



Lagunas peridunares. Foto: Héctor Garrido. EBD/CSIC.

# Tendencias y causas de los cambios a escala secular en las lagunas de Doñana

Arturo Sousa<sup>1</sup>, Julia Morales<sup>1</sup>, Mark Vetter<sup>2</sup> y Leoncio García-Barrón<sup>3</sup>

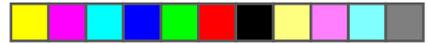
## INTRODUCCIÓN

La visión antropocéntrica de la realidad hace que, frecuentemente, interpretemos los ecosistemas como algo estático, al no apreciar en ellos cambios perceptibles a lo largo de nuestra vida. A esto se añade que la disponibilidad de tecnologías asociadas a los sensores remotos es relativamente reciente, solo a partir de la década de los 50 del S. XX (Bromberg y Bertness, 2005). Por ello, en los estudios más recientes, se tiende a combinar los datos procedentes de fotografías aéreas e imágenes de satélite con la información derivada de mapas históricos para reconstruir los cambios en diferentes ecosistemas del planeta (Cousins, 2001; Petit y Lambin, 2002; Börjeson, 2009; Stein y col., 2010; Sousa y col., 2013).

Nuestro objetivo, en este apartado, es integrar los cambios que han tenido lugar en las lagunas del antiguo Coto de Doñana con los factores principales que han causado dichos cambios durante los últimos 400 años. La comprensión de las alteraciones históricas de los hábitats naturales puede ayudar a los gestores a diseñar la manera de revertir décadas de impactos derivados de la acción humana y restaurar un hábitat a su estado original (Bromberg y Bertness, 2005). Como señalan García-Novo y col. (2007) la historia ecológica trata de iluminar el pasado desde la documentación y la evidencia actual, lo que no evita que queden áreas o procesos en sombra o insuficientemente conocidos. Buena parte de la información documental de este apartado –especialmente la ligada a los cambios en los usos del suelo- se basa en la revisión de los archivos de la Casa Ducal de

1. Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla.
2. Faculty of Information Management and Media, Karlsruhe University of Applied Sciences.
3. Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla.





Medina Sidonia recogida en la tesis doctoral de Granados (1987) y en toda una línea posterior de publicaciones que se realizaron, a partir de ella, por autores del Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla. Esta información documental debe ser completada con otras fuentes independientes –como la cartografía histórica o el microrrelieve- para reconstruir progresivamente, desde la situación actual, la evolución de los complejos lagunares de Doñana hacia atrás en el tiempo.

Todavía sigue existiendo una desigual cobertura bibliográfica de los temas relacionados con Doñana (Castroviejo, 1993). Sin duda, las tendencias de cambio climático (Custodio y col., 2009) y los cambios a escala secular son dos de los aspectos menos atendidos. Este apartado no es el lugar adecuado para realizar una revisión exhaustiva de ellos, por lo que vamos a obviar aspectos claves más vinculados a los ecosistemas terrestres (como la cobertura de los alcornos, los cambios en la composición del matorral, los cambios en la marisma, etc.). La escala temporal elegida para este estudio (Figura 1) explica que no profundicemos en otras fuentes de información paleobiológicas (Stevenson, 1985; Stevenson y Harrison, 1992) más propias de un análisis a escala del Holoceno o de todo el Cuaternario. Una revisión del material bibliográfico generado acerca del Parque Nacional de Doñana hasta el S. XX se puede consultar en Prieto y col. (1998) o García-Novo y col. (2007).

#### Fuentes de datos para estudiar las variaciones en las lagunas a escala secular

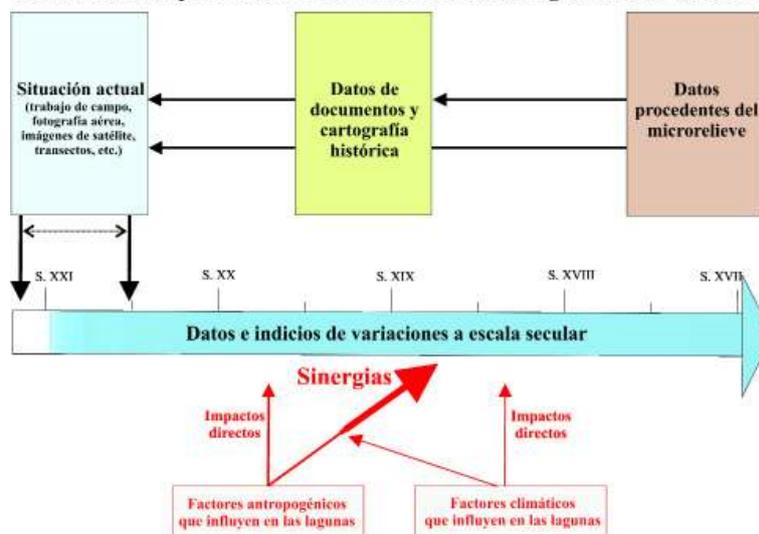
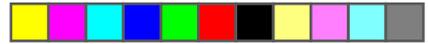


Figura 1. Esquema de la metodología empleada para estudiar los cambios históricos seculares en el actual Parque Nacional de Doñana (modificada a partir de Sousa, 2004).

Las fuentes de información sobre las lagunas de Doñana nos aportan indicios de cómo han ido cambiando a escala secular tomando como referencia la situación actual (Figura 1). Además se van a analizar los principales impactos y cómo su solapamiento temporal puede tener un efecto multiplicador. Esta metodología toma en consideración que los humedales -a escala geológica- tienden a desaparecer en un proceso evolutivo de colmatación (Pérez Gago, 2001). Sin embargo, esta evolución puede estar influida o acelerada exponencialmente por impactos antropogénicos (como cambios en los usos del suelo que aceleren la erosión o el transporte de sedimentos hacia





las zonas topográficamente más deprimidas) e impactos de carácter climático (como cambios en la agresividad o en la distribución intra o interanual de la precipitación). Además estos efectos, originalmente independientes, se pueden solapar temporalmente y multiplicar sus impactos de forma sinérgica (por ejemplo un desmonte de la cobertura del suelo durante épocas de sequía). Todo ello ha conducido a la regresión de la superficie de gran parte de los humedales españoles especialmente durante el S. XX (Sousa y col., 2014).

Por lo tanto nuestro objetivo es detectar si existen indicios de variaciones en las lagunas del Coto de Doñana durante los últimos 400 años, además de analizar si la temporalidad es una característica que también ha definido este conjunto de lagunas en el pasado.

## INDICIOS DE CAMBIOS A ESCALA SECULAR EN LAS LAGUNAS DEL COTO DE DOÑANA

El análisis de los indicios de cambios históricos en las lagunas de Doñana se enfrenta principalmente con dos dificultades metodológicas:

1. Las propias características fisiográficas del territorio de Doñana (Sousa y col., 2013) hacen que exista relativamente poca información sobre las lagunas, respecto a otras áreas más pobladas o productivas del territorio español. Además, esta información no es homogénea ni espacial ni temporalmente.

2. La mayor parte de la información existente está asociada a las lagunas de mayor tamaño y accesibilidad. Estas dos limitaciones contribuyen a que gran parte de la información esté sesgada hacia las lagunas peridunares del actual Parque Nacional.

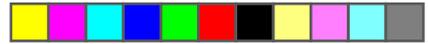
Según Granados (1987) las noticias sobre el Coto de Doñana, en la época anterior a la Conquista cristiana de Al-Andalus, son muy escasas, limitándose a la importancia de los pastos marismos para el ganado equino árabe, aprovechamiento del matorral para leña y otras actividades recolectoras (como el aprovechamiento del palmito o la cera y miel). En 1262 la zona fue reconquistada por Alfonso X, estableciendo un cazadero real en las Rocinas y una ermita en las cercanías de la Laguna de Santa Olalla. Entre los primeros datos históricos disponibles destaca la información que proporciona el Libro de La Montería de Alfonso XI (S. XIV) y su posterior ampliación por Argote de Molina (S. XVI). Este libro señala –además de aspectos cinegéticos- la presencia de muchos humedales (tremedales y sotos) y cierta temporalidad en su encharcamiento:

*“En tierra de Niebla hay vna tierra, quel dizen las Rocinas, e es llana, e es toda Sotos, e ha fiempe hy Puercos” [...] “e no fe puede correr esta tierra fi non en inuierno muy fecho, que non fea llovioufo, e la razón, porque ha muchos Tremedales en inuierno llovioufo, e en verano no es de correr, porque es muy feca e muy dolentrofa. Et feñaladamente fon los mejores Sotos de correr cabo de*



Figura 2. En el S. XVII el área de Doñana aparece como un inmenso cúmulo de arenas ignotas con pocos hitos y escasa toponimia. Sólo destacan las acumulaciones dunares costeras probablemente porque son reconocibles en la navegación de cabotaje. Detalle de la cartografía de (A) Jodocus Hondius (1606), (B) Pedro de Texeira (1634), (C) Willem Blaeu (1640-1650) y (D) Doménico de Rossi (1696).





*vn eglefia, q dizen Sata María de las Rocinas*" (sic; Alfonso XI, 1311-1350). Posteriormente, en la ampliación de este libro de La Montería, Argote de Molina (1582), reincide en la misma idea cuando señala "En la Cofta del Mar por dode Guadalquivir entra en el Oceano fon las Rocinas Mote del Duque de Medina Sidonia, de efpcio de diez y fiete leguas, abundantissimo de mucha caça de Venados Jaualies, y Liebres e en los Rafos, y de aues de Bolateria, q fon sinnumero las que criasne en aquellas laguna, y Marifma" (sic).

La cartografía histórica del S. XVII tampoco aporta mucha más información sobre la zona, al menos, desde el punto de vista de los humedales. De hecho –como se puede ver en la Figura 2, el territorio del actual Espacio Protegido de Doñana se representaba como un gran cúmulo de arenas ("Arenas Gordas"), como describe Pedro de Texeira (1634).

El aprovechamiento histórico de la caza en Doñana atrajo la visita de los reyes de la Casa de Habsburgo (Felipe IV) y posteriormente a diferentes reyes de la Casa de los Borbones (entre ellos Felipe V). Estas visitas suponen una fuente de información valiosa, gracias a las crónicas de los cortesanos que acompañaron a los monarcas en sus viajes. En ellas, se ensalzan sus hazañas cinegéticas lo que implicaba que a veces se describiera también el paisaje. Este es el caso de la crónica de Pedro de Espinosa (1624) que narra como Felipe IV cazaba patos, a finales del invierno, en la denominada "laguna de Sancta Olalla" con una falúa española del S. XVII. Una idea del tamaño y calado de este tipo de embarcaciones se puede deducir del hecho de que, durante la cacería, estuvo ocupada por 7 miembros de la nobleza (incluido el rey), "más los que bogaban":

"Después boluiò à la laguna de Sancta Olalla, donde tenia el Dvque preuenida vna falúa y tres barquetas" (sic). [...] "Los que bogauan en la falúa yvan al vso de marineros, jaquetas y calçones anchos verdes, jubòn, medias y ligas del mesmo color. Aqui se embarcò su Magestad, el Conde de Oliuarez y el Conde de Niebla, que la gouernaua, y dos ballesteros que cuydauan de las escopetas de su Magestad, y Alteza, y otros dos tiradores del Dvque, quedandolos demàs con los monteros de à pie, en las veras de la laguna, leuantando la caça; y todos los monteros de à cauallo con lanças à las espaldas della, para descubrir y guardar la mar" (sic) (Pedro de Espinosa, 1624). Más tarde, en 1729, Felipe V también pescaría durante 5 días en Santa Olalla (Duque, 1977; Granados, 1993).

