Contribución del seguimiento ecológico a largo plazo a la investigación y la gestión en la plataforma LTSEr-Doñana

R. Díaz-Delgado^{1*}, F. Carro¹, F. Quirós², A. Osuna¹, M. Baena¹

(1) Estación Biológica de Doñana-CSIC. Avda. Américo Vespucio s/n. 41092 Sevilla, España.

(2) Espacio Natural de Doñana. 21750 El Rocio, Huelva. España

Autor de correspondencia: R. Díaz-Delgado [rdiaz@ebd.csic.es]

> Recibido el 12 de julio de 2015 - Aceptado el 28 de diciembre de 2015

Díaz-Delgado, R., Carro, F., Quirós, F., Osuna, A., Baena, M. 2016. Contribución del seguimiento ecológico a largo plazo a la investigación y la gestión en la plataforma LTSEr-Doñana. *Ecosistemas* 25(1): 09-18. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-1.03

Doñana, en su conjunto, ha contribuido definitivamente a asentar el seguimiento y la investigación ecológica a largo plazo en España. Una aproximación integrada, aunando los esfuerzos de los gestores y los investigadores ha redundado en contribuciones científicas que mejoran el entendimiento de la biodiversidad y del funcionamiento de los ecosistemas de Doñana. Este trabajo repasa las contribuciones científicas y a la gestión facilitadas por la implementación de un programa de seguimiento ecológico a largo plazo y la integración en las actividades de las redes LTER. Especialmente, el trabajo repasa la aportación del seguimiento a escala de paisaje mediante teledetección s.l., con su gran capacidad retrospectiva y de análisis multi-escala; los diversos seguimientos sobre las poblaciones locales de consumidores primarios y su papel en los ecosistemas de Doñana; el gran esfuerzo efectuado en incorporar seguimientos automáticos mediante la implementación de sensores y desarrollos adaptados a las condiciones extremas de campo; las contribuciones de la aproximación socio-ecológica para valorar el estado de conservación y los servicios ambientales de la plataforma LTSEr Doñana; y por último, la perspectiva desde la gestión de la utilidad del programa a la hora de la toma de decisiones y de la incorporación en las redes internacionales LTER. En resumen, esta revisión pretende evidenciar los diferentes beneficios alcanzados por la implementación del seguimiento y la investigación (socio-)ecológica a largo plazo en Doñana.

Palabras clave: escala de paisaje; teledetección; cambio global; tendencias poblacionales; balance de Carbono; gestión

Díaz-Delgado, R., Carro, F., Quirós, F., Osuna, A., Baena, M. 2016. Contribution from Long-Term Ecological Monitoring to research and management of Doñana LTSEr Platform. *Ecosistemas* 25(1): 09-18. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-1.03

Doñana, as a whole, has definitely helped to consolidate ecological monitoring and long-term research in Spain. An integrated approach, combining the efforts of managers and researchers has led to scientific contributions improving the understanding of Doñana's biodiversity and ecosystem functioning. This paper reviews the scientific contributions and management improvements provided by the implementation of a long-term ecological monitoring program and the LTER networking activities. Especially, the paper reviews the contribution of landscape-scale monitoring by remote sensing s.l., with its retrospective and multi-scale analysis capacity; the different monitoring protocols of local populations of primary consumers and their role in the Doñana ecosystems; the great effort made to incorporate automatic monitoring by deploying sensors and developments adapted to harsh field conditions; the contributions of the socio-ecological approach to assess the state of conservation and environmental services of the Doñana LTSEr platform; and finally, the perspective from the management of the program's usefulness when it comes to decision making and the incorporation in international networks LTER. In summary, this review aims to show the different benefits achieved by the implementation of a long-term (socio-)ecological monitoring and research program in Doñana.

Key words: landscape scale; remote sensing; global change; population trends; carbon balance; management

Introducción

Desde sus inicios, la conservación en Doñana ha contado con un plantel de investigadores y gestores concienciados con la relevancia de la adquisición de conocimiento para el manejo de este espacio protegido. En este proceso, los seguimientos de las poblaciones de aves, de lince o de alcornoques, fueron pioneros en la toma de conciencia de la necesidad de adquisición sistemática de datos a largo plazo a modo de línea de base. Muchos de estos seguimientos han permitido efectuar análisis retrospectivos evidenciando tendencias, cambios e incluso relaciones consistentes con factores de origen antrópico. En la actualidad existe un amplio consenso acerca del papel esencial que representan los programas de seguimiento ecológico a largo plazo a la hora de afrontar el cambio global y sus efectos e implementar tomas de decisiones ([Magurran et al. 2010](#); [Navarrete et al. 2010](#); [Lindenmayer et al. 2015](#); [Fahey et al. 2015](#)).

En el año 2002, a propuesta de la Estación Biológica de Doñana (EBD), se inició el Programa de Seguimiento de Procesos Naturales, el cual preveía la implementación de protocolos de seguimiento a largo plazo de indicadores de estado de ciertas especies de interés, hábitats y procesos naturales y de efectos antrópicos identificados como críticos en el Parque Nacional de Doñana (más detalles en ([Díaz-Delgado 2010a](#))). Después de una década desde la implementación del programa, además de los informes técnicos reportados por el Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales (ESPN), muchos de estos seguimientos han contribuido con sus datos a constatar patrones espaciales y tendencias temporales a través de publicaciones específicas en revistas de investigación, tesis doctorales y congresos nacionales e internacionales. Incluso numerosos proyectos de investigación han sido propuestos y aprobados merced a la disponibilidad de esta información de referencia, permitiendo evidenciar las causas de las tendencias observadas y sus relaciones con diferentes factores. Además, los diferentes ór-

ganos gestores han podido acceder a la información y a su interpretación para la toma de decisiones en diferentes historias de éxito en la conservación de Doñana.

Sin embargo, es a partir del año 2007 cuando, a través de la participación de la EBD en la Red de Excelencia ALTER-Net, comienza a efectuarse la primera toma de contacto con iniciativas similares en el contexto europeo. En este ámbito, la investigación ecológica a largo plazo (LTER-Long Term Ecological Research) comenzaba a cuajar en el viejo continente a través de la incipiente red LTER-Europa. La EBD, aprovechando el impulso de la iniciativa pionera GlobiMed, lideró entonces el proceso de creación y la candidatura de la red LTER-España a formar parte de la red internacional LTER (ILTER). Un total de 10 sitios ubicados en espacios naturales protegidos fueron aceptados como miembros de ILTER y a su vez de LTER-Europa en 2008. Desde entonces el programa de seguimiento y la investigación asociada se han beneficiado de los avances proporcionados por la colaboración en estas redes, a través de la participación en diferentes proyectos de investigación. Entre estos avances destacamos a continuación aquéllos que han revertido en el programa:

- La propuesta de un marco conceptual para valorar el estado de los ecosistemas (terrestres, acuáticos y marinos), su funcionamiento y los servicios que proveen: la integridad ecológica (Barkmann et al. 2001; Burkhard et al. 2011).
- La identificación y armonización de variables e indicadores comunes para evaluar y monitorizar los diferentes procesos ecológicos (Frenzel et al. 2013).
- Selección de métodos científicos actualizados y validados comunes para la cuantificación de las variables e indicadores identificados (ECOPAR: Parameters and Methods for Ecosystem Research and Monitoring).
- Adopción de estándar de metadatos ecológicos y creación de una herramienta común e interoperable de edición, almacenamiento y consulta de metadatos de los sitios de la red LTER-Europa.
- La aproximación socio-ecológica a través de la evaluación de la provisión de servicios ambientales y sus demandas en el contexto socio-económico (Mirtl y Krauze 2007; Singh et al. 2012).
- Promoción de estancias breves de investigadores europeos mediante los proyectos de infraestructuras ExPEER, ICTS (Infraestructura Científico-Técnica Singular) y eLTER (en vigor) que han permitido establecer protocolos de seguimiento en áreas temáticas poco exploradas y llevar a cabo investigaciones asociadas.

