

Implementación de un sistema de seguimiento para la evaluación de los efectos del cambio global sobre el funcionamiento de las áreas protegidas de Iberoamérica

La medida de la respuesta

ECOSISTÉMICA

Este artículo presenta un proyecto para desarrollar un sistema de evaluación, seguimiento y alerta de las respuestas del funcionamiento ecosistémico ante el cambio global en seis áreas protegidas de España, Argentina y Uruguay, ofreciendo los resultados para la experiencia piloto desarrollada en una de ellas, el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar (Almería). El sistema está basado en el análisis de series temporales de imágenes de satélites de bajo coste, que permiten calcular la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por la vegetación como indicador subrogado de la Producción Primaria Neta (PPN) de los ecosistemas. Como aplicación básica del sistema se analiza la existencia de tendencias durante el periodo 2001-2008 en cuatro de los descriptores relacionados con la productividad primaria, la fenología y la estacionalidad de las ganancias de carbono. Como resultado del proyecto, se ofrece a los gestores de las áreas protegidas un sistema de seguimiento y alerta ante los cambios registrados en el funcionamiento de las mismas. Esta herramienta científica de apoyo a la gestión presenta una doble ventaja: por un lado, es adaptable a otras áreas, y por otro, podrá usarse a través de Internet para su consulta pública por parte de otros científicos, gestores y ciudadanos en general.



Por D. ALCARAZ-SEGURA, J. CABELLO, C. BAGNATO, A. ALTESOR, C. OYONARTE, M. OYARZABAL, J.M. PARUELO



El proyecto se realizó en seis áreas protegidas, entre ellas las del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar, en España, (izquierda), Paisaje Protegido de Quebrada de los Cuervos, en Uruguay (arriba), Parque Nacional El Palmar, en Argentina (debajo, izda.), y Parque Nacional de Doñana, en España (debajo).



El cambio global constituye un reto para la conservación de la biodiversidad a través de cambios en el clima, los ciclos biogeoquímicos, los usos del suelo y los intercambios bióticos [1]. A nivel mundial, se ha demostrado que el cambio climático está modificando la duración y la fenología de la estación de crecimiento, el régimen de fuegos y las cadenas tróficas, es decir, múltiples aspectos de la dinámica ecológica [2]. Muchos de estos efectos han sido puestos de manifiesto tanto en España como en el Cono Sur de Sudamérica [3-9]. Estos cambios también afectan a las áreas protegidas, donde se centran los mayores esfuerzos de conservación de la biodiversidad [10]. Por tanto, resulta necesario conocer si la estructura y el funcionamiento de estas áreas se mantienen a lo largo del tiempo y cuantificar sus eventuales cambios [11]. Esto ayudaría a desarrollar prácticas de gestión adaptativa que permitan minimizar la pérdida de biodiversidad, y a tener en cuenta estos cambios para priorizar los esfuerzos de conservación. A su vez, cuantificar el valor que los bienes y servicios que los ecosistemas protegidos proporcionan a los seres humanos y co-

CIENTÍFICOS Y GESTORES DEBEMOS DESARROLLAR E IMPLEMENTAR INSTRUMENTOS DE SEGUIMIENTO QUE PERMITAN EVALUAR LAS CONDICIONES DE SALUBRIDAD DE LOS ECOSISTEMAS Y DE LOS CAMBIOS QUE SE PRODUCEN EN LOS MISMOS

nocer el riesgo que corren aumentaría la aceptación social de las medidas conducentes a su conservación [12].

Según todo lo anterior, científicos y gestores tenemos el deber de desarrollar e implementar instrumentos de seguimiento que permitan una rápida evaluación de las condiciones de salubridad de los ecosistemas (integridad ecológica) y de los cambios que sucedan en los mismos [13,



La región de la cuenca del arroyo Laureles, en Uruguay, formada por pastizales y bosques, ha sido una de las seis áreas seleccionadas para el proyecto.

14]. Las variables a incluir en estos instrumentos deben seguir algunos principios básicos [14-17] para ser capaces de: 1) poder registrarse a nivel de ecosistema, a lo largo de grandes áreas y en tiempo real; 2) ofrecer un breve periodo de tiempo de respuesta que permita la detección temprana de los impactos para

servir de guía a una gestión adaptativa efectiva; 3) poder ser medidos de forma fácil y directa; 4) capturar la variabilidad espacio-temporal causada tanto por los regímenes naturales de perturbación como por los impactos antrópicos; 5) permitir el establecimiento de valores cuantitativos de referencia o control; 6) poder ser comparados no solo a nivel local sino también a escala regional, y 7) poder es-

tablecer relaciones entre ellas a través de diferentes escalas espaciales.

Para este propósito, los atributos funcionales de los ecosistemas (es decir, los relacionados con los intercambios de materia y energía entre la biota y el ambiente) ofrecen varias ventajas, ya que muestran una respuesta más rápida a las perturbaciones que la estructura de la vegetación, evitando que la inercia estructural retrase la percepción de los efectos de la perturbación en los ecosistemas [18]. Además, los atributos funcionales facilitan el seguimiento mediante teledetección bajo un protocolo de observación común en distintas regiones, y permiten caracterizar cuantitativa y cualitativamente los servicios ecosistémicos [19]. Diversos índices espectrales derivados de imágenes de satélite están vinculados a variables funcionales de los ecosistemas, tales como la producción primaria, la evapotranspiración, la temperatura superficial, el albedo superficial y la eficiencia en el uso de las precipitaciones [20-22]. Entre las variables de-

rivadas de los datos espectrales destacan los índices de vegetación. Estos han sido ampliamente utilizados en ecología para el estudio de las tendencias temporales, y desempeñan un papel clave en la investigación del cambio global [23]. Debido a que pueden ser calculados a partir de imágenes con muy diversa resolución espacial y temporal, han sido incorporados en numerosas experiencias de seguimiento [24, 25] desarrolladas en un amplio rango de escalas (desde la regional a la global), mostrando su aplicabilidad para detectar cambios a largo plazo incluso a escala de área protegida [6-8]. La integración de las herramientas de teledetección en ecología a través de los índices de vegetación [26, 27] ha permitido progresar en la caracterización del funcionamiento de los ecosistemas, particularmente de la Productividad Primaria Neta (PPN) a escala regional e incluso global. La incorporación de estas variables funcionales es de vital importancia para la gestión ecosistémica, la planificación sistemática de la conservación [28] y para integrar los efectos del cambio global en las estrategias de conservación [10].

Pese a todo el conocimiento acumulado a escala global y continental, la gestión de cada área protegida requiere de evaluaciones particulares ya que, frecuentemente, cada área no sigue los patrones y tendencias observados a escala regional [6]. En la actualidad existen algunas evaluaciones basadas en teledetección a gran escala de las condiciones de referencia del funcionamiento ecosistémico de las áreas protegidas de España y Sudamérica [6-8, 29-32], así como de las tendencias temporales que presentan [6-8, 32]. No obstante, la ciencia y la práctica de la conservación requieren de evaluaciones con mayor resolución espacial, a escala local y nivel de parque, y que permitan llevar a cabo acciones concretas de gestión en fun-

ción de los efectos que los cambios ambientales están teniendo sobre los procesos ecológicos que mantienen la biodiversidad de un área protegida.

Objetivos

Una de nuestras líneas de investigación durante los últimos diez años viene siendo la de evaluar los efectos del cambio global sobre el funcionamiento de los ecosistemas en áreas protegidas. Este objetivo persigue un interés tanto básico como aplicado. Desde una perspectiva básica, nos ha permitido comprender mejor los controles ambientales del funcionamiento promedio de los ecosistemas y sus tendencias temporales a diferentes escalas espaciales y temporales. Desde un punto de vista aplicado, nos permite desarrollar sistemas de seguimiento y alerta para apoyar la conservación de las áreas protegidas. En este sentido, en el presente trabajo he-

mos desarrollado un marco conceptual y una herramienta de trabajo que aporta información científica sólida acerca de la situación actual y las tendencias temporales en el funcionamiento ecosistémico de seis áreas protegidas de Iberoamérica. Dicha herramienta está basada en el estudio de índices espectrales de vegetación derivados de imágenes de satélite de alta resolución espacial y temporal de bajo coste, y persigue dotar a las áreas protegidas con una herramienta *online* de seguimiento y alerta que permita el seguimiento de la dinámica de la Productividad Primaria Neta, un servicio clave que proporcionan los ecosistemas al incorporar la energía solar a la cadena trófica. La metodología empleada permitiría extender fácilmente el sistema a otras variables descriptoras del funcionamiento de los ecosistemas, como la evapotranspiración o la fenología, de gran interés para la evaluación de los efectos del cambio global sobre la biodiversidad.



