

CASO PRÁCTICO

Sistema para el Seguimiento del funcionamiento de ecosistemas en la Red de Parques Nacionales de España mediante Teledetección

Cabello, J. ^{*1,2}, Alcaraz-Segura, D.^{1,3}, Reyes, A.¹, Lourenço, P.¹, Requena, J.M.¹, Bonache, J.⁴, Castillo, P.⁴, Valencia, S.⁵, Naya, J.⁵, Ramírez, L.⁴, Serrada, J.⁴

¹ Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global, Universidad de Almería, España.

² Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, España.

³ Departamento de Botánica, Universidad de Granada, España.

⁴ Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Madrid, España.

⁵ Indra Sistemas, S.A. Madrid, España.

Resumen: La gestión de las áreas protegidas en el actual contexto de cambio global requiere de aproximaciones que permitan caracterizar y seguir el funcionamiento de los ecosistemas. La teledetección ofrece herramientas para ello, ya que proporciona índices que informan reiteradamente y para grandes porciones de territorio, de los intercambios de materia y energía que tienen lugar entre la biota y la superficie terrestre. Considerando este principio, y la cada vez mayor disponibilidad de información satelital de calidad y facilidad de uso, desarrollamos junto con el Organismo Autónomo de Parques Nacionales de España (OAPN), un sistema de seguimiento que complementa a otras iniciativas desarrolladas por este organismo para informar del estado de conservación de los parques nacionales. El sistema, denominado REMOTE, se basa en el empleo de los índices de vegetación espectrales (IVs) de uso más extendido (EVI -índice de vegetación mejorado- y NDVI -índice de vegetación normalizado-), derivados de la serie temporal de imágenes satelitales del sensor MODIS-Terra. El sistema permite avanzar en la identificación de las condiciones de referencia para la comprensión y predicción de las respuestas de los ecosistemas frente a perturbaciones e intervenciones, y de los cambios direccionales que éstos están experimentando (tendencias). Así mismo ayuda a la detección de anomalías recientes que alertan de cambios bruscos en el funcionamiento de los ecosistemas. REMOTE se caracteriza porque usa como indicadores tres atributos relacionados con las ganancias de carbono anuales (productividad primaria neta) por parte del dosel vegetal, su estacionalidad y fenología. Además, está diseñado y programado con software libre y gratuito, lo que permitirá modificar o implementar mejoras en él fácilmente. Su implementación tiene como objetivo informar a los tomadores de decisiones y gestores de la Red de Parques Nacionales de España de la salud y estado de conservación de los ecosistemas.

Palabras clave: anomalías, atributos funcionales, condiciones de referencia, estado de conservación, ganancias de carbono, índices espectrales de vegetación.

System for monitoring ecosystem functioning of Network of National Parks of Spain with remote sensing

Abstract: Management of protected areas in the current context of global change requires approaches to characterize and to monitor ecosystem functioning. Remote sensing provides adequate tools for that because it provides indices

* Autor para la correspondencia: jcabello@ual.es

that inform repeatedly and for large areas of land, about matter and energy exchanges between the biota and land surface. Considering this principle, and the continuous improvements in the availability of satellite data of higher quality and friendly use, we have developed with the Autonomous Organization of National Parks of Spain (OAPN), a monitoring system that complements other monitoring initiatives from this agency to inform about the conservation status of national parks. The system, called REMOTE, is based on the most used spectral vegetation indices on scientific literature, EVI (Enhanced Vegetation Index) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), derived from the time series of satellite images of the MODIS-Terra sensor. The system allows to progress in identification of reference conditions to understand and predict ecosystems response against environmental perturbations or management actions, and their directional changes (trends) they are experiencing. Likewise, establishment of reference conditions helps to identify anomalies that warn of sudden changes in ecosystem functioning. The system uses as ecosystem functioning indicators three attributes related to the annual carbon gains (net primary production) by the canopy, their seasonality and phenology. In addition, Remote has been designed and programmed on open and free software allowing future modifications and improvements in an easy way. The implementation of this system aims to inform decision-makers and managers of the Network of National Parks of Spain about the health and conservation status of ecosystems.

Key words: anomalies, carbon gains, conservation status, functional attributes, reference conditions, spectral vegetation indices.

1. Introducción

Las redes de Parques Nacionales tienen como objetivo garantizar la conservación de los sistemas naturales más representativos de un país. En el actual contexto de cambio global, estas redes de espacios protegidos se enfrentan al desafío de mantener en buen estado de conservación la biodiversidad y los ecosistemas de los que son garantes. Para orientar la toma de decisiones y asegurar su protección, es fundamental establecer sistemas de seguimiento que permitan evaluar el impacto de los cambios ambientales, y evaluar el efecto de las acciones de gestión y conservación (Lovett *et al.*, 2007, Nagendra *et al.*, 2004). La teledetección ofrece en este sentido enormes ventajas, ya que constituye un método muy efectivo y de reducido coste para la obtención de información biofísica de una forma reiterada, para largas series temporales y a lo largo de grandes extensiones de terreno (Cabello *et al.* 2012b, Rose *et al.* 2015).

Los índices de vegetación espectrales (IVs), tales como el NDVI o el EVI, están cobrando cada vez más interés en el ámbito de la Ecología y la Conservación, ya que han sido propuestos como una de las variables esenciales para el seguimiento de la biodiversidad en todo el Planeta (Skidmore *et al.*, 2015, Pettorelli *et al.* 2016b). Su fortaleza radica en el hecho de que a través del modelo de Monteith (1972) pueden ser fácilmente relacionados con la productividad primaria neta (PPN), y

por tanto con las ganancias de carbono, que integra todo el funcionamiento del ecosistema (McNaughton *et al.*, 1989). De esta forma, los IVs han sido usados ampliamente como una aproximación a la caracterización de la dinámica de las ganancias de carbono para grandes extensiones de terreno (Alcaraz *et al.* 2006, Paruelo *et al.* 2001) permitiendo evaluaciones de paisajes, países, regiones o incluso el Planeta entero. En particular, en el ámbito del seguimiento de las áreas protegidas, estos índices se han manifestado muy útiles para detectar cambios de las Redes de Parques Nacionales (Alcaraz *et al.* 2009), o para evaluar la eficiencia de éstas en el mantenimiento de funciones ecológicas (Tang *et al.* 2011). Por otro lado, y puesto que la PPN representa la función ecosistémica sobre la que descansan el resto de funciones y procesos ecológicos, los IVs comienzan también a ser claves en la evaluaciones de servicios de los ecosistemas (Volante *et al.* 2012, Alcaraz *et al.* 2013, Cabello *et al.* 2013).