Este trabajo tiene como objetivo presentar una revisión sucinta sobre algunos de los resultados obtenidos a partir del tratamiento, análisis e interpretación de la información recabada a través del programa de seguimiento. Los seguimientos no detallados en este trabajo (aves, reptiles, anfibios, limnología, macroinvertebrados acuáticos, mariposas, micromamíferos) también han tenido sus aportaciones en el ámbito de la investigación y la gestión, si bien por razones de extensión no se incluyen en esta revisión.

El seguimiento ecológico a escala de paisaje en el Espacio Natural de Doñana

La aproximación a escala de paisaje en el programa de seguimiento ecológico a largo plazo en el Espacio Natural de Doñana (END, constituido por el Parque Nacional y el Parque Natural) ha contribuido ampliamente a mejorar el conocimiento de diferentes procesos naturales de relevancia ecológica (Díaz-Delgado 2010b). Esta aproximación se desarrolla fundamentalmente a partir de datos procedentes de imágenes de teledetección, *sensu lato*, y datos de parcelas permanentes de campo a modo de verdad-terreno. Las ventajas del empleo de estas fuentes de datos y de las técnicas de análisis de teledetección radican esencialmente en la posibilidad de retroceder en el tiempo hasta las fechas de las primeras imágenes o fotos aéreas disponibles para establecer una re-

ferencia de origen y en la disponibilidad de largas series temporales de imágenes que permiten evidenciar tendencias en diferentes procesos ecológicos de interés (Gardiner y Díaz-Delgado 2007).

Entre ellos, el seguimiento del proceso de inundación y desecación anual de la marisma natural ha permitido contrastar la hipótesis del aumento del hidroperiodo en las últimas décadas (Díaz-Delgado et al. 2006), evidenciando los efectos de las actuaciones de restauración bajo el marco del proyecto Doñana 2005 (Chans y Díaz-Delgado 2006; Santamaría et al. 2006; Frisch et al. 2009). La Figura 1 muestra la mediana de la tendencia histórica del hidroperiodo de la marisma natural del END en el periodo 1975-2011 calculada mediante el método no paramétrico Theil Shen Median Slope que es insensible a los outliers y más preciso que la regresión simple.

Esta aproximación permite ubicar espacialmente las tendencias de incremento o reducción en el tiempo de permanencia del agua, como variable crítica para las comunidades biológicas de la marisma de Doñana (Díaz-Delgado et al. 2010b). El análisis temporal revela dos tendencias significativas: por un lado un incremento en el hidroperiodo en el cuadrante noroccidental (recuadro amarillo Fig. 1) ligado a una reducción importante del hidroperiodo en la desembocadura del Arroyo del Partido a consecuencia del cono de deposición de arenas; y por otro lado una reducción de hidroperiodo en el cuadrante suroriental (recuadro negro Fig. 1; Díaz-Delgado et al. 2014b).

Diferentes trabajos han puesto de manifiesto la relevancia de monitorizar sistemáticamente la inundación y el hidroperiodo anual dada su capacidad explicativa de la presencia, abundancia y cría de diferentes especies de aves acuáticas (Kloskowsky et al. 2009; Ramo et al. 2013; Márquez-Ferrando et al. 2014; Toral et al. 2011; Rendón et al. 2008) y rapaces (Sergio et al. 2011) o en la expansión del helecho acuático invasor *Azolla filiculoides* (Espinár et al. 2015; Díaz-Delgado et al. 2008a; Díaz-Delgado et al. 2011; Bustamante et al. 2009a). De igual forma, el empleo de imágenes hiperespectrales procedentes de sensores aeroportados ha permitido cartografiar con detalle la ubicación de las charcas temporales en el manto eólico del Espacio Natural de Doñana (Gómez-Rodríguez et al. 2011) y mejorar la caracterización de los hábitats de cría de las diferentes especies de anfibios presentes

Figura 1. Tendencia del hidroperiodo medio desde 1975 a 2011 en la marisma natural del END.

Figure 1. Average hydroperiod trend from 1975 to 2011 in the END natural marshlands.

en el END (Gómez-Rodríguez et al. 2008). La serie temporal de imágenes Landsat permitió evidenciar la disminución del hidropedimento en las últimas décadas de estos hábitats tan importantes para la reproducción de los anfibios (Gómez-Rodríguez et al. 2010).

La información multiespectral contenida en las imágenes de satélite ha permitido cuantificar los valores espacio-temporales de turbidez en las aguas tanto de la marisma (Bustamante et al. 2009b) como en el estuario del Guadalquivir (Díaz-Delgado et al. 2010a). El análisis temporal de la serie histórica ha contribuido a reconstruir el régimen de turbidez diferenciando los episodios de turbidez extrema y los ciclos de alta turbidez (Díaz-Delgado et al. 2015). Las cartografías resultantes de los seguimientos de inundación y turbidez en Doñana se encuentran disponibles a través de servicios OGC en <http://venus.ebd.csic.es/imgs/>.

Otros seguimientos a escala de paisaje han permitido cuantificar los procesos geomorfológicos de dinámica dunar y línea de costa evidenciando la regresión costera en el médano del Asperillo y la dinámica de progradación (creación de playa) en la Punta del Malandar (Díaz-Delgado 2008). Los protocolos utilizan el método de segmentación digital de imágenes (Berberoglu y Akin 2009) al igual que el seguimiento de los procesos de sedimentación en marisma, que ha permitido valorar los efectos de las actuaciones de restauración del Proyecto Doñana 2005. En concreto, ha podido evidenciarse la reducción de aportes de arena en el cono de deyección del Arroyo del Partido, uno de los principales tributarios de la marisma, la aparición de nuevos cauces de arroyada después de la creación de lagunas artificiales de decantación y la constatación de la modificación del cauce principal del Caño de la Madre a consecuencia del cono de deyección del Arroyo del Partido.

La aproximación a escala de paisaje utiliza parcelas, transectos y puntos de muestreo in situ a modo de verdad-terreno para validar las cartografías. Estas localidades proporcionan información de validación en el seguimiento de la cobertura de las formaciones vegetales mayoritarias dentro del Parque Nacional de Doñana (PND). Las tendencias observadas de cambio en superficie desde 1999 reportan un aumento generalizado del pinar (incremento en densidad y en extensión) y una reducción de la superficie cubierta por el monte negro hígrófilo sustituidas por comunidades de especies más xéricas de monte intermedio y blanco e incluso sabinar de *Juniperus phoenicea* ssp. *turbinata*. Estas parcelas proporcionan además información sobre estructura, densidad, dinámica poblacional, abundancias y diversidad. El seguimiento del sabinar/pinar ubicado en la Reserva Biológica de Doñana (RBD), en el interior del PND, ha permitido así revelar los efectos dramáticos del evento de mortalidad registrado durante otoño de 2005 tanto a escala local (Lloret y Gran-zow-de la Cerda 2013) como de paisaje (Díaz-Delgado 2006). La mortalidad y daño monitorizado desde el evento muestra una mayor afectación de los individuos juveniles (0.5-1 m de altura de copa) constatada por una menor eficiencia en el uso del agua (Valladares et al. En preparación) y aún mayor daño y mortalidad en las zonas con altas densidades (Díaz-Delgado et al. 2014a). Los efectos de este tipo de eventos perduran durante los siguientes años a pesar de la rebrotada observada en los individuos dañados.

La disposición de las parcelas de verdad-terreno a micro y mesoescala permite mediante la ubicación espacial de cada individuo un proceso de escalado de la información recabada hasta las imágenes disponibles, tanto de imágenes aéreas obtenidas con avión o drones como de satélite. El análisis espacial retrospectivo desde 1956 a la actualidad revela un proceso de expansión e incremento de densidad del sabinar en las naves (García et al. 2014). Así, el establecimiento de parcelas de verdad-terreno en el matorral de la RBD ha permitido validar varias cartografías anuales de abundancias de las especies leñosas dominantes mediante técnicas de desmezclado espectral (Jiménez et al. 2005; Jiménez et al. 2011, Jiménez 2011). Gracias a ellas han podido confirmarse los efectos dramáticos de sequía sobre las especies de monte negro y los procesos de defoliación por fitófagos en el jaguarzo. Recientemente, a través de un proyecto de investigación sobre la diversidad funcional de diferentes comunidades vegetales mediterráneas ha po-

dido complementarse dicha información de cobertura, estructura y densidad con la diversidad de rasgos funcionales poniendo de manifiesto una gran estabilidad de las comunidades de matorral que no muestran grandes cambios en la diversidad funcional ni en los rasgos funcionales después de eventos extremos (Lloret et al. 2014; Pérez-Ramos et al. 2014; de la Riva et al. 2014). En el caso de las parcelas permanentes en el bosque de ribera del Arroyo de la Rocina ha podido evidenciarse la tendencia a la disminución de superficie ocupada por la saucedada en beneficio del fresno, registrándose además un mayor porcentaje de troncos caídos de sauce (Rodríguez-González et al. 2014). Estos resultados confirman los cambios en la hidrología de este importante tributario marismeno. Este seguimiento ha sido posible gracias a una estrecha colaboración con la Universidad de Lisboa mediante accesos financiados por los diferentes proyectos de infraestructuras mencionados.