No parece tampoco casualidad que, hasta finales del S. XIX, sea muy difícil encontrar en la cartografía referencias al resto de lagunas peridunares (Sousa y García-Murillo, 2005). Probablemente esta gran cubeta lagunar que Pedro de Espinosa denominaba "Sancta Olalla" a principios del S. XVIII, incluía a gran parte de lo que actualmente conocemos como las lagunas peridunares de Doñana (Taraje, Zahillo, Dulce, Santa Olalla, tal vez Charco del Toro...). Además, esta gran cubeta, incluiría una amplia extensión que durante el S. XVIII fue colmatada por el avance de las arenas en el borde más meridional de las lagunas. En este sentido la cartografía histórica del S. XVIII nos ilustra cómo podrían haber percibido el sistema de lagunas peridunares Felipe IV y sus cortesanos, durante su visita a principios del S. XVII (Figura 3).

Puesto que la información histórica disponible sobre las lagunas del actual Parque Nacional de Doñana se refiere sobre todo en las lagunas peridunares (probablemente por su mayor extensión, accesibilidad y proximidad al litoral), nos vamos a centrar inicialmente en la evolución secular de este conjunto lagunar. Posteriormente abordaremos los datos disponibles acerca de otras lagunas del actual Parque Nacional.

El hecho de que la gran cubeta lagunar "Sancta Olalla" ocupara una mayor superficie que en la actualidad, no implica necesariamente que la lámina de agua fuera constante a lo largo del tiempo. No tenemos información suficientemente detallada para alcanzar una conclusión taxativa al respecto. Sin embargo, los datos históricos hacen pensar que el carácter de fluctuación de la lámina de agua, sensu lato, era ya entonces uno de los rasgos definitorios de las lagunas de Doñana. Buena prueba de ello es que en algunos mapas del S. XVIII aparece el conjunto de las lagunas peridu-

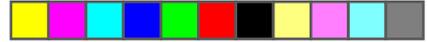


Figura 3. Detalle de dos mapas del S. XVIII en los que aparece el conjunto de las lagunas peridunares como una única gran laguna. (A) Félix de Alarcón (1768) y (B) Anónimo (S. XVIIIa).

nares como dos grandes cubetas (denominadas Santa Olalla y Charco del Toro). La extensión de ambas era muy superior a las cubetas lagunares que actualmente ocupan estos nombres. Esto se puede apreciar en la Figura 4.

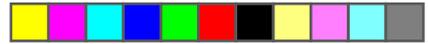
Estos cambios en la extensión de las cubetas lagunares hay que interpretarlos en el contexto de un período climático donde se alternan fases secas y húmedas a lo largo del S. XVIII. Sobre este marco de variación climática natural se irán superponiendo diferentes impactos antropogénicos que también han condicionado históricamente la evolución de las lagunas del Coto de Doñana.

Asociado a ambos tipos de impactos (climáticos y antropogénicos), en el S. XVIII se reactiva el avance de las dunas costeras de Doñana. La vanguardia de estas dunas llega al gran complejo lagunar de “*Sancta Olalla*”, invadiéndolo y colmatando parcialmente. En este sentido es muy significativo el legajo localizado por Granados (1987) fechado en 1769: “*Inmenso cúmulo de arenas que corren por el frente del mar desde la Torre de San Jacinto, al opósito de esta ciudad (Sánlucar de Barrameda), hasta la del Asperillo, llamada por esta razón de los navegantes, la costa de Arenas Gordas. Estas se introducen tierra adentro por partes media legua y por otras más [...] cuyo terreno es también arenoso con una o más varas de profundidad hasta tocar en el terreno firme, de la que incesantemente están llevando los vientos, de forma que al paso que han llevado de medio siglo a esta parte, tragando alamedas enteras y más de la mitad de la laguna de Santa Olalla, se debe aprehender que dentro de otro medio siglo no haya en todo el Coto donde poner un pie con firmeza*”



Figura 4. Detalle de dos mapas del S. XVIII donde la gran cubeta original denominada “*Sancta Olalla*” aparece ahora en grandes cubetas muy próximas. Detalle de la cartografía de (A) Anónimo (S. XVIIIb) y (B) Quintana y Ceballos (1748-1752). Léase el topónimo que le asigna el autor en Anónimo S. XVIIIb: “*Lagunas de Santa Olaya*”.





[...]. Al menos parte de la vegetación freatófítica asociada a este complejo lagunar de “*Santa Olalla*” sobrevivió al avance de la vanguardia de las dunas litorales durante el S. XVIII. De hecho en 1794 Antonio Ponz describe la Pajarera de Santa Olalla y sus aves, destacando no solo la existencia de ésta, sino que estaba muy poblada por álamos.

En algunos mapas del S. XIX y principios del S. XX (Carrasco y Padilla, 1892; Noriega y Cobo del Guzmán, 1897-1900; Cuerpo del Estado Mayor, 1905), sigue apareciendo una única gran cubeta lagunar. Esto se puede deber a fluctuaciones asociadas a períodos de mayor precipitación aunque un análisis pormenorizado de la cartografía histórica nos hace pensar que, lo más probable, es que gran parte de estos autores tomaron como referencia la delineación de mapas más antiguos.

Durante el S. XIX se mantiene esta división en dos grandes cubetas lagunares. La de mayor tamaño aparece bajo el hidrónimo “Santa Olalla” y la más pequeña “Charco del Toro”. Un buen reflejo de ello es la cartografía de Francisco Coello (1869) considerada como la primera de España con un alto grado de fiabilidad técnica y científica (Instituto de Cartografía de Andalucía, 1998). La observación detallada de la delineación de Coello (1869) da a entender que, además de cubetas permanentes, entorno a ellas hay también áreas que presentan un cierto grado de fluctuación en el encharcamiento (Figura 5). Si realmente este mapa histórico refleja verazmente la situación de las lagunas a finales del S. XIX (Figura 5a), debería quedar un rastro de estas dos grandes cubetas originales (que se denominaban “Charco del Toro” y “S<sup>ta</sup>. Olalla o la Pajarera”) en el análisis del microrrelieve local, como se puede apreciar en la Figura 5b.

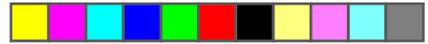


Figura 5. (A) Detalle del mapa de Coello (1869) dónde se aprecia la situación de la vanguardia de las dunas activas a punto de colmar el borde meridional de las dos grandes cubetas originales. (B) Reconstrucción de estos dos grandes complejos lagunares a través del microrrelieve.

A partir de las Figura 5a y 5b se puede intuir la dirección y el sentido del frente de avance de las dunas activas sobre las dos grandes cubetas lagunares (marcado con flechas rojas). En esta figura aparecen también los caminos que pasaban a ambos lados de las lagunas (punteados en trazos discontinuos). Podemos comparar la situación de estos caminos con la Figura 3b fechada al menos 100 años antes. En ésta última se puede apreciar cómo estos caminos rodean a una única gran cubeta lagunar (no dos como ocurre en el mapa fechado en 1869).

Por tanto, es muy probable que a lo largo de los siglos XVIII-XIX, como consecuencia de este avance de la vanguardia de las dunas más activas, la gran cubeta original quedara separada en dos grandes cubetas. A principios del XX la disminución de la disponibilidad hídrica y la Dunización Secundaria conduciría a la situación de las cubetas individualizadas y alineadas como un rosario (de manera similar a como las conocemos hoy día). En este sentido la información que aporta un arqueólogo anglo-francés, Georges Bonsor, es fundamental para entender estos cambios. Bonsor





-que visita estas lagunas en 1920- no solo las describe ya como un rosario de lagunas peridunares individualizadas sino que también elabora un croquis detallado de ellas. Estos datos son aún más relevantes ya que, dicha visita, la realiza acompañado de la cartografía de Coello (1869). En esta descripción de las lagunas, desde el sureste al noroeste, se destaca también la presencia -todavía en esta fecha- de las Pajareras (lo cual indicaría la presencia de restos del antiguo bosque freático de la laguna):

*A un kilómetro al Sur del camino de Matalascañas se encuentra la laguna de La Paja, y a ésta sigue el gran lago de Santa Olalla, llamado también La Pajarrera por la multitud de aves acuáticas que se ven allí todo el año [...]*. Posteriormente continúa: *“La forma alargada de este lago, en unos dos kilómetros de Este a Oeste, con una anchura media de 500 metros [...]”*. *“Al Oeste de Santa Olalla se encuentra la laguna del Taraje, y continuando hacia el Oeste, con intervalos de medio kilómetro próximamente, siguen otras lagunas: La Dulce, El Saillo y el Charco del toro; este último, bastante profundo, está situado a dos kilómetros al Este del sitio de la costa que he llamado La Entrevista”* (sic) (Bonsor, 1922).

Por tanto, describe las lagunas peridunares de forma individual (en lugar de las dos grandes cubetas lagunares que aparecían hasta finales del S. XIX), pero el tamaño de Santa Olalla y su forma alargada es muy superior al actual. Algo parecido puede decirse del Charco del Toro. Esto coincide con otras referencias de las lagunas que las describen también con un tamaño superior a las actuales desde mediados del S. XIX (Madoz, 1848) hasta mediados del S. XX (Pardo, 1948).

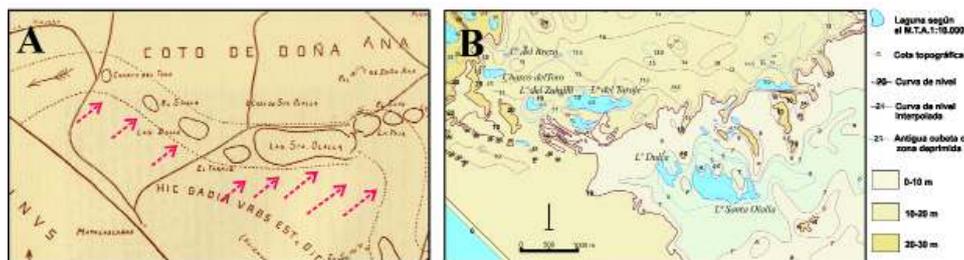
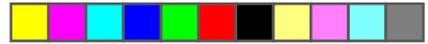


Figura 6. (A) Detalle del croquis de Bonsor (1921) donde aparecen por primera vez todas las lagunas peridunares en una configuración similar a la actual. (B) Detalle del microrrelieve entorno a las cubetas lagunares actuales.

Otro aspecto significativo es que Bonsor (1922) delinea dos líneas paralelas de puntos (Figura 6a) entre las lagunas peridunares que *“...estaba cubierta de juncos en la época de mi visita, en verano; pero en invierno, estos terrenos desaparecen totalmente bajo el agua”*. Por tanto, pone de manifiesto no solo un mayor tamaño de las lagunas que en la actualidad sino que, en consonancia con los datos de cartografía histórica y de las fuentes documentales, durante los períodos más húmedos estas lagunas peridunares estarían conectadas formando uno o dos grandes complejos lagunares. Además la fluctuación intra e interanual de la lámina de agua sigue siendo un rasgo característico de estas lagunas costeras. Podemos comparar el croquis de Bonsor (1921) (Figura 6a) con el mapa de la situación actual (Figura 6b), incluso se aprecia el parecido con el mapa de Coello (1869) en la Figura 5a. De esta comparación se deduce que la parte más meridional de la Laguna de Santa Olalla en Coello (1869) ha sido recortada por el avance dunar en Bonsor (1921), como indicamos con flechas rojas en la Figura 6a. Es precisamente en esta zona donde se ubicaba la que Coello (1869) denominaba como *“Laguna Dulce”*, y que probablemente desapareció bajo el avance dunar.