La Red de Parques Nacionales de España (Figura 1) cuenta con un Plan de Seguimiento y Evaluación conformado por diferentes iniciativas que contribuyen a evaluar de forma continuada y duradera el estado de dicha Red. A estas iniciativas se suma ahora un sistema de seguimiento del funcionamiento de los ecosistemas mediante técnicas de teledetección (Cabello *et al.* 2012b, Cabello *et al.* 2012c, Red de Parques Nacionales - magrama.es). Dicho sistema está basado en la aplicación de los

IVs a la evaluación del estado de conservación de los ecosistemas, y tiene como objetivo dotar a la Red de herramientas que permitan avanzar en la identificación de las condiciones de referencia en el funcionamiento de los parques y los ecosistemas que incluyen, evaluar los cambios direccionales que están teniendo lugar en ellos como consecuencia del cambio global, y detectar anomalías espaciales y temporales en respuesta a las perturbaciones y acciones de gestión. En este artículo presentamos los avances realizados hasta ahora en dicho sistema de seguimiento al que hemos denominado REMOTE (MONitoreo de la RED de Parques Nacionales mediante TEledetección). La puesta en marcha de esta iniciativa tiene como objetivo generar productos que permitan orientar a los gestores de los parques en la toma de decisiones.

2. Material y Métodos

2.1. Requerimientos para el sistema de seguimiento

El desarrollo del sistema de seguimiento se hizo partiendo de los siguientes principios: 1) el

sistema debía estar orientado a la gestión, generando productos e información que apoyen la toma de decisiones y las acciones de gestión en los parques (Tabla 1); 2) considerando la Ley 30/2014 de Parques Nacionales y otras normativas como la Directiva Hábitat (92/43/CEE), el sistema debería también permitir la evaluación del estado actual de conservación de los ecosistemas y sus condiciones de referencia; y finalmente 3) dado que la Red de Parques Nacionales opera en todo el territorio, debería informar a tres niveles de estudio: la Red, los parques individuales y los sistemas naturales –ecosistemas– que integran cada parque.

2.2. Productos de Observación de la Tierra e Indicadores de seguimiento

REMOTE se basa en datos del sensor MODIS, en concreto del producto MOD13Q1 que dispone de datos de EVI y NDVI cada 16 días (16 días forman 1 compuesto MODIS), y cuya resolución espacial es de 250×250 m (Solano *et al.*, 2010). Esta frecuencia temporal permite la construcción de una curva anual para cualquiera de los dos índices espectrales referidos, en cada uno de los

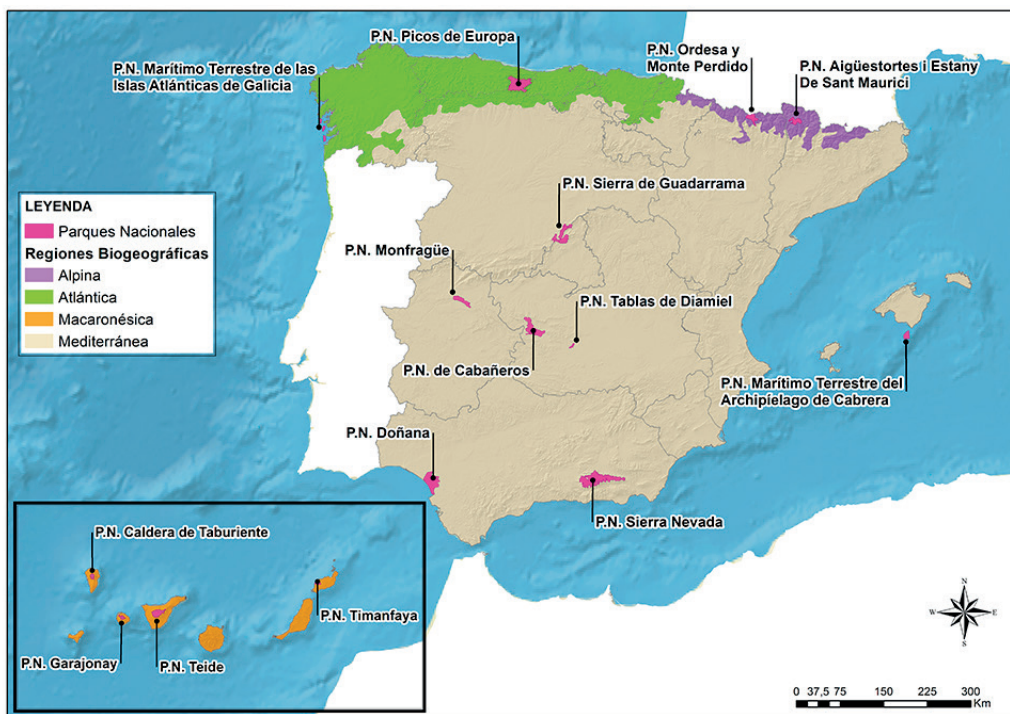


Figura 1. Red de Parques Nacionales de España y las regiones biogeográficas a las que pertenecen.

Tabla 1. Ejemplos de preguntas de gestión a los que puede responder REMOTE.

