre siete parques nacionales españoles de las tendencias de la dinámica estacional del NDVI en el período 1982-2006. En el eje de la izquierda (azul continuo) se representa el promedio del parque para las pendientes significativas obtenidas con el test de tendencias de Mann-Kendall (valor $P < 0.05$). En el eje de la derecha (verde discontinuo) se representa la dinámica estacional promedio del NDVI en el mismo período. En el eje X, los 12 meses del año. Parques Eurosiberianos: AIG: Aigüestortes i E. S. Maurici; ORD: Ordesa y Monte Perdido; PIC: Picos de Europa. Parques Mediterráneos: CAB: Cabañeros; MON: Monfragüe; SNE: Sierra Nevada; DOÑ: Doñana.

Dos parques naturales andaluces bajo diferente manejo

Las discontinuidades (cambios en la amplitud o en la fase de los ciclos) en la dinámica temporal del NDVI fueron mucho más frecuentes e intensas en el P.N. Castril que en el de Cazorla para las tres formaciones vegetales consideradas (**Fig. 3**). Comparando entre formaciones, el piornal de alta montaña (altitud superior a 1600m) presentó la mayor estabilidad en la dinámica temporal del NDVI en ambos parques, mientras que el matorral de media montaña presentó las discontinuidades más marcadas. En su mayoría, los picos de la curva Webster no parecieron guardar relación directa con la pluviometría. No obstante, el período de sequía entre julio de 2004 y septiembre de 2005 llevó asociadas discontinuidades muy marcadas en Castril, que no estuvieron presentes en Cazorla, para las tres formaciones vegetales.