La localización fronteriza de estas lagunas entre diferentes episodios eólicos (están bordeadas por el límite más septentrional de las dunas semiestabilizadas), tiene una gran relevancia en la es-





tructura de la vegetación perilagunar, en la evolución de las cubetas y también en su alimentación. El frente de avance dunar está adosado a la línea que forman estas lagunas entre la Laguna del Brezo y la marisma habiéndolas desplazado hacia el N.E (Allier y col., 1974). Por tanto, sobremonta a las dunas semiestabilizadas y tiende a avanzar sobre las cubetas de las lagunas peridunares. A mediados del siglo XX Pardo (1948), en su *Catálogo de los Lagos de España*, se refiere también a las lagunas del Coto de Doñana, concretamente a El Zopetón (sic), Espajosa, Ganga, Mata de los Domínguez, Mogeja, Pañuelas (sic), Santa Olalla, Taraje y Charco del Toro. Entre ellas destaca Santa Olalla por su extensión, y en menor medida la Laguna del Taraje y Charco del Toro: “De variada y variable extensión, muy influida por el régimen anual de lluvias; la Laguna de Santa Olalla, la más importante, es de aguas permanentes, como la de El Zopetón; las del Taraje y Charco del Toro también suelen conservarla siempre, si bien llegan a desecarse en los años de excepcional sequía”.

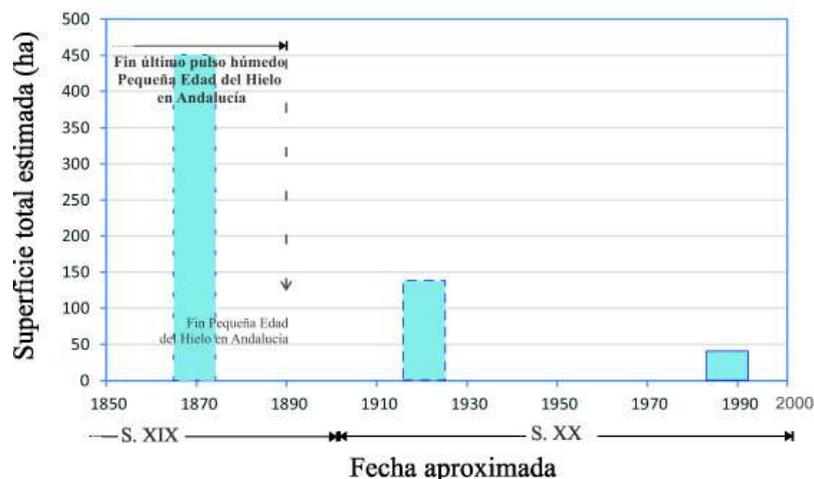


Figura 7. Estimación del área total que pudieron alcanzar las lagunas peridunares en comparación con su situación a finales del S. XX. El trazo discontinuo en el diagrama de barras indica el grado de imprecisión de la estimación.

En esta cita sobresale -por un lado- la importancia en cuanto a extensión de la Laguna de Santa Olalla y su carácter permanente. Por otro lado, también se refiere a las lagunas del Taraje y Charco del Toro como permanentes, salvo los años excepcionalmente secos. Por tanto presenta a estas lagunas como esencialmente permanentes, algo que contrasta -desgraciadamente- con la situación actual. Concretamente respecto al Charco del Toro -actualmente seca- señala: “[...] Pequeña laguna de 150 m de longitud máxima por unos 100 m de anchura también máxima; de aguas permanentes, secándose tan solo en años de excepcional estiaje” (Pardo, 1948). En la Figura 7 se representa una estimación de los cambios en la superficie de las lagunas peridunares desde la segunda mitad del S. XIX. Estos datos están calculados a partir de las isolinéas del microrrelieve, obtenidas por la interpolación de más de 300 cotas topográficas y su interpretación tomando como referencia temporal la cartografía y documentación histórica. Más detalle sobre la metodología se puede consultar en Sousa (2004) y Sousa y García-Murillo (2005).

La cartografía histórica no aporta demasiada información respecto al resto de lagunas del Coto de Doñana. Lo que si parece claro es que globalmente la superficie encharcada era mayor que la actual. Si se analiza con detalle la cartografía de finales del S. XIX, se puede apreciar que





Figura 8. En la cartografía de finales del S. XIX los pequeños afluentes que drenaban por la margen derecha del Arroyo de La Rocina presentaban un mayor desarrollo y se entremezclaban con áreas encharcadas. En la imagen se puede apreciar detalles de la cartografía de (A) Coello (1869), (B) Vogel (1879) y (C) Carrasco y Padilla (1892).

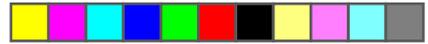
la longitud de los afluentes de la margen derecha de la Rocina era superior a la actual (ver flechas azules en la Figura 8a). En el sector oeste del Parque Natural de Doñana, los arroyos costeros y los afluentes de la margen derecha del Arroyo de La Rocina también tuvieron un retroceso importante asociado a cambios climáticos, la Dunización Secundaria y los usos del suelo (Sousa, 2004; Sousa y col., 2015). Es probable que este mismo proceso, que también afectó al desaparecido Caño o Arroyo de la Higuera (Sousa y García-Murillo, 1998) y a otros arroyos del Algarbe portugués (Devereux, 1982) también hiciera retroceder la extensión del drenaje superficial en el actual Parque Nacional.

La Figura 8 ilustra un mayor desarrollo de las algaidas que drenaban por la margen derecha del Arroyo de La Rocina hasta las marismas del Guadalquivir (Algaida de Bernabé, Caño Guapeiral, Caño de la Casa del Guarda, Caño de la Caquera o el entorno del Martinazo). Tampoco hay demasiada información en la cartografía histórica acerca de las lagunas del Coto de Doñana (si exceptuamos la ya mencionada para las lagunas peridunares). Solo en la cartografía más reciente y detallada (Anónimo, S. XIX; Cuerpo del Estado Mayor, 1905), comienzan a aparecer algunas lagunas delineadas –aunque sin una gran precisión– como *La Mogeá*, *Mata de los Domingos*, *Los Monteruelos*, *La Ganga*, *La Cerrajola* o *La Cencerra* (sic).

Aunque los datos de Pardo (1948), en relación con la lagunas del Coto de Doñana no son concluyentes, sí inducen nuevamente a pensar que algunas lagunas tenían un régimen más constante en la lámina de agua, y también que las dimensiones de las cubetas eran algo mayores que en la actualidad. Veamos algunos ejemplos:

- Laguna Espajosa. “[...] de contorno ovalado, de 100 m de longitud máxima y aguas casi permanentes”. Laguna de Pañuelas. “[...] laguna fluvial, circular, de 100 m de diámetro, con aguas permanentes”. Laguna de la Mata de los Domínguez. “[...] fluvial, de perímetro ovalado, longitud y anchura máximas de 200 y 150 m, respectivamente, con aguas permanentes”. Laguna de la Mogeá: “[...] fluvial, de perímetro redondeado, con diámetro de unos 100 m, aguas temporales”. Además, en muchos casos el análisis del microrrelieve revela la existencia pretérita de antiguas cubetas –de un tamaño mucho mayor que las actuales– que con frecuencia incluyen dentro de su perímetro a lagunas actuales. Este sería el caso la Laguna del Alcornoque Mahón, Contrabandista, Mogeas, o la próxima a las Cañuelas Altas (Sousa, 2004), entre otras. Es posible que en el pasado las lagunas de todo el Manto Eólico Litoral onubense formaran un conjunto continuo (tanto las del actual Parque Natural como las del Parque Nacional (Sousa, 2004). Así aparece reflejado en la cartografía de Gonzalo y Tarín (1887) –las lagunas temporales de Abalarío y las del Coto de Doñana a la altura de la Casa de la Mogeá– o en San Miguel (1913) –las lagunas temporales orientales de Abalarío como el Acebuche, Las Pajas, Las Pozas y El Huerto con las lagunas de Coto de Doñana– nuevamente a la altura de La Mogeá.





## FACTORES ANTROPOGÉNICOS QUE HAN INFLUIDO EN LAS LAGUNAS A ESCALA SECULAR

El impacto de los usos y aprovechamientos del suelo sobre los ecosistemas de Doñana no ha sido constante. Granados (1987, 1993) establece tres factores fundamentales para entender la evolución de la vegetación: presión de herbívoros (ganado y sobre todo caza), carboneo e incendios (Granados y col., 1988). Además de estos factores, ligados fundamentalmente al manejo de los recursos naturales, y por tanto al aprovechamiento por parte del hombre, estos autores recogen también una aridización de las condiciones climáticas. Por ello establecen cinco fases diferentes en la historia ecológica del Coto de Doñana (Granados, 1987 y 1993; Granados y col. 1986 y 1988; Castroviejo, 1993):

1.<sup>a</sup> 1309-1628. Fase cinegética: Debido a la baja fertilidad del suelo, durante muchos siglos la caza fue el uso principal de la zona. Este uso era compatible con actividades como la pesca, la recolección de huevos y sanguijuelas en las lagunas o la explotación de corcho y taninos de alcornoque, así como la quema de carbón a pequeña escala (Merino y col., 1990). El uso ganadero era escaso.

2.<sup>a</sup> 1628-1737. Fase ganadera: Supone una intensa transformación del espacio, debido al aprovechamiento del ganado almonteño especialmente en la zona denominada "Terreno de la Cuestión" (área cuyos derechos de explotación estuvieron en litigio durante siglos). Las vacas, ovejas, cabras y cerdos fueron introducidos en grandes cantidades (probablemente superior a la capacidad de carga de la zona; Merino y col., 1990). Además aumentaron el consumo de leña, los incendios, la quema de carbón, y la destilación de aceites derivados del enebro.

3.<sup>a</sup> 1737-1890. Fase forestal: Comienza con el inicio de las repoblaciones con *Pinus pinea* en 1737 (Granados, 1987), alcanzando a finales del S. XVIII (1775) 400 ha y hasta 3200 ha en 1975. Paralelamente a estos aprovechamientos hay constancia de importantes talas de árboles freatofíticos entre 1543 y 1769, especialmente de *Populus alba* (Castroviejo, 1993). El alcornocal también se redujo desde unos 10.000 pies en 1657 hasta 500 pies en el S. XX (Castroviejo, 1993).

4.<sup>a</sup> 1890-1967. Período de transición: Continúan los trabajos forestales con menor intensidad. Se empieza a vislumbrar el valor ecológico e interés para la conservación de la zona.

5.<sup>a</sup> 1967-Actualidad. Período de Conservación: Se inicia con la creación en 1967 de la Reserva Biológica, y del Parque Nacional de Doñana en 1969, con el consiguiente cambio en el manejo y la gestión de los recursos de la zona.

A lo largo de estas cinco fases los diferentes impactos, derivados de los aprovechamientos del suelo, se van superponiendo con diferente grado de intensidad. Estos impactos, que alteran los ecosistemas originales, se representan en la Figura 9 tomando como referencia los datos de Granados (1987 y 1993), Granados y col. (1986 y 1988), García Novo (1997), García Novo y col. (2007) y Sousa y García-Murillo (2005).