Los parques nacionales de Iguazú situados en Argentina y Brasil, elegidos para el proyecto, son un marco excelente para evaluar los cambios en el funcionamiento ecosistémico.

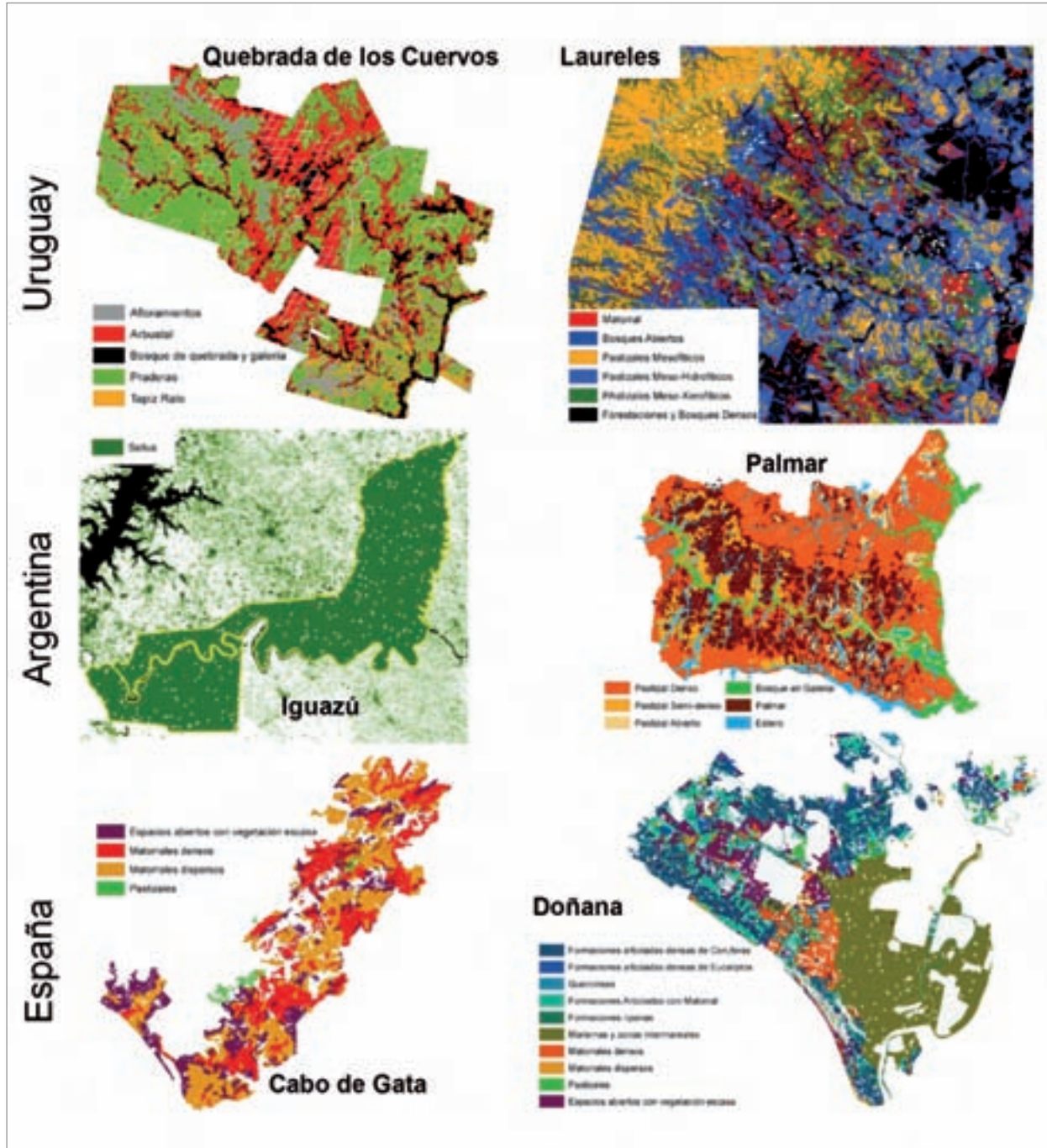


Figura 1. Mapas de los ecosistemas estudiados en cada una de las seis áreas protegidas mostrando los píxeles MODIS de 250 m (cuadrados en blanco) que fueron muestreados en el análisis.

Materiales y métodos

Áreas protegidas objeto de estudio

Este trabajo se llevó a cabo de forma simultánea en un total de seis áreas protegidas de España, Argentina y Uruguay. No obstante, este artículo solo muestra a modo ilustrativo los resultados para la experiencia piloto realiza-

da en la Reserva de la Biosfera del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar [32]. Las seis áreas seleccionadas incluyen una extraordinaria heterogeneidad de ambientes e historias de uso, y representan un marco excelente para evaluar los cambios en el funcionamiento ecosistémico a través de distintos ecosistemas y circunstancias geopolíticas (figura 1):

■ En España: 1) Reserva de la Biosfera del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar, cuya vegetación está dominada por matorrales semiáridos con especies compartidas con las zonas áridas de África y Asia; 2) Parque Nacional y Natural de Doñana, que dan representación tanto al bosque y matorral mediterráneo como a la marisma, un sistema de humedales litorales.

EL SISTEMA DE INFORMACIÓN PROPUESTO COMBINA EL MÉTODO DE GRIGERA *ET AL.* PARA USO AGROPECUARIO Y EL MODELO DE MONTEITH PARA EVALUAR LA PRODUCTIVIDAD DE LOS ECOSISTEMAS A PARTIR DE INFORMACIÓN RADIOMÉTRICA

- En Argentina: 1) Parque Nacional Iguazú y su continuación en Brasil con el Parque Nacional do Iguaçu, que da protección a la última representación de la selva tropical húmeda paranaense; 2) Parque Nacional El Palmar y su continuación en el Refugio de Vida Silvestre de La Aurora del Palmar, última representación de la sabana templada dominada por espinal y palmeras.
- En Uruguay se está implementando el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP). Dentro del mismo se seleccionaron: 1) la primera área integrada al sistema, el Paisaje protegido Quebrada de los Cuervos, y 2) la región de la cuenca de los arroyos Laureles y Cañas, candidata a incorporarse al SNAP. Ambas áreas corresponden a un mosaico de pastizales en un gradiente de meso-xerofíticos a meso-hidrofíticos con bosques nativos en las áreas riparias.

Diseño del sistema de seguimiento del funcionamiento ecosistémico

El sistema de información para el seguimiento de la vegetación y el apoyo a la toma de decisiones de las áreas protegidas se basa en el propuesto por Grigera *et al.* [33] para uso agropecuario, y utiliza el modelo de Monteith [34] para evaluar la productividad de los ecosistemas a partir de información radiométrica. Oyarzabal *et al.* [35] comenzaron su aplicación al P.N. Cabo de Gata-Níjar.

En resumen, el núcleo del sistema de información está formado por una com-

pleta colección de bases de datos biofísicas, entre las que destacan las imágenes de satélite (figura 2). El primer paso consistió en adquirir las diferentes fuentes de información. Posteriormente se realizó un control de calidad antes de ser integradas en el sistema. Finalmente, mediante modelos y análisis estadísticos, se caracterizó la dinámica promedio y se detectaron tendencias temporales y anomalías espaciales de variables biofísicas clave e indicadores del funcionamiento del ecosistema que faciliten la elaboración de informes por parte de los gestores. Una ventaja del esquema propuesto es que se adapta al nivel de información disponible. Así, el mantenimiento y desa-

rrollo del sistema conlleva no solo la actualización sistemática de la información satelital, sino también la calibración de las variables biofísicas y la incorporación de nueva información adicional sobre el área protegida.