Seguimiento ecofisiológico automatizado del sabinar de las naves de la RBD

Los efectos observados del evento de sequía a escala de paisaje sobre el sabinar de las naves de la RBD pusieron de manifiesto la relevancia de la competencia intraespecífica entre los individuos de *Juniperus phoenicea* (Díaz-Delgado et al. 2014a). Con objeto de valorar los mecanismos fisiológicos responsables de la respuesta diferencial a tales eventos extremos se diseñó un seguimiento automático de diferentes variables fisiológicas tanto a escala de individuo como de comunidad. La hipótesis de origen plantea una mayor competencia a mayores densidades de individuos y por lo tanto una menor competencia a mayor distancia entre individuos. Se seleccionaron 3 individuos juveniles de menos de 2 m de altura de copa y 1 individuo adulto de más de 2 m de altura de copa, asumiendo el tamaño del individuo como estima indirecta de su potencial competitivo (Fig. 2). La variable indicadora de competencia seleccionada fue el crecimiento secundario medido para cada uno de los individuos de sabina en el diseño automático y 4 réplicas del diseño. En cada individuo del diseño automático se ubicaron los siguientes sensores: 2 sensores de flujo de savia (6 en el caso de la sabina adulta) y 2 dendrómetros en rama principal y secundaria; 1 sensor de humedad foliar; 1 sensor de temperatura foliar; 1 pluviómetro bajo copa (4 en el caso de la sabina adulta) y 1 fuera de copa; sensores de humedad y temperatura del suelo bajo cada sabina, en suelo desnudo y bajo manto de líquenes, a 4 profundidades (0.1, 0.3, 0.5 y 1 m). Esta red de sensores se encuentra alimentada por paneles fotovoltaicos y sus dataloggers permanentemente conectados a la red a través de una conexión punto a punto, permitiendo consultar en todo momento los datos almacenados a través de la web (<http://icts.ebd.csic.es>). Con objeto de escalar las variables fisiológicas medidas en unos pocos individuos al nivel de comunidad, se instaló una torre de cuantificación de flujos y energía mediante la técnica *Eddy Covariance* (Serrano-Ortiz et al. 2006). Uno de los aspectos más innovadores ha sido el proceso de automatización total del procesamiento de los datos de la torre. El proceso utiliza el software de procesamiento EddyPro (Li-Cor Biosciences®) para cada día obteniéndose los resultados integrados cada media hora del balance de energía, Carbono y agua. El procesamiento genera además gráficas diarias de los flujos (Fig. 3) disponibles en internet (<http://venus.ebd.csic.es/balances/index.html>).

La instalación de toda esta red de sensores comenzó el año 2007 financiadas por las ayudas del programa ICTS (Díaz-Delgado et al. 2008b). No obstante, a lo largo de estos últimos años diversas re-instalaciones y modificaciones se han efectuado como consecuencia de la nula resistencia de algunos sensores y para la mejora del diseño en términos de telecomunicaciones, almacenamiento y alimentación eléctrica. La Figura 4 muestra las tendencias de crecimiento secundario medidas con los dendrómetros para las 4 sabinas monitorizadas durante el periodo septiembre de 2008 a mayo de 2009. Puede observarse como los crecimientos de la sabina adulta y la sabina juvenil aislada son mayores que los registrados para las sabinas juveniles en proximidad del adulto, y en especial del más próximo, evidenciando un efecto por competencia.

Figura 2. a) Foto aérea infrarrojo color adquirida por dron mostrando las sabinas seleccionadas para la monitorización fisiológica en continuo. b) Disposición espacial (distancias entre copas y entre cepas) de las sabinas escogidas para el seguimiento fisiológico de la competencia intraespecífica.

Figure 2. a) Drone color-infrared aerial picture showing the selected Juniper individuals for the physiological monitoring. b) Spatial arrangement (distance among canopies and stumps) of the selected Juniper individuals for the physiological monitoring of intraspecific competence.

Figura 3. Ejemplo de balance de energía durante un día en el sabinar de la RBD. H: calor sensible, LE: calor latente, R_n : Radiación neta y flujos de CO_2 y de H_2O y de calor hacia o desde el suelo (G).

Figure 3. Example of energy balance for a day in the Juniper woodlands of RBD. H: sensible heat, LE: latent heat, R_n : Net Radiation and fluxes of CO_2 and H_2O and soil heat (G)

Figura 4. Variación y tendencias en el crecimiento secundario de las 4 sabinas monitorizadas de septiembre de 2008 a mayo de 2009. Los incrementos de diámetro de tallo en la sabina adulta y la sabina juvenil aislada son mayores que los registrados para las sabinas juveniles en proximidad del adulto, y en especial del más próximo, evidenciando un efecto por competencia.

Figure 4. Dynamics and trends in secondary growth of the 4 monitored Juniper individuals from September 2008 to May 2009. Stem diameter increase for the adult and isolated juvenile is greater than those for the juveniles in the proximity to the adult and especially the closest one, evidencing a competitive effect.

De acuerdo con la disponibilidad de datos de los diversos sensores ha podido estimarse el intercambio neto de Carbono del ecosistema (Net Ecosystem Exchange) del sabinar en $250 \text{ g/m}^2\cdot\text{año}$. Estas tasas son similares a otros ecosistemas semi-áridos en el mundo Mediterráneo. La **Figura 5** muestra el patrón temporal de intercambio neto de Carbono durante el periodo de abril de 2014 a abril de 2015. Puede observarse como el ecosistema incorpora Carbono durante la etapa de crecimiento coincidente con la primavera, para pasar posteriormente durante el periodo de sequía estival a perder Carbono a partir del 30 julio mantenido hasta finales de noviembre cuando comienzan las primeras lluvias. El cierre de energía se efectúa para evaluar la fiabilidad de las medidas obtenidas mediante la técnica de Eddy-Covariance. Para ello se cuantifica el porcentaje de la fracción de energía que explican los flujos turbulentos de calor latente (LE) y de calor sensible (E) (Serrano-Ortiz et al. 2006). En el ciclo anual del sabinar del Ojillo se alcanzó a explicar una variabilidad del 73% ($R^2=0.93$). El valor medio de evapotranspiración diaria se estimó en 21 mm dándose el máximo durante el mes de abril (31 mm) y el mínimo durante el mes de agosto (5.88 mm). En la actualidad se están aplicando diferentes métodos de estima de respiración de suelo y plantas para calcular la producción primaria bruta, si bien se confirma el servicio de secuestro de Carbono por parte de este ecosistema. La estima de biomasa del sabinar mediante relaciones alométricas (Villar et al. 1997) con las variables cuantificadas en las parcelas de seguimiento se corresponde con 5243 g/m^2 , de los cuales el 20% corresponde a biomasa verde (hojas) y el resto a biomasa leñosa.

El seguimiento ecológico a largo plazo de los consumidores primarios

Los consumidores primarios son aquellas especies animales que se alimentan de los productores, es decir consumen en su mayor parte alimento de origen vegetal, en términos generales se les denomina herbívoros. Basándonos en la información obtenida a partir

del programa de seguimiento ecológico a largo plazo en el END, en este apartado se aborda el papel de las especies de mamíferos consumidores primarios que podemos dividir en dos grandes grupos: Por un lado los ungulados silvestres (ciervo, *Cervus elaphus*; gamo, *Dama dama* y jabalí, *Sus scrofa*) y los domésticos (vaca, *Bos taurus*; caballo, *Equus caballus* y oveja, *Ovis aries*). Estas especies constituyen un elemento clave en los ecosistemas de Doñana. Por otro lado comentaremos el papel del conejo (*Oryctolagus cuniculus*) como especie clave en los ecosistemas mediterráneos.