Además del sobrepastoreo, entre las primeras actividades tradicionales que afectaron a los ecosistemas litorales de Doñana, podemos destacar el carboneo sobre enebros y sabinas, junto con la deforestación de las masas forestales vinculada con la pesca y la construcción de barcos de la armada real. Noticia de estos aprovechamientos se encuentran en los cuestionarios que Tomás López y Vargas Machuca (1731-1802) envía a los párrocos de todos los pueblos de España (Segura y De Miguel, 1990; Ruiz, 1999; Sánchez, 1999). En 1785 el párroco de Almonte (Alonso Álvarez de Cardoso) responde afirmando que en la playa de Arenas Gordas hay seis torres vigías que sirven de guía (San Jacinto, Zalabar, Carboneros, La Higuera, Asperillo y la del Oro), separadas entre ellas tres millas. Lo más interesante es que en ellas residen diariamente 2 torreros "para encender a las alboradas las luminarias". Las dos especies más codiciadas para el uso maderero



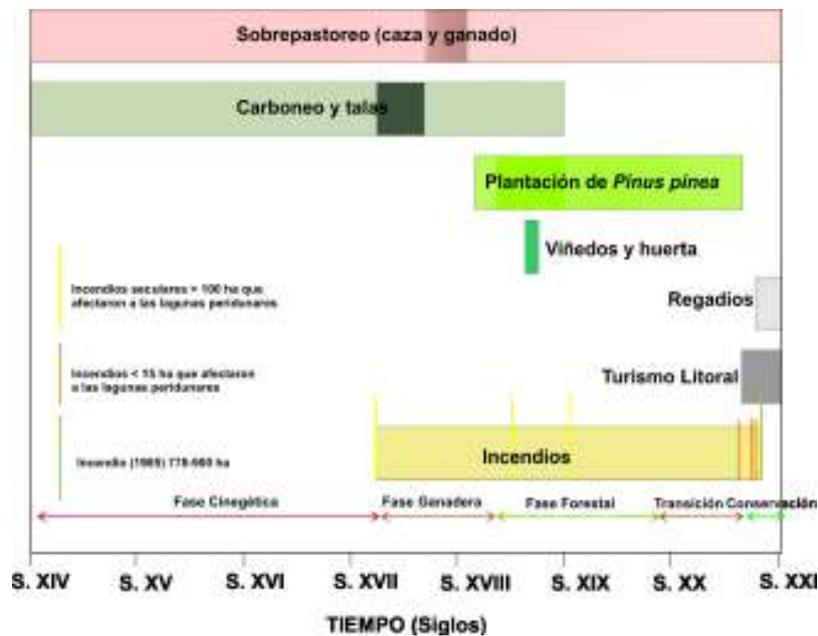
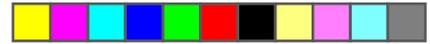


Figura 9. Esquema que recoge las principales actividades antrópicas que han afectado secularmente a los ecosistemas sobre arenas del Coto de Doñana desde el S. XIV hasta el XXI a lo largo de las cinco fases históricas más recientes. Modificado y ampliado a partir de Sousa (2004). Los tonos más intensos, dentro de cada color, indican los períodos de tiempo en el que el aprovechamiento es más intenso en cada caso.

eran el sauce y el álamo. Las varetas de sauce, que se empleaban para construir flejes de los barriles donde se guardaba el pescado salado, podían superar algunos años las 20.000 y procedían de los alrededores de la Laguna de Santa Olalla (García-Novo y col. 2007). Entre 1543 y 1769 se talaron al menos 393 pies de *Populus alba* en el Coto de Doñana. A pesar de ello, en 1770, todavía existían 553 ejemplares de esta freatofita, 4.055 de *Salix* sp., 9 de *Fraxinus angustifolia* y un número indeterminado de *Tamarix* sp. (Granados, 1987). El predominio de sauces y álamos era mantenido con frecuentes repoblaciones, y sirvió para abastecer las industrias de Sevilla y Sanlúcar de Barrameda, entre otras de carpinteros y toneleros. El inventario forestal impulsado por el Marqués de la Ensenada en el S. XVIII y la cartografía de las provincias marítimas del Departamento de la Marina de Cádiz (Gómez, 1991), aportan información cuantitativa al respecto (Figura 10). En el caso particular de Almonte, el inventario diferencia de manera separada "Almonte" de "Almonte-Coto de Oñana" (sic) como se puede consultar en la Figura 10a. Además dicho inventario incluye información acerca de la edad de las masas forestales del Coto de "Oñana" (plantíos nuevos, crecidos o viejos; Figura 10b).

La Figura 10b muestra que en el Coto de Doñana no había pinos viejos, a diferencia de los alcornoques que sí eran viejos a mediados del S. XVIII, y también es significativa la ausencia de alcornoques de edad intermedia ("Crecidos"). Desde el punto de vista de la vegetación freatofítica (probablemente vinculada al Arroyo de La Rocina), destaca la gran concentración de fresnos y sobre todo de pies de sauces, que superaban a los de alcornoque. Desgraciadamente en esta información no se especifica si estos sauces corresponden a pies nuevos (repoblados), o bien a individuos viejos y ya desarrollados. En cambio en el caso de los fresnos, aproximadamente la mitad eran viejos en el S. XVIII. La Ordenanza de Montes de 1748 prevé plantar 902.800 pies en el



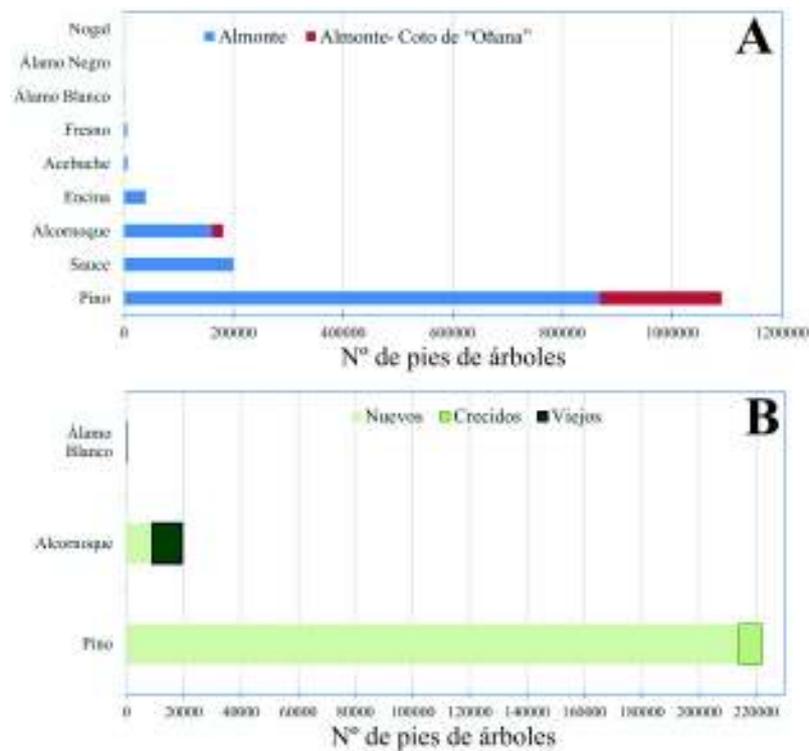
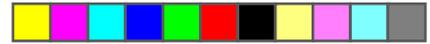


Figura 10. (A) Número de pies de árboles por especie forestal en el Coto de Doñana y en el resto del Almonte a mediados del S. XVIII. (B) Número de pies de Álamo blanco, Alcornoque y Pino Piñonero en el Coto de Doñana indicando su grado de antigüedad, de acuerdo al inventario forestal del S. XVIII.

Coto de "Oñana", aunque no especifica con qué especie de interés forestal. Estos resultados son coherentes con la reducción del alcornocal de Doñana y con el inicio de la reforestación con *Pinus pinea* de acuerdo a la tesis doctoral de Granados (1987). Según este autor hasta 1717, y especialmente 1737, no se iniciaron repoblaciones con pino piñonero en el Coto de Doñana, siendo el pinar de la zona de Marismillas el primero que se plantó dentro de los límites del actual Parque Nacional. Estas plantaciones dan buenos resultados para la obtención de madera, leña, carbón y piñones, a diferencia de lo que ocurrió con las 20-25 ha de viñedos que se plantaron a partir de 1773 en Marismillas. En el entorno de las lagunas peridunares se inició -en 1852- la repoblación con *Pinus pinea* en las proximidades del Charco del Toro (Las Mojedas, Charco del Toro, El Raposo) y Santa Olalla (Santa Olalla Corral Quemado, Zopetón).

Otro impacto clave para entender la historia ecológica del Coto de Doñana fue el uso del fuego. Granados y col. (1986) y Granados (1987) recogen 15 incendios entre 1625 y 1861, siendo los más extensos los de 1625 (cerca de 1.000 ha), 1753 (afectó a las Pajareras de Santa Olalla), 1804 (cerca de 1.000 ha) y en menor medida 1822 y 1837. Ya en la segunda mitad del S. XX, estos autores, recogen 17 incendios de escasa entidad con excepción de los de 1981 (300 ha) y sobre todo de 1985 (778-900 ha). En la Figura 9 se han destacado los de mayor entidad que han afectado a las lagunas peridunares. En la Figura 11a representamos la localización espacial de los incendios de Doñana según Granados (1987). En la Figura 11b, en cambio, reconstruimos un detalle de la superficie estimada de los principales incendios históricos sobre

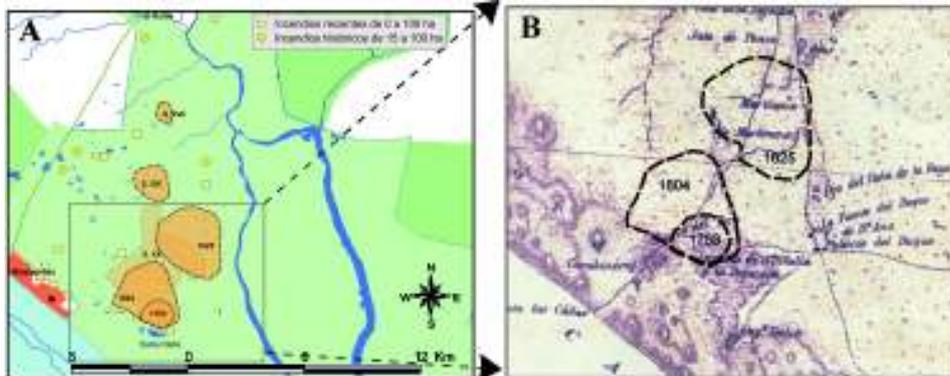
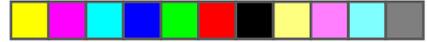


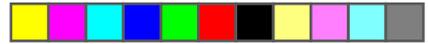
Figura 11. (A) Localización espacial aproximada de los principales incendios en el Parque Nacional de Doñana elaborada a partir de los datos de Granados y col. (1986) y Granados (1987). (B) Localización estimada de los principales incendios históricos en relación con la situación de las lagunas de Doñana en el mapa de Coello (1869). Modificado a partir de Sousa (2004) y Sousa y García-Murillo (2005).

las cubetas de las lagunas peridunares tal y como se encontraban a finales del S. XIX (Sousa, 2004; Sousa y García-Murillo, 2005).

Si se analiza la cartografía estimativa de todos los incendios que se han dado en el matorral de Arenas Estabilizadas del Parque Nacional de Doñana entre 1625 y 1985, se ve como la mayor parte de ellos se ha superpuesto en un sector pequeño de la actual Reserva Biológica (Granados y col., 1986; Granados, 1987), teniendo como límite más meridional precisamente a las lagunas peridunares de Doñana (Figura 11a). Esto se debe a que las dunas vivas actúan como cortafuegos naturales en la expansión de los incendios hacia la zona de corrales, como se describe en el caso del incendio de 1625. Al representar, en la Figura 11b, los incendios históricos más extensos sobre el mapa de Coello (1869), se aprecia claramente el efecto que tuvieron sobre el borde más septentrional de las lagunas peridunares de Doñana. Este análisis cartográfico coincide plenamente con la interpretación que realiza Granados (1987) a partir de las fuentes históricas escritas. Al margen de los incendios ya vistos, los fuegos de 1963, 1974 y 1979 afectaron respectivamente al entorno de la Laguna del Taraje, Laguna Dulce y Laguna de Santa Olalla en 0,5 ha, 0,5 ha y 2 ha, aproximadamente. También el importante incendio de 1985 alcanzó la zona norte de las lagunas.