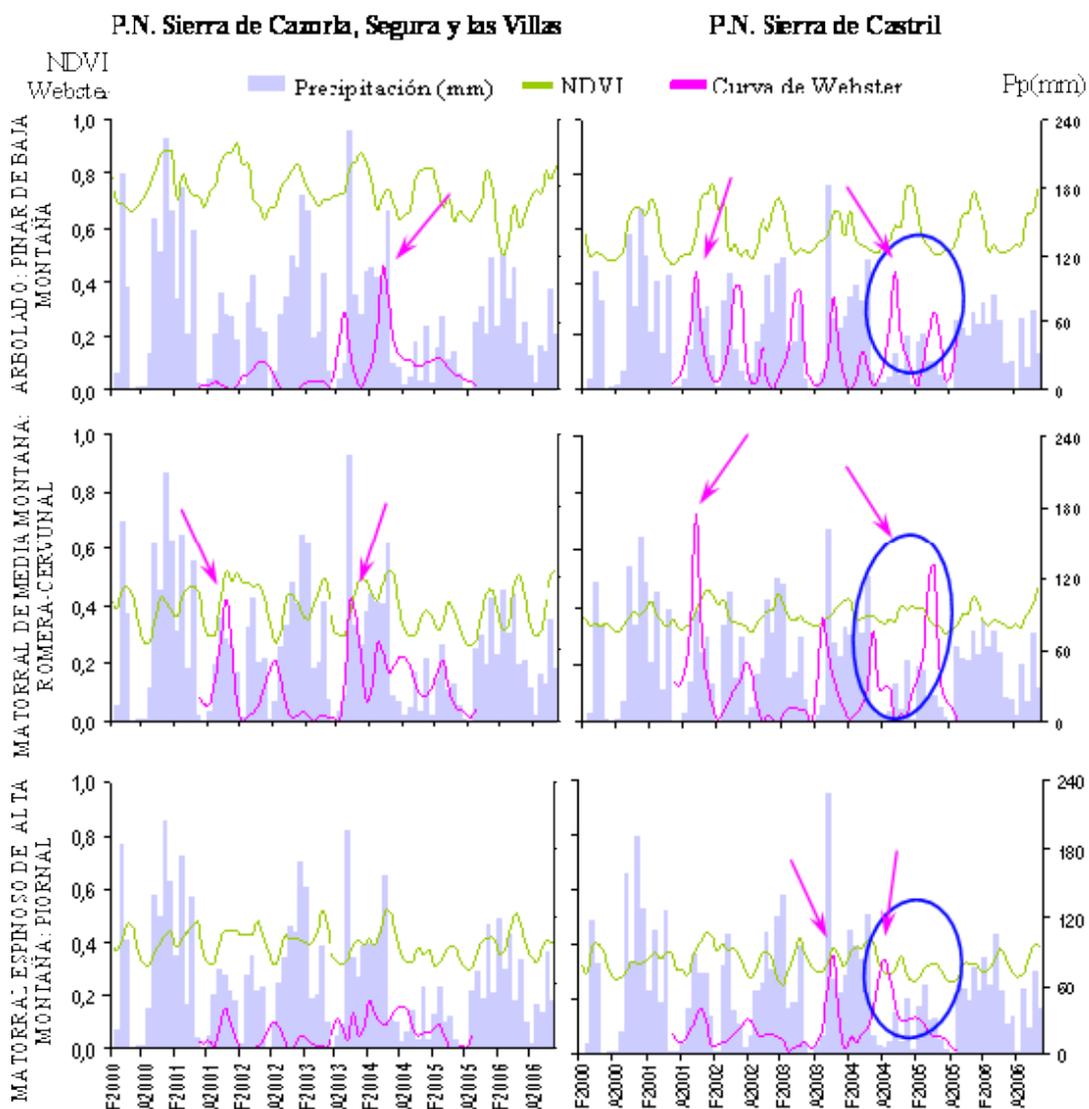


Figura 3. Comparación entre la serie estacional de NDVI, la curva de Webster y la precipitación mensual para las tres formaciones vegetales en dos parques naturales con diferente gestión. En el eje Y izquierdo (líneas rosa y verde), curva Webster y NDVI respectivamente; en el eje Y derecho (barras azules), precipitación mensual (mm). Eje X, período desde febrero-2000 hasta diciembre-2006. Picos de valores altos en la curva Webster manifiestan discontinuidades en la dinámica temporal del NDVI relacionadas con cambios estructurales en la amplitud o fase de los ciclos (las flechas señalan las principales). Los círculos azules marcan discontinuidades coincidentes con un período de sequía.

Discusión

Al tratarse de zonas bajo protección, aunque en diferentes grados y con distinta efectividad, las áreas protegidas podrían concebirse como un sistema de referencia del funcionamiento potencial de los ecosistemas en condiciones naturales (Garbulsky y Paruelo 2004) donde los cambios deberían ser menos extensos y de menor intensidad que en las zonas sin protección, los que están más expuestos a los cambios ambientales (por ejemplo, cambios de uso del suelo, contaminación, plagas, etc.). Sin embargo, este estudio muestra cómo algunas áreas protegidas también presentan cambios muy importantes en distintos aspectos del funcionamiento de sus ecosistemas. No todas las áreas cambiaron ni lo hicieron por igual, por lo que estas diferencias en la magnitud y sentido de los cambios constituye una información valiosa sobre la que evaluar y priorizar las políticas y acciones de conservación.

Áreas protegidas de Sudamérica

Las tendencias en el promedio anual de NDVI entre 1982 y 1999 en las áreas protegidas de Sudamérica evidencian un cambio funcional importante en gran parte de ellas. Las tendencias hacia un aumento del NDVI estuvieron más extendidas (>10% de

la superficie protegida) pero fueron de menor magnitud que los descensos, que fueron más locales (<10% de superficie), salvo en los bosques secos donde los cambios negativos fueron muy extensos. Esta diferencia en la mayor extensión de las tendencias positivas frente a las negativas podría explicarse por el carácter regional de los cambios en el clima (aumentos en la temperatura y/o en la precipitación según el bioma en cuestión) y, probablemente, en la composición atmosférica (CO₂, N₂), frente al carácter local de los impactos de una protección inefectiva en algunas áreas, donde la agricultura y deforestación furtivas tenderían a bajar el NDVI (Paruelo et al. 2004). Por ejemplo, algunos patrones de tendencia ocurren asociados a los biomas de bosques secos y húmedos independientemente del país donde se encuentren. En cambio, los pastizales, sabanas y arbustales mostraron tendencias disímiles entre países, probablemente asociadas a una mayor diversidad de situaciones ambientales y a cambios furtivos en el uso del suelo.

La red española de parques nacionales

Los siete parques estudiados mostraron tendencias significativas en la dinámica estacional del NDVI que variaron en magnitud y sentido en función de la región biogeográfica y la época del año. En general, en toda la red, las tendencias negativas tendieron a ocurrir en la época del año con alto NDVI, mientras que las tendencias positivas acontecieron en los periodos del año con valores de NDVI entre moderados y bajos. En los parques eurosiberianos, el aumento generalizado de las temperaturas ha ocasionado un incremento de la actividad vegetal en primavera al comienzo de la estación de crecimiento relacionado con un adelantamiento de la misma (Alcaraz-Segura et al. 2008a). Esto conlleva un mayor consumo de agua en primavera que, al mantenerse constantes las precipitaciones, ha aumentado el estrés hídrico durante el verano, provocando un descenso en la intercepción máxima de radiación de final del verano, justo en mitad de la estación de crecimiento. Por el contrario, en los parques mediterráneos, el aumento de las temperaturas ha favorecido un mayor incremento de la actividad vegetal durante el período frío de otoño-invierno, pero una aceleración de la senescencia tras el máximo de intercepción de radiación de primavera, probablemente también asociado a un aumento del estrés hídrico, lo que ha provocado un adelantamiento de la fecha del mínimo NDVI (Alcaraz-Segura et al. 2008a).