Un concepto necesario para comprender el papel de los herbívoros en el ecosistema es la capacidad de carga del medio (número máximo de animales que puede albergar un espacio, garantizando su conservación a largo plazo); es un concepto teórico difícilmente evaluable a efectos prácticos y puede estar condicionada por muchos factores. Por lo tanto, la correcta aplicación de ésta puede ser muy compleja, y su gestión inadecuada puede conducir a obtener cargas superiores a las realmente soportables por el medio natural. Por lo que la carga que podremos asumir será aquella cuyo umbral superior se corresponda con un efecto aún admisible sobre parámetros de índole social, ecológico, sanitario o de conservación. Esto supone una gestión adaptativa sobre las especies, a través del análisis de los datos y resultados que se obtienen del seguimiento continuado de sus poblaciones, tanto domésticas como silvestres y sus efectos sobre el espacio, con el objetivo de garantizar la conservación de todos los valores del PND.

En la **Tabla 1** se exponen las equivalencias entre las cargas de los ungulados que habitan Doñana a excepción del jabalí. Como se puede observar, una vaca consume cuatro veces más biomasa vegetal que un ciervo adulto.

Desgraciadamente, las poblaciones de herbívoros están aumentando (**Fig. 6**), algunas de manera exponencial al no presentar depredadores naturales que controlen sus poblaciones, fundamentalmente el lobo (*Canis lupus*) extinguido en la comarca en la década de los cincuenta del pasado siglo.

Figura 5. Intercambio neto de Carbono para el periodo abril de 2014 a abril de 2015 en el sabinar de la RBD. Se muestra también un esquema con las características de la instalación de la torre Eddy-Covariance.

Figure 5. Net Carbon Ecosystem Exchange for the period between April 2014 and April 2015 in the Juniper woodlands of RBD. The setup characteristics of the Eddy-Covariance are also shown.

Tabla 1. Equivalencias de las cargas ganaderas de los herbívoros de Doñana (según (Holeček 1988)).

Table 1. Equalised stocking rates of the herbivores in Doñana (according to (Holeček 1988))

Grupo animal	Unidad de Ganado Mayor (UGM)
Bovino adulto	1.00
Becerro	0.60
Equino adulto	1.00
Potro	0.30
Ciervo adulto	0.25
Ciervo juvenil	0.09
Gamo adulto	0.20
Gamo juvenil	0.05

Figura 6. Abundancias de ganado (bovino y equino) y ungulados silvestres (ciervo y gamo) en el PND desde 1986. (Fuente: END-Junta de Andalucía y ESPN-EBD-CSIC).

Figure 6. Cattle (bovine and equine) and wild ungulate (Red Deer and Fallow Deer) abundances in Doñana National Park since 1986. (Data source from END-Junta de Andalucía and ESPN-EBD-CSIC).

En la **Figura 6** se puede observar como a partir de 1992 el ganado vacuno presenta una tendencia positiva con fluctuaciones interanuales. La tendencia creciente es especialmente constante en los últimos años (período 2005-2013). Sin embargo, la carga ganadera equina durante el último periodo (desde 2000) presenta una tendencia estable o a la baja.

En los ungulados silvestres el gamo era la especie más abundante hasta 1995, alcanzándose un pico máximo en 1993, esta abundancia disminuye drásticamente en el año 1996 motivada por una gran inundación en dicho año después de un periodo de sequía prolongado. La tendencia en la última década del ciervo es creciente, habiéndose casi duplicado la población.

El jabalí (*Sus scrofa*) es considerado como una especie ingeniera de ecosistemas, es decir, es capaz de modificar sustancialmente el hábitat pudiendo afectar a otras especies. Estos impactos ocasionados están todavía poco estudiados. Tienen la capacidad de alterar las propiedades del suelo al levantar éste, produciendo un aumento de la pérdida de nutrientes por lixiviación (Hendrix et al. 1986). El efecto directo más obvio es la reducción de la cubierta vegetal, una pérdida de diversidad (Siemann et al. 2009), de regeneración vegetal (Webber et al. 2010), junto a alteraciones de la composición vegetal específica (Siemann et al. 2009).

Los efectos en las comunidades animales también son notables, reduciendo la meso y macrofauna del suelo entre un 40 y 90% (Pavlov y Edwards 1995). Ejerce depredación sobre anfibios, reptiles mariferos y aves (Jolley et al. 2010). Es notable la predación que ejerce sobre nidos de aves en ambientes lacustres (Giménez-Anaya et al. 2008), similares a Doñana. Por último, aunque existen pocos estudios

al respecto, producen un efecto negativo sobre las comunidades acuáticas, alterando la composición de las comunidades animales y vegetales, degradando la calidad del agua, dispersando plantas, animales, enfermedades y patógenos (Barrios-García y Ballari 2012).

En Doñana se tienen datos de la dinámica poblacional del jabalí desde el año 2005. En la **Figura 7** se puede observar un descenso muy marcado en la abundancia entre el periodo 2006 al 2009, como consecuencia del control poblacional realizado por el END. Desde entonces la especie se está recuperado rápidamente, sugiriendo un aumento poblacional muy elevado desde la interrupción del control.

A la vista de estos resultados podemos concluir que las poblaciones de grandes herbívoros en el END es muy elevada afectando negativamente a los pastizales oligotróficos del Parque, muy diversos en especies herbáceas raras o en peligro, al abonarlos en exceso con sus excrementos (Soriquer 1983).

Se han detectado también efectos negativos sobre determinadas especies de plantas y sobre su fauna de invertebrados asociada que incluye, en numerosos casos, endemismos zoológicos de gran interés apenas estudiados. En la zona de ecotono entre la marisma y las arenas conocida como La Vera, los ungulados consumen más de un 75% de la biomasa vegetal producida, y menos del 25% de la misma se encuentra disponible al inicio de la siguiente estación de crecimiento (Soriquer et al. 2001; **Fig. 8**).

Figura 7. Índices kilométricos de abundancia (IKA) de jabalí en el periodo 2005-2013. (Fuente ESPN-EBD-CSIC).

Figure 7. Kilometric Index of Abundance (KIA) of wild boar for the period 2005-2013. (Data source from ESPN-EBD-CSIC).

Figura 8. Aspecto de un cercado de exclusión de herbívoros. Nótese la diferente cobertura dentro y fuera del cercado a consecuencia del sobrepastoreo. Autor F. Carro.

Figure 8. Overgrazing effect around exclosure fence in the marshland. Notice the dramatic difference in plant cover outside and inside the exclosure plot. Autor F. Carro.

Además, ejercen una elevada presión por herbivoría sobre algunas especies de flora amenazada propias de comunidades ligadas a hábitats prioritarios, prados húmedos mediterráneos de hierbas altas del *Molinion-Holoschoenion*, en concreto sobre *Armeria gaditana* y *Avellara fistulosa*, donde la elevada presencia de herbívoros en las localidades de la vera no permite que sus individuos alcancen la fructificación, haciendo peligrar sus poblaciones (Equipo de Seguimiento de Doñana. ICTS – Reserva Biológica de Doñana (EBD-CSIC) 2014).

El mantenimiento de unos niveles de herbivoría adecuados puede considerarse como una herramienta esencial en el manejo y conservación de los valores naturales de Doñana, por lo que es necesario disminuir la carga ganadera tanto de ungulados silvestres como domésticos.

Otra especie que suscita un interés especial por ser una pieza clave de los ecosistemas mediterráneos es el conejo de monte. Es una presa consumida por más de 40 especies de depredadores, destacando el lince ibérico (*Lynx pardinus*) y el águila imperial ibérica (*Aquila adalberti*). Desde tiempos históricos ha sido una especie muy abundante en la península ibérica, sin embargo, en el siglo XX la especie sufrió elevados descensos poblacionales debido principalmente a la pérdida de hábitat y a enfermedades de origen vírico.