Paralelamente a estos cambios, en los usos y aprovechamientos del suelo, Granados (1987) detecta, desde comienzos del S. XVIII, un incremento en el número de años de sequía respecto a los siglos anteriores. Este hecho junto con el descepe del barrón (*Ammophila arenaria* subsp. *arundinacea*) empleado para techar chozas (Granados y col., 1988) y la tala de sabinas (*Juniperus phoenicia* subsp. *turbinata*) y enebros (*Juniperus oxycedrus* subsp. *macrocarpa*) produjo lo que Castroviejo (1993) denomina "enarenamiento del Coto de Doñana". Durante este proceso el manto eólico fue cubriendo las arenas estabilizadas, principalmente las depresiones y zonas encharcadas, que eran precisamente las que podían sostener una vegetación adaptada a condiciones de mayor humedad. Como señala Muñoz Reinoso (1995), la actual topografía ondulada del Parque Nacional es fiel reflejo de antiguos sistemas dunares hoy parcialmente arrasados. La presencia de un nivel freático somero, junto con la permeabilidad del substrato, permite que las depresiones puedan inundarse en invierno, dando lugar a innumerables lagunas. Por ello, cualquier pequeña alteración de la topografía tiene un impacto directo sobre las lagunas y la vegetación higrofítica de Doñana.





Esta actividad eólica, bautizada por Granados (1987) como “Dunización Secundaria”, carece de la morfología dunar típica y produce una suavización progresiva del paisaje dunar de las Arenas Estabilizadas. Por tanto, afectó de manera mayoritaria a las comunidades de carácter higrofitico y, en consecuencia, a la vegetación asociada a los complejos lagunares de la zona. En definitiva, se puede decir que en el Parque Nacional de Doñana se ha producido una regresión del estrato arbóreo original, así como de las especies más higrofiticas (Granados, 1987).

## **FACTORES CLIMÁTICOS QUE HAN INFLUIDO A ESCALA SECULAR**

Los cambios de usos en el suelo y los impactos antropogénicos, que de ellos se derivan, no se dan habitualmente en un contexto climático homogéneo. El clima, por definición, es dinámico y por tanto el cambio climático es la norma (Parmesan y col., 2011). En el cuadro dedicado a las tendencias climáticas se puede analizar como, durante los últimos siglos, todo el suroeste de la península Ibérica ha estado sometido a la alternancia de períodos secos y húmedos. Resulta obvia la relación directa entre la precipitación anual y la alimentación de lagunas temporales. Como señalan Custodio y col. (2009) el régimen hidrológico de los ecosistemas epigénicos de Doñana está dominado por las variables climáticas más que por las hidrogeológicas. Además, en el caso particular de Doñana, el régimen de precipitación puede influir también sobre las lagunas si contribuye a la activación de los sedimentos arenosos.

Custodio y col. (2009) consideran que en general, en Doñana, la mayor tasa de recarga de los acuíferos se produce en invierno y primavera cuando la precipitación total anual supera los 300 mm. En este sentido Díaz-Paniagua y col. (2010) estiman la cantidad de precipitación acumulada necesaria para que se empiecen a llenar las cubetas lagunares de Doñana en una cantidad cercana a los 255 mm durante las últimas décadas. Para apreciar más claramente el efecto de la precipitación sobre la alimentación de las lagunas, en la Figura 12a hemos representado -para el período 1817-2010- las medias móviles para periodos de 11 años de la precipitación anual de la serie “Doñana Secular” (ver Cuadro “Aproximación a las tendencias pluviométricas seculares en Doñana”). Paralelamente, para la misma serie, se representa el mes del año hidrológico en que la precipitación acumulada supera 255 mm desde 1817 hasta 2010 (Figura 12b).

La Figura 12a muestra una tendencia lineal hacia la disminución de la precipitación, desde principios del S. XIX. Además destaca un período más húmedo aproximadamente entre 1850 y 1890. También es relevante que la media aritmética para el período 1817-1899 sea de 697.7 mm, en contraste con la del período 1900-1999 (595.7 mm) y sobre todo en comparación con el último período de referencia (1980-2010; 566.9 mm). Además la Figura 12b estima que, en los dos últimos siglos, el 59 % de los años las lagunas comenzaban a llenarse al finalizar diciembre. En total el 88 % de los años las lagunas iniciaron su llenado hasta el mes de febrero, y solo un 12 % de los últimos 200 años se iniciaba a partir del mes de marzo. Globalmente la Figura 12b evidencia una tendencia hacia el retraso en la fecha estimada del comienzo del llenado de las lagunas, asociado a los períodos de menor precipitación, mostrando un perfil más o menos simétrico respecto de la Figura 12a. Durante los períodos húmedos las lagunas se llenaban antes (y probablemente durante mayor tiempo y con una mayor superficie afectada). Desgraciadamente esta aproximación es limitada ya que no contempla el balance hídrico ni el efecto que puedan tener -sobre la escorrentía, infiltración y llenado de las cubetas- los cambios en los usos del suelo y en los niveles isopiezométricos.

Estas fluctuaciones en la precipitación hay que contemplarlas en el marco más amplio de la Pequeña Edad del Hielo (PEH, a partir de ahora). Las series, generadas a partir de proxy data (Ro-



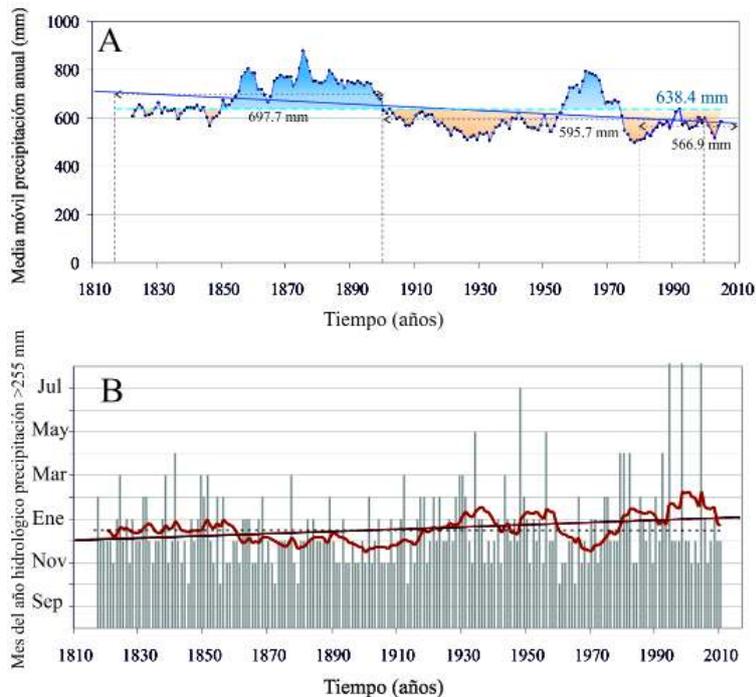
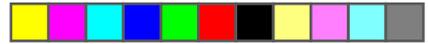


Figura 12. (A) Media móvil calculada para periodos de 11 años de la precipitación anual en Doñana (1817- 2010). En azul se marcan los periodos en los que la precipitación supera la media anual de los últimos 200 años (638.4 mm) y en naranja los que están por debajo de la media. (B) Estimación del mes del año hidrológico en el que la precipitación acumulada supera 255 mm (también se representa la media móvil cada 11 años).

drigo y col., 1999), muestran que desde el S. XVI se alternaron en Andalucía los periodos húmedos (finales del S. XVI, comienzos del S. XVII y finales del S. XIX) y los periodos secos (mediados del S. XVI y del S. XVIII). La Figura 12 evidencia un inicio más precoz del llenado de las lagunas durante la última fase húmeda de la PEH, a finales del S. XIX. En cambio, los periodos secos se pueden comparar con las fases álgidas de la Dunización Secundaria en Doñana. Y es que, en toda el área de Doñana (y probablemente en gran parte del cuadrante suroccidental de la península Ibérica) existe un patrón climático secular donde fluctúan los periodos secos y húmedos, al cual se superpone una tendencia hacia la aridización. En este contexto temporal es necesario señalar que, entre finales del S. XX y principios del S. XXI, no se aprecia una tendencia climática suficientemente marcada que explique - solo por sí misma- la desecación rapidísima que se abate actualmente sobre las lagunas peridunares.

Estudios complementarios (García-Barrón y col., 2011) muestran no solo el previsible incremento de la variabilidad interanual de la precipitación sino también de la disparidad a finales del S. XX. De esta forma, serán más probables años de precipitación muy escasa frente a otros muy lluviosos, y ello -en ocasiones- en años consecutivos. En relación con la variabilidad de las precipitaciones en el suroeste de la península Ibérica, se mantiene una relativa estabilidad durante el primer tercio del siglo XX, que coincide con un periodo de pocas precipitaciones y un aumento progresivo durante las tres últimas décadas del S. XX. Pero no solo es importante cuánto llueve anualmente sino cómo se distribuye la precipitación a lo largo de cada año hidrológico (García Barrón y col., 2013). El desplazamiento interanual y concentración del periodo de lluvias hacia otoño afecta al llenado de cubetas.





Además del régimen de precipitación, la hidrología del área de Doñana depende de las tasas de evaporación y de evapotranspiración real (Custodio y col., 2009), que están controladas por la temperatura y la cobertura vegetal. Las características geomorfológicas y el clima mediterráneo de Doñana explican que las variables térmicas no tengan una influencia tan severa sobre los ecosistemas lagunares de Doñana como la precipitación. A diferencia del patrón general del Hemisferio Norte, en las series españolas, el incremento térmico asociado al Cambio Climático es más reciente y tiene menor grado de significación debido a su gran variabilidad (García Barrón y Pita, 2004). Más concretamente en la península Ibérica, a lo largo del S. XX, se detecta un calentamiento superior a 1 °C en la temperatura media, con un ascenso especialmente pronunciado, durante la segunda mitad del S. XX (Castro-Díez y col., 2007).

Para estimar la evolución de las variables térmicas en el entorno de Doñana hemos generado, a partir de la ecuación de regresión entre los registros para el período 1979-2009 de los observatorios de Palacio de Doñana y Sevilla Aeropuerto, las series de temperaturas máximas y mínimas desde 1900 (Figura 13). En esta figura se puede observar el incremento térmico durante el S. XX, más pronunciado en las temperaturas mínimas que en las máximas.

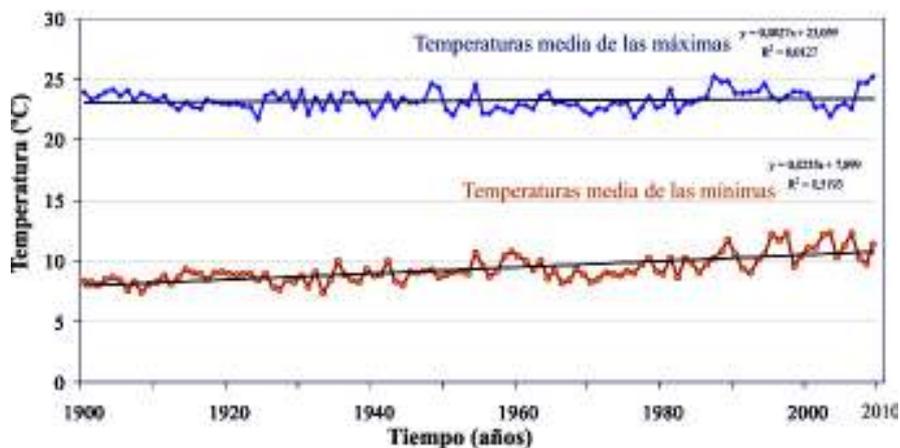
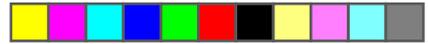


Figura 13. Tendencias de los valores medios anuales de la temperatura máxima y mínima diarias desde 1900-2009 a partir de la serie generada por regresión entre los registros de Palacio de Doñana y Sevilla-Aeropuerto.