Índices espectrales de vegetación y atributos descriptores del funcionamiento ecosistémico

El estudio del funcionamiento de los ecosistemas se basó en el análisis de datos espectrales aportados por imágenes de satélite. Para ello se utilizaron imágenes de dos índices de vegetación: el Índice de Vegetación de la diferencia Normalizada (IVN o NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) y el Índice de Vegetación Mejorado (IVM o EVI, *Enhanced Vegetation Index*). Ambos permiten monitorear la actividad fotosintética, la productividad o el índice de área foliar de los ecosistemas para territorios amplios mediante series tempo-

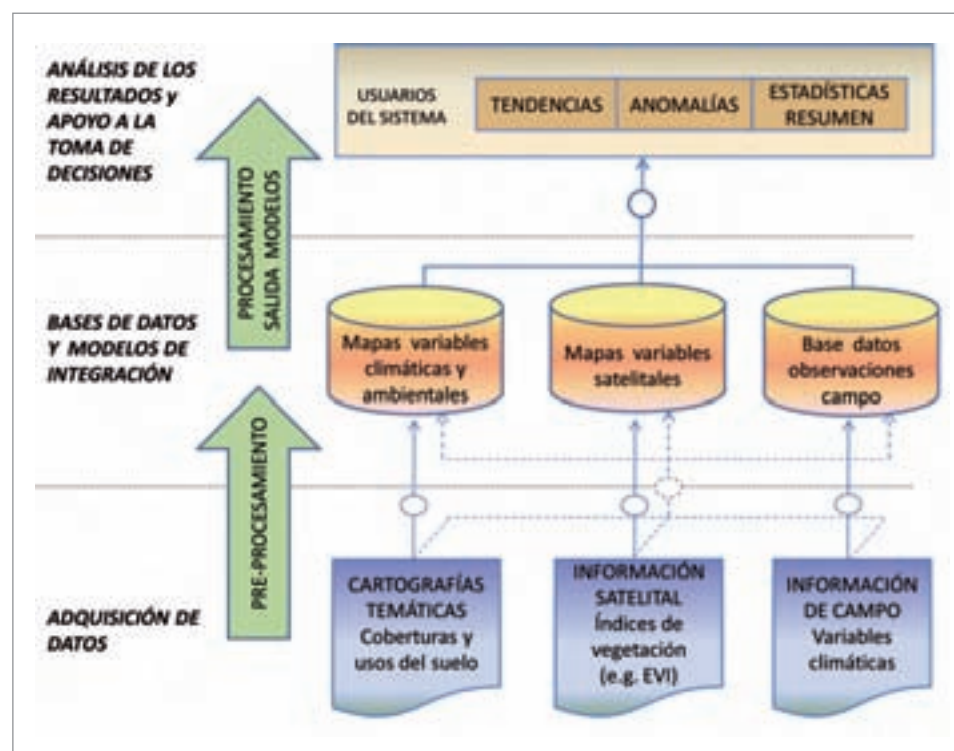


Figura 2. Esquema del sistema de información.

EL ESTUDIO SE BASÓ EN EL ANÁLISIS DE DATOS ESPECTRALES A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITES DE DOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN: EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE LA DIFERENCIA NORMALIZADA (IVN O NDVI) Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN MEJORADO (IVM O EVI)

rales de imágenes de satélite. Están basados en la propiedad espectral de la vegetación verde de absorber diferencialmente la radiación fotosintéticamente activa. El NDVI calcula la diferencia normalizada de la reflectancia entre dos longitudes de onda relacionadas con el proceso de la fotosíntesis (rojo e infrarrojo cercano), mientras que el EVI incorpora una tercera longitud de onda (azul) que minimiza la influencia del suelo y la atmósfera.

Las imágenes de EVI se obtuvieron del sensor MODIS en compuestos de 16 días con una resolución espacial de 250 metros. Gracias a su alta calidad y resolución espacial, estas imágenes constituyen el núcleo del sistema de seguimiento. No obstante, debido a que solo están disponibles desde el año 2000, para poder ir más atrás en el tiempo y caracterizar el funcionamiento y las tendencias a largo plazo se emplearon también imágenes de NDVI de la base de datos NOAA-AVHRR-LTDR en compuestos de 15 días, que, pese a tener un tamaño de píxel de 5 kilómetros, están disponibles desde 1981 hasta 2000. El sistema de información descarga, filtra (solo se consideran valores con calidad espectral buena o superior) y guarda sistemáticamente el producto «índices de vegetación» desde un servidor de la NASA (<ftp://e4ftl01u.ocs.nasa.gov/MOLT/ MOD13Q1.005/>), proceso que para esta aplicación ha sido automatizado con Kepler e IDL+ENVI 4.6. En el presente trabajo solo se muestran los resultados basados en imágenes MODIS para el P.N. Cabo de Gata-Níjar.

Como indicador principal del funcionamiento del ecosistema se calculó la

Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA (APAR)) por la vegetación, un estimador de la productividad primaria, mediante la siguiente ecuación: $RFAA = fRFAA \times RFAi$; donde $fRFAA$ es la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa que es Absorbida por la vegetación, y $RFAi$ la Radiación Fotosintéticamente Activa incidente. La $fRFAA$ fue calculada a partir de una relación lineal con el EVI (también calculada para el NDVI) utilizando el método propuesto por Ruimy *et al.* [36], que requiere fijar los valores de $fRFAA$ mínimos (0%) y máximos (95 %). En el caso del P.N. Cabo de Gata, el otro término de la ecuación, la $RFAi$, fue tomado de registros diarios de la estación meteorológica del aeropuerto de Alme-

ría. Para más detalles del algoritmo general de cálculo de la RFAA, ver Grigera *et al.* [33] y Oyarzabal *et al.* [35].

La ventaja de usar la RFAA, en vez de directamente un índice de vegetación, radica en cierto desfase en las dinámicas temporales de la intercepción de energía ($fRFAA$, calculada a partir del EVI) y de la radiación incidente. La $fRFAA$ promedio fue máxima durante febrero y mínima durante septiembre, mientras que la $RFAi$ fue máxima en junio y mínima en diciembre. Cuando esto ocurre, la RFAA (calculada según la ecuación anterior como el producto entre ambas medidas) es mejor indicador de la actividad fotosintética de la vegetación que los índices de vegetación.

A partir de la RFAA, según el modelo de Monteith, es posible calcular la productividad de la vegetación multiplicando la RFAA por su eficiencia en el uso de la radiación (RUE o LUE, *Radiation or Light Use Efficiency*). En la propuesta no se ha implementado este último paso ya que todavía no existe información

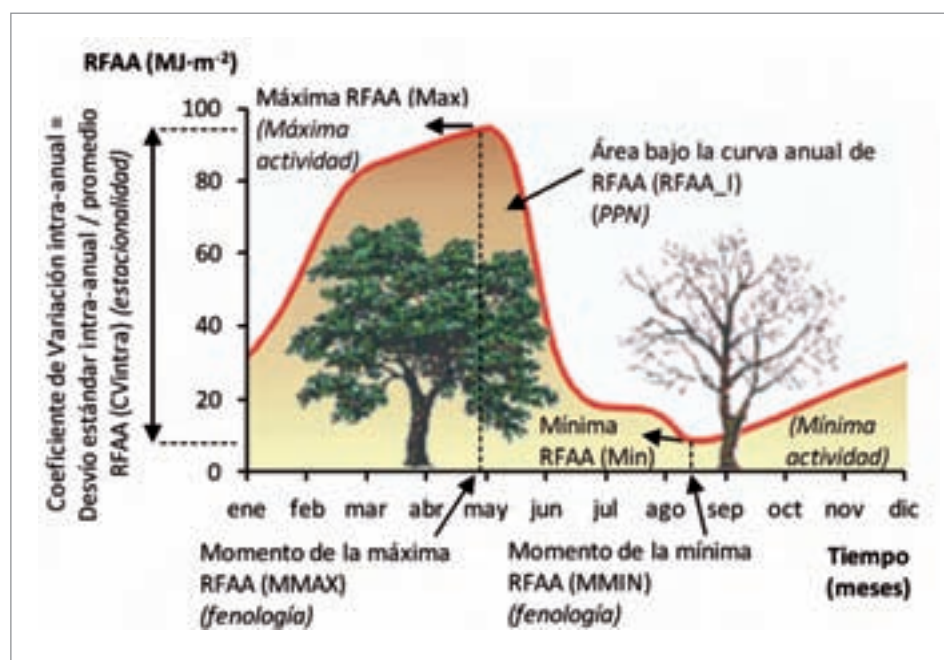


Figura 3. Curva anual de la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por la vegetación y atributos derivados descriptores del funcionamiento ecosistémico. Adaptada de Baldi *et al.* [39].