Los seguimientos de conejos a largo plazo en el PND han constatado un descenso poblacional considerable en áreas de presencia tradicional de lince como el Coto del Rey, con descensos superiores al 80 % en el periodo 2012-2013 (Fig. 9).

Los datos provenientes de otras zonas del PND, áreas de presencia estable de lince, así como de cotos de caza, sugieren también fuertes caídas poblacionales. La fuerte reducción del número de conejos en 2013 viene acompañada de una reducción en el número de crías de lince nacidas en libertad y en un aumento del número de lince atropellados debido a los mayores desplazamientos efectuados por estos para encontrar alimento (Delibes-Mateos et al. 2014). Su declive puede tener un efecto adverso en cascada en el funcionamiento de los ecosistemas.

La aproximación socio-ecológica en la plataforma LTSER-Doñana

Una de las grandes aportaciones de la integración en la red LTER-Europa ha sido la adopción en el programa de seguimiento para Doñana de la aproximación socio-ecológica a la hora de analizar los motores de cambio en los ecosistemas y en los servicios que proveen. La propuesta original de la red LTER-Europa plantea la necesidad de considerar las actitudes, percepciones y participación de la sociedad humana en los sitios LTER en relación con la gestión y conservación de sus ecosistemas (Mirtl y Krauze 2007). Esta inclusión de la dimensión humana en la conservación de Doñana ya cuenta con los precedentes de los dos Planes de Desarrollo Sostenible de Doñana de acuerdo con los principios de la Agenda 21; el primero válido de 1993 al año 2000 y el segundo en vigor desde 2010. No obstante, la red europea ha sido pionera en la propuesta de herramientas interdisciplinares para la investigación conjunta de los sistemas socio-ecológicos (Haberl et al. 2006) creando para ello en 2007 una red de 31 plataformas de investigación socio-ecológica a largo plazo (LTSER) entre las que se propuso la plataforma LTSER-Doñana conformada por los municipios de la comarca de Doñana, incluyendo el END (Mirtl et al. 2013). En sus inicios los diferentes estudios buscaron proporcionar experiencias para la conceptualización de esta nueva aproximación. Entre ellos destaca la comparativa efectuada con otras 2 plataformas, Eisenwurzen en Austria y el Delta del Danubio en Rumanía, mediante el empleo de la aproximación DPSIR (Drivers, Pressures, States, Impacts and Responses, (EEA 2005)) evidenciando la relación existente entre la apropiación humana de la producción primaria neta (HANPP, (Vitousek et al. 1986; Haberl 1997)) y la riqueza de aves reproductoras (Haberl et al. 2009). Un ejercicio similar se plantea en (Maass et al. 2010) describiendo los principales motores socioeconómicos que condicionan los ser-

Figura 9. Dinámica temporal del Índice Kilométrico de Abundancia del conejo durante el mes de setiembre para el periodo 2005-2013 en el Parque Nacional de Doñana. BD: Itinerarios en zonas de Baja Densidad. AD: Itinerario en zonas de Alta Densidad. (Fuente ESPN-EBD-CSIC)

Figure 9. Temporal dynamics of the September Kilometric Index of Rabbit Abundance for the period 2005-2013 in Doñana National Park. BD: Transects in low density areas. AD: Transects in high density area. (Data source from ESPN-EBD-CSIC).

vicios ambientales en el sitio Chamela de las red mexicana (Mex-LTER) y en la plataforma LTSER-Doñana. Precisamente la red LTER-Europa ha propuesto una evaluación rápida de los servicios ambientales de cualquier ecosistema mediante un método rápido basado en opinión experta testado en 35 sitios de su red (Dick et al. 2014). La plataforma LTSER-Doñana implementó este protocolo resultando su evaluación muy similar a la de los sitios de igual tamaño de acuerdo a su mayor provisión de servicios. Dada la imperiosa necesidad de referenciar espacialmente la provisión y la demanda de tales servicios y por ende la integridad ecológica, la plataforma LTSER-Doñana participó en un método de cartografiado con una estima de la incertidumbre en la asignación de usos y cubiertas a servicios concretos y a sus niveles de integridad ecológica (Stoll et al. 2015). Esta aproximación ha permitido valorar la percepción de provisión de diferentes servicios en función del tipo de ecosistema.

En definitiva, la aproximación socio-ecológica ha contribuido con novedosas herramientas numéricas al mejor entendimiento de las relaciones entre el funcionamiento ecosistémico y los servicios proporcionados a la sociedad en el marco conceptual de la integridad ecológica como criterio de conservación.

Beneficios en la gestión y en la toma de decisiones

Doñana es uno de los espacios naturales protegidos con un historial de datos de seguimiento más amplio de todos los que conforman el territorio europeo. Aunque la declaración del Parque Nacional data de 1969, la obtención de datos de parámetros físicos, químicos y sobre todo biológicos comenzó muchos años antes y, de una manera más protocolizada, desde la declaración de la Reserva Biológica de Doñana en el año 1964. A estos seguimientos específicos hay que sumarle el valiosísimo aporte de todos los registros que durante siglos se han tomado de las actuaciones en el medio (siembras, cortas, repoblaciones, cacerías, aprovechamientos, etc) y que se conservan en los archivos históricos de los diver-

so propietarios que ha tenido el territorio. Estos bancos de datos hacen que este espacio natural protegido presente una ventaja muy relevante sobre los demás, y muy útil y básica para el seguimiento, por ejemplo, de los efectos y manifestaciones del cambio global. A los parámetros que se comenzaron a tomar mediante el programa de seguimiento de procesos naturales, fundamentalmente de aves, con el paso de los años se le han ido añadiendo multitud de otros datos de interés que representan un valor muy especial para los que tenemos la responsabilidad de la toma de decisiones en la gestión del territorio.

El levantamiento de información en Doñana ha ido marcado por las herramientas propias del momento. Y, aunque siempre se ha ido usando la mejor de ellas, es evidente que una gran cantidad de los datos que se conservan de Doñana se encuentran en formatos y soportes que se deben ir adaptando a los medios técnicos actuales para poder cruzarlos unos con otros y así aprovechar más su utilidad. Y esto no es tarea fácil. Son de gran valor los Cuadernos de Campo de los observadores que, primero voluntarios y luego técnicos, han ido desarrollando su trabajo desde hace décadas en Doñana. Los datos recogidos en ellos representan un tesoro que año a año va adquiriendo más valor pero que se encuentran en el soporte de la época: el papel. Recientemente la Estación Biológica de Doñana ha procedido a dar un primer paso para la informatización de todo este elevado volumen de información. De este modo ahora se pueden realizar rápidamente consultas de especies, fechas, censos, anillas, etc., mediante una búsqueda on-line de algunos de estos cuadernos que ya han sido digitalizados (<http://www.cuadernosdecampo.es/>).

Pero existe mucha información que aún se conserva en papel y no sólo eso, sino que además se encuentra muy repartida, pues en muchos casos estas bases de datos se han ido elaborando por iniciativas particulares de técnicos. Por ejemplo, recientemente hemos editado un informe de mortalidad no natural de lince ibérico en Doñana, desde el año 1982 al 2013, y hemos tenido que manejar 15 bases de datos, informes y documentos, confeccionados con campos y criterios distintos, cada uno al gusto del técnico que, con su mejor criterio y buena disposición, tuvo el detalle y el acierto de hacerlo.

En definitiva, en Doñana disponemos de un gran volumen de información pero nos falta la homogenización de toda ella. Como imagen más gráfica podemos decir que Doñana es un inmenso y magnífico caserón al que se le han ido adaptando las innovaciones que han ido apareciendo en las distintas épocas: a la cocina se le han cambiado los fogones de carbón por unas excelentes placas de vitrocerámica y unos hornos maravillosos, pero el comedor sigue estando en el extremo opuesto de la casa y por tanto la comida sigue llegando fría.

Ese es el reto actual para darle más valor a todo el voluminoso y magnífico trabajo que se viene realizando desde hace décadas.