Sin embargo, este incremento térmico no tiene porqué ser homogéneo a lo largo de todo el año. Es decir, puede haber períodos dentro del año (días, meses o estaciones), en los que el incremento térmico sea mayor que en otros. Para detectar estas tendencias, tras generar por el procedimiento descrito las series estimadas de temperaturas diarias máximas y mínimas, se ha calculado el coeficiente lineal de la recta de la pendiente de cada uno de los 365 días del año para el período 1951-2009. La Figura 14 muestra el incremento térmico medio de cada día en °C/año.

En la Figura 14 destaca que las temperaturas mínimas han tenido un incremento medio (0,014 °C/año) superior al de máximas diarias (0,005 °C/año). El incremento de las temperaturas mínimas diarias se ha producido principalmente durante el final de otoño y principio de invierno. Con menor intensidad, y con un comportamiento más irregular, las temperaturas máximas diarias tienden a incrementarse sobre todo durante el otoño y la primavera.





Los cambios en las tendencias climáticas han podido desencadenar -durante los períodos secos- lo que Granados y col. (1988) y Merino y col. (1990) han denominado como Dunización Secundaria. Esto supuso la disminución de la estabilidad del sustrato y el aumento de la aridez, como resultado del alejamiento del nivel freático de la superficie (Merino y col., 1990). Según estos autores esto podría explicar la desaparición de pequeñas lagunas, las dificultades de la reinstalación de algunas especies y la muerte de las especies con mayores requerimientos hídricos. Granados y col. (1988) fechan este incremento de la aridez -en el caso del Parque Nacional de Doñana- a principios del siglo XVIII, aunque se mantendría en los siglos siguientes debido a la sucesión de períodos húmedos y secos (Granados, 1987; Sousa y García-Murillo, 2003; Sousa y col., 2009). De hecho, a finales del S. XIX, Gonzalo y Tarín (1886) señala que las repoblaciones en el litoral de Doñana se deberían ampliar "...para detener la rápida marcha de las arenas voladoras...". Esta Dunización Secundaria se acentúa, al menos en algunas zonas del Manto Eólico Litoral onubense, con el inicio del S. XX. Al respecto, San Miguel (1913) hace referencia a que muchos arroyos del litoral onubense oriental han sido ya borrados del relieve litoral por el relleno de su cauce con arena. Esto ha sido confirmado en estudios posteriores para el Parque Natural de Doñana (Sousa y col., 2015),

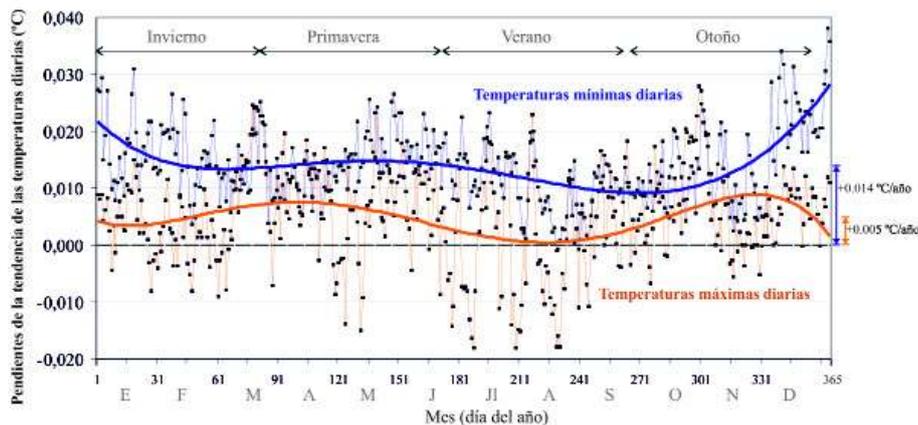
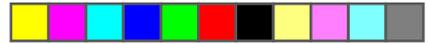


Figura 14. Valor del coeficiente lineal de la tendencia de temperaturas máxima y mínima en los 365 días del año durante el período 1951-2009. En azul y naranja se representan las correspondientes curvas suavizadas de ajuste polinómico.

para el Parque Nacional de Doñana (Sousa, 2004), y en arroyos del Algarbe portugués (Devereux, 1982). Por todo ello la Dunización Secundaria, al igual que el avance de los frentes dunares, fue un proceso con cierta continuidad, al menos desde el S. XVIII hasta nuestros días (Castroviejo, 1993).

A lo largo de los últimos siglos la Dunización Secundaria ha tenido fases álgidas o especialmente activas, asociadas tanto a impactos antropogénicos como a períodos climáticos. En el caso de las dunas litorales, las causas de este proceso se centran, según García-Novo y col. (2007), en la deforestación de enebrales y sabinars para la almadraba de Torre Carbonero, la instalación de viñedos en Las Marismillas y el sobrepastoreo durante un período de inestabilidad climática. Merino y col. (1988) señalan que es difícil afirmar hasta qué punto la Dunización Secundaria se debe a cambios en las tendencias climáticas o cambios en los usos del suelo, ya que ambos parecen haber ocurrido al mismo tiempo. En nuestra opinión, dependiendo del área concreta del Espacio Protegido de Doñana, y de la fecha a la que se haga referencia, uno u otro tipo de factor ha podido





tener una implicación más intensa. Sin embargo, lo relevante no es la participación parcial de cada uno de ellos sino el impacto sinérgico, consecuencia del solapamiento temporal de los impactos climáticos y antropogénicos (ver Figura 1). Esta coincidencia temporal es el factor clave que ha disparado, en determinados períodos, la movilización de las arenas y su posterior depósito en las áreas topográficamente más deprimidas como lagunas, arroyos y cañadas.

## **SINERGIAS ENTRE IMPACTOS CLIMÁTICOS Y ANTROPOGÉNICOS SOBRE LAS LAGUNAS DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA**

Para tener una visión global de las sinergias producidas por los impactos climáticos y antropogénicos a lo largo del tiempo en las lagunas de Doñana, vamos a representarlos de forma conjunta. En la Figura 15 se presenta un esquema temporal de los factores que han conformado la historia ecológica de las lagunas del Coto de Doñana en los últimos siglos. Además de las fases de la historia ecológica hemos marcado, en tonos celestes y naranjas respectivamente, los períodos húmedos y secos. También se han representado los pulsos de actividad eólica conocidos en el suroeste de la península Ibérica, los mínimos de manchas solares según Russel y col. (2010), los incendios de mayor extensión, así como aquellos eventos históricos más significativos de la historia de Doñana.

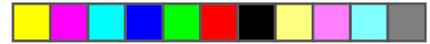
En la Figura 15 se aprecia que los cambios en el clima, y gran parte de los impactos antropogénicos, se pueden datar entre mediados del S. XVI y finales del S. XIX. Anteriormente hemos visto que la mayoría de los impactos ligados a los cambios en los usos y aprovechamientos del suelo se concentran durante la segunda mitad del S. XVII hasta principios del S. XVIII (sobrepastoreo, carboneo y talas e incendios), y durante la segunda mitad del S. XVIII hasta principios del S. XIX (plantación de pinos, viñedos y huertas, y en menor medida incendios, sobrepastoreo, carboneo y talas).

Paralelamente a estos impactos antropogénicos se reconocen dos fases de alta actividad eólica en el suroeste de Portugal hacia 1570 AD y 1710 AD. Según Costas y col. (2012), la primera fase de actividad eólica puede estar relacionada con el inicio de la PEH o la transición hacia el mínimo de manchas solares de Maunder, y el otro pulso de actividad eólica coincide con el final del Mínimo de Maunder (Figura 15) y la fase más intensa de la Dunización Secundaria en el Coto de Doñana (Granados y col., 1988). Como se ha comentado anteriormente, una de las consecuencias de este proceso sería la colmatación de más de la mitad del complejo lagunar de Santa Olalla durante la primera mitad del S. XVIII. Estos cambios coinciden temporalmente con la alternancia de períodos húmedos y secos durante la PEH en Andalucía.

La aparición de uno de estos períodos secos a mediados del S. XVIII da continuidad al proceso de Dunización, estando su intensidad modulada por los diferentes impactos antropogénicos ya citados. Sin embargo asociar, de manera directa y unívoca, la acumulación de arena eólica a períodos más secos o más húmedos es un problema complejo, ya que puede estar afectado por variaciones climáticas regionales (Costas y col., 2012) y también por los cambios en los usos del suelo (Merino y col., 1990). Además, los cambios en la agresividad de la precipitación en el suroeste de la península Ibérica no coinciden necesariamente con períodos secos o húmedos, sino que se potencian con los sucesos de lluvias intensas o muy concentradas estacionalmente (García Barrón y col., 2014).

Se considera que la PEH finaliza en Andalucía alrededor de 1890 (Castro-Díez y col., 2007), coincidiendo con una disminución en la frecuencia acumulada de años húmedos y el incremento de los secos, tras el final del tercer pulso húmedo de la PEH en Andalucía (Figura 15). La inercia del proceso de Dunización Secundaria, la disminución de la disponibilidad hídrica (Figura 12) y el incremento de la evapotranspiración -consecuencia del incremento térmico (Figura 13)- conducen a la





individualización de las cubetas del complejo lagunar de Santa Olalla hasta la situación actual. Esto se puede visualizar comparando la cartografía de Coello (1869) y de Bonsor (1921) en las Figuras F5a y F5b, lo que se confirma con el análisis del microrrelieve y la documentación histórica escrita.