Tabla 1. Indicadores descriptores del funcionamiento ecosistémico sobre los que se basó el trabajo.

Índice	Tipos de medida	Definición	Significado Biológico
RFAA	Medidas de cantidad, estructura y condición de la vegetación	Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por la vegetación	Cantidad de energía absorbida por las plantas durante la fotosíntesis
RFAA_i	Productividad total y biomasa	Cantidad total de energía absorbida por las plantas durante la fotosíntesis en un año	Productividad anual de la vegetación
CVintra	Variabilidad intra-anual de la productividad	Desvío estándar / Promedio	Estacionalidad de las ganancias de carbono
Max	Máxima productividad total y biomasa	Valor máximo a lo largo del año	Máxima capacidad fotosintética del ecosistema
Min	Mínima productividad total y biomasa	Valor mínimo a lo largo del año	Mínima capacidad fotosintética del ecosistema
MMAX	Momento del año	Fecha en la que se alcanza el valor máximo a lo largo del año	Fenología de la máxima actividad fotosintética del ecosistema
MMIN	Momento del año	Fecha en la que se alcanza el valor mínimo a lo largo del año	Fenología de la mínima actividad fotosintética del ecosistema

suficiente sobre la RUE y su determinación es muy compleja, si bien podría incorporarse en el futuro [37, 38].

El sistema permite la representación de los valores de RFAA de cada píxel en cada fecha, obteniendo así la curva anual de RFAA (figura 3), a partir de la cual se calculan los siguientes atributos descriptores de la dinámica anual de la RFAA que son utilizados como indicadores integradores del funcionamiento de los ecosistemas: 1) la integral anual de la RFAA (RFAA_I), calculada como el producto del promedio anual de RFAA por el número de imágenes compuestas que hay en un año (23 en el caso de MODIS), y considerado como estimador lineal de la productividad primaria; 2) el coeficiente de variación intra-anual de la RFAA (RFAA_CV), calculado como el desvío estándar anual dividido por el promedio anual, y considerado como descriptor de la estacionalidad en las ganancias de carbono; 3) los valores de máxima (RFAA_Max) y 4) mínima (RFAA_Min) RFAA del año, como indicadores de la máxima y mínima actividad fotosintética de los ecosistemas; y,

por último, los momentos de 5) máxima (MMAX) y 6) mínima (MMIN) RFAA. En resumen, estos seis atributos informan sobre la productividad, estacionalidad y fenología de los ecosistemas [23] (tabla 1) (figura 3).

Detección de tendencias en el funcionamiento ecosistémico

Se buscaron tendencias en la magnitud, estacionalidad y fenología de la RFAA mediante el test no-paramétrico de Mann-Kendall [6-9, 32], que tiene la ventaja de ser robusto ante la distribución no normal de los datos, la existencia de huecos y la autocorrelación temporal. Este test no-paramétrico, basado en rangos, calcula la tendencia monótona considerando el número de veces que un año en particular presenta un valor mayor o menor que cualquiera de los años anteriores. Estos métodos han demostrado ser poderosos en análisis preliminares a escala grosera sobre la península Ibérica [6-9, 32] y Sudamérica [5, 7, 29, 39]. Este análisis se llevó a cabo en las seis áreas protegidas y sus entornos inmediatos a dos escalas espaciales (MODIS 250 me-

tros y LTDR 5 kilómetros), aunque en el presente trabajo solo se muestran los resultados obtenidos para el P.N. Cabo de Gata-Níjar para MODIS.

Detección de anomalías espaciales en el funcionamiento ecosistémico

Como ejemplo de la capacidad del sistema para el apoyo a la toma de decisiones, se han identificado anomalías espaciales en la RFAA dentro de los tipos de vegetación «matorral disperso» y «matorral denso» en el P.N. Cabo de Gata-Níjar, con el objetivo de identificar zonas donde sería más necesario llevar a cabo una restauración de la cobertura vegetal, aumentando así la productividad y resiliencia del ecosistema. Para cada tipo de vegetación, utilizando el Mapa de Usos y Coberturas Vegetales del Suelo de Andalucía, se seleccionó una muestra al azar de 40 píxeles que cumplieran dos condiciones: inclusión completa dentro de un tipo de vegetación y localización alejada de la zona limítrofe con otros tipos de vegetación.

El objetivo de estas muestras es establecer la variabilidad característica de la variable funcional considerada (RFAA en el ejemplo) para un determinado ecosistema estableciendo el rango «usual» entre el que suelen oscilar sus valores. Los valores fuera de ese rango serán considerados como anómalos espacialmente [40]. En este ejemplo se ha usado el intervalo del promedio ± 1 desviación estándar. Si aumentamos el número de desvíos estándar en torno a la media, el sistema será más tolerante o menos sensible.

Detección de alertas y evaluación de su relevancia

Gracias a que el sistema incorpora sistemáticamente nuevas imágenes conforme van estando disponibles (cada 16 días en el caso de los índices de vegetación de MODIS), se puede evaluar el «nuevo» estado de los ecosistemas protegidos, tomando como referencia el com-

EL SISTEMA INCORPORA NUEVAS IMÁGENES DE SATÉLITE CADA 16 DÍAS, LO QUE PERMITE EVALUAR EL «NUEVO ESTADO» DE LOS ECOSISTEMAS PROTEGIDOS TOMANDO COMO REFERENCIA EL COMPORTAMIENTO DE AÑOS ANTERIORES

portamiento que presentaron en años anteriores. De forma gráfica, la idea consiste en representar los valores para la curva del año promedio de la serie histórica disponible, con su intervalo de variación inter-anual (± 1 desviación estándar), y sobre el mismo gráfico representar los valores actualizados más recientes para la misma variable. De este modo se produciría una alerta cuando el nuevo valor de la variable se aleje del comportamiento promedio (media ± 1 desviación estándar). La evaluación de la relevancia de la alerta se basa en su fortaleza, desviación y duración. La fortaleza representa las diferencias entre los nuevos valores y aquellos esperados

en función del comportamiento histórico: a mayor diferencia, mayor fortaleza. La desviación trata de determinar si la alerta puede ser simplemente un evento temprano o tardío, tal como un comienzo temprano de la estación lluviosa o un comienzo tardío de la estación de fuego. La duración mide el tiempo desde el que la alerta se viene repitiendo, y se estima a partir del número de fechas previas para las que el valor alcanzado en un atributo funcional es inferior (o superior) a la media ± 1 desvío estándar. En la valoración de la relevancia de la alerta también se considera el valor de conservación de los ecosistemas afectados, y si éstos ya venían experimentando tendencias de largo plazo.



La vegetación del Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar, en Almería (España), está dominada por matorrales semiáridos, con numerosas especies compartidas con las zonas áridas de África y Asia.