Para los que tenemos responsabilidad en la gestión, y debemos tomar decisiones en este valioso y complejo territorio, es de suma importancia tanto disponer de datos de referencia del pasado como poder vincular y cruzar datos de los diversos seguimientos que se realizan, de tal modo que el resultado de la vinculación de esos datos nos ayude, no sólo a comprender mejor cómo funciona el medio, sino también a adelantarnos a situaciones de emergencia como puede ser la sobre-inundación en periodos invernales o el desarrollo de “blooms” de cianobacterias tóxicas al inicio de la época estival.

La posibilidad que ofrece el seguimiento y la investigación ecológica a largo plazo para la gestión de Doñana es una oportunidad magnífica para que toda la información generada se vuelque en soportes más rápidos, más accesibles y por tanto más útiles. La definición de unos protocolos de levantamiento de la información, junto con la metodología en la toma de datos, hace que se pueda profundizar en un mejor conocimiento y representa una herramienta de grandísima ayuda, no sólo para los que tenemos la responsabilidad en la toma de decisiones y prevención de sucesos, sino para la comunidad científica y el conocimiento de la sociedad en general.

Esta nueva filosofía de apertura y puesta a disposición de la sociedad de la información levantada es un aspecto importantísimo que le aporta más valor si cabe a esta red y constituye uno de sus puntos fuertes. Los trabajos previos y la puesta a punto de la red LTER-España y de la plataforma LTSEr-Doñana están suponiendo un duro trabajo, especialmente de los que han tenido más responsabilidades durante este proceso, pero en su culminación facilitarán enormemente el desempeño de las tareas de los que estamos ahora y de los que vendrán después.

En Doñana hemos apostado por pertenecer a la Red LTER-España porque se avanza en el conocimiento más profundo del medio, se facilita la toma de decisiones, se pueden evitar situaciones de emergencia, se dispone de herramientas para mitigar los efectos del cambio global, el mundo científico tiene un acceso más directo y fiable de multitud de datos que se toman con unos criterios y metodología consensuados internacionalmente, y la sociedad esta mejor informada. Con todo ello se refuerza el papel de la función de los espacios naturales protegidos, se realzan los valores, no sólo de biodiversidad sino también de calidad de vida, que presentan y los que justificaron su declaración y, para los que trabajamos en ellos, refuerza y revaloriza nuestro trabajo.

Agradecimientos

El programa fue financiado originalmente por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales, y en paralelo por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir bajo el Proyecto de Restauración Hidrológica Doñana 2005. El personal del ESPN fue aportado mayoritariamente por la EBD. A partir de 2007, esta financiación pasó a ser asumida por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, que ha mantenido hasta 2014 la asignación presupuestaria necesaria para mantener los protocolos e incrementar las series de datos correspondientes. En la actualidad, la financiación ha sido cancelada y el personal redistribuido. El 60% de los protocolos se han discontinuado y sólo la vigencia de algunos proyectos de investigación está permitiendo su continuidad hasta su finalización. La red LTER-España y la plataforma LTSEr-Doñana han podido mejorar su integración y participación en investigación ecológica a largo plazo gracias a financiación nacional como el proyecto ACI-Comités (ACI2008-0815) del Programa de Internacionalización de la I+D del antiguo Ministerio de Ciencia e Innovación y europea mediante el programa LIFE+ a través del proyecto EnvEurope (Environmental quality and pressures assessment across Europe: the LTER network as an integrated and shared system for ecosystem monitoring, LIFE08 ENV/IT/000399).

Referencias

- Barkmann, J., Baumann, R., Meyer, U., Müller, F., Windhorst, W. 2001. Ökologische Integrität: Risikoversorge im Nachhaltigen Landschaftsmanagement. *GAI* 10(2):97–108.
- Barrios-García, M.N., Ballari, S.A. 2012. Impact of wild boar (*Sus scrofa*) in its introduced and native range: a review. *Biol. Invasions* 14, 2283–2300.
- Berberoglu, S., Akin, A. 2009. Assessing different remote sensing techniques to detect land use/cover changes in the eastern Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11(1):46–53.
- Burkhard, B., Opitz, S., Lenhart, H., Ahrendt, K., Garthe, S., Mendel, B., Windhorst, W. 2011. Ecosystem based modelling and indication of ecological integrity in the German North Sea—Case study offshore wind parks. *Ecological Indicators* 11(1):168–174.
- Bustamante, J., Díaz-Delgado, R., Aragonés, D., Fernández-Zamudio, R., García Murillo, P., Cirujano, S. 2009a. Using hyperspectral sensors to map the spread of the invading water fern (*Azolla filiculoides*). En: *2nd European Congress of Conservation Biology ECCB2009. Programme Book*. pp. 62, ECCB, Praga, Chequia. Disponible en http://www.eccb2009.org/uploads/Programme_ECCB2009.pdf
- Bustamante, J., Pacios, F., Díaz-Delgado, R., Aragonés, D. 2009b. Predictive models of turbidity and water depth in the Doñana marshes using Landsat TM and ETM+ images. *Journal of Environmental Management* 90:2219–2225.