Nivel de información	Preguntas de gestión
Red y parques individuales	<p>¿Cuáles son las condiciones de referencia de los parques en términos de ganancias de carbono anuales (productividad primaria), y la estacionalidad y fenología de éstas?</p> <p>¿Existe alguna tendencia de cambio direccional en los parques en términos de productividad primaria, fenología y estacionalidad?</p> <p>¿Cómo se ha comportado el parque en el último año con respecto a la serie histórica?</p> <p>¿Cómo se viene comportando en el año en curso un parque con respecto al mismo periodo -e.g. primavera, verano, invierno, otoño- en años anteriores?</p> <p>¿De qué áreas o ecosistemas depende la magnitud, variabilidad y tendencias en el servicio ganancias de carbono de un parque determinado?</p>
Ecosistema	<p>¿Qué áreas/localidades por las que se distribuye un ecosistema muestran un comportamiento anómalo o extremo?</p> <p>¿Cómo están cambiando los ecosistemas en términos de ganancias de carbono?</p>

píxeles (porciones de territorio correspondientes a un ecosistema) a lo largo de un año promedio. A partir de esta curva, representativa de la dinámica anual media del verdor de la vegetación, derivamos mediante una rutina informática los siguientes parámetros: valor medio, máximo y mínimo del IV (EVI o NDVI); desviación típica y coeficiente de variación del mismo; y las fechas del máximo y del mínimo a lo largo del año (expresadas como el número del compuesto de MODIS en el que ocurre). Estos parámetros representan atributos

funcionales relacionados con las ganancias anuales de carbono (IV medio), los valores máximos y mínimos que esta variable toma a lo largo del año, su estacionalidad (desviación típica, coeficiente de variación) y su fenología (fechas de máximo y mínimo) (Figura 2, Tabla 2), cuyo valor como indicadores ambientales para el seguimiento de la respuesta de los ecosistemas ya ha sido suficientemente contrastada (Pettorelli *et al.*, 2005, Alcaraz-Segura *et al.* 2009).

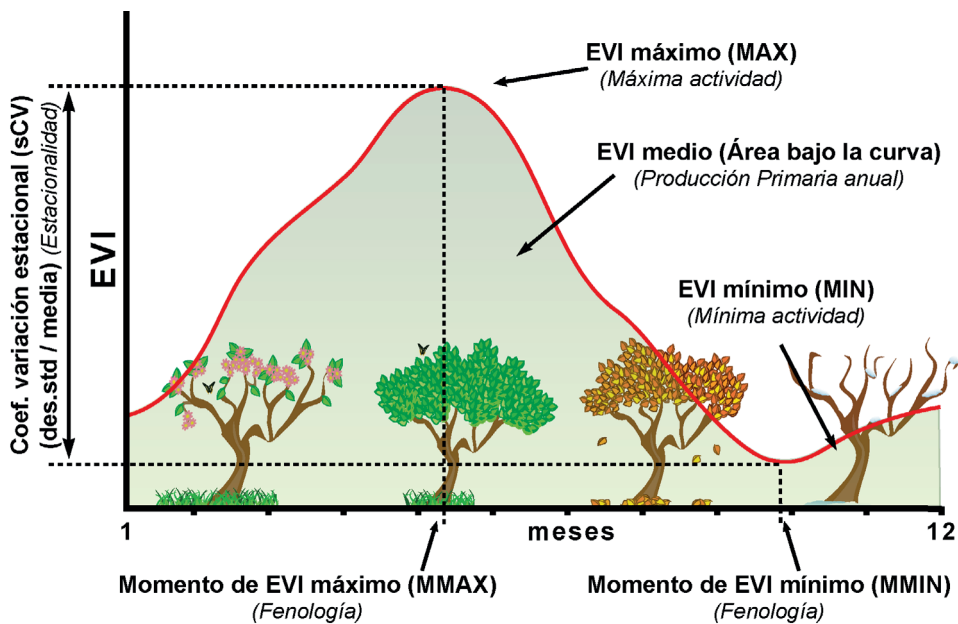


Figura 2. Curva anual de la dinámica del índice de verdor (EVI o NDVI) e indicadores del funcionamiento derivados de su parametrización.

Tabla 2. Atributos indicadores del funcionamiento de los ecosistemas: definición y significado biológico.

Atributo	Definición ⁽¹⁾	Significado biológico
IV Medio	Media de los valores de IV en un año	Ganancias de carbono anuales que realiza el dosel vegetal
IV Máximo	Máximo de IV en el año	Valor máximo que alcanzan las ganancias de carbono
IV Mínimo	Mínimo de IV en el año	Valor mínimo que alcanzan las ganancias mínimas de carbono
Desviación típica	Dispersión de los valores del IV en el año	Estacionalidad en las ganancias de carbono
Coefficiente de Variación de IV	Relación entre el valor medio de IV y su variabilidad anual	Estacionalidad en las ganancias de carbono
Momento del máximo de IV	Fecha del valor máximo de IV	Fenología de las ganancias de carbono
Momento del mínimo de IV	Fecha del valor mínimo de IV	Fenología de las ganancias de carbono

⁽¹⁾Los valores pueden obtenerse para un año concreto, o para la media de la serie temporal (año promedio). En éste último caso, son usados para identificar las condiciones de referencia del ecosistema.

2.3. Tratamiento de las imágenes y selección de unidades de análisis

REMOTE se basa en el empleo del software libre R (R Development Core Team, 2008) para el procesamiento de las imágenes y la obtención de los indicadores de seguimiento. El sistema trabaja para todo el territorio nacional creando un mosaico con las diferentes escenas empleadas. Previo a la creación de dicho mosaico, las imágenes son procesadas de acuerdo con diferentes niveles de filtrado de calidad (Reyes *et al.*, 2015), y a partir del mosaico creado es posible seleccionar el conjunto de píxeles que corresponden a parques concretos o ecosistemas específicos dentro de ellos. Para ello se dispone de mapas vectoriales, tanto de los Parques Nacionales como de los ecosistemas. En este último caso, cabe destacar que también es posible establecer criterios más o menos exigentes para la selección de píxeles de acuerdo con el porcentaje de superficie que ocupa un ecosistema dentro de ellos. La personalización de criterios, así como toda la interacción con REMOTE y la visualización de los resultados se realiza mediante una interfaz gráfica programada en la plataforma de desarrollo Microsoft .NET.