Resultados y discusión

Tendencias en el funcionamiento ecosistémico

Los resultados obtenidos para Cabo de Gata-Níjar (figura 4a) muestran que en la serie temporal analizada mayoritariamente se ha producido un incremento de la RFAA y, por tanto, de la Productividad Primaria Neta, lo que coincide con la tendencia global observada en el periodo 1981-2000 [41]. El patrón espacial agrupado que muestran las tendencias positivas y negativas permite orientar y evaluar las acciones de gestión del P.N. Cabo de Gata Níjar, así como la investigación de sus causas y consecuencias.

La ausencia de tendencias negativas dentro del área protegida indica que no se está produciendo disminución de la

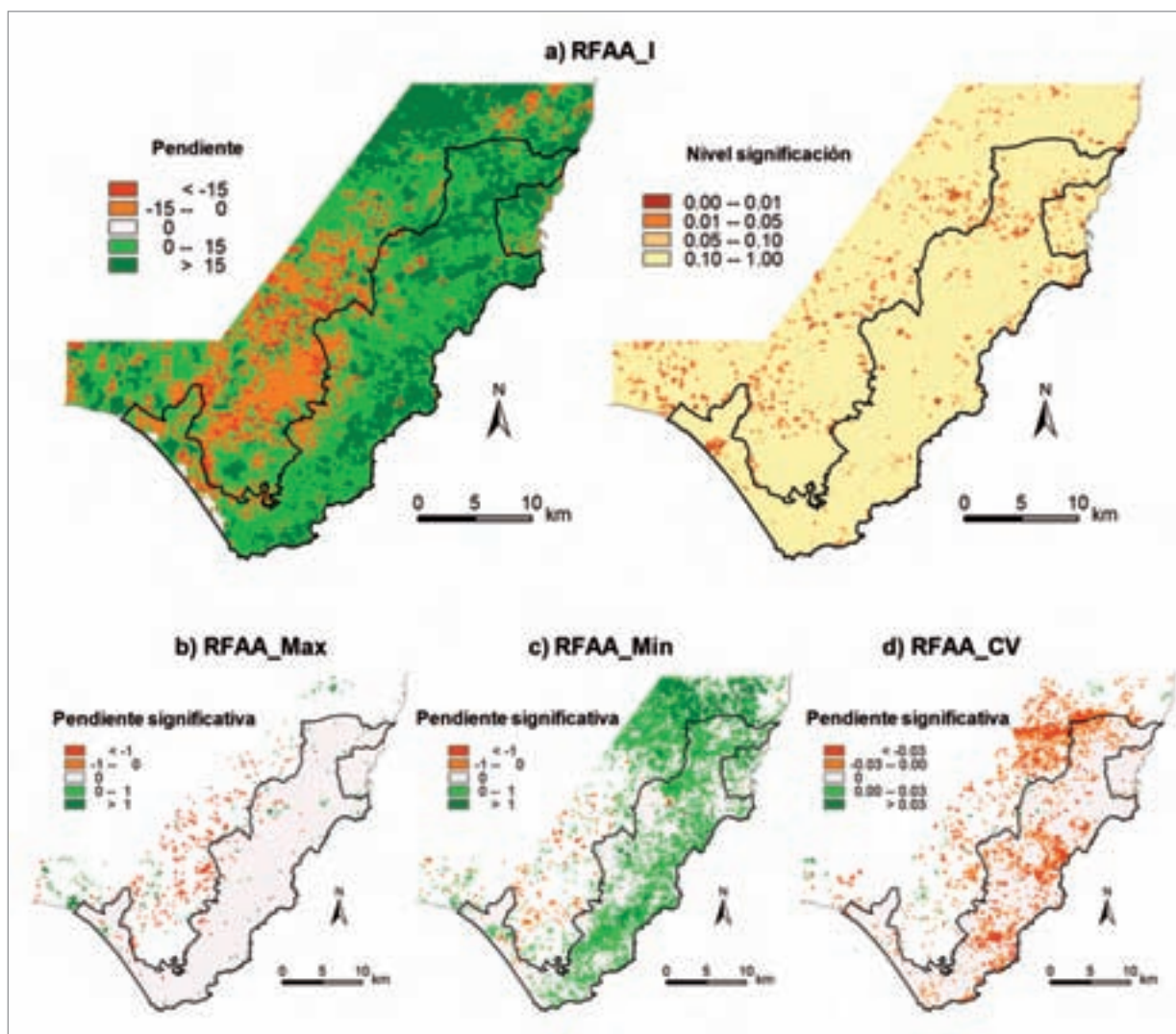


Figura 4. Mapas de tendencias en la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por la vegetación en el área protegida Reserva de la Biosfera del Cabo de Gata-Níjar (Almería-España) y zonas limítrofes en el periodo 2001-2008. Los mapas muestran: (a) la pendiente de la tendencia en la integral anual (RFAA_I) (izquierda), y su nivel de significación o p-valor (derecha); y las tendencias significativas; en (b) los valores máximos (RFAA_Max), (c) los valores mínimos (RFAA_Min), y d) en el coeficiente de variación (RFAA)_CV). Las pendientes fueron calculadas con el método de Sen. La significación de las mismas fue calculada con el test de tendencias de Mann-Kendall. La línea representa el contorno del área protegida. Adaptada de Oyonarte *et al.* [32].

productividad de la vegetación, lo que contrasta con la situación fuera del área protegida, donde predominan los píxeles con tendencias negativas, en muchos casos significativas (figura 4.b). Dado que tanto las condiciones climáticas y su evolución, como los tipos de vegetación son similares dentro y fuera del parque, cabe pensar que las diferencias de funcionamiento encontradas se relacionan con el diferente uso y manejo y con procesos de recuperación y degradación de la cubierta vegetal.

La dinámica anual de la RFAA permite también profundizar en el conocimiento de otros aspectos del funcionamiento de los ecosistemas, tales como la fenología o la estacionalidad de las ganancias de carbono. En este trabajo

se calcularon también las tendencias de los valores máximo y mínimo anual de RFAA, con particular interés para la gestión de ecosistemas en condiciones ambientales límite, como los ecosistemas áridos del P.N. Cabo de Gata-Níjar.

LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA CABO DE GATA-NÍJAR REFLEJAN QUE EN LA SERIE TEMPORAL ANALIZADA HA HABIDO UN AUMENTO DE LA RFAA Y, POR TANTO, DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA, COINCIDENTE CON LA TENDENCIA OBSERVADA EN EL PERIODO 1981-2000

jar, donde cambios en los valores mínimos pueden estar relacionados con procesos de degradación. El análisis de tendencias en los valores máximos (RFAA_Max) y mínimos (RFAA_Min) señala que en los años analizados el incremento de la radiación absorbida observado en la RFAA_I se debe sobre todo a un incremento en los valores mínimos (figura 4.c), más que a un incremento en los valores máximos (figura 4.b). La presencia de tendencias positivas significativas en los valores de RFAA_Min pero no en los de RFAA_Max provocó disminuciones significativas en el coeficiente de variación intra-anual, un indicador de la estacionalidad (figura 4d). Esto quiere decir que las diferencias en la radiación absorbida entre las estaciones de crecimiento y de reposo se han reducido, es decir, ha disminuido la estacionalidad.

Anomalías espaciales

Los resultados obtenidos (figura 5) señalan que, como era de esperar, la RFAA_I es significativamente mayor en las áreas con «matorral denso» (604,3 MJ.m⁻².año⁻¹) que en las de «matorral disperso» (515,9 MJ.m⁻².año⁻¹); al mismo tiempo, su variabilidad espacial es menor (coeficiente variación de 13,1% y 15,6%, respectivamente).

Con estos resultados nos centramos en la clase de «matorral disperso» como la zona donde más necesaria es la restauración, y utilizamos los niveles de referencia para identificar aquellos píxeles con un comportamiento muy por debajo del promedio de RFAA_I para ser «matorral disperso». El resultado final es un mapa de anomalías espaciales (figura 6) donde se muestran aquellas áreas con un comportamiento por debajo (15,9%), por encima (22,1%) o dentro del rango de referencia (61,9% de la superficie) de RFAA_I del «matorral disperso».