- Chans, J.J., Díaz-Delgado, R. 2006. Monitoring and Evaluation: the key to the Doñana 2005 Restoration Project. Pages 319–326 *Doñana, water and biosphere*. F. García Novo C. Marín Cabrera. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España.
- de la Riva, E.G., Lloret, F., Pérez-Ramos, I.M., Marañón, T., Saura-Mas, S., Díaz-Delgado, R., Villar Montero, R. 2014. Diversidad funcional del matorral de Doñana: respuesta a episodios climáticos extremos. En: Janss, G.F.E., Astasio, R. Vilà, M. (eds.). *Jornadas de investigación sobre la conservación de Doñana. Sevilla, 6-7 febrero 2014. Libro de resúmenes*, pp.79. Estación Biológica de Doñana, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla, España.
- Delibes-Mateos, M., Ferreira, C., Carro, F., Escudero, M.A., Gortázar, C. 2014. Ecosystem Effects of Variant Rabbit Hemorrhagic Disease Virus, Iberian Peninsula. *Emerging Infectious Diseases* 20(12):2166–2168.
- Díaz-Delgado, R. 2006. *Evento de mortalidad en la vegetación terrestre del Parque Nacional de Doñana*. Page 17. Informe de seguimiento, Estación Biológica de Doñana, CSIC, Sevilla, España.
- Díaz-Delgado, R. 2008. Cartografía dinámica costera del Parque Nacional de Doñana. En: Pardo Pascual, J.E., Ruiz Fernández, L.A. (eds.). *Actas de las Jornadas Técnicas las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: Análisis de la evolución de playas y dunas*, pp. 28–32. Universitat Politècnica de València, Valencia, España.
- Díaz-Delgado, R. 2010a. Puesta a punto e implementación de un programa integrado de seguimiento ecológico a largo plazo en el Espacio Natural de Doñana. *Ecosistemas* 19(2):42–55.
- Díaz-Delgado, R. 2010b. An Integrated Monitoring Programme for Doñana Natural Space: The Set-Up and Implementation. En: *Conservation Monitoring in Freshwater Habitats*, pp. 325–337. Springer.
- Díaz-Delgado, R., Bustamante, J., Pacios, F., Aragonés, D. 2006. Hydroperiod of Doñana Marshes: Natural or Anthropogenic Origin of Inundation Regime? En: *Proceedings of GlobWetland: Looking at Wetlands from Space, Frascati, Italy, 19-20 October 2006*, ESA Publications Division. Noordwijk, Países Bajos.
- Díaz-Delgado, R., Bustamante, J., Aragonés, D. 2008a. Caso 5. La teledetección como herramienta en la cartografía de especies invasoras: *Azolla filiculoides* en Doñana. En: Vila, M., Valladares, F., Traveset, A., Santamaría, L., Castro, P., (eds.). *Invasiones Biológicas*, pp. 159–163. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
- Díaz-Delgado, R., Infante, J.M., Gutiérrez, C., Soriguer, R. 2008b. Real-time ecophysiological monitoring of Juniper woodlands in Doñana. En: *Proceedings of the International Workshop on Ecohydrology and Ecophysiology of plants in water-limited environments. International Workshop on Ecohydrology and Ecophysiology of plants in water-limited environments, Perth, Australia, 15-19 September 2008*, pp. 31. University of Western Australia, Perth, Australia.
- Díaz-Delgado, R., Ameztzy, I., Cristobal, J., Bustamante J. 2010a. Long time series of Landsat images to reconstruct river surface temperature and turbidity regimes of Guadalquivir estuary. En: *Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium on Remote Sensing (IGARSS2010), Honolulu, Hawaii, 25-30 July*, pp. 233–236. Geosciences and Remote Sensing Society.
- Díaz-Delgado, R., D. Aragonés, I. Ameztzy, J. Bustamante. 2010b. Monitoring marsh dynamics through remote sensing. En: Hurford, C., Schneider, M., Ian Cowx, I. (eds.). *Conservation Monitoring in Freshwater Habitats*, pp. 375–386. Springer.
- Díaz-Delgado, R., Ameztzy, I., Aragonés, D., Bustamante, J. 2011. Cartografía histórica del helecho acuático invasor *Azolla filiculoides* en la marisma de Doñana. En: Recondo González C., Pendás Molina, E. (eds.). *Teledetección Bosques y cambio climático. Actas XIV Congreso Asociación Española de Teledetección, Mieres del Camino, 21 al 23 de septiembre 2011*, pp.329–332. Asociación Española de Teledetección, Mieres del Camino, Asturias, España.
- Díaz-Delgado, R., Afán, I., Silva, R. 2014a. Patrones espaciales de daño en copa en el sabinar de la Reserva Biológica de Doñana a consecuencia de un evento extremo de sequía. En: Cámara Artigas, R. (Coord.). *Sistemas vegetales y fauna en medios litorales: Avances en sus características, dinámica y criterios para la conservación*, pp. 189–192. Cámara Artigas, R., Beatriz Rodríguez Pérez, B., Juan Luis Muriel Gómez, J.L. Sevilla, España.
- Díaz-Delgado, R., Bustamante, J., Aragonés, D., Afán, I. 2014b. Reconstrucción histórica y tendencias del hidropereodo de las marismas de Doñana. En: Janss, G.F.E., Astasio, R., Vilà, M. (eds.), *Jornadas de Investigación sobre la Conservación de Doñana*, pp. 47, EBD-CSIC, Sevilla, España. Disponible en http://libros.csic.es/product_info.php?products_id=749
- Díaz-Delgado, R., Aragonés, D., Afán, I., Bustamante, J. 2015. A synoptic turbidity index for the Guadalquivir River with Landsat TM and ETM+ images: the turboperiod. En: Sobrino, J.A. (ed.). *Fourth Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, pp. 195–198. Universitat de València. Publicacions de la Universitat de València, Torrent, Valencia, España.
- Dick, J., Al-Assaf, A., Andrews, C., Díaz-Delgado, R., Groner, E., Halada, L., et al. 2014. Ecosystem Services: A Rapid Assessment Method Tested at 35 Sites of the LTER-Europe Network. *Ekologia* 33(3):217–231.
- EEA 2005. *The European Environment — State and Outlook 2005*. European Environment, Copenhagen, Dinamarca.
- Equipo de Seguimiento de Doñana. ICTS – Reserva Biológica de Doñana (EBD-CSIC). 2014. *Memoria del año hidrometeorológico 2013-2014. Programa de Seguimiento de Procesos y Recursos Naturales en el Espacio Natural Doñana*. pp. 120. Informe técnico, Dirección General de Espacios Naturales y Participación Ciudadana. Junta de Andalucía – Estación Biológica de Doñana (CSIC), Sevilla, España.
- Espinar, J.L., Díaz-Delgado, R., Bravo-Utrera, M.A., Vilà, M. 2015. Linking *Azolla filiculoides* invasion to increased winter temperatures in the Doñana marshland (SW Spain). *Aquatic Invasions* 10(1):17–24.
- Fahey, T.J., Templer, P.H., Anderson, B.T., Battles, J.J., Campbell, J.L., Driscoll, C.T., et al. 2015. The promise and peril of intensive-site-based ecological research: insights from the Hubbard Brook ecosystem study. *Ecology* 96(4):885–901.
- Frenzel, M., Baesler, C., Bastianini, M., Campanaro, A., Mateucci, G., Stoll, S. 2013. *Manual of harmonised methods for environmental indicators across different ecosystems*, pp. 395. Project Report, LIFE Environment Project, Halle, Alemania.
- Frisch, D., Arechederra, A., Green, A.J. 2009. Recolonisation potential of zooplankton propagule banks in natural and agriculturally modified sections of a semiarid temporary stream (Doñana, Southwest Spain). *Hydrobiologia* 624(1):115–123.
- García, C., Moracho, E., Díaz-Delgado, R., Jordano, P. 2014. Long-term expansion of juniper populations in managed landscapes: patterns in space and time. *Journal of Ecology* 102(6):1562–1571.
- Gardiner, N., Díaz-Delgado, R. 2007. Trends in Selected Biomes, Habitats and Ecosystems: Inland Waters. En: Strand, H., Höft, R., Stritholt, J., Miles, L., Horning, N., Fosnight, E. (eds.). *Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators*, pp. 83–102. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada.
- Giménez-Anaya, A., Herrero, J., Rosell, C., Couto, S., García-Serrano, A. 2008. Food habits of wild boars (*Sus Scrofa*) in a mediterranean coastal wetland. *Wetlands* 28(1):197–203.
- Gómez-Rodríguez, C., Bustamante, J., Koponen, S., Díaz-Paniagua, C. 2008. High-resolution remote-sensing data in amphibian studies: identification of breeding sites and contribution to habitat models. *Herpetological Journal* 18:103–113.
- Gómez-Rodríguez, C., Bustamante, J., Díaz-Paniagua, C. 2010. Evidence of Hydroperiod Shortening in a Preserved System of Temporary Ponds. *Remote Sensing* 2(6):1439–1462.
- Gómez-Rodríguez, C., Díaz-Paniagua, C., Bustamante, J. 2011. *Cartografía de lagunas temporales del Parque Nacional de Doñana*. Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla, España.
- Haberl, H. 1997. Human appropriation of net primary production as an environmental indicator: implications for sustainable development. *Ambio* 143–146.
- Haberl, H., Gaube, V., Díaz-Delgado, R., Krauze, K., Neuner, A., Peterseil, J., Plutzer, C., Singh, S.J., Vadineanu, A. 2009. Towards an integrated model of socioeconomic biodiversity drivers, pressures and impacts. A feasibility study based on three European long-term socio-ecological research platforms. *Ecological Economics* 68(6):1797–1812.
- Haberl, H., Winiwarter, V., Andersson, K., Ayres, R.U., Boone, C., Castillo, A. et al. 2006. From LTER to LTSE: Conceptualizing the socioeconomic dimension of long-term socioecological research. *Ecology and society* 11(2):13.
- Hendrix, P. F., Parmelee, R.W., Crossley Jr. D.A., Coleman, D.C., Odum, E.P., Groffman, P.M. 1986. Detritus Food Webs in Conventional and No-Tillage Agroecosystems. *BioScience* 36(6):374–380.
- Holechek, J.L. 1988. An Approach for Setting the Stocking Rate. *Rangelands* 10(1):10–14.
- Jiménez, M. 2011. *Cartografía de especies de matorral de la Reserva Biológica de Doñana mediante el sistema hiperspectral aeroportado INTA-AHS. implicaciones en el estudio y seguimiento del matorral de Doñana*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Cantoblanco, Madrid, España.