3. Resultados

3.1. Alcance y servicios del sistema de seguimiento

REMOTE ha sido diseñado para incluir tres módulos de trabajo e informar de tres dimensiones del funcionamiento de los ecosistemas. Los módulos son: 1) una interfaz gráfica de usuario para facilitar la interacción con la aplicación, 2) un procesador de los datos de estudio y 3) un gestor para la visualización de los resultados. A través de todos los módulos se obtiene información referida a los siguientes aspectos del funcionamiento de los ecosistemas: 1) el comportamiento medio y rango de variabilidad de la respuesta ecosistémica en la unidad de análisis seleccionada (condiciones de referencia, Figuras 3 y 4b), esto permite ir progresivamente (a medida que se se añaden años a la serie temporal) caracterizando el contexto funcional en el que evaluar y comprender la respuesta de los ecosistemas; 2) la identificación de cambios direccionales (tendencias) a lo largo de la serie temporal consultada, para detectar cambio sutiles que no son visibles a partir de observaciones puntuales; y 3) la detección de anomalías recientes que pueden ser usadas por los

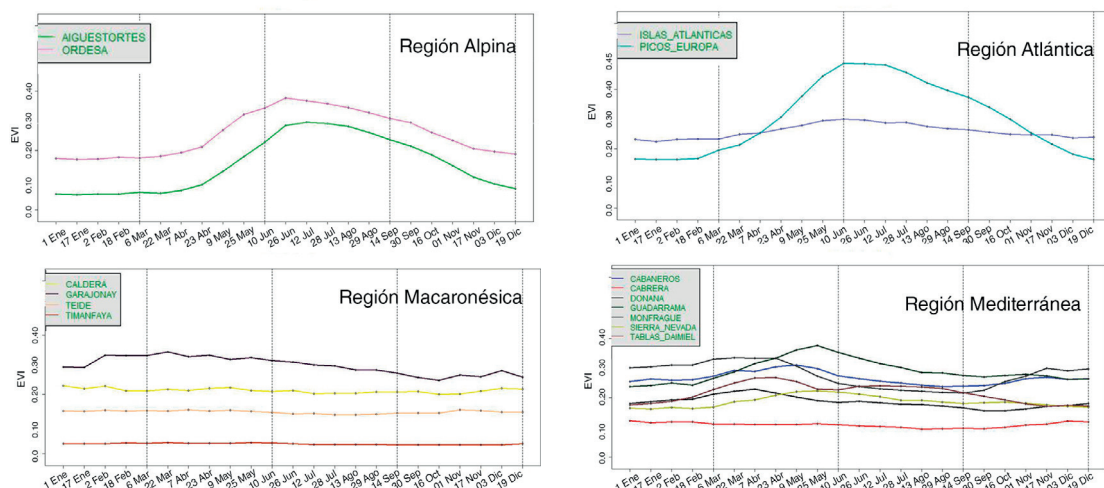


Figura 3. Condiciones de referencia de la Red de Parques Nacionales agrupados por región biogeográfica, definidas a partir de la dinámica anual media de EVI de cada parque para la serie temporal 2001-2014. Las regiones biogeográficas representan unidades de gestión ambiental para España y la Unión Europea. De esta forma, el sistema de seguimiento (REMOTÉ) proporciona un contexto funcional en el que interpretar la variabilidad de la respuesta de los ecosistemas frente a las perturbaciones y acciones de gestión.

gestores a modo de alerta de cambios bruscos en el funcionamiento de los ecosistemas. En todos los casos, la consulta puede hacerse para el nivel de estudio requerido (región biogeográfica, parque o ecosistema) y para todos los atributos funcionales que empleamos como indicadores de la productividad primaria, la estacionalidad y fenología del dosel vegetal. La interfaz gráfica genera 3 tipos de salidas gráficas: 1) mapas, cuando se requiere información espacialmente explícita (Figura 4a); 2), gráficos de líneas, cuando se requiere describir la dinámica estacional de un parque o un ecosistema (Figura 3); y 3) gráficos de cajas, para describir de una manera sintética el comportamiento de un parque o ecosistema; siendo posible, además, hacer comparativas entre los parques que integran la Red. Por su parte, el módulo de procesado de datos permite seleccionar el período de entrada de datos sobre el que se hará el análisis y el nivel de calidad de los píxeles expresado en porcentaje. Un complemento que aumenta la versatilidad de REMOTÉ, es que ofrece la posibilidad de descarga de datos geospaciales de manera manual o automática, lo que permite incorporar la información funcional a otro tipo de estudios que se estén llevando a cabo en la Red.

3.2. Primer informe de resultados de REMOTÉ

En diciembre de 2015 redactamos el primer informe derivado de la aplicación de REMOTÉ a la Red de Parques Nacionales de España. Dicho informe incluyó dos capítulos relativos a: 1) la caracterización de las condiciones de referencia en el funcionamiento de los parques de cada región biogeográfica para la serie temporal 2001-2014 (Figura 3); y 2) la identificación de las anomalías del IV y los cambios observados en los atributos funcionales que presentaron los parques en 2014. Para identificar las condiciones de referencia de un determinado parque, se realizó un promedio de los datos de EVI de toda la serie temporal disponible (2001-2014) fecha a fecha. Se seleccionó este IV de acuerdo a los trabajos previos realizados en ecosistemas y parques de la Red (Dionisio *et al.*, 2012, Alcaraz-Segura *et al.*, 2015). Con ello obtuvimos una dinámica anual media del EVI (Figura 3), representativa del funcionamiento de cada parque durante el período considerado (Alcaraz-Segura *et al.*, 2009). En el caso de las anomalías, se identificaron atendiendo a la distancia entre el valor de 2014 (último año de