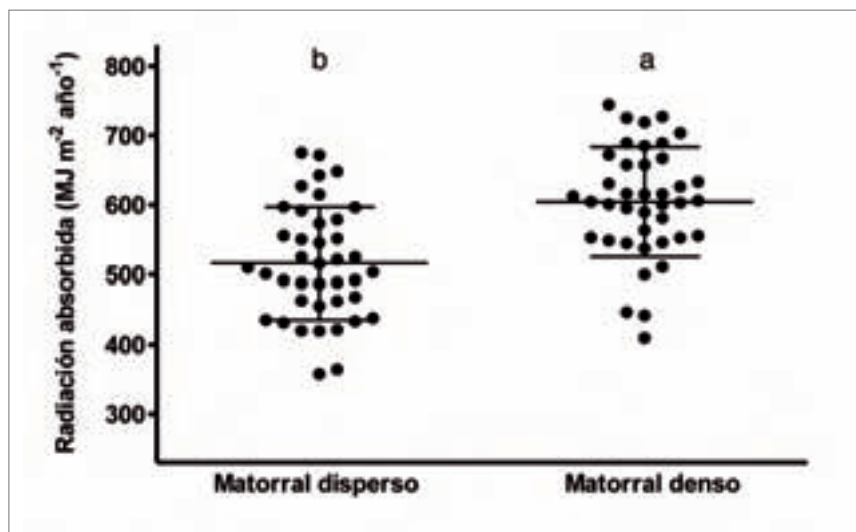


Figura 5. Heterogeneidad espacial de la radiación anual absorbida por dos de los usos del suelo en el área protegida. Los puntos corresponden al promedio del periodo 2000-2008 de cada uno de los cuarenta píxeles muestreados, y las líneas marcan los intervalos de variabilidad determinados por el funcionamiento promedio de cada clase (línea central corresponde a la media, las líneas externas a más/menos un desvío estándar). Letras distintas indican diferencias significativas entre medias mediante un test de t ($p < 0.0001$). Adaptada de Oyonarte *et al.* [32].

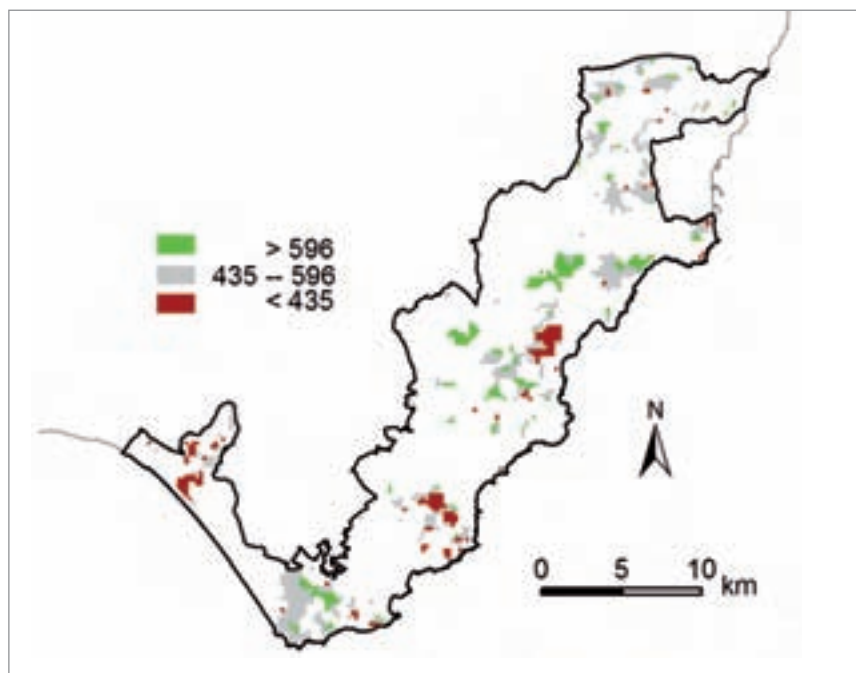


Figura 6. Mapa de anomalías espaciales en la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida anualmente (RFAA) por la vegetación en la superficie ocupada por el tipo de uso «matorral disperso». Las clases se establecen en función de los niveles de referencia «variabilidad aceptada» del tipo de uso. El intervalo es definido por la media \pm una desviación estándar de la muestra seleccionada ($n = 40$). Todos los píxeles del área protegida pertenecientes al tipo de uso se clasifican según su valor esté dentro del intervalo (gris), por encima (verde) o por debajo del límite inferior del intervalo (marrón). Al igual que el de tendencias, este mapa muestra que los píxeles con anomalías se encuentran agrupados espacialmente. Esta continuidad espacial permite interpretar que los resultados son científicamente consistentes y útiles para la gestión, al marcar áreas suficientemente extensas para desarrollar actuaciones que serían inviables si el resultado hubiera sido una serie de pequeñas áreas (píxeles) distribuidas al azar por el territorio. Adaptada de Oyonarte *et al.* [32].

Figura 7. Matriz de decisiones para el apoyo a la gestión. Permite evaluar la necesidad, y prioridad, de la gestión de un área en función de los valores de radiación anual absorbida y su tendencia temporal. Para su interpretación es necesario considerar los objetivos de gestión. En este caso se muestra un ejemplo para un supuesto, aplicado a zonas de matorral disperso, de selección de áreas de reforestación.

		RFAA media ¹		
		Inferior	Normal	Superior
Tendencia temporal RFFA_I ²	Positiva	5 (5,3%)	2 (15,4%)	1 (5,9%)
	Moderada	7 (9,5%)	4 (42,9%)	3 (15,0%)
	Negativa	9 (1,2%)	8 (3,7%)	6 (1,2%)

(1) Media de la Radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (RFAA_I) en la serie temporal 2000-2008. Los píxeles se clasifican en clases atendiendo a su valor respecto a niveles de referencia del tipo de uso: Normal: dentro del intervalo de variabilidad (media \pm desvío estándar); Inferior: por debajo del límite inferior del intervalo; y Superior: por encima de límite superior.
 (2) Clases de tendencias para la serie temporal. Los píxeles se clasifican según la pendiente del test de Mann-Kendall (ver apartado de tendencias). Clases: Negativa, valores inferiores a 0 (tendencia negativa); Moderada, valores entre 0 y 15 (tendencia positiva); y Positiva, valores superiores a 15 (tendencia positiva). En este ejemplo no se considera el grado de significación que ofrece el test de Mann-Kendall.

y tendencia positiva son consideradas áreas de actuación no prioritaria.

Sistema de alerta temprana

La gestión de un área protegida requiere de información actualizada sobre el estado de salud o la existencia de cambios en los ecosistemas que permitan guiar las acciones de manejo, por ejemplo, a ajustar cada año la capacidad de carga ganadera a las condiciones particulares del ecosistema de ese año. La figura 8 permite evaluar de forma rápida e intuitiva el estado presente de un ecosistema en relación a su comportamiento promedio histórico, mostrando, como ejemplo, la clase de «matorral disperso» en el P.N. Cabo de Gata.

Sistema de apoyo a la toma de decisiones

Con el análisis anterior de anomalías espaciales ya disponemos de una primera selección de áreas dónde es más necesario actuar. Sin embargo, dado que los recursos disponibles son limitados, es necesario priorizar sobre qué áreas concretas se va a actuar. Con este fin se propone una matriz de decisión basada en la combinación de la información de tendencias temporales y anomalías espaciales generada por el sistema. La matriz de decisión de la figura 7 permite priorizar los píxeles en función de su anomalía espacial en la RFAA_I relativa (columnas) y su tendencia temporal relativa (filas).