- Jiménez, M., Díaz-Delgado, R., Soriguer, R., Fernández-Renau, A., Prado, E., Gutiérrez, O. 2005. Aproximación de las imágenes hiperespectrales AHS a la cartografía de abundancia de matorral. *Revista de Teledetección* (24):95–100.
- Jiménez, M., Pou, A., Díaz-Delgado, R. 2011. Cartografía de especies de matorral de la Reserva Biológica de Doñana mediante el sistema hiperespectral aeroportado INTA-AHS. Implicaciones en el estudio y seguimiento del matorral de Doñana. *Revista de Teledetección* (36):98–102.
- Jolley, D.B., Ditchkoff, S.S., Sparklin, B.D., Hanson, L.B., Mitchell, M.S., Grand, J.B. 2010. Estimate of herpetofauna depredation by a population of wild pigs. *Journal of Mammalogy* 91(2):519–524.
- Kloskowsky, J., Green, A., Polak, M., Bustamante, J., Krogulec, J. 2009. Complementary use of natural and artificial wetlands by waterbirds wintering in Doñana, south-west Spain. *Aquatic Conservation* 19(7):815–826.
- Lindenmayer, D.B., Burns, E.L., Tennant, P., Dickman, C.R., Green, P.T., Keith, D.A., et al. 2015. Contemplating the future: Acting now on long-term monitoring to answer 2050's questions. *Austral Ecology* 40(3):213–224.
- Lloret, F., Granzow-de la Cerda, I. 2013. Plant competition and facilitation after extreme drought episodes in Mediterranean shrubland: does damage to vegetation cover trigger replacement by juniper woodland? *Journal of Vegetation Science* 24(6):1020–1032.
- Lloret, F., Saura-Mas, S., Granzow-de la Cerda, I., del Cacho, M., Curiel Yuste, J., Mattana, S., et al. 2014. Respuesta del matorral de la Reserva Biológica de Doñana a episodios climáticos extremos de sequía invernal. En: Janss, G.F.E., Astasio, R. Vilà, M. (eds.). *Jornadas de investigación sobre la conservación de Doñana. Sevilla, 6-7 febrero 2014. Libro de resúmenes*, pp.28. Estación Biológica de Doñana, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla, España.
- Maass, M., Díaz-Delgado, R., Balvanera, P., Castillo, A., Martínez-Yrizar, A. 2010. Redes de Investigación Ecológica y Socio-Ecológica a Largo Plazo (LTER y LTSE) en Iberoamérica: Los casos de México y España. *Revista chilena de historia natural* 83(1):171–184.
- Magurran, A.E., Baillie, S.R., Buckland, S.T., Dick, J.M., Elston, D.A., Scott, E.M., Smith, R.I., Somerfield, P.J., Watt, A.D. 2010. Long-term datasets in biodiversity research and monitoring: assessing change in ecological communities through time. *Trends in Ecology and Evolution* 25(10):574–582.
- Márquez-Ferrando, R., Figuerola, J., Hooijmeijer, J.C.E.W., Piersma, T. 2014. Recently created man-made habitats in Doñana provide alternative wintering space for the threatened Continental European black-tailed godwit population. *Biological Conservation* 171:127–135.
- Mirtl, M., Krauze, K. 2007. Developing a new Strategy for Environmental Research and Monitoring: The European Long-Term Ecological Research Network's (LTER Europe) role and perspective. En: *Nature Conservation management: From idea to practical results*, pp. 36–52. Lublin. ALTERNet, Lublin–Łódź–Helsinki–Aarhus.
- Mirtl, M., Orenstein, D.E., Wildenberg, M., Peterseil, J., Frenzel, M. 2013. *Development of LTSE Platforms in LTER-Europe: Challenges and Experiences in Implementing Place-Based Long-Term Socio-ecological Research in Selected Regions*. Springer Netherlands. Países Bajos.
- Navarrete, S.A., Gelcich, S., Castilla, J.C. 2010. Long-term monitoring of coastal ecosystems at Las Cruces, Chile: Defining baselines to build ecological literacy in a world of change. *Revista Chilena De Historia Natural* 83(1):143–157.
- Pavlov, P.M., Edwards, E.C. 1995. Feral pig ecology in Cape Tribulation National Park, North Queensland, Australia. *Journal of Mountain Ecology* 3: 148–151.
- Pérez-Ramos, I.M., Díaz-Delgado, R., de la Riva, E.G., Villar Montero, R., Lloret, F., Marañón, T. 2014. Cambios temporales en la estructura de las comunidades de matorral de la Reserva Biológica de Doñana: diversidad funcional y resiliencia. En: Janss, G.F.E., Astasio, R. Vilà, M. (eds.). *Jornadas de investigación sobre la conservación de Doñana. Sevilla, 6-7 febrero 2014. Libro de resúmenes*, pp.28. Estación Biológica de Doñana, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla, España.
- Ramo, C., Aguilera, E., Figuerola, J., Máñez, M., Green, A.J. 2013. Long-term population trends of colonial wading birds breeding in Doñana (SW Spain) in relation to environmental and anthropogenic factors. *Ardeola* 60(2):305–326.
- Rendón, M.A., Green, A.J., Aguilera, E., Almaraz, P. 2008. Status, distribution and long-term changes in the waterbird community wintering in Doñana, south-west Spain. *Biological Conservation* 141(5):1371–1388.
- Rodríguez-Gonzalez, P., Díaz-Delgado, R., Albuquerque, A. 2014. Preservación de los bosques húmedos de Doñana: proyecto de seguimiento integral de la vegetación higrófila y su interacción con los cambios ambientales y antrópicos. En: Janss, G.F.E., Astasio, R. Vilà, M. (eds.). *Jornadas de investigación sobre la conservación de Doñana. Sevilla, 6-7 febrero 2014. Libro de resúmenes*, pp.36. Estación Biológica de Doñana, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla, España.
- Santamaría, L., Green, A., Díaz-Delgado, R., Bravo, M.A., Castellanos, E. 2006. Caracoles: a new laboratory for science and wetland restoration. En: García Novo, F., Marín Cabrera, C. (eds.). *Doñana, water and biosphere*, pp. 313–315. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España.
- Sergio, F., Blas, J., López, L., Tanfena, A., Díaz-Delgado, R., Donázar, J.A., Hiraldo, F. 2011. Coping with uncertainty: breeding adjustments to an unpredictable environment in an opportunistic raptor. *Oecologia* 166(1):79–90.
- Serrano-Ortiz, P., Kowalski, A.S., Alados-Arboledas, L. 2006. La técnica eddy covariance como herramienta para la determinación de la capacidad de asimilación de CO₂ de un ecosistema. *Acta Granatense* 4/5:95–106.
- Siemann, E., Carrillo, J.A., Gabler, C.A., Zipp, R., Rogers, W.E. 2009. Experimental test of the impacts of feral hogs on forest dynamics and processes in the southeastern US. *Forest ecology and management* 258(5):546–553.
- Singh, S.J., Haberl, H., Chertow, M., Mirtl, M., Schmid, M. 2012. *Long Term Socio-Ecological Research: Studies in Society-Nature Interactions Across Spatial and Temporal Scales*. Springer Science and Business Media.
- Soriguer, R.C. 1983. Consideraciones sobre el efecto de los conejos y los grandes herbívoros en los pastizales de la Vera de Doñana. *Doñana Acta Vertebrata* 10(1):155–168.
- Soriguer, R.C., Sierra, A.R., Nevado, L.D. 2001. *Análisis de la incidencia de los grandes herbívoros en la marisma y vera del Parque Nacional de Doñana*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid, España.
- Stoll, S., Frenzel, M., Burkhard, B., Adamescu, M., Augustaitis, A., Baeßler, C., Bonet, F.J. et al. 2015. Assessment of ecosystem integrity and service gradients across Europe using the LTER Europe network. *Ecological Modelling* 295:75–87.
- Toral, G.M., Aragonés, D., Bustamante, J., Figuerola, J. 2011. Using Landsat images to map habitat availability for waterbirds in rice fields. *Ibis* 153(4):684–694.
- Villar, R., Martínez, F., Martín, A., Merino, J. 1997. Biomass of the Juniperus Phoenicea forest in the sand dune ecosystems of the Doñana National Park. En: García Novo, F., Crawford, R.M.M., Díaz Barradas, M.C. (eds.). *The Ecology and Conservation of European Dunes*, pp. 135–141. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Vitousek, P.M., Ehrlich, P.R., Ehrlich, A.H., Matson, P.A. 1986. Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience* 368–373.
- Webber, B.L., Norton, B.A., Woodrow, I.E. 2010. Disturbance affects spatial patterning and stand structure of a tropical rainforest tree. *Austral Ecology* 35(4):423–434.