La Figura 15 evidencia también que los periodos donde las fuentes históricas describen a las lagunas peridunares como una gran laguna (durante la visita de Felipe IV en 1624) o con dos grandes cubetas lagunares (Coello, 1869), coinciden con el final o la fase más intensa de periodos significativamente más húmedos de la PEH. Posteriormente, durante el S. XX, el calentamiento del Hemisferio Norte sigue repercutiendo en las tendencias climáticas. La transición entre ambos periodos genera un

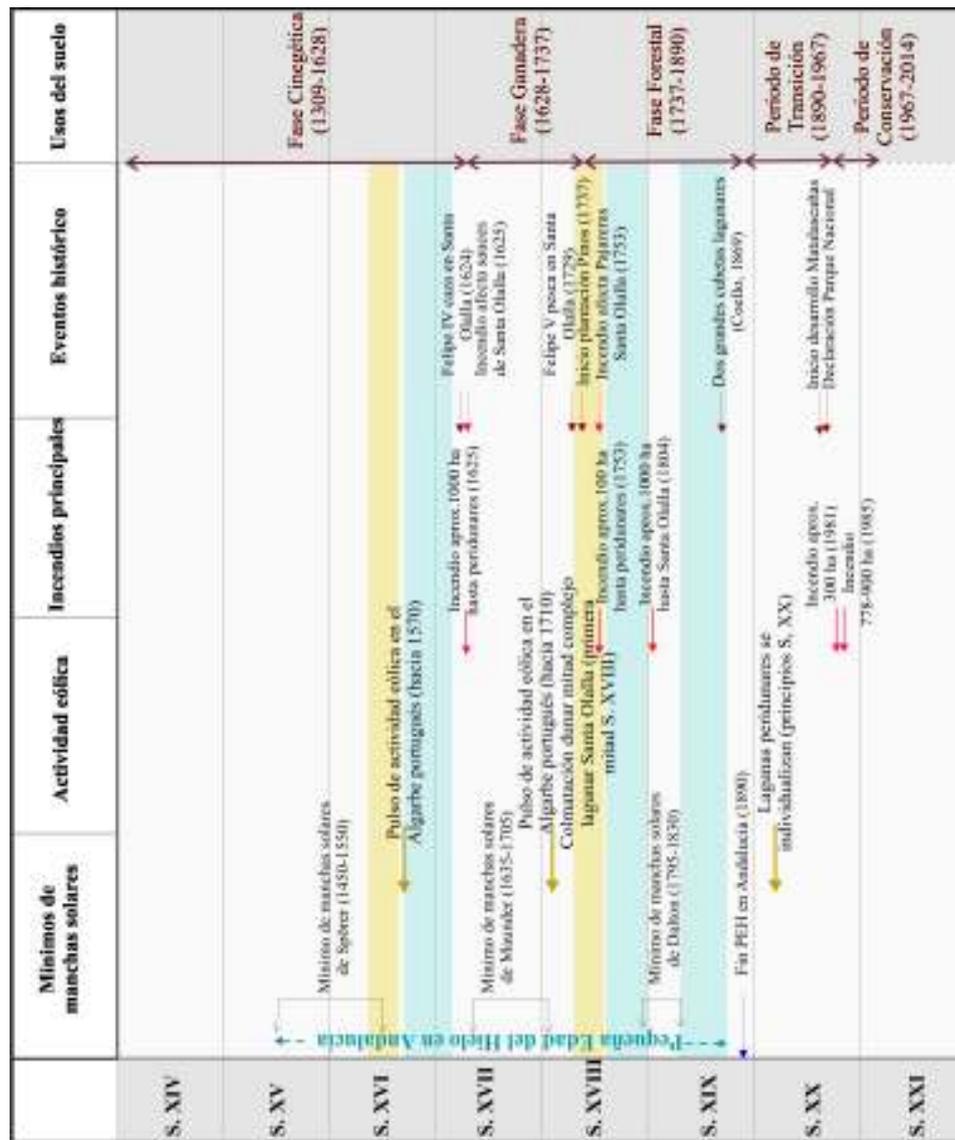
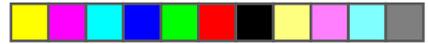


Figura 15. Síntesis de periodos climáticos, usos del suelo predominantes y eventos históricos relevantes para la evolución de las lagunas del Coto de Doñana. En tonos celestes se representan periodos húmedos y en tonos naranjas los periodos secos de acuerdo a Rodrigo y col. (1999), Barriandos y Martín-Vide (1998) y Sousa y col. (2013).

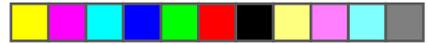


punto de inflexión climático que algunos autores han denominado Calentamiento posterior a la PEH o *post-LIA warming* (Sorvari y col., 2002; Sousa y col., 2006). De hecho, la fase seca que se produce después del final de la PEH (en la transición entre los S. XIX y XX), coincide con la desecación de algunos humedales en el sur (Martin-Puertas y col., 2008; Sousa y col., 2009, 2013, 2015; Valero-Garcés y col., 2006), el centro-este (Romero-Viana y col., 2009) e incluso norte (Morellón y col., 2012; Corella y col., 2013) de la península Ibérica. En relación con esto, Diodato y col. (2011) evidencian que en el Mediterráneo Occidental y Central hay un aumento de la erosividad hacia el final de la PEH. A estas tendencias se suma un incremento de la irregularidad de la precipitación, especialmente en algunas variables como la disparidad durante el último tercio del S. XX (García-Barrón y col., 2011).

Los escenarios de Cambio Climático para el S. XXI (ver Cuadro “Aproximación a los escenarios climáticos futuros en el Parque Nacional de Doñana”) perfilan una mayor evapotranspiración y, lo que es más importante, una menor disponibilidad hídrica en consonancia con los estudios recientes para toda España (Argüeso y col., 2012). Los modelos climáticos globales de escenarios de emisión medio-alto (A2) proyectan para Doñana una reducción de la recarga de aguas subterráneas que oscila entre el 14 y el 57 % en 2080 (Guardiola-Albert y Jackson, 2011). Independiente del futuro de las tendencias climáticas, en el pasado hemos visto como la superposición de impactos antropogénicos a las tendencias climáticas naturales ha disparado sinérgicamente procesos cuyas consecuencias son difíciles de prever, pero que siempre apuntan hacia un retroceso de los ecosistemas acuáticos continentales y las comunidades biológicas a ellos asociados. Como afirma Granados (1993), la Dunización Secundaria en el pasado favoreció la colmatación de los humedales más pequeños y la somerización de los más grandes. De ahí la necesidad de controlar todos aquellos impactos que -como las extracciones de agua o la activación de procesos erosivos- repercuten directamente en la supervivencia de los ecosistemas lagunares del Parque Nacional de Doñana.

## CARTOGRAFÍA HISTÓRICA CITADA

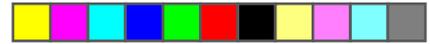
1606. “Andalucía Nova (Jodocus Hondius, 1606)”. Cartoteca del Instituto Geográfico Nacional.
1634. “Mapa del Reyno de Andalvcia”. Pedro Texeira. “La Descripción de España y de las Costas y Puertos de sus Reynos”; pág. 117-192. En: Pereda, F., Marías, F. (Eds.) El Atlas del Rey Planeta “La Descripción de España y de las costas y puertos de sus reinos” de Pedro Texeira. Nerea, Madrid.
- 1640-1650. “Andaluzia continens Sevilam et Cordobam”. Theatrum du Monde au Nouvel Atlas. Autor: Willem Blaeu. Cartoteca de Instituto Geográfico Nacional.
1696. “Li Regni de Granata E D'Andalucía”. Domenico de Rossi (Domenicus Rubeis). Cartoteca del Instituto Geográfico Nacional.
- 1748-1752. “Mapa de la Provincia Marina de Ayamonte”. José Quintana y Ceballos. En: Gómez Cruz, M. (1991). Atlas Histórico-Forestal de Andalucía S. XVIII. Universidad de Granada, Granada.
1768. “Estado de las administraciones principales. y agregadas de la Real Renta de Tavaco del Reyno de Sevilla”. Félix de Alarcón. Cartoteca Histórica del Instituto Cartografía de Andalucía, Sevilla.
- S. XVIIIa. “Demostración de Paño de Pintura del Coto de D<sup>a</sup> Ana que antes se nombró la Dehesa del Carrizal y la Figuera, término de la villa de Almonte frente de la Ciudad de S. Lucar de Barrameda, propia de los Duques de MedinaSidonia”. Anónimo S. XVIII (pañó de pintura). En: Rivera, M.L. (2002). Arqueología e Historia, págs. 340-352. En: Canseco, V. (Ed.) Parque Nacional de Doñana. Canseco editores, Talavera de La Reina.
- S. XVIIIb. “Pleyto sobre el Cobro de los Tributos de sal de las salinas sitas en el Coto de D<sup>a</sup> Ana Term<sup>o</sup> de la Villa de Almonte”. Anónimo. En: Castrillo, M.C. (2000) Doñana Nombre a Nombre.



- Estudio de la toponimia del Parque Nacional de Doñana. Diputación Provincial de Huelva, Huelva. 1869. "Huelva" por D. Francisco Coello. Cartoteca Histórica del Servicio Geográfico del Ejército.
1879. "Spanien und Portugal in 4 blättern". Von C. Vogel. Escala ~ 1:500,000. Stieler's hand. Atlas nº 41. Cartoteca Histórica del Instituto Cartografía de Andalucía, Sevilla.
1892. "Nuevo mapa geográfico estadístico de la provincia de Huelva". Autor: José Carrasco y Padilla (Excma. Diputación Provincial de Huelva). E. 1: 300.000. Cartoteca del Instituto Geográfico Nacional.
- 1897-1900. "Provincia de Huelva, nivelación", por el Instituto Geográfico Estadístico. Dibujado por F. Noriega y J. Cobo de Guzmán. Trabajos topográficos desde 1897 á 1900. Cartoteca Histórica del Servicio Geográfico del Ejército.
- S. XIX. "Provincia de Huelva", Anónimo. Cartoteca Histórica del Servicio Geográfico del Ejército.
1905. "Mapa Militar Itinerario de España". Formado por el Cuerpo del Estado Mayor del Ejército. Hoja 83, 2ª edición (1916). En: Cartografía Histórica de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes. 1994, Sevilla.
1921. "El Tartessos, brazo occidental del Guadalquivir (desparecido)". J. Bonsor. Coto de Doña Ana, 25 de agosto de 1921. E. 1:50.000. En: Bonsor, J. (1922). El Coto de Doña Ana. Una visita arqueológica. Diputación de Huelva, reedición 1990. Huelva.

## REFERENCIAS

- Alfonso XI (1311-1350). Libro de la montería que mandó escribir el muy alto y muy poderoso Rey Don Alonso de Castilla y de León, último deste nombre. Reproducción facsímil de la edición de Sevilla de Andrea Pescioli (1582), Sociedad de Bibliófilos Andaluces (1979), Valencia.
- Allier, C., González Bernáldez, F., Ramírez Díaz, L. (1974). Mapa Ecológico de la Reserva Biológica de Doñana y memoria a E. 1:10.000. División del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Estación Biológica de Doñana, Sevilla.
- Argote de Molina, G. (1582). Discurso sobre el libro de la montería que mandó escribir el muy alto y muy poderoso Rey Don Alonso de Castilla, y de León. Acrecentado por Gonzalo Argote de Molina. Reproducción facsímil de la edición de Sevilla de Andrea Pescioli (1582), Sociedad de Bibliófilos Andaluces (1979), Valencia.
- Argüeso, D., Hidalgo-Muñoz, J.M., Gámiz-Fortis, S.R., Esteban-Parra, M.J, Castro-Díez, Y. (2012). High-resolution projections of mean and extreme precipitation over Spain using the WRF model (2070–2099 versus 1970–1999). *Journal of Geophysical Research* 117, D12108, doi:10.1029/2011JD017399
- Barriendos, M., Martin-Vide, J. (1998). Secular climatic oscillations as indicated by catastrophic floods in the Spanish Mediterranean coastal area (14th–19th centuries). *Climatic Change* 38, 473–491.
- Bonsor, J. (1922). El Coto de Doña Ana. Una visita arqueológica. Diputación de Huelva, Huelva.
- Börjeson, L. (2009). Using a historical map as a baseline in a land-cover change study of northeast Tanzania. *African Journal of Ecology* 47, 185-191.
- Bromberg, K.D., Bertness, M.D. (2005). Reconstructing New England salt marsh losses using historical maps. *Estuaries and Coasts* 28, 823-832.
- Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J., Staudt, M., Gámiz-Fortis, S. (2007) Temperature and precipitation changes in Andalusia in the Iberian Peninsula and Northern Hemisphere context. En: Sousa, A., García-Barrón, L., Jurado, V. (Coords.) *Climate Change in Andalusia: trends and environmental consequences*. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla. Pp: 57-77.
- Castroviejo, J. (1993). Mapa del Parque Nacional de Doñana. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Agencia de Medio Ambiente, Madrid.
- Corella, J.P., Stefanova, V., El Anjoumi, A., Rico, E., Giral, S., Moreno, A., Plata-Montero, A., Valero-Garcés, B.L. (2013). A 2,500-year multi-proxy reconstruction of climate change and human activities in northern Spain: the Lake Arreo record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 386, 555-568.
- Costas, S., Jerez, S., Trigo, R.M., Goble, R., Rebelo, L. (2012). Sand invasion along the Portuguese coast forced by westerly shifts during cold climate events. *Quaternary Science Reviews* 42, 15-28.
- Cousins, S.A.O. (2001). Analysis of land-cover transitions based on seventeenth and eighteenth century cadastral maps and aerial photographs. *Landscape Ecology* 16, 41-54.