Dos parques naturales andaluces bajo diferente gestión

La menor frecuencia e intensidad de discontinuidades en la dinámica temporal del NDVI en el P.N. Cazorla respecto del de Castril (un parque con evidencias de sobrepastoreo) pone de manifiesto el efecto que el manejo tiene sobre la estabilidad de la dinámica temporal de la actividad de la vegetación (Durante et al. en prensa). A pesar de que ambos parques presentan condiciones ambientales similares, Castril mostró una menor estabilidad en la dinámica temporal del NDVI en las tres formaciones vegetales estudiadas. El piornal, presenta la menor carga ganadera debido a las condiciones climáticas adversas (bajas temperaturas en altitud superior a 1600m), lo que se reflejó en una menor frecuencia e intensidad de discontinuidades en la dinámica temporal del NDVI en ambos parques y en una menor diferencia entre ellos. Por el contrario, el matorral de media montaña, donde existe la mayor presión ganadera, presentó discontinuidades muy altas en ambos parques, aunque mayores y más frecuentes en Castril. Por último, a pesar de no encontrar una relación formal con la pluviometría, sí observamos que la sequía severa de 2004-2005 tuvo un mayor efecto sobre la estabilidad del NDVI en Castril que en Cazorla. Además, para ambos parques, la inestabilidad de la dinámica del NDVI ante esta falta de precipitaciones fue más intensa en el matorral de media montaña, donde existe mayor pastoreo.

Conclusiones

Este trabajo muestra la utilidad de las series temporales de imágenes de satélite para analizar cambios en el funcionamiento ecosistémico de áreas protegidas. Nuestros resultados revelan cómo las políticas de conservación de la biodiversidad no pueden basarse exclusivamente en situaciones estáticas o promedio, ya que el funcionamiento de las áreas protegidas muestra cambios en múltiples aspectos y por diferentes motivos. Asimismo, resaltan la importancia de estudiar variables más allá del promedio anual ya que, pese a presentar la ventaja de ser la variable más utilizada e integradora, están ocurriendo cambios que no afectan significativamente al promedio, pero que tienen efectos importantes en otros aspectos, tales como la estacionalidad, fenología y estabilidad de la dinámica temporal del verdor de la vegetación. Por ejemplo, los cambios significativos en la dinámica estacional del NDVI detectados en este estudio no siempre provocaron tendencias significativas en el promedio anual en los parques nacionales españoles (Alcaraz-Segura et al. 2008a; Alcaraz-Segura et al. 2008b). También, este estudio muestra cómo un manejo histórico inadecuado de los ecosistemas puede alterar su capacidad de regulación de la dinámica temporal del NDVI, lo que supone una menor estabilidad del área protegida. En conjunto, las evaluaciones presentadas permitirían establecer prioridades en conservación al dar respuesta a preguntas de diferentes niveles de gestión, tales como, ¿qué biomas y países están sufriendo mayores cambios?, ¿cambian por igual los parques nacionales de una misma región biogeográfica?, o ¿cómo afecta el manejo histórico a la estabilidad del funcionamiento ecosistémico de un parque natural?

Agradecimientos

Agradecemos las revisiones de M. Delibes y S. Baeza, que ayudaron a mejorar significativamente el manuscrito. J. Paruelo, J. Cabello y C. Oyonarte proporcionaron comentarios interesantes para realizar el trabajo. Siham Tabik ayudó en el cálculo de tendencias en los Parques Nacionales españoles. Los autores han sido subvencionados a cargo de las siguientes instituciones y programas: Becas postdoctorales del Ministerio de Educación y Ciencia (convocatoria 2005), Organismo Autónomo de Parques Nacionales (proyecto 066/2007), *Inter-American Institute for Global Change Research* (IAI, CRN II 2031) subvencionado por la *US National Science Foundation* (Ayuda GEO-0452325), Junta de Andalucía (proyectos de excelencia RNM1288 y RNM1280), Proyecto LUCDEME, Comisionado para Universidades e Investigación del Departamento de Innovación, Universidades y Empresa de la Generalitat de Catalunya y del Fondo Social Europeo. Las imágenes de satélite fueron proporcionadas por S. Los (FASIR), Global Land Cover Facility (GIMMS), y MODIS website (MODIS).

Referencias

Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J.M., Delibes, M. 2008a. Assessing protected areas to face environmental change through satellite-derived vegetation greenness: The case of the Spanish National Parks. *Environmental Management*. doi:10.1007/s00267-008-9154-y.