La matriz asigna valores del 1 al 9 según un orden de prioridad de menor (1) a mayor (9): baja (celdas amarillas), media (celdas naranjas) y alta (celdas rojas). Entre paréntesis se indica el porcentaje de superficie ocupado por cada clase. En este caso, la máxima prioridad correspondería a áreas con RFAA_I relativa baja y tendencia negativa, mientras que aquellas áreas con RFAA_I alta

LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y ALERTA SIMILAR AL DESARROLLADO ES FACTIBLE Y RECOMENDABLE EN TODO TIPO DE ÁREAS PROTEGIDAS COMO APOYO A LA GESTIÓN ADAPTATIVA DE LAS MISMAS

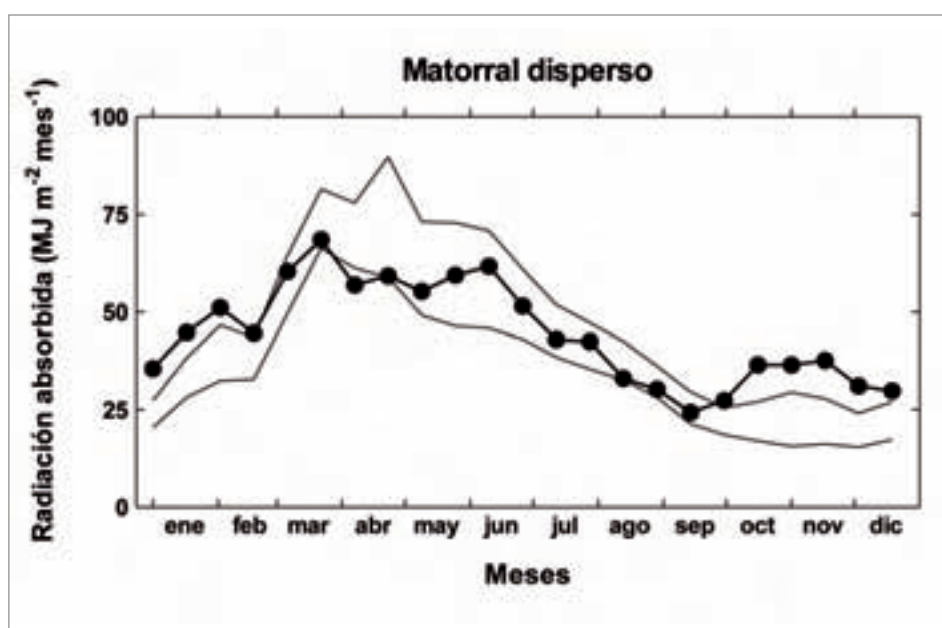


Figura 8. Gráfico para el sistema de alerta temprana. Las líneas continuas indican el rango promedio \pm una desviación estándar (en este caso 2001-2007), y la línea gruesa con puntos muestra la dinámica del año más reciente. Un dato cada 16 días. Adaptada de Oyonarte et al. [32].



El Parque de Doñana representa tanto al bosque y al matorral mediterráneo como a la marisma.

Ejemplos preliminares ya en curso de esta herramienta lo constituyen el «Sistema de estimación y seguimiento de la productividad forrajera en tiempo real» (SegF, <http://larfile.agro.uba.ar/lab-sw/sw/gui/Inicial.page>) y el «*Land Ecosystem Change Utility for South America*» (LechuSA, <http://lechusa.unsl.edu.ar/>), desarrollados por el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección de la Universidad de Buenos Aires y por el Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad de San Luis, respectivamente.

Conclusiones

La implementación de un sistema de seguimiento y alerta similar al desarrollado es factible y recomendable en todo tipo de áreas protegidas como apoyo a la gestión adaptativa de las mismas. Los análisis que ofrece el sistema permiten detectar y actuar de manera temprana y espacialmente explícita frente a cambios en el funcionamiento de los ecosistemas antes de que puedan tener lugar alteraciones en su estructura que sean más di-

fíciles de revertir. Esto mejora la capacidad para administrar los recursos naturales y afrontar amenazas, y aumenta la confianza en el proceso de toma de decisiones. Además, gracias a que el sistema está basado en el monitoreo de un servicio ecosistémico intermedio [42] o de soporte [43] como la Productividad Primaria Neta (PPN), ofrece un vínculo directo con el «estado de salud» de las áreas protegidas y de los beneficios que éstas proporcionan a los seres humanos, lo que permite a los gestores operar más eficazmente en los ámbitos jurídico y político al promover la valoración pública de los recursos protegidos.

Por último, gracias a la gratuidad de las imágenes de satélite empleadas, el sistema desarrollado puede ponerse en marcha de forma poco costosa y relativamente sencilla. Además, al ir acumulando información de forma sistemática y estar escrito en código abierto al público, el sistema es versátil y permite personalizarlo e incrementar su capacidad de análisis conforme se identifiquen nuevos objetivos específicos de monitoreo por parte de gestores y científicos. ♦

AGRADECIMIENTOS

A diversos colaboradores que participaron en el proyecto: Agustín Giorno, Siham Tabik, Elisa Liras, David Vinazza, José M. Molero, Lucas Sevilla García, Antonio Castro. A Jeff Burkey (King County) por el desarrollo del código básico para el test de tendencias. Los autores han sido subvencionados por las siguientes instituciones y programas: FUNDACIÓN MAPFRE (convocatoria de ayudas a la investigación 2008), Organismo Autónomo de Parques Nacionales (proyecto 066), Junta de Andalucía y Fondos FEDER (proyectos de excelencia RNM1280 y P09-RNM5048), Inter-American Institute for Global Change Research (IAI, CRN II 2031 y 2094), y Convenio «Desarrollo rural y sostenibilidad ambiental: diseño y ejecución de programas de seguimiento». Las imágenes de satélite fueron descargadas del MODIS Land *website* y la página web del grupo Land Long-Term Data Record.

AUTORES

D. Alcaraz-Segura. Dr. en Ciencias Ambientales. Investigador postdoctoral en el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, Facultad de Agronomía e IFEVA, Universidad de Buenos Aires y CONICET (Argentina), y en el Dpto. de Biología Vegetal y Ecología, Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global, Universidad de Almería (España). *Correspondencia: Ctra. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, Almería (España). Tel: (+34)950015932. Fax: (+34)950015069. e-mail: dalcaraz@ual.es

J. Cabello. Dr. en Biología. Profesor en el Dpto. de Biología Vegetal y Ecología, Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global, Universidad de Almería (España).

C. Bagnato. Técnico en el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, Facultad de Agronomía e IFEVA, Universidad de Buenos Aires y CONICET (Argentina).

A. Altoso. Dra. en Biología. Profesora del Departamento de Ecología, Universidad de la República (Uruguay).

C. Oyonarte. Dr. en Biología. Profesor en el Departamento de Edafología y Química Agrícola, Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global, Universidad de Almería (España).

M. Oyarzabal. Dr. en Ciencias Agropecuarias. Coordinador del Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, Facultad de Agronomía e IFEVA, Universidad de Buenos Aires y CONICET (Argentina).

J.M. Paruelo. Dr. en Ecología. Profesor de la Facultad de Agronomía y Director de la Licenciatura en Ciencias Ambientales, Universidad de Buenos Aires, Investigador Principal del CONICET, y director del Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, Facultad de Agronomía e IFEVA, Universidad de Buenos Aires y CONICET (Argentina).