- Custodio, E., Manzano, M., Montes, C. (2009). Las aguas subterráneas en Doñana. Aspectos ecológicos y sociales. Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Sevilla.
- Devereux, C.M. (1982). Climatic speeds erosion of the Algarve's Valleys. *Geographical Magazine* 54, 10-17.
- Díaz-Paniagua, C., Fernández-Zamudio, R., Florencio, M., García-Murillo, P., Gómez-Rodríguez, C., Portheault, A., Serrano, L., Siljeström, P. (2010). Temporary ponds from Doñana National Park: a system of natural habitats for the preservation of aquatic flora and fauna. *Limnetica* 29, 41-58.
- Diodato, N., Bellocchi, G., Romano, N., Chirico, G.B. (2011). How the aggressiveness of rainfalls in the Mediterranean lands is enhanced by climate change. *Climatic Change* 108, 591-599.
- Duque, A. (1977). El mito de Doñana. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Educación, Madrid.
- Espinosa, P. de (1624). Bosque de Doñana demostraciones que hizo el Duque VIII de Medina Sidonia a la presencia de S. M. el rey Felipe IV en el Bosque de Doñana. Reedición de Padilla Libros (1994), Sevilla.
- García-Barrón, L., Aguilar, M., Pineda-Roibas, M., Morales, J. y Sousa, A. (2014). Análisis secular del riesgo de agresividad pluviométrica en el suroeste de España. En: Rodrigo, F.S. y col. (Eds.) Cambio climático y cambio global. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología 9, Almería. Pp: 467-476.
- García-Barrón, L., Aguilar, M., Sousa, A. (2011). Evolution of annual rainfall irregularity in the southwest of the Iberian Peninsula. *Theoretical and Applied Climatology* 103, 13-26.
- García-Barrón, L., Morales, J., Sousa, A. (2013). Characterisation of the intra-annual rainfall and its evolution (1837-2010) in the southwest of the Iberian Peninsula. *Theoretical and Applied Climatology* 114, 445-457.
- García-Barrón, L., Pita, M.F. (2004). Stochastic analysis of time series of temperature in the south-west of the Iberian Peninsula. *Atmosfera* 17, 225-244.
- García-Novo, F. (1997). The ecosystems of Doñana National Park. En: García Novo, F., Crawford, R.M.M., Díaz Barradas, M. C. (Eds.) The ecology and conservation of european dunes. Universidad de Sevilla, Sevilla. Pp: 97-116.
- García-Novo, F., Martín, A., Toja, J. (2007). La frontera de Doñana. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Gómez, M. (1991). Atlas Histórico-Forestal de Andalucía S. XVIII. Universidad de Granada, Granada.
- Gonzalo y Tarín, J. (1886). Descripción física, geológica y minera de la provincia de Huelva. Tomo I Primera Parte: Descripción física. Imprenta y fundición de Manuel Tello, Madrid.
- Gonzalo y Tarín, J. (1887). Mapa geológico y Topográfico de la Provincia de Huelva E. 1:400.000 y Memoria. Instituto geológico y Minero de España, Madrid.
- Granados, M. (1993). El Hombre en el origen de los paisajes litorales actuales. En: Granados M., Ojeda, J. F. (Eds.) Intervenciones Públicas en el Litoral Atlántico andaluz. Efectos territoriales. Agencia de Medio Ambiente. Sevilla. Pp: 17-25.
- Granados, M. (1987). Transformaciones históricas de los ecosistemas del P.N. de Doñana. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Granados, M., Martín, A., García Novo, F. (1986). El papel del fuego en los ecosistemas de Doñana. *Boletín de la Estación Central de Ecología* 29, 17-28.
- Granados, M., Martín, A., García Novo, F. (1988). Long-term vegetation changes on the stabilized dunes of Doñana National Park (SW Spain). *Vegetatio* 75, 73-80.
- Guardiola-Albert, C., Jackson, S.R. (2011). Potential impacts of climate change on groundwater supplies to the Doñana wetland, Spain. *Wetlands* 31, 907-920.
- Instituto de Cartografía de Andalucía. (1998). La Nueva Cartografía en España (del S. XVIII al XX). Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, Sevilla.
- Madoz, P. (1848). Diccionario Geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de Ultramar. Biblioteca Santa Ana (1990), Almedralejo.
- Martín-Puertas, C., Valero-Garcés, B.L., Mata, M.P., González-Sampérez, P., Bao, R., Moreno, A., Stefanova, V. (2008). Arid and humid phases in southern Spain during the last 4000 years: the Zoñar Lake record, Córdoba. *Holocene* 18, 907-921.
- Merino, J., Martín, A., Granados, M., Merino, O. (1990). Desertification of coastal sands of southwest Spain. *Agriculture Ecosystems and Environment* 33, 171-180.
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampérez, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.A., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B. (2012). A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Climate of the Past* 8, 683-700.
- Muñoz Reinoso, J.C. (1995). Influencia del agua freática sobre la vegetación de las áreas de descarga sobre arenas en la reserva biológica de Doñana. *Limnetica* 11, 9-16.
- Pardo (1948). Catálogo de los Lagos de España. Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid.
- Parmesan, C., Duarte, C., Poloczanska, E., Richarsson, A.J., Singer, M.C. (2011). Overstretching attribution. *Nature Climate Change* 1, 2-4.
- Pérez Gago, M. (2001) Análisis de los trabajos publicados en revistas y congresos nacionales en relación con humedales españoles durante el período 1989-1999. En: Fernández Uría, A. (Ed.) VII Simposio de



- Hidrogeología. Asociación Española de Hidrogeólogos, Murcia. Pp: 31-41.
- Petit, C.C., Lambin, E.F. (2002). Long-term land-cover changes in the Belgian Ardennes (1775–1929): Model-based reconstruction vs. historical maps. *Global Change Biology* 8, 616–630.
- Prieto, I., Bernúes, M., Montes, C. (1998) Fuentes documentales y bibliográficas sobre Doñana y su entorno. En: Montes, C., Borja, F., Bravo, M.A., Moreira, J.M. (Coords.) Reconocimiento biofísico de Espacios Naturales Protegidos. Doñana: una aproximación ecosistémica. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Sevilla. Pp: 151-155.
- Rodrigo, F.S., Esteban-Parra, M.J., Pozo-Vázquez, D., Castro-Díez, Y. (1999). A 500 year precipitation record in Southern Spain. *International Journal of Climatology* 19, 1233-1253.
- Romero-Viana, L., Miracle, M.R., López-Blanco, C., Cuna, E., Vilaclara, G., García-Orellana, J., Keely, B.J., Camacho, A., Vicente, E. (2009) Sedimentary multiproxy response to hydroclimatic variability in Lagunillo del Tejo (Spain). En: Buczkó, K., Korpónai, J., Padisák, J., Starratt, S.W. (Eds.) *Palaeolimnological proxies as tools of environmental reconstruction in fresh water*. Springer, Netherlands. Pp 231-245.
- Ruiz, J.E. (1999). Huelva, según las relaciones enviadas por los párrocos al geógrafo real Tomás López en el siglo XVIII. Diputación Provincial de Huelva, Huelva.
- Russell, C.T., Luhmann, J.G., Jian, L.K. (2010). How unprecedented a solar minimum? *Reviews of Geophysics* 48, RG2004, doi:10.1029/2009RG000316.
- San Miguel, M. (1913). Las costas de la provincia de Huelva y sus variaciones en el período histórico. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 13, 434-468.
- Sánchez, J.M. (1999). Huelva y su provincia en las relaciones geográficas de Don Tomás López. Padilla Libros Editores & Libreros, Sevilla.
- Segura, C., De Miguel, J.C. (1990) Introducción. En: Segura, C., De Miguel, J.C. (Eds.) *Diccionario Geográfico de Andalucía: Granada*. Don Quijote, Sevilla. Pp. 3-10.
- Sorvari, S., Korhola, A., Thompson, R. (2002). Lake diatom response to recent Arctic warming in Finnish Lapland. *Global Change Biology* 8, 171-181.
- Sousa, A. (2004). Evolución de la vegetación higrofitica y de los humedales continentales asociados en el litoral onubense oriental. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Sousa, A., García-Murillo, P. (1998). Cambios históricos en el avenamiento superficial y la vegetación del Parque Natural de Doñana (Sector Abalarío, Huelva). *Ería* 46, 165-182.
- Sousa, A., García-Barrón, L., García-Murillo, P.; Vetter, M., Morales, J. (2015). The use of changes in small coastal Atlantic brooks in southwestern Europe as indicators of anthropogenic and climatic impacts over the last 400 years. *Journal of Paleolimnology* 53, 73-88.
- Sousa, A., García-Barrón, L., Morales, J., García-Murillo, P. (2006). Post-Little Ice Age warming and desiccation of the continental wetlands of the Aeolian sheet in the Huelva region (SW Spain). *Limnetica* 25, 57-70.
- Sousa, A., García-Barrón, L., Vetter, M., Morales, J. (2014). The historical distribution of main malaria foci in Spain as related to water bodies. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11, 7896-7917.
- Sousa, A., García-Murillo, P. (2003). Changes in the wetlands of Andalusia (Doñana National Park, SW Spain) at the End of the Little Ice Age. *Climatic Change* 58, 193–217.
- Sousa, A., García-Murillo, P. (2005). Historia ecológica y evolución de las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Sousa, A., García-Murillo, P., Morales, J., García-Barrón, L. (2009). Anthropogenic and natural effects on the coastal lagoons in the southwest of Spain (Doñana National Park). *ICES Journal of Marine Science* 66, 1508–1514.
- Sousa, A., Morales, J., García-Barrón, L., García-Murillo, P. (2013). Changes in the *Erica ciliaris* Loeffl. ex L. peat bogs of southwestern Europe from the 17th to the 20th centuries AD. *Holocene* 23, 255-269.
- Stein, E.D., Dark, S., Longcore, T., Grossinger, R., Hall, N., Beland, M. (2010). Historical ecology as a tool for assessing landscape change and informing wetland restoration priorities. *Wetlands* 30, 589–601.
- Stevenson, A.C. (1985). Studies in the vegetational history of S. W. Spain. I. Modern pollen rain in the Doñana National Park, Huelva. *Journal of Biogeography* 12, 243-268.
- Stevenson, A.C., Harrison, R.J. (1992). Ancient forest in Spain: a model for land-use and dry forest management in South-West Spain from 4.000 B.C. to 1.900 A.D. *Proceedings of the Prehistoric Society* 58, 227-247.
- Texeira, P. (1634) La Descripción de España y de las Costas y Puertos de sus Reynos. En: Pereda, F., Marías, F. (Eds.) *El Atlas del Rey Planeta "La Descripción de España y de las costas y puertos de sus reinos" de Pedro Texeira (1634)*. Editorial Nerea, Madrid. Pp: 117-192.
- Valero-Garcés, B.L., González-Sampériz, P., Navas, A., Machín, J., Mata, P., Delgado-Huertas, A., Bao, R., Moreno, A., Carrión, J.S., Schwalb, A., González-Barrios, A. (2006). Human impact since medieval times and recent ecological restoration in a Mediterranean lake: the Laguna Zoñar, southern Spain. *Journal of Paleolimnology* 35, 441-465.