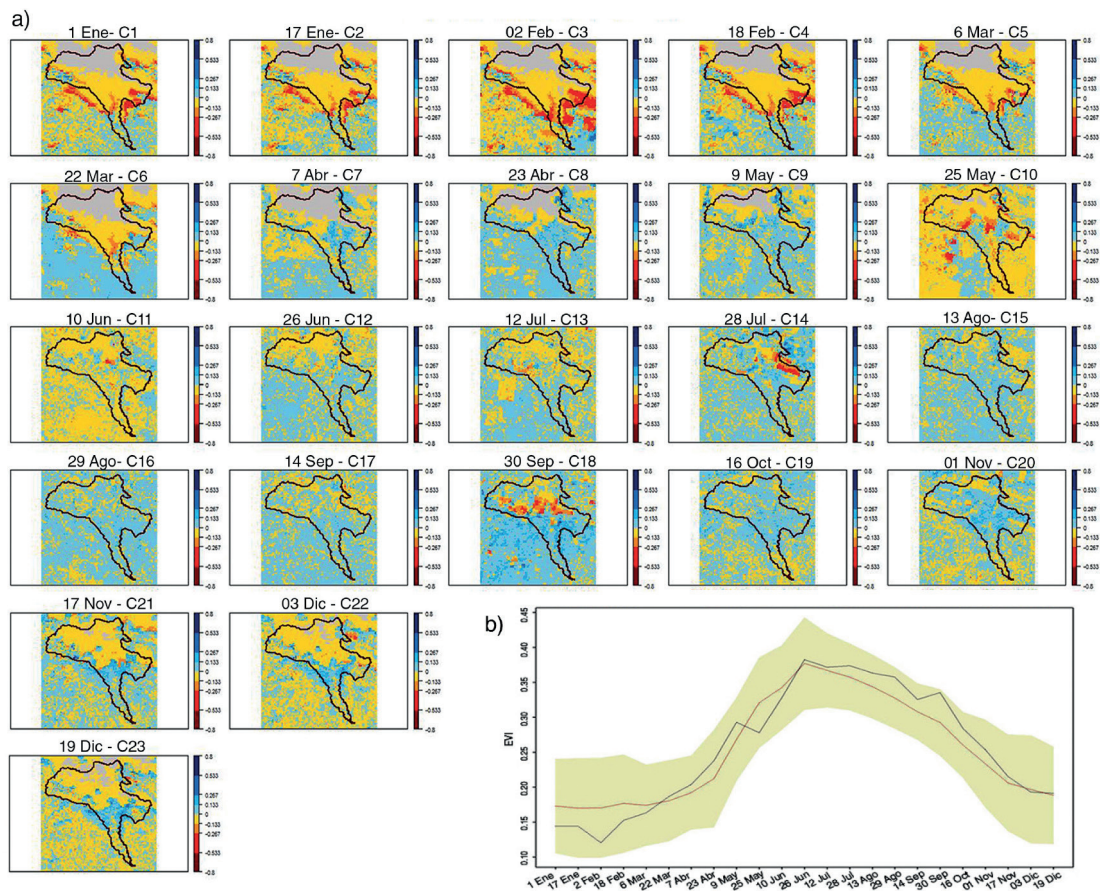


Figura 4. Anomalías temporales de EVI en el parque nacional Ordesa y Monte Perdido. a) distribución espacial de las anomalías en la región. Los colores rojos y amarillos indican anomalías negativas; los azules, anomalías positivas. b) comparación de la dinámica anual media de EVI y su desvío estándar (condiciones de referencia) con la dinámica de EVI del año 2014. Las líneas punteadas roja y negra representan el EVI promedio de toda la serie temporal y el EVI de 2014 respectivamente. La franja marrón representa la variabilidad interanual del EVI.

la serie temporal) con el promedio de toda ella. Por el momento consideramos que dichas anomalías eran relevantes si la diferencia entre ambos valores era superior a $\pm 0,25$. Desde el punto de vista ecológico, la elección de este umbral representa una convención temporal, ya que para ser ajustado se necesitaría conocer con mayor profundidad el contexto de variabilidad del funcionamiento de los ecosistemas en términos de los atributos empleados, y su relación con otros procesos ecológicos. En cualquier caso, actualmente estamos trabajando en la incorporación del cálculo de un intervalo de confianza basado en la desviación típica, para indicar la significación estadística de la anomalía.

Además, en el informe de 2016 está previsto incorporar los análisis de tendencias.

3.2.1. Condiciones de referencia de los parques nacionales en el contexto de la región biogeográfica a la que representan

Los resultados del análisis de las condiciones de referencia se muestran en la Figura 3. Los parques pertenecientes a la región Alpina (Aigüestortes i Estany de Sant Maurici y Ordesa y Monte Perdido) muestran una estación de crecimiento claramente centrada en el verano y que abarca desde finales de abril hasta finales de octubre, coincidente con las temperaturas más altas. Esto hace pensar que

la dinámica del EVI en los parques de esta región está muy controlada por la temperatura (Alcaraz-Segura *et al.*, 2009). En el caso de los parques atlánticos (Los Picos de Europa) muestran una dinámica estacional muy parecida, pero la estación de crecimiento alcanza el máximo al final de la primavera, casi un mes antes que en la región Alpina (10 de junio). Los parques mediterráneos presentan la mayor variabilidad en relación a la dinámica estacional, lo que parece estar determinado por el gradiente altitudinal y latitudinal y la presencia de humedales. En función de la latitud y la altitud, debe producirse un cambio en la importancia de los controles ambientales que determinan el funcionamiento de estos parques, y particularmente, en la estacionalidad de sus ecosistemas. Así, mientras que a bajas altitudes el control principal es la sequía de verano, en la alta montaña es la temperatura. Esto hace que la estación de crecimiento y el comportamiento estacional cambien de unos parques a otros, e incluso dentro de un mismo parque. En la Sierra de Guadarrama, Cabañeros y Sierra Nevada la estación de crecimiento alcanza su máximo entre los meses de mayo y junio, mientras que en Monfragüe se alcanza al principio de la primavera. En todos los casos se produce un decaimiento de la actividad durante el verano, aunque en Sierra de Guadarrama y Sierra Nevada este fenómeno ocurre principalmente en las zonas más bajas. Por su parte, los humedales (Tablas de Daimiel y Doñana) muestran una dinámica estacional con dos picos de actividad, uno al principio de la primavera (finales de marzo-abril) y otro a comienzos de septiembre, aunque este último es menor. Finalmente, los parques macaronésicos no muestran estacionalidad en las ganancias de carbono. Aunque el verano no es lluvioso, el comportamiento de los vientos alisios, aportando humedad por debajo del mar de nubes o sequedad por encima, parece contribuir a que los ecosistemas mantengan una actividad constante a lo largo del año (Del Arco *et al.* 2002). Las diferencias en la productividad primaria de estos parques parece estar determinada fundamentalmente por los vientos alisios, ya que los parques que reciben la influencia de la humedad del océano (Garajonay) son los más productivos. Dentro de cada parque la altitud y la orientación de las laderas podrían estar determinando la disponibilidad hídrica, y en consecuencia, de la productividad.

3.2.2. Anomalías de EVI y cambios en la productividad, estacionalidad y fenología del dosel vegetal en 2014

En 2014 se pueden reconocer algunos patrones regionales en las anomalías observadas en la curva anual de EVI y en los cambios en los atributos funcionales (productividad, estacionalidad y fenología) (Tabla 3). Así, en los parques alpinos, la estación de crecimiento se retrasó, y los ecosistemas tuvieron un comportamiento más estacional y más productivo que lo observado a lo largo de la serie temporal. En los parques Atlánticos (Los Picos de Europa), la estación de crecimiento se alargó en 2014, ya que se adelantó en primavera y se retrasó en otoño. Además, fue un año más estacional probablemente porque el invierno fue más intenso, aunque el balance anual diera como resultado mayor ganancias de carbono. Los parques mediterráneos difirieron en cuanto a la anomalía de EVI y los atributos de funcionamiento de los ecosistemas observados en 2014. En los parques de montaña (Sierra de Guadarrama y Sierra Nevada) prácticamente no se registraron anomalías relevantes en la curva anual de EVI, aunque se observó un descenso generalizado de éste, que en ningún caso excedió los valores medios de la serie temporal. Cabañeros y Monfragüe, parques de monte mediterráneo y dehesa, mostraron anomalías positivas en los valores de EVI de otoño e invierno, lo que resultó tanto en mayores ganancias de carbono en el conjunto del año, como en la estacionalidad de éstas. Tablas de Daimiel y Doñana mostraron un adelanto general de la estación de crecimiento. Los valores y las anomalías observadas en ambos casos difirieron probablemente debido a la contribución al funcionamiento del parque que tienen los matorrales y pinares de Doñana. Finalmente, en los parques macaronésicos se observaron anomalías negativas importantes durante el otoño y el invierno en Caldera de Taburiente, pero sobre todo en Garajonay. En ambos casos se produjo un descenso de las ganancias de carbono anuales, al contrario de lo que ocurrió en Teide, donde aumentó.

4. Discusión

4.1. Productos para la gestión de la Red de Parques Nacionales de España

En relación al seguimiento y gestión de los espacios protegidos, la información satelital muestra

Tabla 3. Cambios en el funcionamiento de los ecosistemas durante 2014 en la Red de Parques Nacionales de España. Se muestran las anomalías en la dinámica de EVI a lo largo de este año y los cambios en tres atributos funcionales (Productividad, estacionalidad y fenología) estimados a partir de dicha dinámica, con respecto a los valores medios observados para el período 2001-2014. Los símbolos usados representan la magnitud y el sentido de los cambios observados, y el adelanto o retraso de la estación de crecimiento.

Región	Cambios en atributos					
Biogeográfica	Parque		funcionales ⁽¹⁾	Anomalías de EVI a lo largo del año ⁽²⁾		
Alpina	Aigüestortes i Estany de Sant Maurici	P	↑	(+)	Después 1ª quincena Julio hasta 1ª Noviembre	
		E	↑			
		F	→	(-)		Invierno e inicio primavera
	Ordesa y Monte Perdido	P	↑	(+)	Después 2ª quincena Julio hasta 1ª Noviembre	
		E	↑			
		F	→	(-)		Invierno
Atlántica	Los Picos de Europa	P	↑	(+)	Abril a Octubre	
		E	↑	(-)	Invierno	
		F	→			
Mediterránea	Sierra de Guadarrama	P	↓	(+)	No relevantes	
		E	↑	(-)	Invierno	
		F	≈			
	Sierra Nevada	P	↓	(+)	No relevantes	
		E	≈	(-)	No relevantes	
		F	≈			
	Cabañeros	P	↑	(+)	Ocasionales en Otoño e Invierno	
		E	↑	(-)	No relevantes	
		F	≈			
	Monfragüe	P	↑↑	(+)	Otoño e inicio Invierno	
		E	↑	(-)	No relevantes	
		F	≈			
	Tablas de Daimiel	P	↓	(+)	No relevantes	
		E	≈	(-)	Enero a Noviembre	
		F	←			
	Doñana	P	↑	(+)	Enero a Mayo	
		E	≈	(-)	No relevantes	
		F	←			
	Macaronésica	Garajonay	P	↓	(+)	Final Primavera y Verano
			E	↑	(-)	Invierno
			F	≈		
		Caldera de Taburiente	P	↓	(+)	Ocasionales en Primavera
			E	≈	(-)	Otoño e inicio Invierno
			F	≈		
Teide	P	↑	(+)	No relevantes		
	E	≈	(-)	No relevantes		
	F	≈				

(1) P: Producción Primaria Neta, E: Estacionalidad; F: Fenología (Fecha del valor máximo de EVI). ↑↑ y ↑: valores superiores a la media registrada para todo el período (productividad y estacionalidad); ↓: valores inferiores; ≈ sin cambio. ← adelanto en la fecha en la que ocurre el EVI máximo y → retraso en esta fecha.

(2) Las anomalías positivas (+) o negativas (-) se refieren a valores de EVI superiores o inferiores en 0,25 para un momento dado con respecto a los valores medios observados en el período 2001-2014 en dicho momento del año.

utilidad más allá de la evaluación de los cambios en la distribución de los ecosistemas (Nagendra *et al.* 2013). Este tipo de información permite desarrollar otras perspectivas muy útiles en el actual contexto de cambio global, tales como evaluar cambios en funciones ecológicas clave y detectar anomalías y tendencias en respuesta a las perturbaciones (Pettorelli *et al.* 2016a). REMOTE está diseñado para la aplicación de las dos últimas, ya que presenta dos características fundamentales: 1) desde el punto de vista conceptual los IVs aparecen como variables adecuadas para medir el funcionamiento de los ecosistemas, en la medida en que informan sobre los intercambios de materia y energía entre la biota y la superficie terrestre (Cabello *et al.* 2012c, Jax 2010) y la parametrización de la curva anual de éstos IVs permite derivar indicadores de las ganancias totales de carbono en el conjunto del año, y de su estacionalidad y fenología; 2) la extensión de las series temporales de la información satelital es cada vez mayor (15 años en el caso del producto MOD13Q1), permitiendo la generación de métricas con suficiente validez estadística (e.g. Dionisio *et al.* 2012). Ambas características son muy relevantes para los programas de seguimiento de áreas protegidas, que hasta ahora mayoritariamente ponían el foco en las condiciones ambientales, o en la estructura y composición de los ecosistemas.

Para asegurarnos de que REMOTE sea una herramienta realmente orientada hacia la gestión, su desarrollo se está haciendo en estrecha colaboración con el OAPN y atendiendo a cuestiones relevantes para el gestor como usuario final (Tabla 2). Los indicadores que derivamos están siendo incorporados al sistema de indicadores del Plan de Seguimiento y Evaluación de la Red de Parques Nacionales. Por otro lado, el OAPN ya ha comenzado a incorporar los resultados obtenidos en sus informes de seguimiento y memoria anuales sobre la Red de Parques, e integrará dicha información en los informes de situación remitidos al Senado cada tres años.

Uno de los principales retos a superar es usar REMOTE para informar de cambios concretos en la biodiversidad. Resolver esta cuestión requiere profundizar en el análisis cruzado de la información de que dispone el OAPN a partir de las otras iniciativas de seguimiento ya existentes

(fenología, clima, estado fitosanitario, etc.), de otros datos de seguimiento levantados en los diferentes parques, o de resultados obtenidos por investigadores. Hemos de tener en cuenta, que las alteraciones de los ecosistemas tienen una naturaleza compleja, ya que responden a múltiples impulsores de cambio (cambio climático, incendios, cambio en los usos del suelo, gestión forestal...), y pueden estar indicando aspectos muy diversos de la funcionalidad del ecosistema, desde un desacoplamiento en interacciones bióticas, la pérdida de calidad del hábitat para algunas especies, o la falta de disponibilidad de agua como consecuencia de procesos de sequía o sobreexplotación de recursos hídricos. Por ahora no es posible vincular los resultados que obtenemos de REMOTE a éstas u otras posibles preocupaciones de los gestores, pero en cualquier caso, representa una herramienta de gran potencial, ya que su principal función es actuar de “termómetro” para informar sobre la “salud” e “integridad” del sistema (e.g. Tabla 3).

4.2. Futuros desarrollos

REMOTE está preparado para avanzar en diferentes sentidos. En primer lugar, está previsto automatizar la descarga y procesamiento de imágenes de forma que pueda informar de los cambios de los ecosistemas “casi” en tiempo real y, fortalecer su función como sistema de alerta. Segundo, el sistema está abierto a la incorporación de otros productos de teledetección además de los IVs. Entre tales productos consideramos prioritarios el empleo de indicadores de evapotranspiración, albedo y humedad del suelo, ya que esto nos permitiría situar la evaluación de los parques en el marco de las políticas de cambio climático. Además, para extender su aplicación a los parques de menor extensión (Islas Atlánticas de Galicia y el Archipiélago de Cabrera), se incorporarán imágenes de mayor resolución espacial. Tercero, una vez que el OAPN dispone de una cartografía uniforme para el conjunto de los sistemas naturales (ecosistemas) de la Red, REMOTE puede informar a nivel de ecosistema. Este módulo ya está operativo y confiamos en que será de gran ayuda para los gestores locales de cada parque. Finalmente, debemos considerar que el empleo de toda esta información satelital servirá para evaluar el papel de la Red en la

provisión de servicios de los ecosistemas a la sociedad, un aspecto clave para que las políticas ambientales basadas en el mantenimiento de los ecosistemas en un estado favorable de conservación continúen siendo apoyadas por el público. En este sentido, conviene destacar que aunque hasta ahora REMOTE es de uso interno para el OAPN, se prevé que se abrirá al público una vez que hayamos adquirido experiencia en el uso de la herramienta. Este aspecto resulta clave en la actualidad, ya que conocer cuál es el estado de conservación de nuestros ecosistemas y poner de manifiesto los servicios que proveen al bienestar humano representa una demanda para la gestión ambiental en el siglo XXI.

5. Conclusiones

En este trabajo presentamos REMOTE, un sistema informático orientado al seguimiento del funcionamiento de los ecosistemas de la Red de Parques Nacionales de España basado en teledetección. Este sistema presenta una serie de características que lo hacen muy útil para la gestión: 1) puede informar a los niveles de ecosistema, parque o Red de Parques; 2) permite identificar para cualquiera de estos tres niveles de estudio, las condiciones de referencia, las anomalías temporales y las tendencias a largo plazo en las ganancias de carbono por parte del dosel vegetal, y la estacionalidad y fenología de éstas, tres atributos del funcionamiento de los ecosistemas de gran significado biológico; 3) provee resultados en forma de mapas y gráficas lo que ayuda a los gestores a conocer dónde y cuándo están ocurriendo cambios en los ecosistemas; y 4) esté basado en software libre como R, lo que reduce al mínimo el coste económico del sistema, y permite su constante mejora y actualización. El futuro desarrollo del software REMOTE pasa por la incorporación de nuevos productos de observación de la tierra (albedo, evapotranspiración) así como la incorporación de datos de nuevos sensores (sensor MSI del satélite Sentinel 2 del programa Copernicus) con el objetivo de aumentar la información que aporta el sistema. Como valor añadido, los resultados de REMOTE abren la puerta a establecer la conexión entre variables biofísicas, funcionamiento y provisión de servicios por parte de los ecosistemas.

Agradecimientos

Los trabajos han sido financiados por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN), y el Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG).

Referencias

- Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J., Cabello, J. 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography*, 15(2), 200-212. <http://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00215.x>
- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J., Delibes, M. 2009. Use of Descriptors of Ecosystem Functioning for Monitoring a National Park Network: A Remote Sensing Approach. *Environmental Management*, 43(1), 38-48. <http://doi.org/10.1007/s00267-008-9154-y>
- Alcaraz-Segura, D., Bella, C. M. D., Straschnoy, J. V. 2013. *Earth Observation of Ecosystem Services*. CRC Press.
- Alcaraz-Segura, D., Reyes, A., Cabello, J. 2015. Cambios en la productividad de la vegetación mediante teledetección. En: Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Barea-Azcón, J.M. y Aspizua, R. (editores). 2015. *La huella del cambio global en Sierra Nevada: Retos para la conservación*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. pp. 140-143.
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Lourenço, P. 2012a. 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. En *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2008-2011*, pp. 45-69. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid. Disponible en: www.magrama.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/programa-investigacion/oapn_inv_art0803_tcm7-231997.pdf [Acceso: junio/2016].
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Lourenço, P., Reyes, A. 2012b. *Guía para la incorporación de la teledetección al seguimiento de la Red de Parques Nacionales*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- Cabello, J., Fernández, N., Alcaraz-Segura, D., Oyonarte, C., Pineiro, G., Altesor, A., Delibes, M., Paruelo, J. M. 2012c. The ecosystem functioning dimension in conservation: insights from remote sensing. *Biodiversity and Conservation*, 21(13), 3287-3305 <http://doi.org/10.1007/s10531-012-0370-7>

- Cabello, J., Lourenço, P., Reyes, A., Alcaraz-Segura, D. 2013. Ecosystem Services Assessment of National Parks Networks for Functional Diversity and Carbon Conservation Strategies Using Remote Sensing. *Earth Observation of Ecosystem Services*, 179.
- Del Arco, M., Salas, M., Acebes, J. R., del C. Marrero, M., Reyes-Betancort, J. A., Pérez-de-Paz, P. L. 2002. Bioclimatology and climatophilous vegetation of Gran Canaria (Canary Islands). *Annales Botanici Fennici*, 39(1), 15-41.
- Dionisio, M.A., Alcaraz-Segura, Domingo, Cabello, J. 2012. Satellite-Based Monitoring of Ecosystem Functioning in Protected Areas: Recent Trends in the Oak Forests (*Quercus pyrenaica* Willd.) of Sierra Nevada (Spain). En *International Perspectives on Global Environmental Change*.
- Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la Conservación de los Hábitats Naturales y de la Fauna y Flora Silvestres. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* L 206: 1-50.
- España. Ley 30/2014, de 3 de diciembre, de Parques Nacionales. *Boletín Oficial del Estado*. 4 de Diciembre de 2014. Número 293. 9. 99762-99792.
- Jax, K. 2010. *Ecosystem Functioning*. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511781216>
- Lovett, G.M., Burns, D.A., Driscoll, C.T., Jenkins, J.C., Mitchell, M.J., Rustad, L., Shanley, J.B., Likens, G.E., Haeuber, R. 2007. Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(5), 253-260. [http://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[253:WNEM\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[253:WNEM]2.0.CO;2)
- McNaughton, S. J., Oesterheld, M., Frank, D. A., Williams, K. J. 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*, 341(6238), 142-144. <http://doi.org/10.1038/341142a0>
- Monteith, J. L. 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747-766. <http://doi.org/10.2307/2401901>
- Nagendra, H., Tucker, C., Carlson, L., Southworth, J., Karmacharya, M., Karna, B. 2004. Monitoring Parks Through Remote Sensing: Studies in Nepal and Honduras. *Environmental Management*, 34(5), 748-760. <http://doi.org/10.1007/s00267-004-0028-7>
- Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J.P., Jongman, R. H.G., Tarantino, C., Adamo, M., Mairota, P. 2013. Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators*, 33, 45-59. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.014>
- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Sala, O. E. 2001. Current Distribution of Ecosystem Functional Types in Temperate South America. *Ecosystems*, 4(7), 683-698. <http://doi.org/10.1007/s10021-001-0037-9>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510. <http://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pettorelli, N., Wegman, M., Gurney, L., Dubois, G. 2016a. Monitoring Protected Areas from Space. In: Joppa, L.N., Baillie, J.E.M., Robinson, J.G. (eds.), *Protected Areas. Area They Safeguarding Biodiversity?* Wiley Blackwell, pp: 242-259. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118338117.ch14>
- Pettorelli, N., Wegmann, M., Skidmore, A., Múcher, S., Dawson, T.P., Fernandez, M., Lucas, R., Schaeppman, M.E., Wang, T., O'Connor, B., Jongman, R.H.G., Kempeneers, P., Sonnenschein, R., Leidner, A. K., Böhm, M., He, K.S., Nagendra, H., Dubois, G., Fatoyinbo, T., Hansen, M.C., Paganini, M., de Klerk, H.M., Asner, G.P., Kerr, J.T., Estes, A.B., Schmeller, D.S., Heiden, U., Rocchini, D., Pereira, H.M., Turak, E., Fernandez, N., Lausch, A., Cho, M.A., Alcaraz-Segura, D., McGeoch, M.A., Turner, W., Mueller, A., St-Louis, V., Penner, J., Vihervaara, P., Belward, A., Reyers, B., Geller, G.N. 2016b. Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, n/a-n/a. <http://doi.org/10.1002/rse2.15>
- R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, <http://www.R-project.org>.
- Red de Parques Nacionales - magrama.es. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/red-parques-nacionales> [Acceso: Mayo, 2016].
- Reyes, A., Alcaraz-Segura, D., Cabello, Javier. 2015. Implicaciones del filtrado de calidad del índice de vegetación EVI para el seguimiento funcional de ecosistemas. *Revista De Teledetección*, 43, 11-30. <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3316>
- Rose, R. A., Byler, D., Eastman, J. R., Fleishman, E., Geller, G., Goetz, S., Guild, L., Hamilton, H., Hansen, M., Headley, R., Hewson, J., Horning, N., Kaplin, B.A., Laporte, N., Leidner, A., Leimgruber, P., Morissette, J., Musinsky, J., Pintea, L., Prados, A., Radeloff, V.C., Rowen, M., Saarchi, S., Schill, S., Tabor, K., Turner, W., Vodacek, A., Vogelmann, J., Wegmann, M., Wilkie, D., Wilson, C. 2015. Ten ways remote sensing can contribute to conservation. *Conservation Biology*, 29(2), 350-359. <http://doi.org/10.1111/cobi.12397>
- Skidmore, A. K., Pettorelli, N., Coops, N. C., Geller, G. N., Hansen, M., Lucas, R., Múcher, C. A., O'Connor, B., Paganini, M., Pereira, H. M., Schaeppman, M. E., Turner, W., Wang, T., Wegmann, M. 2015. Agree on biodiversity metrics to track from space. *Nature*, 523, 403-405. <http://dx.doi.org/10.1038/523403a>

- Solano, R., Didan, K., Jacobson, A. Huete, A. 2010. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). Version 2.00, May 2010 (Collection 5). Disponible en: http://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_01_2012.pdf [Acceso: Junio, 2016].
- Tang, Z., Fang, J., Sun, J., Gaston, K. J. 2011. Effectiveness of Protected Areas in Maintaining Plant Production. *PLoS ONE*, 6(4): e19116. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0019116>
- Volante, J. N., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M. J., Viglizzo, E. F., Paruelo, J. M. 2012. Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environments*, 154: 12-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.012>