PARA SABER MÁS

- [1] Sala, O. E.; Chapin, F. S.; Armesto, J. J.; Berlow, E.; Bloomfield, J.; Dirzo, R.; Huber-Sanwald, E.; Huenneke, L. F.; Jackson, R. B.; Kinzig, A.; Leemans, R.; Lodge, D. M.; Mooney, H. A.; Oesterheld, M.; Poff, N. L.; Sykes, M. T.; Walker, B. H.; Walker, M.; Wall, D. H., Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 2000, 287, (5459), 1770-1774.
- [2] van der Putten, W. H.; de Ruiter, P. C.; Bezemer, T. M.; Harvey, J. A.; Wassen, M.; Wolters, V., Trophic interactions in a changing world. *Basic and Applied Ecology* 2004, 5, (6), 487-494.
- [3] Valladares, F.; Peñuelas, J.; de Luis Calabuig, E.; Moreno-Rodríguez, J. M., Impactos sobre los ecosistemas terrestres. In *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, Ministerio de Medio Ambiente: Madrid, Spain, 2005; pp 65-112.
- [4] Fernández-González, F.; Loidi, J.; Moreno-Saiz, J. C.; Moreno-Rodríguez, J. M., Impactos sobre la biodiversidad vegetal. In *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, Ministerio de Medio Ambiente: Madrid, 2005; pp 183-248.
- [5] Paruelo, J. M.; Garbulsky, M. F.; Guerschman, J. P.; Jobbagy, E. G., Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. *Int. J. Remote Sens.* 2004, 25, (14), 2793-2806.
- [6] Alcaraz-Segura, D.; Cabello, J.; Paruelo, J. M.; Delibes, M., Trends in the surface vegetation dynamics of the National Parks of Spain as observed by satellite sensors. *Appl. Veg. Sci.* 2008, 11, 431-440.
- [7] Alcaraz-Segura, D.; Baldi, G.; Durante, P.; Garbulsky, M. F., Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 2008, 17, (3), 108-117.
- [8] Alcaraz-Segura, D.; Cabello, J.; Paruelo, J. M.; Delibes, M., Assessing protected areas to face environmental change through satellite-derived vegetation greenness: The case of the Spanish National Parks. *Environ. Manage.* 2009, 43, (1), 38-48.
- [9] Alcaraz-Segura, D.; Liras, E.; Tabik, S.; Paruelo, J.; Cabello, J., 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* 2010, 10, (2), 1291-1314.
- [10] Hannah, L.; Visconti, G.; Beniston, M.; Iannorelli, E. D.; Barba, D., The role of a global protected areas system in conserving biodiversity in the face of climate change. In *Global Change and Protected Areas*, Beniston, M., Ed. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2001; pp 413-422.
- [11] Barber, C. V.; Miller, K. R.; Boness, M., Securing protected areas in the face of global change: Issues and strategies. IUCN: Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 2004; p 236.
- [12] Pyke, C. R., The implications of global priorities for biodiversity and ecosystem services associated with protected areas. *Ecology and Society* 2007, 12, (1).
- [13] Yaffee, S. L., Three faces of ecosystem management. *Conservation Biology* 1999, 13, (4), 713-725.
- [14] Ludwig, J. A.; Tongway, D. J.; Bastin, G. N.; James, C. D., Monitoring ecological indicators of rangeland functional integrity and their relation to biodiversity at local to regional scales. *Austral Ecology* 2004, 29, (1), 108-120.
- [15] Costanza, R.; Norton, B. G.; Haskell, B. D., *Ecosystem Health: New goals for environmental management*. Island Press: Washington D.C., 1992; p 279
- [16] Grumbine, R. E., What is ecosystem management. *Conservation Biology* 1994, 8, (1), 27-38.
- [17] Zorn, P.; Stephenson, W.; Grigoriev, P., An ecosystem management program and assessment process for Ontario National Parks. *Conservation Biology* 2001, 15, (2), 353-362.
- [18] Milchunas, D. G.; Lauenroth, W. K., Inertia in plant community structure: State changes after cessation of nutrient enrichment stress. *Ecological Applications* 1995, 5, 1195-2005.
- [19] Costanza, R.; d'Arge, R.; de Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R. V.; Paruelo, J. M., The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 1997, 387, 253-260.
- [20] di Bella, C. M.; Rebella, C. M.; Paruelo, J. M., Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 2000, 21(4), 791-797.
- [21] Liang, S., Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. *Remote Sensing of Environment* 2000, 76, 213-238.
- [22] Running, S. W.; Thornton, P. E.; Neemani, R. R.; Glassy, J. M.; Sala, O. E.; Jackson, R. B.; Mooney, H. A.; Howarth, R. W., Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth observing system. In *Methods in Ecosystem Science*, Springer-Verlag: New York, USA, 2000; pp 44-57.
- [23] Pettorelli, N.; Vik, J. O.; Mysterud, A.; Gaillard, J. M.; Tucker, C. J.; Stenseth, N. C., Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution* 2005, 20, (9), 503-510.
- [24] Nemani, R.; Hashimoto, H.; Votava, P.; Melton, F.; Wang, W.; Michaëlis, A.; Mutch, L.; Milesi, C.; Hiatt, S.; White, M., Monitoring and forecasting ecosystem dynamics using the Terrestrial Observation and Prediction System (TOPS). *Remote Sens. Environ.* 2009, 113, (7), 1497-1509.
- [25] Crabtree, R.; Potter, C.; Mullen, R.; Sheldon, J.; Huang, S.; Harmsen, J.; Rodman, A.; Jean, C., A modeling and spatio-temporal analysis framework for monitoring environmental change using NPP as an ecosystem indicator. *Remote Sens. Environ.* 2009, 113, (7), 1486-1496.
- [26] Alcaraz-Segura, D.; Paruelo, J. M.; Cabello, J., Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics. *Plant Ecol.* 2009, 202, 13-29.
- [27] Paruelo, J., La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 2008, 17, (3), 4-22.
- [28] Margules, C. R.; Pressey, R. L., Systematic conservation planning. *Nature* 2000, 405, (6783), 243-253.
- [29] Garbulsky, M. F.; Paruelo, J. M., Remote sensing of protected areas to derive baseline vegetation functioning characteristics. *Journal of Vegetation Science* 2004, 15, 711-720.
- [30] Paruelo, J. M.; Piñeiro, G.; Oyónarte, C.; Alcaraz-Segura, D.; Cabello, J.; Escribano, P., Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected areas in southeastern Spain. *Appl. Veg. Sci.* 2005, 8, (1), 93-102.
- [31] Paruelo, J.; Fernández, N.; Delibes, M., Conservation, land-use changes and ecosystem functioning: The case of the Doñana area in southern Spain. *Environmental Conservation* En revisión.
- [32] Oyónarte, C.; Alcaraz-Segura, D.; Oyarzabal, M.; Paruelo, J.; Cabello, J., 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 *Reservas de la Biosfera. Su contribución a la provisión de servicios ecosistémicos. Experiencias exitosas en Iberoamérica*, Araya Rosas, P.; Clüsener Godt, M., Eds. UNESCO: Paris, 2010; pp 119-154.
- [33] Grigera, G.; Oesterheld, M.; Pacín, F., Monitoring forage production with MODIS data for farmers' decision making. *Agricultural Systems* 2007, 94, 637-648.
- [34] Monteith, J. L., Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 1972, 9, 747-766.
- [35] Oyarzabal, M.; Paruelo, J. M.; Federico, P.; Oesterheld, M.; Lauenroth, W. K., Trait differences between grass species along a climatic gradient in South and North America. *Journal of Vegetation Science* 2008, 19, (2), 183-191.
- [36] Ruimy, A.; Saugier, B.; Dedieu, G., Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* 1994, 99, (3), 5263-5283.
- [37] Piñeiro, G.; Oesterheld, M.; Paruelo, J. M., Seasonal variation in aboveground production and radiation-use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems* 2006, 9, (3), 357-373.
- [38] Garbulsky, M. F.; Peñuelas, J.; Papale, D.; Ardö, J.; Goulden, M. L.; Kiely, G.; Richardson, A. D.; Rotenberg, E.; Veenendaal, E. M.; Filella, I., Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography* 2010, 19, 253-267.
- [39] Baldi, G.; Noretto, M. D.; Aragón, M. R.; Aversa, F.; Paruelo, J. M.; Jobbagy, E. G., Long-term satellite NDVI datasets: Evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. *Sensors* 2008, 8, 5397-5425.
- [40] Larson, W. E.; Pierce, F. J., The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Soil Science* 1994, 35, 37-51.
- [41] Cao, M.; Prince, S. D.; Small, J.; Goetz, S. J., Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000. *Ecosystems* 2004, 7, (3), 233-242.
- [42] Fisher, B.; Turner, R. K.; Morling, P., Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics* 2009, 68, (3), 643-653.
- [43] Millennium Ecosystem Assessment, M. E. A., *Ecosystems and human well-being: synthesis report*. Island Press: Washington D.C., 2005; p 155.