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

Araque, E. 1997. Las sierras de Segura y Cazorla. Un escenario privilegiado para la investigación forestal española de los dos últimos siglos. *Revista Forestal Española* 16:21-27.

Baldi, G., Noretto, M.D., Aragón, M.R., Aversa, F., Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G. 2008. Long-term satellite NDVI datasets: Evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. *Sensors* 8:5397-5425.

Barber, C.V., Miller, K.R., Boness, M. 2004. *Securing Protected Areas in the Face of Global Change: Issues and Strategies*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

Durante, P., Oyonarte, C., Valladares, F. En prensa. Influence of land use types and climatic variables on seasonal patterns of NDVI in Mediterranean Iberian ecosystems. *Applied Vegetation Science* 00:000-000.

Duro, D.C., Coops, N.C., Wulder, M.A., Han, T. 2007. Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Progress in Physical Geography* 31(3):235-260.

Garbulsky, M.F., Paruelo, J.M. 2004. Remote sensing of protected areas to derive baseline vegetation functioning characteristics. *Journal of Vegetation Science* 15:711-720.

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

Hüttich, C., Herold, M., Schmullius, C., Egorov, V., Bartalev, S.A. 2007. Indicators of Northern Eurasia's land-cover change trends from spot-vegetation time-series analysis 1998-2005. *International Journal of Remote Sensing* 28:4199-4206.

IUCN (World Conservation Union) 1998. 1997 United Nations list of protected areas. Prepared by WCMC and WCPA. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

James, M.E., Kalluri, S.N.V. 1994. The pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing* 15:3347-3363.

Legendre, P., Legendre, L. 1998. *Numerical ecology 2*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Leverington, F., Hockings, M. 2004. Evaluating the effectiveness of protected area management: the challenge of change. En: Barber, C.V., Miller, K.R., Boness, M. (eds.) *Securing Protected Areas in the Face of Global Change: Issues and Strategies*, pp. 169-214. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

Los, S.O., Collatz, G.J., Sellers, P.J., Malmstrom, C.M., Pollack, N.H., DeFries, R.S., Bounoua, L., Parris, M.T., Tucker, C.J., Dazlich, D.A. 2000. A global 9-yr biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data. *Journal of Hydrometeorology* 1:183-199.

- Milchunas, D.G., Lauenroth, W.K. 1995. Inertia in plant community structure: State changes after cessation of nutrient enrichment stress. *Ecological Applications* 5:1195-2005.
- Mildrexler, D.J., Zhao, M., Heinsch, F.A., Running, S.W. 2007. A new satellite-based methodology for continental-scale disturbance detection. *Ecological Applications* 17(1):235-250
- Monteith, J.L. 1981. Climatic variation and the growth of crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107:749-774.
- Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'Amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W.W., Hedao, P., Kassem, K.R. 2001. Terrestrial ecoregions of the worlds: A new map of life on Earth. *BioScience* 51:933-938.
- Paruelo, J.M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3):4-22.
- Paruelo, J.M., Epstein, H.E., Lauenroth, W.K., Burke, I.C. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* 78:953-958.
- Paruelo, J.M., Garbulsky, M.F., Guerschman, J.P., Jobbágy, E.G. 2004. Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. *International Journal of Remote Sensing* 25:2793-2806.
- Passera, C.B., González, J.L., Robles, A.B., Allegretti, L.I. 2001. Determinación de la capacidad sustentadora de pastos de zonas áridas y semiáridas del sureste ibérico, a partir de algoritmos. En: *Biodiversidad en pastos*, pp. 611-618. Sociedad Española para el Estudio de los Pastos. Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación, Generalitat Valenciana., Alicante, España.
- Slayback, D.A., Pinzon, J.E., Los, S.O., Tucker, C.J. 2003. Northern hemisphere photosynthetic trends 1982-99. *Global Change Biology* 9:1-15.
- Tucker, C.J., Pinzon, J.E., Brown, M.E., Slayback, D.A., Pak, E.W., Mahoney, R., Vermote, E.F., El Saleous, N. 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* 26:4485-4498.
- Tucker, C.J., Sellers, P.J. 1986. Satellite remote-sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* 7:1395-1416.
- Tucker, C.J., Townshend, J.R., Goff, T.E. 1985. African land-cover classification using satellite data. *Science* 227:369-375.
- Van Belle, G., Hughes, J. 1984. Nonparametric Tests for Trend in Water Quality. *Water Resources Research* 20:127-136.
- Virginia, R.A., Wall, D.H. 2001. Principles of Ecosystem function. En: Levin, S.A. (ed.) *Encyclopedia of Biodiversity*, pp. 345-352. Academic Press, San Diego, USA.
- WDPA Consortium. World Database on Protected Areas-2006 version. 2006. World Conservation Union (IUCN) and UNEP-World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC).