



por un planeta vivo[®]

Caudales ecológicos en la marisma del Parque Nacional de Doñana y su área de influencia

Junio 2009

**Caudales ecológicos de la marisma
del Parque Nacional de Doñana
y su área de influencia**

Junio 2009

© WWF España
Gran Vía de San Francisco, 8-D
28005 Madrid
Tel.: 91 354 05 78
Fax: 91 365 63 36
Info@wwf.es
www.wwf.es

Textos: Rafael Sánchez Navarro
Coordinación: Alberto F. Lop y Eva Hernández
Contribuciones: Lourdes Hernández, Celsa Peiteado, Guido Schmidt y Enrique Segovia
Foto portada: @ Jorge Sierra / WWF

Editado en junio de 2009 por WWF España (Madrid, España).
WWF España agradece la reproducción de los contenidos del presente documento en cualquier tipo de medio siempre y cuando se cite expresamente la fuente (título y propietario del copyright). @ Texo: 2009, WWF España. Todos los derechos reservados.

- INDICE -

1. INTRODUCCION	6
2. AMBITO Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO	8
3. DINAMICA DE LA MARISMA DE DOÑANA Y SUS RIOS DE INFLUENCIA.....	9
3.1. DINAMICA EN CONDICIONES NATURALES.....	9
3.1.1. Descripción del funcionamiento hidrológico natural de la marisma	9
3.1.2. Régimen hidrológico de los ríos vertientes a Doñana.....	11
3.1.3. Balance hídrico de las aguas subterráneas	16
3.1.4. Balance hídrico de la marisma y su hidroperiodo	18
3.2. CAMBIOS EN LA DINAMICA NATURAL DE LA MARISMA.....	19
3.2.1. Modificaciones de cauces y transformaciones en la marisma	19
3.2.2. Cambios en el funcionamiento hidrológico de la marisma	20
3.2.3. Alteración hidrológica de los ríos que vierten a la marisma	22
3.2.4. Balance hídrico de las aguas subterráneas en condiciones de explotación	25
3.2.5. Cambios en el balance hídrico de la marisma y su hidroperiodo.....	27
3.3. LA RESTAURACION HIDROLOGICA DE DOÑANA.....	27
3.3.1. Los intentos de restauración en la década de los ochenta	27
3.3.2. Nuevos intentos en la década de los noventa	30
3.3.3. El proyecto “Doñana 2005”	30
4. EL ESTUDIO DE LOS CAUDALES ECOLOGICOS.....	33
4.1. ENFOQUE TRADICIONAL DE MÉTODOS: TIPOS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES..	33
4.2. CAUDALES ECOLOGICOS EN DOÑANA: UN CASO PARTICULAR	35
4.2.1. Ambito espacial de los caudales ecológicos en Doñana	35
4.2.2. Un nuevo enfoque: de los métodos al marco de decisión.....	37
4.2.3. Proceso de formulación de la propuesta.....	37
4.3. APLICACIÓN DEL MARCO CONCEPTUAL	40
4.3.1. Relación hidrología-ecología	40
4.3.1.1. Hidrología vs conservación: modelo general	40
4.3.1.2. Hidrología vs vegetación.....	41
4.3.1.2. Hidrología vs vegetación vs aves	44
4.3.2. Marco legal de los caudales ecológicos en Doñana	46
4.3.2.1. Los caudales ecológicos dentro de un marco legal general	46
4.3.2.2. Marco normativo específico para Doñana	47
4.3.3. Formulación de la propuesta de caudales ecológicos en Doñana.....	48
4.4. PROPUESTA DE CAUDALES ECOLOGICOS EN EL AMBITO DE DOÑANA	50
5. CONCLUSIONES	55
6. RECOMENDACIONES FINALES	56
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	63

RESUMEN EJECUTIVO

En el capítulo 1 se sitúa la conservación de los humedales en el contexto de los usos crecientes del agua, con referencias expresas al caso de Doñana. Los usos del agua alteran una dinámica hidrológica de los humedales que acaba afectando a su funcionamiento y valores naturales. La conservación de estos sistemas naturales depende por tanto de garantizar unos aportes de agua al humedal. El nuevo ciclo de planificación hidrológica proporciona esta gran oportunidad de establecer formalmente las provisiones de agua para Doñana. En el capítulo 2 se concreta el ámbito espacial del estudio y los objetivos particulares del presente trabajo.

En el capítulo 3 se aborda la dinámica hidrológica de la marisma desde una perspectiva amplia que abarca las cuencas de sus ríos de influencia (la marisma de Doñana depende de los aportes externos al área protegida). Este análisis ha permitido conocer unos sistemas naturales muy dinámicos y activos, marcados en gran medida por eventos extremos y la variabilidad. No obstante, la marisma de Doñana ha sido profundamente modificada desde el punto de vista hidrodinámico. En este trabajo se ha completado la cronología de estos cambios desde 1850 hasta la actualidad, llegando a la conclusión de que hoy día recibe menos del 20% de los aportes en régimen natural. Este capítulo se ha completado con una síntesis cronológica de las iniciativas emprendidas para recuperar los aportes hídricos a la marisma. En tres décadas de intentos de restauración no han faltado algunos fracasos ni cambios de orientación, lo cual enriquece nuestra perspectiva y añade nuevas lecciones aprendidas.

En el capítulo 4 se aborda propiamente el estudio de los caudales ecológicos. Se realiza un rápido repaso de los métodos tradicionales de cálculo. No obstante, Doñana es particularmente compleja y los métodos rígidos y limitados. Por esta razón se aborda el estudio desde una nueva perspectiva que encaja mejor en los marcos de decisión. Se ha adoptado la aproximación ELOHA (Ecological Limits of Hydrologic Alteration), un marco científicamente robusto y flexible para evaluar y gestionar los caudales ecológicos, donde el conocimiento se organiza sistemáticamente dentro de un contexto de toma de decisión. La relación hidrología-ecología es clave para entender la dinámica de los ecosistemas, hábitats y especies. Entre los grupos biológicos destaca la vegetación por su importancia intrínseca, por el papel que desempeña para los diferentes grupos faunísticos y por su capacidad indicadora de cambios. Por esta razón se ha analizado la respuesta de la vegetación a los cambios hidrológicos en Doñana a través de modelización y análisis comparativo de cartografía temática. Para el periodo 1990-2004 algunas de las agrupaciones vegetales que necesitan más agua han reducido su superficie más del 60%, llegando en algún caso al 80% de reducción. Este conocimiento científico debe integrarse en una propuesta de caudales ecológicos que debe encontrar en última instancia la conformidad y coherencia entre los compromisos legales establecidos. Por esta razón se ha analizado el marco legal que restringen en gran medida las posibles opciones de caudales ecológicos en el ámbito de Doñana. La propuesta de caudales ecológicos para recuperar la integridad ecológica de Doñana debe ser la propia de su régimen natural de caudales. Así está establecido en el marco legal y lo confirman los estudios hidrológicos y ecológicos realizados al efecto. En el capítulo 5 se sintetizan las conclusiones más importantes del estudio

El capítulo 6 recoge las recomendaciones para la futura puesta en práctica de la propuesta de caudales ecológicos. La primera recomendación hace referencia a la necesidad de incorporar una propuesta de necesidades hídricas para Doñana en el plan hidrológico de la Demarcación del Guadalquivir. La segunda recomendación se refiere a la urgente necesidad de iniciar un proceso de concertación entre las partes interesadas que culmine con acuerdos y compromisos para implementar efectivamente la propuesta. La tercera recomendación insta a declarar en "Régimen de Protección Especial" los ríos y arroyos vertientes a Doñana, así como el sistema acuífero subyacente. Finalmente la cuarta recomendación hace referencia a la necesidad de recuperar óptimamente la conectividad fluvial y mareal de la marisma.

El documento termina con el capítulo 7 de referencias bibliográficas.

EXECUTIVE SUMMARY

In Chapter 1, wetlands conservation is analyzed in the context of the increasing water uses, with specific references to Doñana. Water uses alter the hydrological dynamics of wetlands which ultimately affects their functioning and natural values. Conservation of these natural systems depend, therefore, to ensure the contribution of the water needs to wetlands. The new water planning cycle provides a great opportunity to formally establish water supplies for Doñana. In Chapter 2 we define the spatial limits of this study and the specific aims of this work.

In Chapter 3 deals with the hydrological dynamics of the Doñana marshes, including the basins of the tributary rivers (Doñana depend on inputs from outside the protected area). This analysis has revealed some very dynamic natural systems, marked largely by the natural variability and water extreme events (droughts and floods). However, Doñana wetlands have been profoundly modified since the hydrodynamic point of view. In this work we develop the complete chronology of these changes from 1850 to present: actually Doñana receives less than 20% of the contributions in natural regime. This chapter is complete with a chronological summary of the initiatives undertaken to recover the input water to the marsh. In three decades of restoration efforts have not missed some failures or changes of direction, which enriches our perspective and add new lessons learned.

In Chapter 4 deals with the proper study of ecological flows. There is a brief review of traditional methods of calculation. However, Doñana is particularly complex, and these traditional methods are rigid and limited. For this reason in this study we adopt a new perspective that fits better into the decision making. The ELOHA approach (Ecological Limits of Hydrologic Alteration) is a scientifically robust and flexible framework for assessing and managing environmental flows, where knowledge is systematically organized within a context of decision making. The relationship between hydrology and ecology is important to understanding the dynamics of ecosystems, habitats and species. Vegetation is a good performance indicator for its intrinsic importance and the role played on the various animal groups. For this reason we have analyzed the vegetation response to hydrological changes in Doñana through modeling and analysis of thematic mapping. For the period 1990-2004 some of the species that need more water have reduced their surface area more than 60%, in some cases reaching 80% reduction. This knowledge should be incorporated in the ecological flow proposals which must find the ultimate conformity and consistency among the legal set. For this reason we have analyzed the legal framework that greatly restrict the possible options for environmental flows in the area of Doñana. The proposal to restore the ecological integrity should be the Doñana's natural flow. Is well established in the legal framework and confirm the ecological and hydrological studies undertaken for the purpose. Chapter 5 summarizes the major findings of the study

Chapter 6 contains recommendations for future implementation of the proposed ecological flow regimes. The first recommendation refers to the need to incorporate Doñana's water needs in the Guadalquivir Water Management Plan. The second recommendation concerns the urgent need to initiate a consultation process involving all stakeholders leading to agreements and commitments to effectively implement the proposal. The third recommendation called to declare a "Special Protection Status" for the streams, rivers coming into Doñana and the underlying aquifer system. The fourth recommendation concerns the need to optimally recover the connectivity of the river and tidal marsh.

Finally, the document ending with Chapter 7 of references.

1. INTRODUCCION

Los graves problemas de los humedales

Durante la segunda mitad del siglo 20 fueron recopiladas estadísticas alarmantes sobre la destrucción de humedales. Incluso admitiendo la falta de precisión en las cifras globales, prácticamente la mitad de la superficie de estos ecosistemas ha desaparecido respecto a las existentes a comienzo de siglo (IUCN, 2000). El caso de España corrobora estas cifras internacionales: el Inventario Español de Zonas Húmedas puso de manifiesto la desaparición del 60% de los lagos y humedales, la mayoría entre 1950 y 1990 (MOPU, 1990). De las 280.228 ha documentadas al principio del siglo XX, solamente fueron registradas durante el inventario 114.100 ha.

A pesar de que la presión sobre los humedales ha descendido en las últimas décadas, la mayoría de los factores que motivaron su transformación persisten aún en muchos lugares. Estas amenazas engloban una larga lista de actividades que directa o indirectamente afectan los componentes físicos, químicos y biológicos de los humedales, poniendo en grave peligro su conservación (MMA, 2000).

Doñana en una difícil situación

Como en otros ámbitos peninsulares, en la cuenca del río Guadalquivir se pueden observar las consecuencias del exceso de presiones sobre los humedales, con un claro ejemplo en el paradigmático Espacio Natural de Doñana. Con la finalidad de mejorar el desarrollo socioeconómico de los habitantes de esta zona, este espacio estuvo sometido durante décadas a una intensa intervención pública, al amparo de un modelo de desarrollo basado en la profunda transformación del territorio (sistemas de drenaje, diques y canales artificiales, infraestructura para control de avenidas, detracciones de aguas superficiales y subterráneas). Más allá de las expectativas y logros obtenidos, este modelo ha introducido cambios hidrológicos y ecológicos a gran escala que ponen en claro riesgo el patrimonio natural y cultural de Doñana.

Muchas causas, pero entre ellas alguna muy relevante

Se han realizado múltiples diagnósticos para identificar el origen y magnitud de los problemas que amenazan a Doñana. La reducción de los aportes a la marisma ha sido generalmente identificada como una de las principales causas del cambio ecológico, y un aspecto clave para la recuperación integral de la marisma (CIED, 1992; MAPA, 1994; MMA, 1999; MMA, 2001; entre otros).

Plantear soluciones abordando las causas

Tal como quedó reflejado en las conclusiones de la 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana (MMA, 1999), la restauración ecológica de la marisma sólo podrá alcanzarse a medio y largo plazo si se garantizan tanto sus aportes hídricos como los del conjunto de ríos y arroyos que vierten a la misma (en condiciones naturales el río Guadiamar, La Rocina, El Partido, etc.). En este contexto, la determinación de los caudales ecológicos supone cuantificar aquellos volúmenes que serán reservados para la conservación ambiental (de los propios ríos y de la marisma) frente a los diferentes usos del agua.

Nuevos nombres para viejos problemas

A pesar de las diferentes acepciones acuñadas hasta la fecha (regeneración hídrica, restauración hidroecológica, etc.), el “agua que necesita la marisma para su conservación” ha sido un problema permanente en la gestión de Doñana, como reflejan los diferentes Planes Rectores de Uso y Gestión del Parque Nacional (Real Decreto 2421/1984, Real Decreto 1772/1991 y Decreto 48/2004). En nuestro marco legal este concepto del “agua necesaria para la conservación” se presenta bajo la denominación de “caudales ecológicos” o “demandas hídricas” en el caso de humedales¹.

Dónde y cuándo...., ahora es una gran oportunidad

El artículo 18 del Real Decreto 907/2007 del Reglamento de Planificación Hidrológica establece que las necesidades de agua de las zonas húmedas se determinarán en el plan hidrológico de la cuenca. Dentro del calendario previsto por la Directiva Marco del Agua, el Plan Hidrológico de la Demarcación del Guadalquivir deberá estar finalizado en diciembre de 2009, es decir, restan escasos meses para su aprobación.

¿Qué pretende este trabajo?

Sin menoscabo de los procesos de participación y concertación previstos en la legislación para la puesta en práctica de los caudales ecológicos, urge iniciar el debate científico sobre la cuantificación de las necesidades hídricas de Doñana² en el contexto de su recuperación y conservación. El plan hidrológico de la demarcación permite integrar las necesidades ambientales y los usos, incluyendo tanto las aguas subterráneas como aquellas otras fuera del ámbito espacial del área protegida pero con gran influencia sobre la misma (caudales ecológicos de los ríos vertientes a la marisma.)

Este estudio lanza unas primeras cifras tentativas de caudales ecológicos de los ríos vertientes a la marisma y las necesidades hídricas de la misma, con la intención de iniciar el debate técnico y científico y abordando con coherencia los criterios de sostenibilidad en las cuencas hidrológicas vertientes a Doñana.

¹ En el Real Decreto 907/2007 del Reglamento de Planificación Hidrológica se hace referencia a la obligatoriedad de determinar las necesidades hídricas de los humedales, mientras que en la Orden ARM/2656/2008 por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica se desarrollan los conceptos y métodos para la determinación de las mismas.

² Según el artículo 57 (7) de la Ley 46/1999, los caudales ecológicos o demandas ambientales no tendrán el carácter de uso (...), debiendo considerarse como una restricción previa que se impone con carácter general a los sistemas de explotación (a excepción de la regla sobre supremacía del uso para abastecimiento de poblaciones). Estas demandas ambientales deben introducirse en el balance de recursos de las cuencas (de ahí la importancia de su cuantificación), de tal forma que las disponibilidades obtenidas en estas condiciones son las que pueden, en su caso, ser objeto de asignación y reserva para los usos existentes y previsibles.

2. AMBITO Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Tal como quedó recomendado por el Comité Internacional de Expertos (CIED, 1992), las aguas de Doñana deben ser entendidas y estudiadas en el contexto de las cuencas hidrográficas que tienen influencia sobre la misma. Este enfoque requiere de un ámbito espacial de análisis que supera los límites del Espacio Natural de Doñana. El ámbito del presente estudio se extiende a este gran sistema hidrológico de referencia, incluyendo específicamente la cuenca de los ríos vertientes a Doñana (cuencas del río Guadiamar, La Rocina, del Partido, Cañada Mayor, etc.), así como la componente subterránea vinculada expresamente a la Unidad Hidrogeológica 05-51 Almonte-Marismas.

Con la realización del presente trabajo se pretende recopilar y sintetizar el conocimiento hidrológico existente en torno a las marismas de Doñana, con objeto de definir propuestas de caudales ecológicos vinculadas a sus objetivos de conservación y formuladas a partir de la mejor información existente. De manera particular se analiza la relación de interdependencia que existe entre la marisma y los ríos vertientes a la misma, de tal forma que estas propuestas de caudales ecológicos sean coherentes entre sí y permitan unas condiciones hidrológicas adecuadas para conservar a largo plazo los valores naturales de Doñana, y por extensión, sus valores culturales y territoriales.

3. DINAMICA DE LA MARISMA Y SUS RIOS DE INFLUENCIA

3.1. DINAMICA EN CONDICIONES NATURALES

3.1.1. Descripción del funcionamiento hidrológico natural de la marisma.

En el funcionamiento hidrológico de la marisma de Doñana intervienen un variado entramado de ríos, arroyos y lagunas, donde confluyen además aguas de diferente procedencia (incluida la inundación mareal y las aguas subterráneas del acuífero subyacente). Conocer este funcionamiento es un primer paso indispensable para abordar el estudio de las necesidades hídricas de la marisma de Doñana (figura 1).

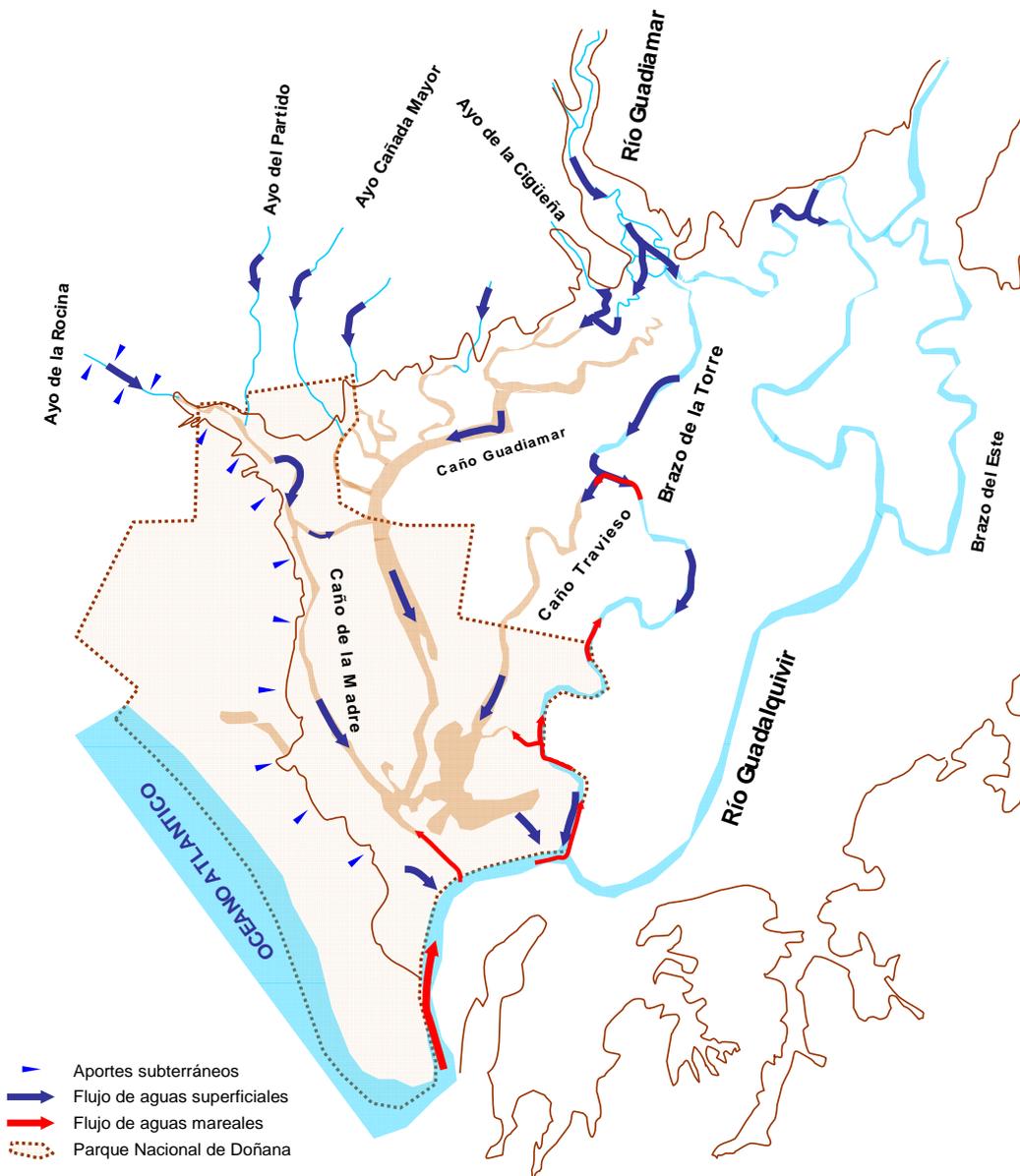


Figura 1. Esquema del funcionamiento natural de las marismas de Doñana. FUENTE: Original en ICONA, 1994. Modificado por el autor.

Como se ha mencionado anteriormente, las aguas que confluían de forma natural a la marisma estaban constituidas fundamentalmente por los aportes de origen superficial (ICONA, 1994; MMA, 2001; García Novo y Marín, 2005; García Viñas *et al*, 2005), incluyendo los aportes parciales del río Guadalquivir, Guadiamar y las aportaciones de un conjunto de arroyos menores en la parte noroccidental (Arroyo de La Rocina, Arroyo del Partido y Cañada Mayor, entre otros).

A pesar de que el río Guadalquivir es con diferencia el río más grande de la región (aprox. 7000 hm³/año), su influencia directa en la marisma de Doñana era solo parcial, ya que sus aguas solo entraban en momentos de crecidas a través del derramadero natural del Brazo de la Torre en la Vuelta de la Arena y superando los levés naturales de la Montaña del Río (Vanney, 1970; ICONA, 1994; Bayán y Dolz, 1995). En cambio, los principales aportes de agua a la marisma provenían del río Guadiamar (aprox. 200 hm³/año). Este río desbordaba en varios brazos a su llegada a la Junta de los Caños, entrando sus aguas a la marisma a través del Caño Guadiamar o bien a través del Caño Travieso en la Vuelta de la Arena. Aproximadamente las dos terceras partes del agua entrante a la marisma se debían al río Guadiamar (TyP, 1996).

Los importantes volúmenes procedentes del régimen de crecidas de estos ríos se veían complementados con los aportes directos de los arroyos del sector noroccidental. A pesar de sus reducidas cuencas, el arroyo de la Cigüeña, I Portachuelo, Juncosilla y Cañada Mayor desembocaban directamente sus aguas al caño Guadiamar, con una aportación conjunta de todos ellos en torno a 30 hm³ (TyP, 1996). Por su parte, el Arroyo de la Rocina y Arroyo del Partido aportan unos volúmenes mayores (en torno a 50 hm³/año cada uno), con el valor añadido de los aportes estratégicos que suponen las descargas del acuífero incluso durante el estiaje. De esta forma podían permanecer ciertas áreas inundadas de un año para otro, como la antigua Retuerta con sus extensos carrizales y eneaes descrita por Chapman a finales del siglo XIX (MMA, 2001).

Finalmente dentro de las aportaciones superficiales también se deben incluir las entradas periódicas que recibía la marisma por el régimen de mareas del Guadalquivir. A través de las escotaduras naturales de la Montaña del río y de los derramaderos del Brazo de la Torre, las mareas entraban en la marisma inundando los lucios de Los Ansares, del Membrillo y los caños de las Nuevas, de Brenes y de la Figuerola (Valverde, 1960; Vanney, 1970; MMA, 2001). Esta influencia mareal permitía además el contacto e intercambio de diversas comunidades biológicas entre la marisma y la ría del Guadalquivir en determinadas épocas del año, fenómeno ecológico de vital importancia para la distribución y proliferación de las diferentes especies de la comunidad de peces (Valverde, 1960; Fernández Delgado *et al*, 2000).

En cuanto a las aguas subterráneas, el Espacio Natural de Doñana se asienta sobre un sistema acuífero (Unidad Hidrogeológica 05.51 Almonte-Marismas) que se extiende por un territorio próximo a los 2500 km², con ligeras diferencias según los autores (IGME, 1992; Custodio y Palancar, 1995; Custodio *et al*, 2006 (a); Custodio *et al*, 2006 (b)). A pesar de que el basamento impermeable de la cubeta de la marisma impide prácticamente la conexión directa con el acuífero, existen afloramientos superficiales del acuífero en la periferia de la marisma (figura 2), hacia el Este (Ecotono de La Vera-Retuerta) y hacia el Norte (ecotono Norte). Estas descargas han sido cifradas respectivamente en rangos de valor que oscilan entre 25-32 hm³/año para la Vera y 10-15 hm³/año para el ecotono Norte (Custodio *et al*, 2006 (b)). Además del aporte que suponen para la marisma en épocas de estiaje, estas descargas han permitido la formación de lagunas temporales características de estos ambientes (Hondón y Sopotón) así como charcos y surgencias desde donde fluyen algunos caños que desaguan en las marismas (García Novo y Marín, 2005). Otro ejemplo eran lagunas

temporales alimentadas también por surgencias del acuífero que existían más al norte hasta mediados del siglo XX, entre El Rocío y el Arroyo del Partido.



Figura 2. Las descargas del acuífero en la zona de contacto entre las arenas y la marisma dan lugar a un ecotono de gran importancia ecológica en Doñana. En la imagen se observan las “pajareras” sobre alcornoques de gran porte cuyas raíces alcanzan las aguas freáticas.

3.1.2. Régimen hidrológico de los ríos vertientes a Doñana

El régimen hidrológico natural, con toda su gama y distribución de caudales, es un factor de control que marca en gran medida las pautas de cambio de los ecosistemas (Richter *et al*, 1996; Poff *et al*, 1997; Richter *et al*, 1997). Pese a la importancia de todos estos diferentes tipos de caudal (crecidas de diferente magnitud y duración, episodios de estiaje, etc.) en la configuración de los marcos ambientales (competencia, depredación, descomposición, colonización, ciclo de nutrientes, hidrodinámica, etc.), puede decirse que algunos “tipos de caudal” ejercen un papel especialmente destacado dentro de la dinámica ecosistémica (Bunn y Arthington, 2002; King *et al*, 2003; Olden y Poff, 2003; Richter *et al*, 2006).

Los caudales mínimos por ejemplo, establecen condiciones limitantes del hábitat para muchas especies a través de parámetros hidráulicos como la velocidad o la profundidad, marcando la diferencia ecológica clave en la diferenciación de los ríos permanentes y temporales. Cuando estos caudales mínimos ocurren de forma natural (incluso el desecado del río), se trata de un mecanismo de control que permite la puesta en práctica de estrategias adaptativas desarrolladas por las especies autóctonas a lo largo de su historia evolutiva (Poff *et al*, 1997; Bunn y Arthington, 2002; Lytle y Poff, 2004). Si los episodios de caudales bajos se mantienen dentro de su rango natural de ocurrencia, las especies autóctonas pueden persistir en estas

condiciones de estrés, mientras que la falta de adaptación de las especies foráneas podría llevarlas a su exclusión (Poff *et al*, 1997). En estas circunstancias de caudales bajos limitantes, la diversidad espacial y la conectividad de los refugios es un aspecto físico clave.

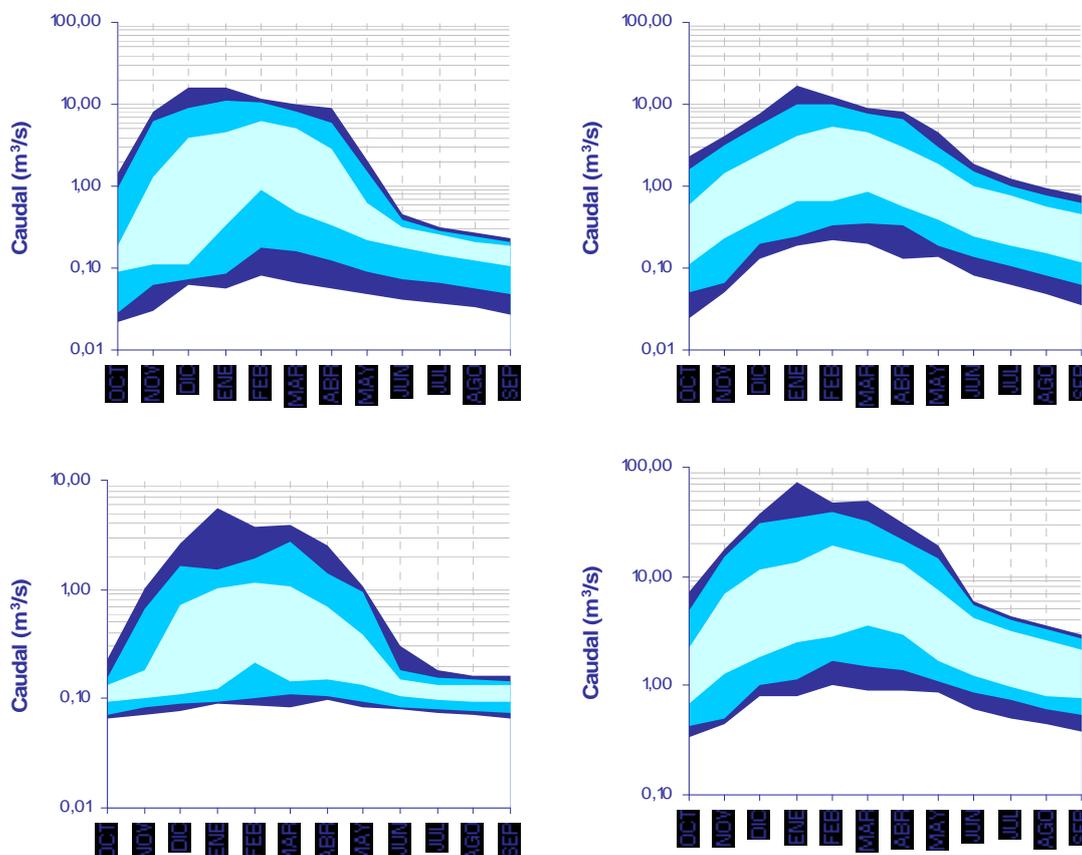


Figura 3. Patrones hidrológicos en régimen natural para el Arroyo de la Rocina (superior izquierda), Arroyo del Partido (superior derecha) y río Guadiamar en cabecera (inferior izquierda) y Brazo de la Torre (inferior derecha). Las diferentes tonalidades de azul muestran las probabilidades de ocurrencia de los caudales mensuales (azul añil rango entre el percentil 5-95; azul cielo rango entre el percentil 10-90 y azul turquesa claro rango entre el percentil 25-75). FUENTE: Elaboración propia a partir de datos Sacramento (CHG, 1998).

El análisis de frecuencias para una serie de caudales muestra la distribución y valores característicos del rango natural de caudales (tanto caudales mínimos y sus correspondientes episodios de estiaje como su patrón estacional). En el caso de los ríos y arroyos vertientes a la marisma de Doñana, se han elaborado las gráficas de la figura 3 a partir de los datos mensuales del modelo Sacramento³ para el periodo 1942-1997 (CHG, 1998). Estas gráficas muestran los patrones estacionales de los caudales de base para el Arroyo de La Rocina, Arroyo del Partido, río Guadiamar en la estación de aforos EA 56 en Gerena y río Guadiamar en su tramo inferior en su punto de entrada al Brazo de la Torre. Como se puede observar, estos ríos siguen un mismo patrón en su régimen de caudales, presentando un periodo de aguas altas para los meses de octubre a mayo que se alterna con un periodo de acusado de estiaje entre junio y septiembre.

³ La escasa información foronómica de los ríos vertientes a la marisma dificulta el estudio de sus condiciones naturales. La utilización de modelos precipitación-escorrentía permite una aproximación al conocimiento de tales condiciones. Los datos presentados del modelo Sacramento (CHG, 1998) han sido identificados como los más adecuados, después de analizar los resultados del mismo con los equivalentes del modelo SIMPA (CEDEX, 2007) y los datos de las estaciones de aforo de las cuencas vertientes.

Es interesante señalar que según los datos del modelo ninguno de estos ríos se secaba de forma natural, con caudales superiores a 200 l/s en el caso del río Guadiamar a su entrada a la marisma, y superiores a 20 l/s en el caso de la Rocina y Partido. Esta conclusión acerca de la perennidad de estos ríos vertientes a la marisma coincide con la presencia de determinados grupos biológicos. Así, en la cabecera del río Guadiamar han sido encontrados ejemplares de bivalvos (*Anodonta anatina* y *Unio delphinus*) testimonios de estas condiciones de permanencia del agua, como mínimo en algunos reductos del lecho (figura 4).

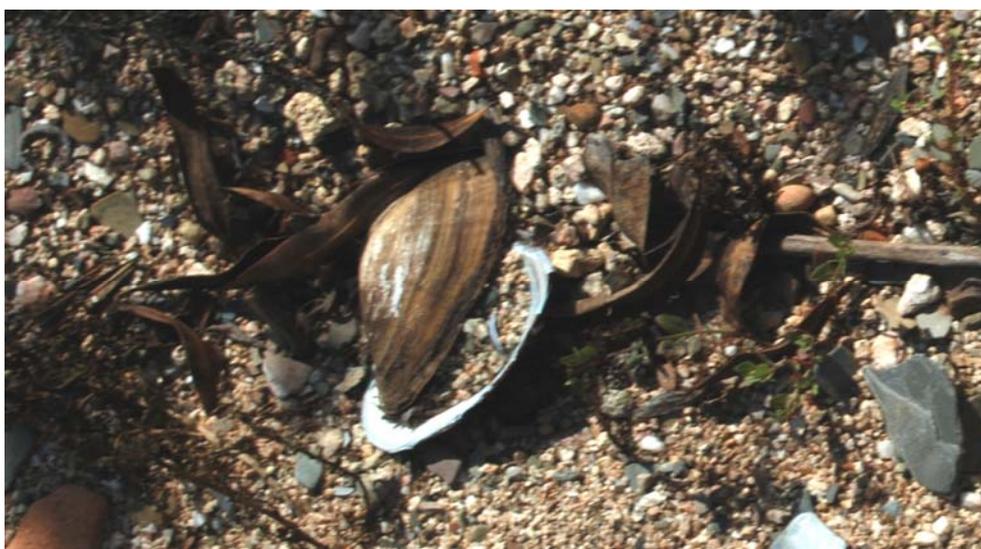


Figura 4. La presencia de determinados grupos biológicos es un testimonio de unas condiciones hidrológicas permanentes o casi permanentes en los ríos donde habitan. En la fotografía se observan las conchas del bivalvo *Unio delphinus* encontradas en la cabecera del río Guadiamar en 2008.

Por otra parte, desde el punto de vista de la influencia del régimen de caudales en la dinámica ecológica, las crecidas constituyen probablemente los eventos naturales de mayor importancia (Junk *et al*, 1989; Bayley, 1995; Junk, 1999; Stanford *et al*, 2005). Cuando tiene lugar una crecida, se produce un mecanismo intenso de transferencia de materiales y energía entre el río y su ribera, y en este caso entre el río, la marisma y el mar. Estos eventos activan la dinámica temporal de los ambientes acuáticos fuera del cauce principal y tienen lugar diferentes perturbaciones en los efectivos de las especies, etc. (Stanford *et al*, 2005). Se puede decir por tanto que el régimen de crecidas de un sistema natural (muy especialmente en el caso del clima mediterráneo) es un elemento indispensable para la correcta dinámica ecosistémica del mismo.

Como se ha mencionado anteriormente, el río Guadalquivir también aportaba sus aguas a la marisma en los momentos de crecida. A pesar de que no conocemos el valor umbral a partir del cual se producían estas entradas⁴, la inundación de la marisma de Doñana podría comenzar a partir de los 2000 m³/s y ser inundaciones generalizadas a partir de 3000-4000 m³/s (Del Moral, 1991). Para hacernos una idea

⁴ Las "cortas" realizadas en el curso bajo del río Guadalquivir producen diversos efectos que conllevan a una disminución de los desbordamientos en la marisma. Por ejemplo, el efecto más inmediato y directo de la corta Fernandina (1815) fue la desconexión del punto de entrada del río Guadalquivir en el Brazo del Torre. No obstante, con estas cortas se producían otros efectos indirectos como el incremento de la pendiente media del cauce central del Guadalquivir y sus correspondientes tasas erosivas. Esto da lugar a un proceso de incisión del cauce y al aumento relativo de las alturas de las motas del río.

del régimen de inundaciones, resulta ilustrativo observar los hidrogramas del río Guadalquivir para el periodo 1912-1930 en la estación de aforo número 8 en Cantillana (figura 5) de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA).

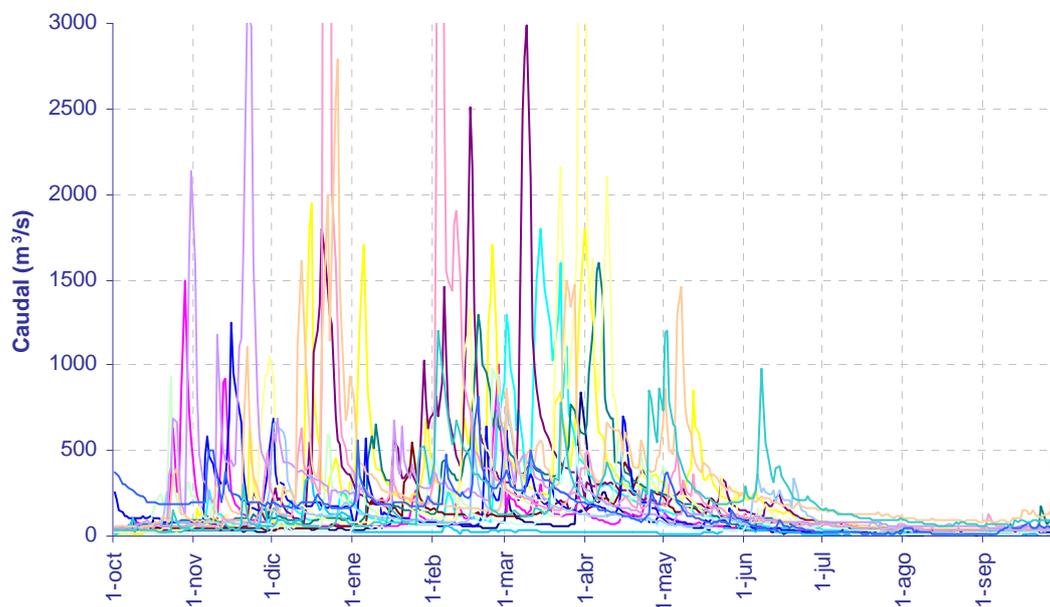


Figura 5. Régimen natural de crecidas del río Guadalquivir en Cantillana para el periodo 1912-1930 en la estación de aforo EA 8. FUENTE: Elaboración propia a partir de datos ROEA.

Estos hidrogramas muestran episodios de crecidas recurrentes durante los meses de otoño e invierno, eventos que se producían con un periodo de recurrencia de unos 2 años y presentaban en promedio una duración de 6 días. No obstante, crecidas superiores a estos valores son muy frecuentes en este río. Vanney (1970) destaca el número de crecidas superiores a 4000 m³/s como rasgo particular y diferenciador del Guadalquivir frente a otros ríos de España y Portugal: entre 1923 y 1952 se contabilizan 12 crecidas superiores a 5000 m³/s y de 1923 a 1963, 14 años presentaron un caudal punta superior a 4000 m³/s.

En cuanto al régimen de crecidas del río Guadiamar, los datos de aforos para su análisis son mucho más escasos. Por esta razón se estudiaron los caudales de avenida del río Guadiamar a partir de la aplicación de un modelo numérico del comportamiento hidrológico de la cuenca (Dolz *et al*, 2001). Según los resultados de este estudio, los caudales de avenida para un periodo de retorno 10 años fueron establecidos en 658 m³/s, mientras que para un periodo de retorno de 25 años el caudal correspondiente fue de 937 m³/s.

Además de la probabilidad de ocurrencia de los caudales de avenida, en el marco del presente trabajo interesa conocer aspectos adicionales del régimen de crecidas (no sólo de las crecidas máximas), como es su frecuencia según diferentes magnitudes, duración de eventos, momento de ocurrencia, etc. Solamente para efectos ilustrativos se han analizado los datos la estación de aforo EA 76 del río Guadiamar en Aznalcázar, abarcando el periodo 1967-2007 a pesar de los numerosos años incompletos (figura 6). Según esta información, prácticamente cada año ocurrían crecidas superiores a 20 m³/s, con crecidas que superaban los 70 m³/s para un periodo de retorno de 2 años. En promedio estos eventos duraban unos diez días,

llegando en algunos casos a superar el mes de duración. De nuevo es el periodo entre noviembre y mayo donde se producen las crecidas, no existiendo este fenómeno en los meses de estiaje.

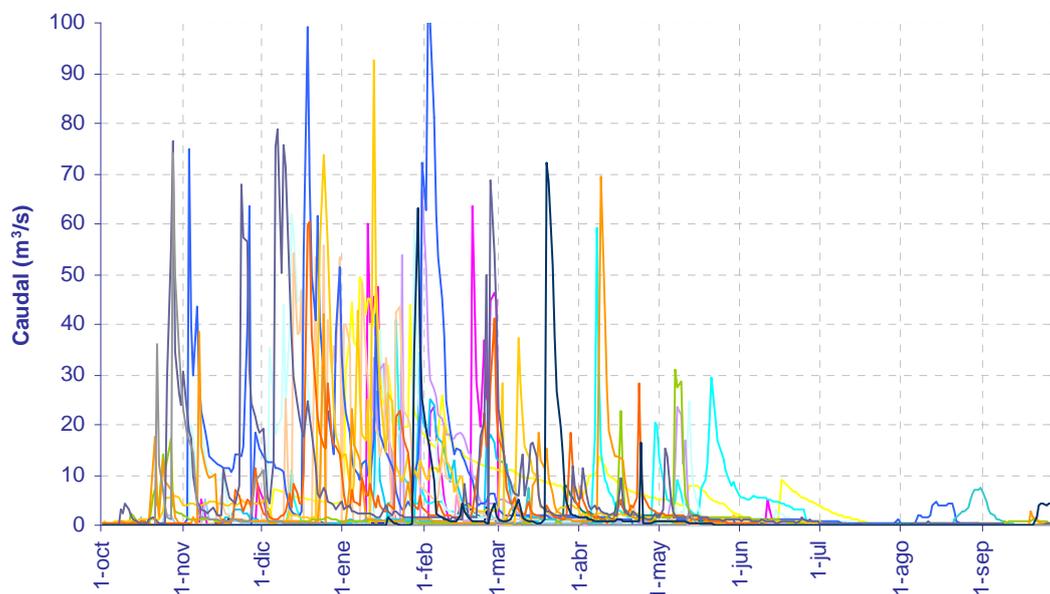


Figura 6. Régimen natural de crecidas del río Guadiamar en Aznalcázar (estación de aforo EA 76) para el periodo 1967-2006. FUENTE: Elaboración propia a partir de datos ROEA.

Finalmente, otro aspecto de interés para ilustrar su importancia relativa en el balance de la marisma, está relacionado con las aportaciones totales de los tributarios más significativos. En la tabla 1 se muestran las aportaciones características en régimen natural del río Guadiamar, Arroyo de La Rocina y Arroyo del Partido (CHG, 1998). Como se puede observar, el río Guadiamar en el año medio aportaría las dos terceras partes de los aportes que llegan a la marisma, mientras que el Arroyo de la Rocina y Partido presentan un comportamiento muy similar, aportando cada uno algo más del 15%. Estos valores son en términos generales coincidentes con otras fuentes consultadas (MOPU, 1993; TyP, 1999; CEDEX, 2007).

Tabla 1. Aportaciones del Arroyo La Rocina, Arroyo del Partido y Guadiamar según años hidrológicos característicos definidos por el percentil 25 (año seco), percentil 50 (año mediano) y percentil 75 (año húmedo). FUENTE: Elaborado a partir de datos del modelo Sacramento (CHG, 1998)

	AÑO SECO	AÑO MEDIO	AÑO HUMEDO
Arroyo La Rocina	21,2	52,9	77,0
Arroyo del Partido	18,3	52,6	77,7
Río Guadiamar en Brazo de la Torre	75,4	218,3	342,7

A escala más local, los aportes medios anuales para la Cañada Mayor han sido cifrados en 8 hm³, 16,7 hm³ para el Arroyo de la Cigüeña, 2,7 hm³ para el Almirante y Sajón y 2 hm³ para la Juncosilla (TyP, 1999).

3.1.3. Balance hídrico de las aguas subterráneas

Debido a la extensión y complejidad del sistema Almonte-Marismas, la determinación de los diferentes elementos de su balance hídrico resulta una difícil tarea no exenta de incertidumbres. A pesar de que este acuífero ha sido estudiado repetidamente durante las últimas tres décadas (IGME en 1976, 1982, 1989, 1992; CHG; 1995; Suso y Llamas, Custodio et al, 2006 b), los resultados obtenidos párale mismo han variado a lo largo del tiempo según las diferentes hipótesis de cálculo. No obstante, parece ser que existen unos valores convergentes, que en cualquier caso son inferiores a las estimaciones realizadas en los inicios del Plan Almonte-Marismas (figura 7).

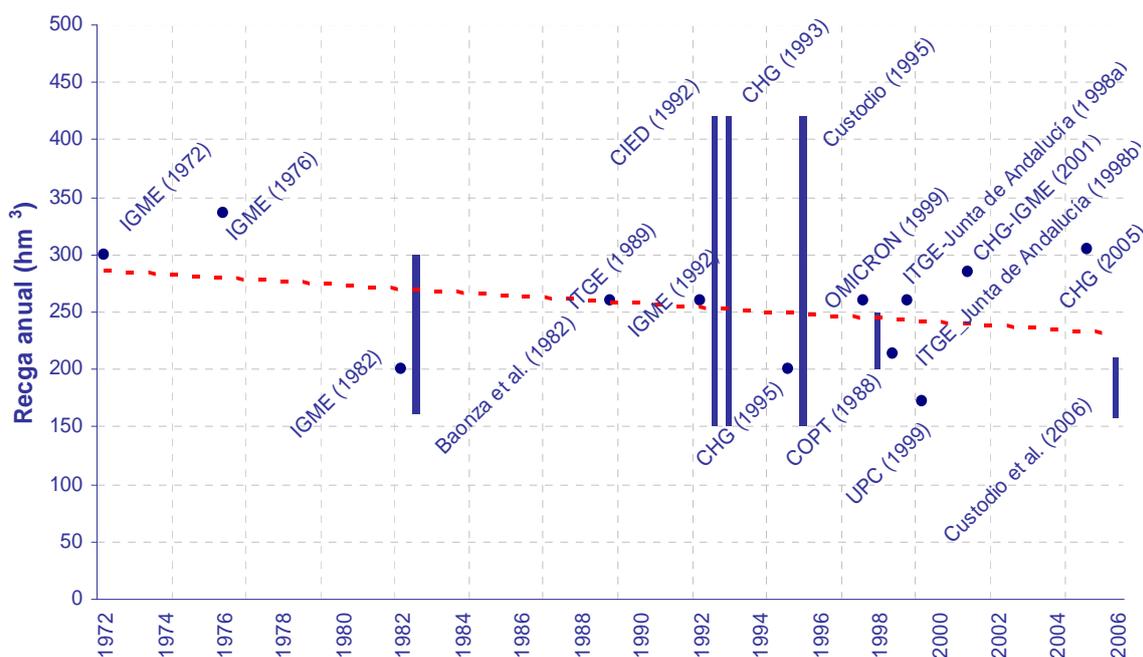


Figura 7. Diferentes estimaciones de la recarga media anual del acuífero Almonte-Marismas. Citas en las referencias bibliográficas. FUENTE: Elaboración propia.

A pesar de los numerosos estudios a los que se hace referencia anteriormente, pocos de ellos presentan valores desagregados, indicando los volúmenes correspondientes para cada uno de los diferentes ecosistemas acuáticos vinculados al acuífero. En la figura 8 se presentan los resultados del balance hídrico realizado para el sistema acuífero Almonte-Marismas y sus diferentes vías de descarga (Custodio *et al*, 2006 b).

Según los resultados del balance hídrico analizado por Custodio y colaboradores, el valor de la recarga media interanual para un área de recarga de 2700 km² se sitúa entre 158 y 210 hm³/año. En el caso de las salidas del agua del sistema, la vegetación produce una evapotranspiración freática cifrada entre 18-29 hm³. Las descargas en los cauces de los arroyos próximos a la marisma suponen entre 31-43 hm³ en el caso de La Rocina y la horquilla entre 31-39 hm³ para los otros arroyos del Norte de la marisma (Partido, Cañada Mayor, etc.). Otras salidas del sistema alimentan el ecotono de La Vera (25-32 hm³) y ecotono Norte (10-15 hm³). Finalmente se encuentran las salidas difusas al mar a lo largo de la costa, o bien a través de pequeños manantiales en el acantilado arenoso costero (43-52 hm³).



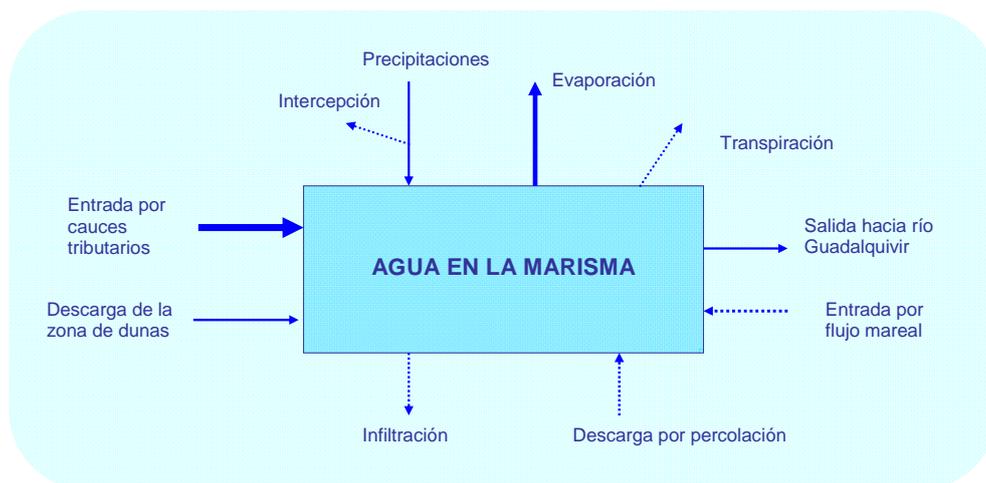
Figura 8. Balance hídrico en régimen natural del sistema acuífero Almonte-Marismas. FUENTE: Original en Custodio et al. 2006a.

Finalmente se debe considerar la variabilidad interanual en este balance medio, donde los años secos, p.e., con precipitación menor de 300 mm, la recarga que recibe el acuífero podría ser prácticamente nula (Suso y Llamas, 1990).

CUADRO 1

Componentes del balance hídrico de la marisma (original en García Viñas et al, 2005)

Para describir el ciclo hidrológico de la marisma en términos cuantitativos, se debe realizar un balance hídrico donde se contabilicen las entradas de agua a la misma, las salidas del sistema y la evolución de las reservas almacenadas.



El balance hídrico se representa mediante la siguiente ecuación:

$$P - ET + I_s + I_a = E_s + F_a + D + \Delta R$$

Donde P: Precipitación en el área de la cubeta; ET: Evapotranspiración; I_s : Importación de agua exterior; I_a : Importación subterránea de agua exterior; E_s : Escorrentía superficial que sale de la marisma; F_a : Fugas subterráneas fuera del sistema; D: Demanda satisfecha; ΔR : Variación en las reservas hídricas de la marisma.

3.1.4. Balance hídrico de la marisma y su hidroperiodo.

Cuando se habla del balance hídrico de un humedal se hace referencia a la cuantificación de sus entradas y salidas de agua (cuadro 1). Por su parte, el hidroperiodo se refiere a la distribución temporal del agua en el humedal, o lo que es lo mismo, periodo durante el cual el humedal se encuentra en condiciones de encharcamiento.

El hidroperiodo de los humedales es una herramienta clave para su conservación, pues representa fielmente las modificaciones en la cantidad del agua del humedal (es una expresión gráfica del balance hídrico), refleja su distribución temporal y por extensión da una idea de las taxocenosis y procesos ecológicos asociados al mismo (Mitsch y Gosselink, 2000; Díaz-Paniagua *et al*, 2005; Batzer y Sharitz, 2006; Foster, 2007; Waterkeyn *et al*, 2008). Por mencionar un ejemplo, la germinación de las semillas de las especies vegetales dependerá de las condiciones de encharcamiento. Efectivamente, los mecanismos de selección y ajuste adaptativo operados durante miles de años, han dimensionado los periodos de fertilidad de las plantas (y también de los animales) en relación a la época en que ocurren las fases de inundación. Por esta razón, los cambios en la estacionalidad del hidroperiodo pueden implicar consecuencias notables sobre la vegetación.

La marisma de Doñana es un sistema complejo desde el punto de vista hidrológico, donde aún existen carencias de información a la hora de cuantificar determinados parámetros que aparecen en la ecuación del balance (Casas y Urdiales, 1995; OMICRON, 1999; AYESA, 2004). No obstante, a partir del programa de seguimiento y control del Parque Nacional de Doñana y otras iniciativas similares, durante la última década se han adquirido datos básicos que permiten realizar un balance hídrico de la marisma con bastante fiabilidad, al menos con los elementos más significativos del sistema (García Viñas *et al*, 2005; Custodio *et al*, 2006).

A pesar de que actualmente podamos conocer mejor las condiciones hidrológicas naturales, el hidroperiodo de la marisma depende tanto del balance hídrico como de las características morfométricas de la cubeta (la mitad de agua con la mitad de superficie podría proporcionar el mismo hidroperiodo). Como se comentará posteriormente, la marisma de Doñana ha sufrido importantes modificaciones a lo largo del último siglo, que inevitablemente han cambiado su morfometría. No obstante, han sido descritas las características básicas de la marisma por diferentes autores (Valverde, 1960; ICONA, 1994; Casas y Urdiales, 1995; MMA, 2001; etc.).

Según el Plan de Aguas del Parque Nacional (Casas y Urdiales, 1995), el conjunto de las aguas acumuladas suponía la progresiva inundación de la marisma a partir de los meses de octubre-noviembre, hasta alcanzar su máximo en los meses de enero o febrero (figura 9). Cuando la cubeta llega a su máxima capacidad (aproximadamente 135 hm³), el excedente de las aguas mezcladas se evacuaba al río Guadalquivir a través de los caños naturales propiciados por las escotaduras presentes en el levé de comunicación entre el río Guadalquivir y los caños interiores de la marisma (Montaña del Río). A partir de primavera, las pérdidas por evaporación no eran compensadas por los aportes fluviales, llegando a desecarse la marisma bien entrado el verano.

El balance realizado en el Plan de aguas también indica que a lo largo del ciclo anual se produce un periodo de total sequía estival que puede oscilar entre tres semanas y tres meses. Solamente cuando se tenían lugar dos ciclos húmedos excepcionales y sucesivos se producía el fenómeno de “junta de las aguas”.

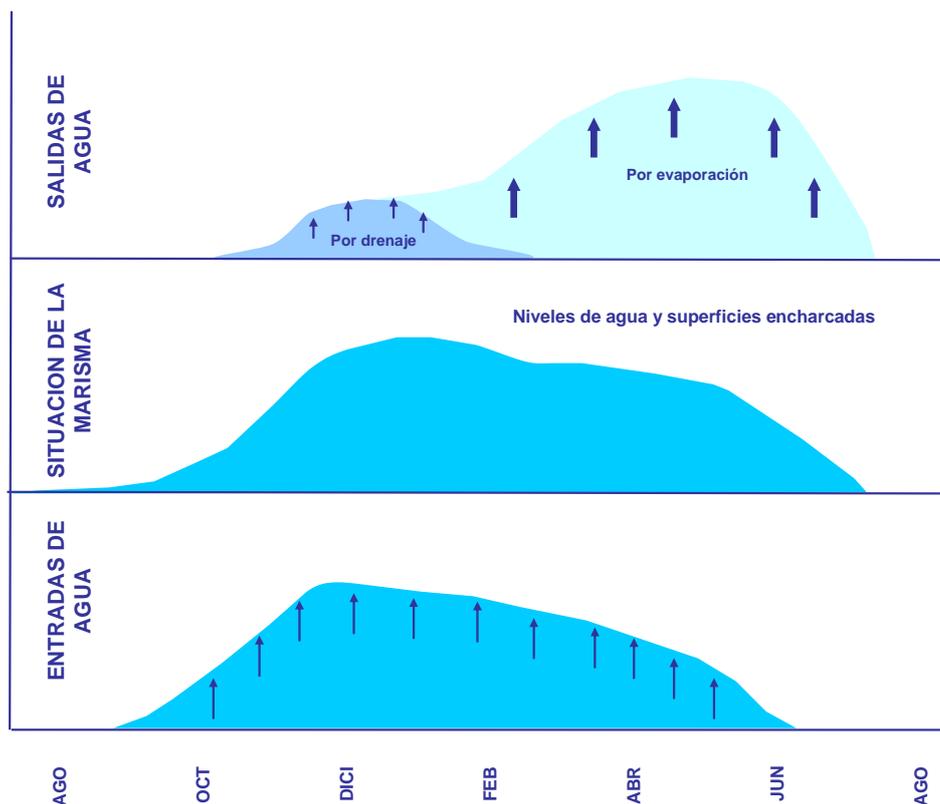


Figura 9. Entradas y salidas de agua en las marismas de Doñana, con su hidroperiodo característico. FUENTE: Original en Casas y Urdiales. 1995.

3.2. CAMBIOS EN LA DINAMICA NATURAL DE LA MARISMA

3.2.1. Modificaciones de cauces y transformaciones en la marisma

Una de las primeras causas que contribuyeron a la alteración del régimen hidrológico de la marisma tiene su origen en las obras sobre el río Guadalquivir, llevadas a cabo durante los últimos siglos para mejorar sus condiciones de navegabilidad (Vanney, 1970; Menanteau, 1982; etc.). Entre las actuaciones que tuvieron una incidencia clave en la pérdida de funcionalidad del Brazo de la Torre hay que destacar la corta Fernandina realizada en 1815. La corta se produjo aguas abajo de la Puebla del Río, donde nacían los dos brazos del río Guadalquivir (Brazo del Este y Brazo del Oeste). La corta redujo la longitud del cauce en 16 km, incrementando la pendiente del cauce, concentrando el flujo en el cauce central en detrimento de los brazos y aislando el meandro de Isla Cristina. Otras cortas, rectificaciones y dragados posteriores han contribuido a reforzar la tendencia de concentración del caudal en un cauce único, acelerando al mismo tiempo la colmatación de los brazos secundarios.

Con respecto al río Guadiamar, en el año 1941 se inicia la redacción del *Proyecto de Desagüe del Río Guadiamar* con objeto de canalizar las aguas del sistema Guadiamar y Travieso y proteger las marismas de las inundaciones. Al finalizar este proyecto, el sistema formado por el Guadiamar-Travieso-Brazo de la Torre quedó encauzado entre dos diques paralelos con una separación media de 1 Km y una longitud aproximada de 25 Km. Posteriormente en 1960-61, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir construye un dique transversal (Muro de la FAO) que recorre la marisma de este a oeste, entre el encauzamiento del Guadiamar y la desembocadura del Arroyo Cañada

Mayor, dejando fuera a este último. La construcción del dique supuso la creación de un recinto aislado de su régimen de inundaciones para su transformación en terrenos agrícolas de 16.400 has de marismas (TyP, 1996).

A pesar de la influencia de estas actuaciones en el área de Doñana en siglos anteriores, las intervenciones humanas a partir de la segunda mitad del Siglo XX provocan los cambios más profundos del régimen hidrológico de las marismas y la reducción drástica de su superficie (figura 10).

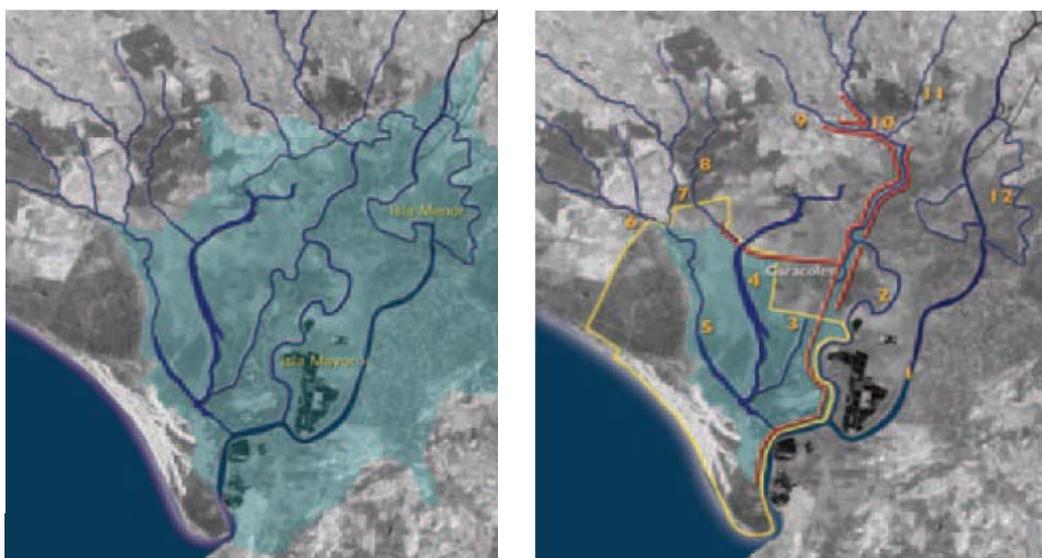


Figura 10. Área de las antiguas marismas del Guadalquivir (izquierda) y la actual marisma de Doñana (derecha). 1. Río Guadalquivir; 2. Brazo de la Torre; 3. Caño Travieso; 4. Caño Guadamar; 5. Madre de las Marismas; 6. Arroyo La Rocina; 7. Arroyo El Partido; 8. Arroyo Cañada Mayor; 9. Arroyo Cigüeña; 10. río Guadamar; 11. Arroyo Majaberraque; 12 Brazo del Este. FUENTE: Original en García Novo y Marín, 2005.

En su conjunto, las transformaciones que tuvieron lugar en las marismas del Guadalquivir supuso la transformación de la antigua llanura de inundación marismeña, reduciendo su superficie de 150.000 has hasta las 30.000 has actuales (Casas y Urdiales, 1995; MMA, 2001; García Novo y Marín, 2005)

3.2.2. Cambios en el funcionamiento hidrológico de la marisma

Como consecuencia de las diferentes actuaciones (modificaciones en cauces, construcción de diques, nivelaciones, drenajes, etc.) se produjo una alteración drástica en el régimen de aportes a la marisma (figura 11).

Como consecuencia de las cortas, dragados y rectificaciones realizadas en el río Guadalquivir, el Brazo de la Torre se desfigura en el paisaje en su tramo de origen. La sobre-elevación de la Montaña del Río termina de aislar definitivamente la marisma del río Guadalquivir, evitando la entrada de los aportes fluviales salvo en condiciones de crecidas excepcionales. La pérdida de funcionalidad del Brazo de la Torre por acumulación de sedimentos se traduce en la desaparición de la influencia mareal en la marisma y la pérdida de su conectividad biológica.

Las aguas del río Guadamar junto con el Arroyo de la Cigüeña, son ahora recogidas por el nuevo encauzamiento de Entremuros, para verter directamente (y sin inundar la

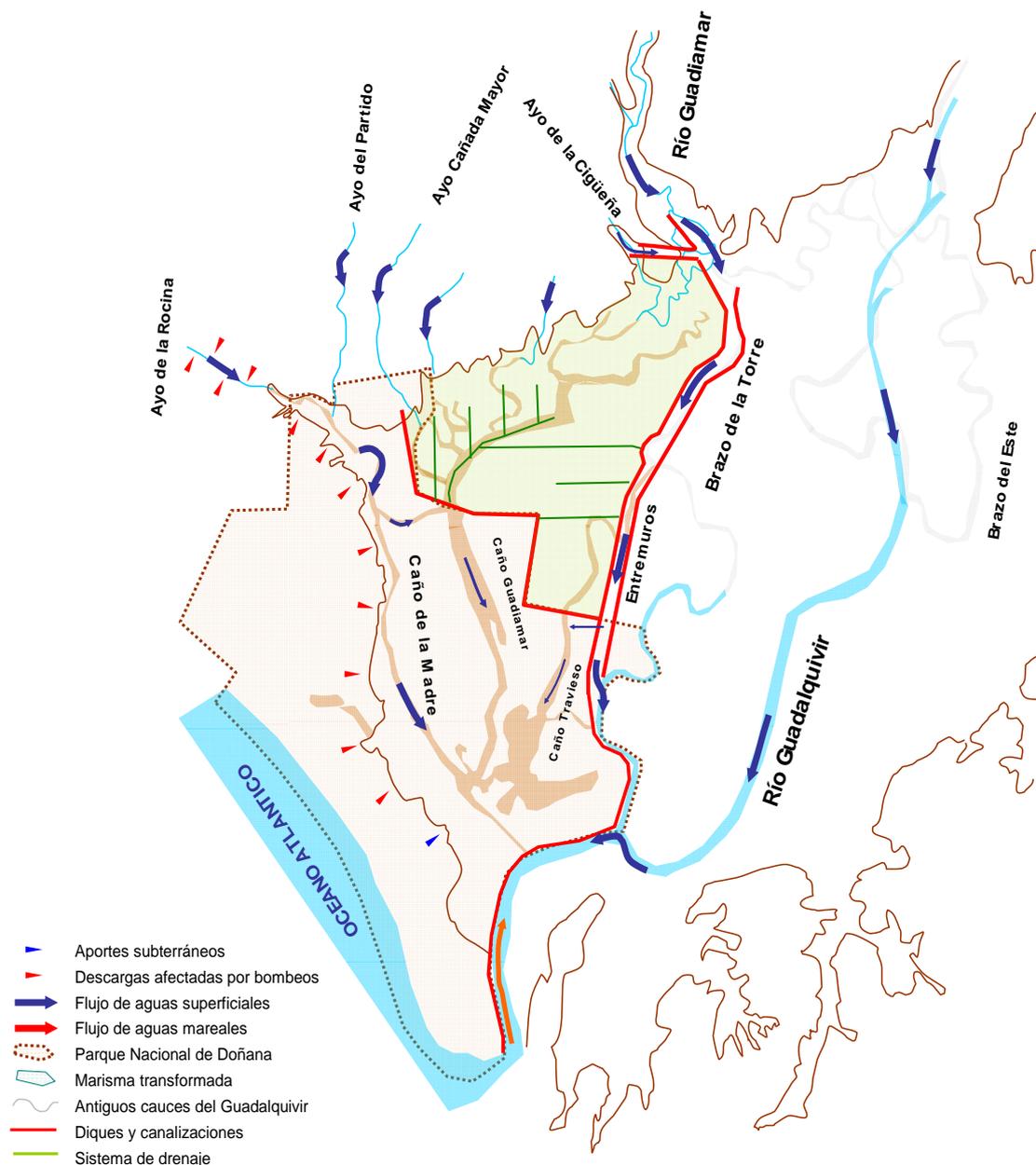


Figura 11 . Esquema del funcionamiento hidrológico de la marisma de la margen derecha del Guadalquivir hacia el año 2000. FUENTE: Original en *ICONA, 1994*. Modificado por el autor.

marisma) en el Brazo de la Torre en un punto próximo a la desembocadura del Guadalquivir. Una de las consecuencias de estos cambios hidrológicos fue la pérdida de la funcionalidad de las principales arterias que distribuían el agua dentro de la marisma, tanto del Caño Guadiamar (en 1955 al construirse el encauzamiento del río Guadiamar) como del Caño Travieso (en 1969 cuando se aisló la finca de Caracoles).

Estas y otras canalizaciones, así como el muro transversal de la FAO impidieron que las aguas continuaran inundando los recintos marismeños de Marisma Gallega, Cantarita, Caracoles e Isla Mayor, quedando las marismas reducidas a una tercera parte de su extensión original (TyP, 1996).

El régimen hidrológico de la marisma había sido profundamente modificado, pasando de ser un régimen fluvial, mareal y pluvial a ser casi exclusivamente pluvial en la actualidad (MMA, 2001).

Finalmente cabe citar el accidente de la explotación minera de Aznalcóllar (Sevilla) en abril de 1998. La rotura del muro de contención exterior y del muro separador interior de la balsa de residuos estériles produce un vertido de aguas contaminadas y lodos al río Agrio y de éste al río Guadiamar, con un volumen total estimado de 4,5 hm³. El área afectada por la sedimentación de lodos comprende unas 2.600 ha a lo largo de más de 40 Km de cauce, con una anchura media de 600-700 m y espesor variable, mientras que las zonas afectadas por las aguas ácidas suponen otras 2.300 ha, aproximadamente.

Entre las medidas adoptadas por la Junta de Andalucía a raíz del accidente destaca el refuerzo y la protección de las márgenes del río Guadiamar y la construcción de muros transversales para detener el avance de las aguas ácidas en la zona de Entremuros. Por su parte, la administración del Parque Nacional de Doñana procedió al sellado total de la marisma del Parque respecto a Entremuros, al Canal de Aguas Mínimas, al Brazo de la Torre y al río Guadalquivir, cauces que se podían ver, presumiblemente, cubiertos por la riada tóxica (MMA, 2001).

3.2.3. Alteración hidrológica de los ríos que vierten a la marisma

A pesar de que no existen grandes presas en las cuencas de los ríos que vierten a la marisma (a excepción del embalse del Agrio), algunos componentes del régimen hidrológico de los mismos han estado sometidos a fuertes cambios en las últimas décadas.

Como puede observarse en los hidrogramas de la figura 12, el régimen hidrológico del río Guadiamar y La Rocina responde a un comportamiento natural en su régimen de crecidas, si bien los caudales mínimos aparecen modificados si consideramos que estos ríos presentaban de forma natural un régimen permanente.

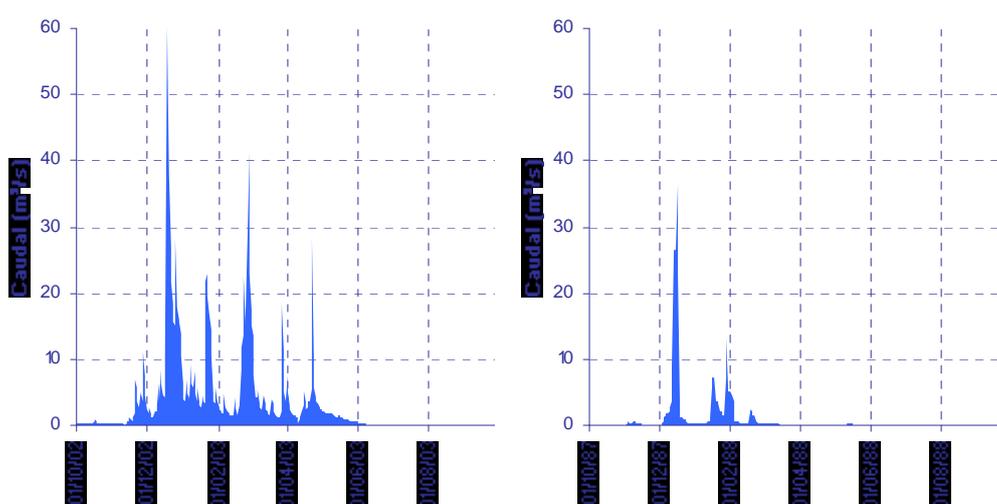


Figura 12 . Hidrogramas diarios del río Guadiamar en la EA 76 en Aznalcázar y Arroyo de la Rocina en la EA 150 en el Rocío. FUENTE: Elaboración propia a partir da datos ROEA.

Efectivamente, tal como se analizó en el apartado 3.1.2., los ríos más importantes vertientes a Doñana (Guadimar, Arroyo de la Rocina y Arroyo del Partido) se caracterizaban por presentar este régimen permanente, es decir, salvo años excepcionalmente secos, los cursos de agua siempre mantenían un cierto nivel de caudal, al menos en sus tramos finales.

Los registros de la estación de aforo EA 76 del río Guadimar en Aznalcázar (figura 13) permiten conocer su régimen hidrológico a escala diaria.



Figura 13. Río Guadimar aguas abajo de la estación de aforo EA 5076 del río Guadimar en Aznalcázar.

Analizando la serie desde 1991 hasta 2006 (figura 14), se observa como todos los años el río sufre un periodo de cese de caudal, oscilando entre los 261 días del año 1994/95 hasta los 7 días del año 2003/04. En promedio para estos años, durante un periodo superior a tres meses no circula agua por el río, condición característica de los ríos intermitentes.

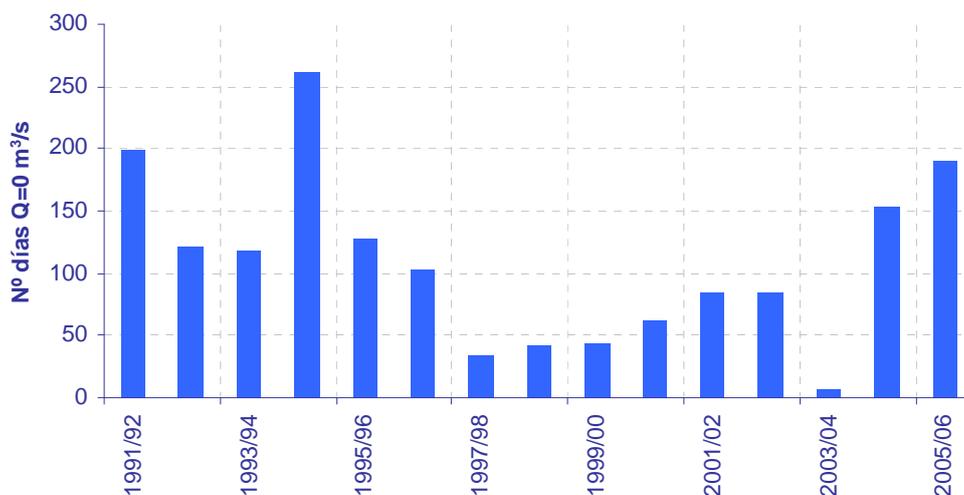


Figura 14. Número de días con caudal nulo para el periodo 1992-2006 del río Guadimar en la EA 76 en Aznalcázar. FUENTE: Elaboración propia a partir de datos ROEA.

Cuando estas condiciones ocurren de manera natural, estos ríos presentan comunidades biológicas con estrategias adaptativas que les permiten sobrevivir en estas situaciones de cese de caudal (Poff, 1997; Richter, 1997; Bunn y Arthington, 2002; etc.). Por el contrario, cuando los episodios de cese de caudal son inducidos artificialmente por el manejo de los caudales, se produce un fuerte impacto sobre las comunidades biológicas de los ríos permanentes, provocando un descenso en las poblaciones y en última instancia cambios de algunas especies.

Sin duda alguna, la alimentación de estos caudales de base de los ríos se producía por las descargas más o menos constantes de los acuíferos que entraban en contacto con los mismos. No obstante, la explotación de las aguas subterráneas produce un cambio sustancial en el régimen de descargas, particularmente puesto de manifiesto en el caso del Arroyo de La Rocina (Custodio, 1995; Manzano et al, 2001; Custodio et al, 2006b).

El comportamiento de las aguas subterráneas en el área de La Rocina ha sido descrito con detalle por Custodio (1995; 2006a; 2006b). En condiciones naturales el agua que se recarga en las arenas fluye hacia la parte más profunda del acuífero y luego asciende, de forma localizada, en las proximidades de La Rocina (figura 15). Estas descargas mantienen el caudal de base del Arroyo y permiten la existencia de una exuberante vegetación freatófítica.

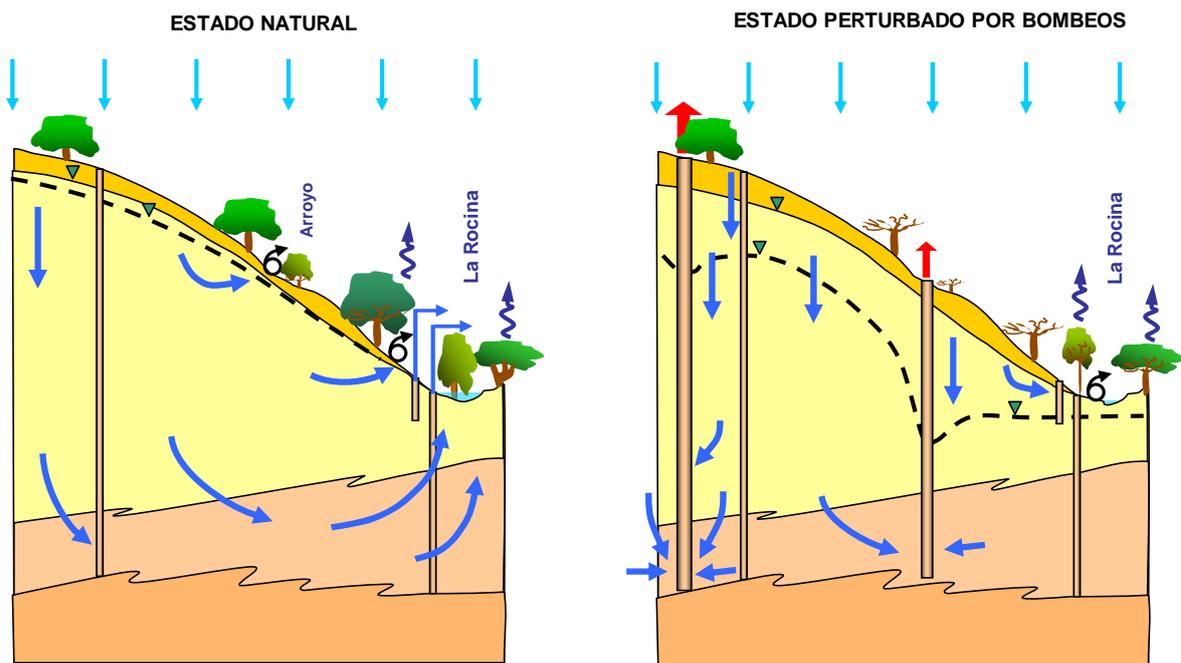


Figura 15. Descargas del sistema acuífero Almonte-Marismas en el entorno del Arroyo de la Rocina, en condiciones naturales (izquierda) y en condiciones de explotación (derecha). FUENTE: Original en Custodio et al, 2006b. Modificado por el autor

Según el mismo autor, en condiciones de explotación (derecha) la extracción intensiva de agua subterránea localizada en zonas de descarga natural del acuífero ocasiona descensos locales acumulados de los niveles piezométricos profundos, que a su vez suponen un descenso del nivel freático. El gradiente hidráulico entre ellos ha aumentado y la mayoría de los flujos de agua son ahora descendentes, disminuyendo así la descarga natural a La Rocina. En estas condiciones, la vegetación freatófítica no alcanza las mayores profundidades del nivel freático, produciéndose la muerte progresiva de muchos ejemplares.

3.2.4. Balance hídrico de las aguas subterráneas en condiciones de explotación

Según Custodio y colaboradores (2006b), el balance hídrico anual del sistema acuífero Almonte-Marismas en condiciones de explotación presenta los siguientes valores (figura 16). La recarga media se considera igual a la que ocurría en condiciones naturales (158-210 hm³), mientras que las extracciones netas del acuífero se han cifrado en una horquilla entre 81 y 98 hm³/a (una vez considerados los retornos). En estas condiciones de explotación se observa una reducción drástica en las descargas al Arroyo La Rocina (cifradas en torno al 90%) y una reducción significativa de las descargas en los arroyos del Norte de la marisma y de los ecotonos de La Vera y Norte. Llama la atención como el ecotono Norte deja de descargar en la marisma entre 10 y 15 hm³ anuales para invertir el flujo y captar de la marisma 3 hm³.

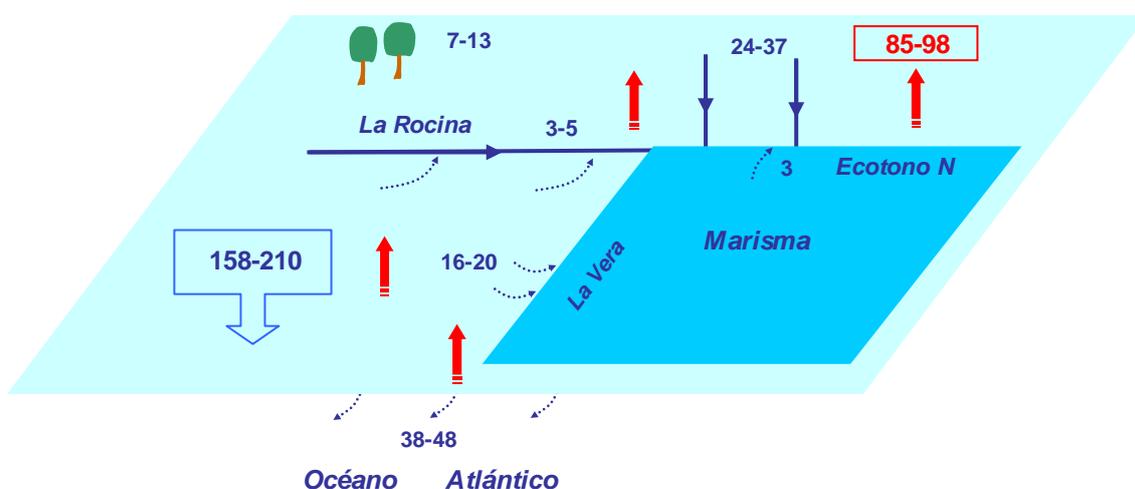


Figura 16. Balance hídrico en régimen de explotación del sistema acuífero Almonte-Marismas. FUENTE: Original en Custodio et al. 2006a.

Sin llegar a presentar cifras tan concisas y sobre un supuesto de extracciones entre 62 y 73 hm³, la Comisión Internacional de Expertos evaluó la reducción de las descargas naturales del acuífero entre la mitad y la cuarta parte o menos del valor natural (CIED, 1992). En cualquier caso parece evidente que las extracciones por bombeo del acuífero han producido una clara merma en las descargas de agua subterránea que se manifiesta en la reducción del caudal de base del Arroyo de La Rocina y la reducción de áreas de vegetación freatófita.

3.2.5. Cambios en el balance hídrico de la marisma y su hidroperiodo

Una de las consecuencias principales del conjunto de intervenciones de la historia reciente de Doñana ha sido la drástica reducción de los aportes de agua a la marisma. A pesar de las muchas matizaciones que se pueden hacer en referencia a los valores presentados, la figura 17 recoge a grandes rasgos la cronología de las intervenciones más importantes y una cuantificación aproximada de las mismas.

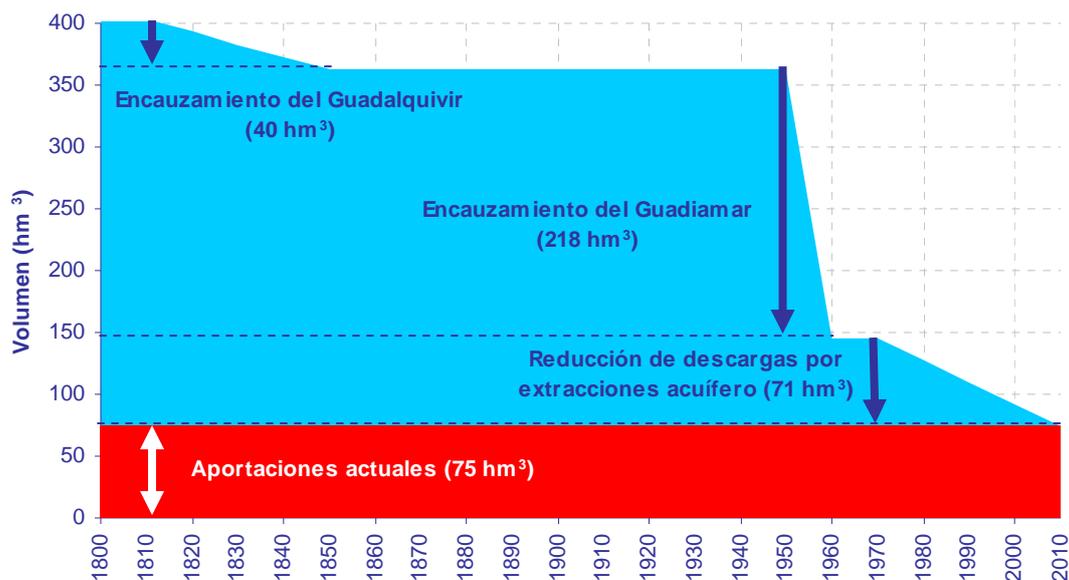


Figura 17. Cronología de la reducción de aportes fluviales a la marisma con indicación de los principales intervenciones. FUENTE: Elaboración propia a partir de datos SACRAMENTO (CHG, 1998) y de la ROEA

Existe una gran incertidumbre en torno a los aportes del río Guadalquivir a la marisma bajo condiciones de funcionamiento más o menos natural del Brazo de la Torre y Montaña del Río. Solamente a efectos ilustrativos se han cifrado los aportes del río Guadalquivir en un promedio anual de 40 hm³.

Sin duda la mayor reducción en las aportaciones se produjo con las sucesivas canalizaciones del río Guadamar y su aislamiento total de la marisma en 1998. En términos globales, la desconexión del río Guadamar de la marisma ha supuesto un descenso en los aportes próximo o superior al 60% (Casas y Urdiales, 1995; TyP, 1996; MMA 2001). Por su parte, los arroyos que aún vierten directamente a la marisma (Arroyo de La Rocina, Arroyo del Partido, etc.) están viendo reducidos sus volúmenes por la explotación de las aguas subterráneas del acuífero (Custodio et al, 2006b).

La tabla 2 muestra los valores comparativos de los aportes en condiciones naturales frente a las condiciones actuales. Teniendo en cuenta las aportaciones fluviales y subterráneas, se puede decir que en términos globales, la marisma de Doñana recibe actualmente menos del 20% de los aportes que recibía de forma natural.

Tabla 2. Comparación de los aportes a la marisma en condiciones naturales frente a las condiciones actuales. FUENTE: Elaboración propia a partir de datos SACRAMENTO (CHG, 1998) y de la ROEA

	APORTES (hm ³)		REDUCCION (%)
	CONDICIONES NATURALES	CONDICIONES ACTUALES	
Río Guadalquivir	40	0	100,0
Río Guadamar	218	0	100,0
Otros aportes ¹	145	74	49,0
	403	74	81,6

¹ Entre estos aportes se consideran los diferentes arroyos que aportan a la marisma (la Rocina, el Partido, etc.) y los aportes desde los ecotonos (Vera-Retuerta y Norte)

Los efectos de la drástica reducción de las aportaciones a la marisma han sido parcialmente compensados por dos factores. Independientemente de los problemas ambientales ocasionados (pérdida de conectividad biológica, sobre-elevación de los niveles máximos de inundación, transformación en un sistema de marisma estancado, etc.), el cierre de las compuertas equipadas en la Montaña del Río (de los Dos Rompidos, de la Figuerola, de Brenes, etc.) ha permitido prolongar los periodos de inundación de la marisma. En segundo lugar, junto a la reducción de aportaciones se ha producido en paralelo una reducción de la superficie de la marisma que parcialmente pudiera compensar los niveles de inundación en la marisma remanente.

Considerando estas dos circunstancias y sin negar que los arroyos vertientes ocasionalmente puedan aportar volúmenes suficientes para rellenar la cubeta marismeña, en ningún caso han sido capaces de alargar la duración del período de inundación en un régimen similar al del pasado.

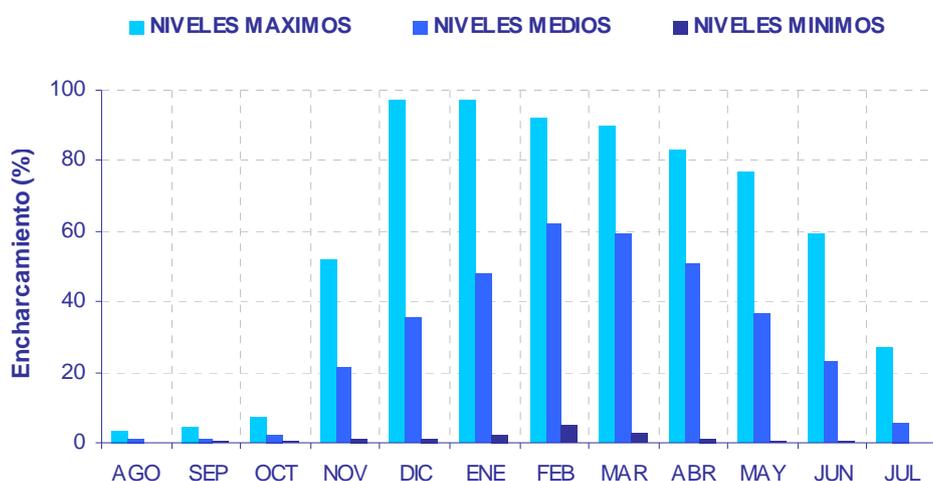


Figura 18. Niveles máximos, medios y mínimos de inundación de la marisma para el periodo 1975-2006. FUENTE: Original en Aragonés *et al.* 2005.

La figura 18 representa los porcentajes de encharcamiento de la marisma para el periodo 1975-2006 (Aragonés *et al.*, 2005). Dentro de las series mensuales de inundación que fueron analizadas en el estudio, se puede observar como se ha alcanzado el nivel máximo de inundación de la marisma solamente para los meses de diciembre y enero. En el caso de los niveles mensuales promedio, el nivel máximo de encharcamiento ha alcanzado solo el 60% de la marisma (febrero y marzo), presentando 3 meses con una superficie encharcada prácticamente nula (agosto, septiembre y octubre). En el caso de los niveles mínimos observados, durante el mes de febrero no se alcanzó el 5% de inundación, con 8 meses presentando un nivel de inundación inferior al 1%.

3.3. LA RESTAURACION HIDROLOGICA DE DOÑANA

3.3.1. Los intentos de restauración en la década de los ochenta.

Con el objetivo central de recuperar los aportes tradicionales a la marisma del río Guadamar, en 1981 se presentó por primera vez el *Plan de Regeneración Hídrica de Doñana* (MMA, 2001). El Plan pretendía restaurar la funcionalidad de los caños

Guadimar y Travieso gracias a los caudales aportados por el río Guadimar desde Entremuros (Solución Centro-Norte y Solución Sur) Además se abordaba la restauración de la Montaña del Río como elemento regulador del flujo de agua desde la marisma al río Guadalquivir (figura 19).

Con la Solución Centro-Norte se trataba de restaurar parcialmente la funcionalidad del Caño Guadimar. Teóricamente su funcionamiento debía producirse durante otoño e invierno con fuertes crecidas en Entremuros, lo que permite que en la vuelta de la Arena penetre el agua por gravedad inundando el canal D-II-1. En la junta de los Caños el agua sería bombeada hacia el Caño Guadimar a razón de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrando por gravedad en el Parque Nacional unos 8 Km. aguas abajo.

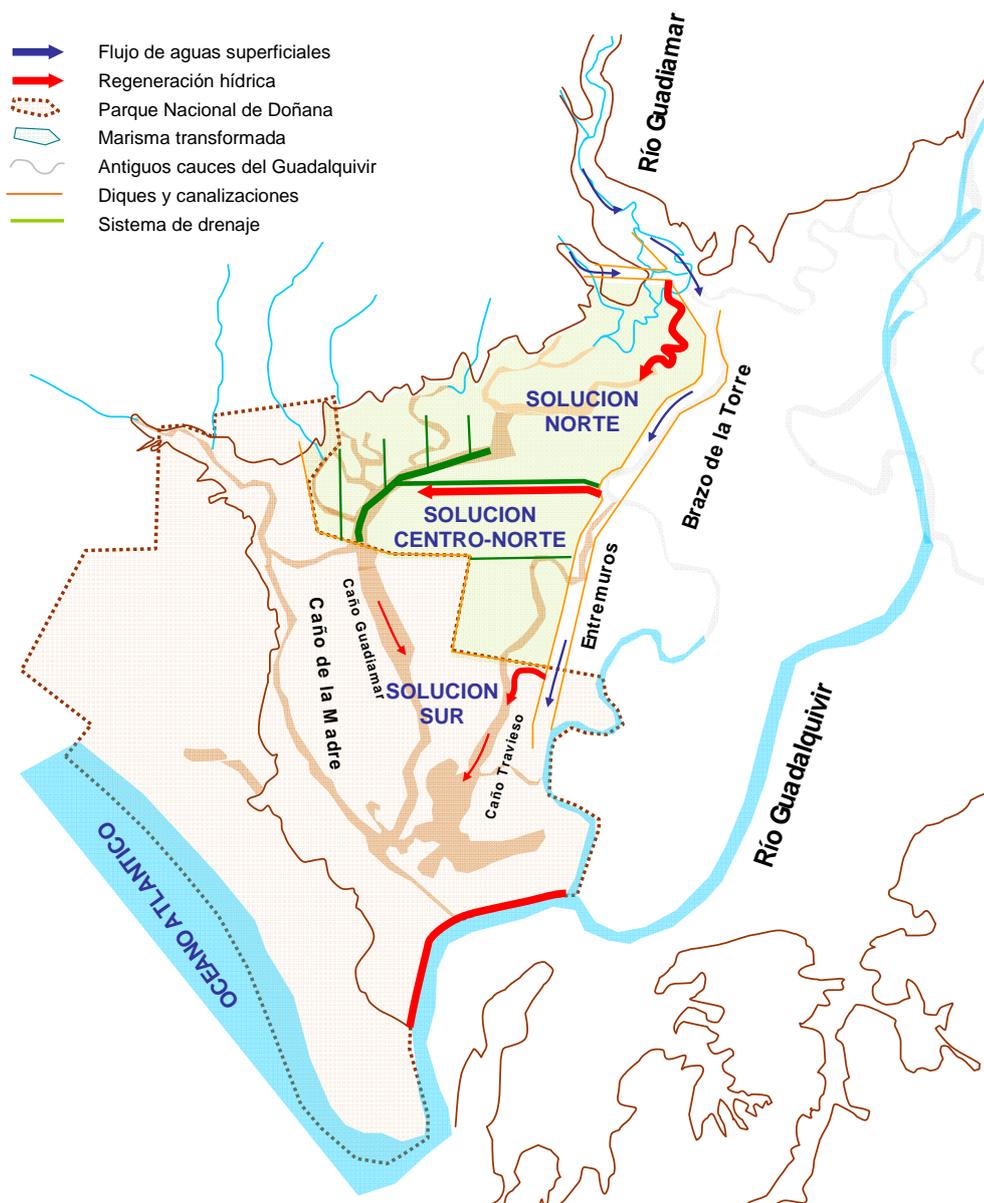


Figura 19. Principales elementos del “Plan de Regeneración Hídrica de Doñana” en la década de los ochenta y la Solución Norte planteada en la década de los noventa. FUENTE: Original en ICONA, 1994. Modificado por el autor.

A pesar de que las obras fueron inauguradas en 1985, su efectividad desde entonces ha sido muy limitada por diferentes razones. Uno de los principales problemas surgió cuando el mismo colector D-II-1 tendría que servir para conducir tanto las aguas de la

regeneración hídrica (desde Entremuros) como las aguas sobrantes de los regadíos del Sector I y de los riegos particulares del Sector III (hacia Entremuros). El hecho de no acometer la construcción del canal paralelo al colector llevó a una situación de conflicto de uso. Además, el hecho de no abordar la restauración del perfil natural del Caño Guadiamar y la capacidad de bombeo de 4 m³/s (resultaba muy costosa en tiempo y energía), implicaba que fueran necesarios entre 1 y 2 hm³ para que el agua alcanzara la cota de inundación del Parque Nacional y entrara en el mismo (ICONA, 1994).



Figura 20. Estación de bombas en la vuelta de la Arena y el colector D-II-1. Este colector tendría que servir para llevar las aguas de la regeneración hídrica (desde Entremuros) como las aguas sobrantes de los regadíos (hacia Entremuros)

La Solución Sur pretendía recuperar a gran escala la entrada de aguas del río Guadiamar a través del Caño Travieso. Para ello se construyó en 1987 un canal artificial (Nuevo Travieso) de 2 Km de longitud y unos 250 m de anchura que comunicaba Entremuros con el Caño Travieso. Pronto se evidenció que si bien permitía la entrada al Parque Nacional de grandes cantidades de agua durante las crecidas, posteriormente había un proceso de reversión de caudales de la marisma hacia Entremuros, es decir, el mismo camino pero en sentido inverso. La efectividad real de esta actuación fue escasa (ICONA, 1994; TyP, 1996; MMA, 2001).

Finalmente, entre 1982 y 1983 se construyó la nueva Montaña del Río como elemento de regulación que vino a sustituir el antiguo levé natural del río Guadalquivir, en aquel entonces afectado por los procesos de erosión ocasionados por el tráfico de los grandes barcos. Se trataba de un muro de 14 km de longitud que se extendía desde la desembocadura del Brazo de la Torre hasta el extremo Sur del Lucio del Membrillo, bordeando las salinas de San Rafael. La nueva Montaña del Río fue equipada con un sistema de compuertas en las antiguas escotaduras naturales, de tal forma que pudiera ralentizarse el proceso de vaciado de la marisma y ejercer un control sobre el intercambio de flujos con el río Guadalquivir (ICONA, 1994).

3.3.2. Nuevos intentos de restauración en la década de los noventa culminados con el accidente de Aznalcóllar.

La escasa efectividad de estas actuaciones a la hora de recuperar aportes del Guadiamar llevó al Patronato del Parque Nacional y a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir a estudiar la Solución Norte. Esta actuación consistía en la derivación de aguas del río Guadiamar y Arroyo de la Cigüeña mediante un sistema de compuertas situado justo aguas abajo de la confluencia de ambos encauzamientos, y su conducción a través de un canal artificial hasta el Rincón del Pescador en el Caño Guadiamar. El canal transcurriría dentro del Sector III del Plan Almonte Marismas, con una longitud proyectada de 14 km y 20 m³/s de capacidad máxima de transporte.

Como actuaciones complementarias para recuperar la funcionalidad del Caño Travieso, algo más al sur de la construcción del Nuevo Travieso existían aún 5,2 Km. del muro derecho del encauzamiento del Guadiamar. Para facilitar la entrada masiva de agua hacia el Caño Travieso y los lucios de los Ansares y del Buen Tiro, este muro fue desmontado y devuelto el terreno a su situación primitiva (Bayán y Dolz, 1995).

El escenario de la regeneración hídrica de Doñana cambió radicalmente en aquellos momentos a partir del accidente de la explotación minera de Aznalcóllar (Sevilla) en abril de 1998. La rotura del muro de contención exterior y del muro separador interior de la balsa de residuos estériles produjo un vertido de aguas contaminadas y lodos al río Agrio y de éste al río Guadiamar, con un volumen total estimado de 4,5 hm³. El área afectada por la sedimentación de lodos alcanzó unas 2.600 ha a lo largo de más de 40 Km de cauce, con una anchura media de 600-700 m y espesor variable, mientras que las zonas afectadas por las aguas ácidas supusieron otras 2.300 ha, aproximadamente (MMA, 2001).

A raíz del accidente, la Junta de Andalucía adoptó una serie de medidas, entre las que se destacan el refuerzo y la protección de las márgenes del río Guadiamar y la construcción de muros transversales para detener el avance de las aguas ácidas en la zona de Entremuros. Por su parte, la administración del Parque Nacional de Doñana procedió al sellado total de la marisma del Parque respecto a Entremuros, al Canal de Aguas Mínimas, al Brazo de la Torre y al río Guadalquivir, cauces que se podían ver, presumiblemente, cubiertos por la riada tóxica (MMA, 2001).

3.3.3. El proyecto “Doñana 2005”

A pesar de las diferentes iniciativas acometidas en los años 80 y 90, por diferentes razones las marismas de Doñana no habían recuperado los aportes característicos de la misma que garantizaran su futuro. En estas circunstancias surge el ambicioso proyecto de la restauración hidroecológica de la marisma denominado “Doñana 2005”. Este proyecto se concibe como un catálogo abierto de actuaciones para frenar las tendencias degradativas de la marisma observadas en las décadas anteriores, restaurar sus pautas de dinámica hidrológica natural propia de la marisma y permeabilizar la marisma con el estuario del río Guadalquivir.

Para tratar de lograr estos ambiciosos objetivos, el plan incluía inicialmente un conjunto de actuaciones similares en algunos casos a las iniciativas de las décadas anteriores, pero mucho más ambiciosas en cuanto a su alcance y magnitud. Las actuaciones iniciales del proyecto Doñana 2005 se localizan en la figura 21 y se enumeran en la tabla 3.

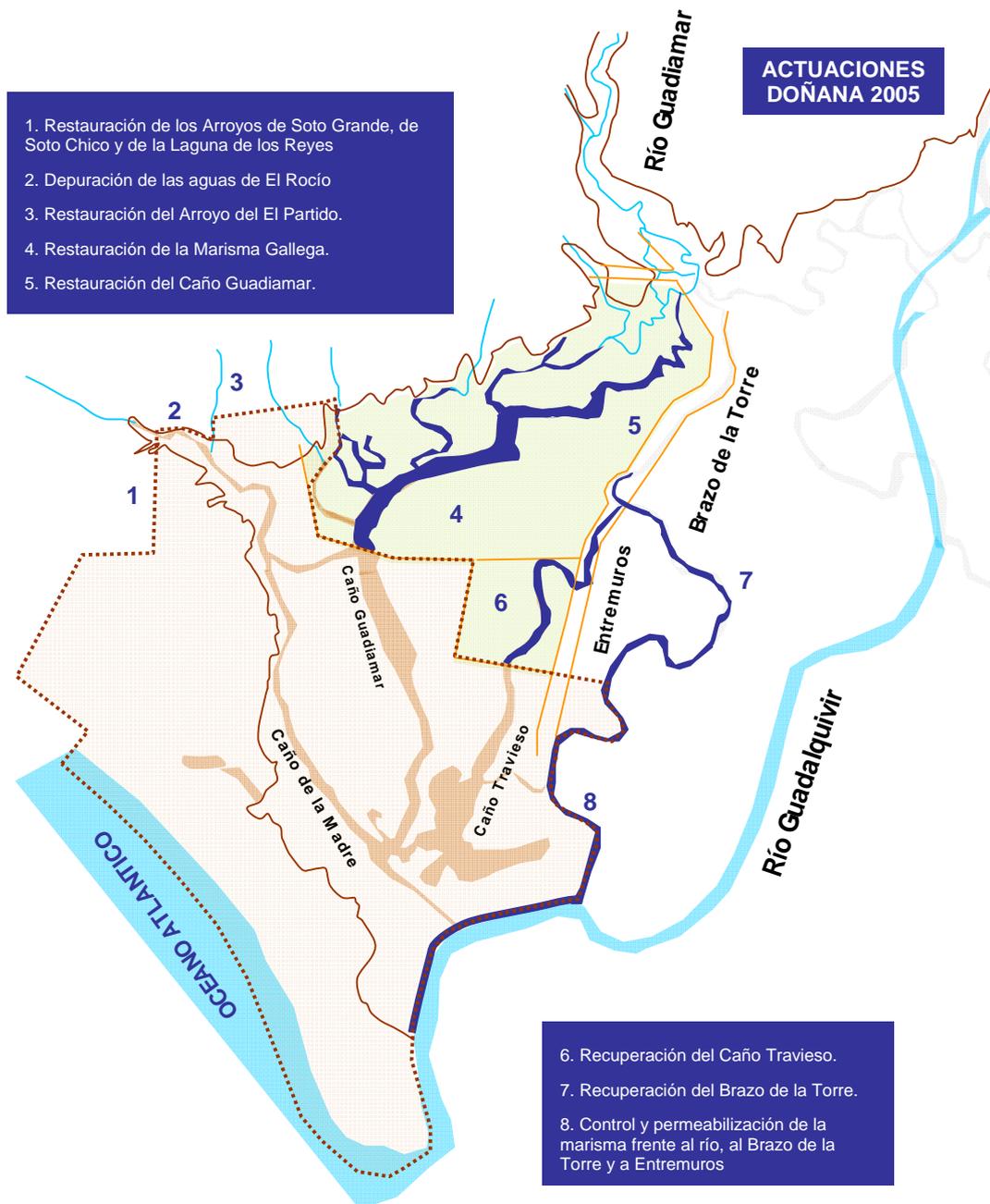


Figura 21. Localización de las actuaciones iniciales del Proyecto “Doñana 2005”. FUENTE: Elaboración propia

Según el informe de seguimiento de Doñana 2005 al 85% de su ejecución (primavera de 2008), de las ocho obras de restauración de las que consta el Proyecto, las actuaciones número 1, 2, 3, 4 y 8 han sido concluidas y puestas en servicio (ejemplo en la figura 22), así como la primera fase de la actuación 6 (MARM, 2008).

En cambio la ejecución de la actuación número 5 (recuperación del Caño Guadamar) se encuentra aplazada hasta que se obtengan nuevos estudios. Los datos de campo en los que se analizan las alternativas son escasos y poco fiables, arrojando ciertas dudas sobre las aguas que llegarían a Doñana en primavera (muy escasas o quizás ninguna). En este sentido se ha pronunciado la Comisión Científica, el Grupo de Apoyo al Coordinador y el propio Coordinador (MARM, 2008).

Tabla 3. Actuaciones iniciales del Proyecto “Doñana 2005”. FUENTE: MMA, 2001.

ACTUACION 1	Restauración de los arroyos de Soto Grande y Soto Chico y arroyo de la Laguna de los Reyes.
ACTUACION 2	Depuración de las aguas residuales del Rocío.
ACTUACION 3	Restauración de la dinámica hidráulica del arroyo del Partido, recuperando la llanura de inundación y el meandro tradicional hoy profundamente alterado.
ACTUACION 4	Eliminación y restauración del sistema de caños y arroyos que drenan la Marisma Gallega en el sector situado al norte del Parque Nacional, y restauración de la comunicación natural entre los dos sectores.
ACTUACION 5	Recuperación de la funcionalidad del caño Guadiamar, incorporando las aportaciones derivadas del río Guadiamar y/o del arroyo de la Cigüeña. Por otra parte, restauración y recuperación ambiental del cauce del río Guadiamar.
ACTUACION 6	Restauración del caño Travieso, a partir de la recuperación de la funcionalidad del Brazo de la Torre.
ACTUACION 7	Recuperación de la funcionalidad fluvio-mareal del Brazo de la Torre.
ACTUACION 8	Restauración de la funcionalidad tradicional de los caños de Brenes, Cherry (Buen Tiro), Carrajola y la Figuerola, así como su conexión permeable con el estuario, el río Guadalquivir y el Brazo de la Torre.



Figura 22. Aspecto del Caño Guadiamar al Norte del Parque Nacional.

4. EL ESTUDIO DE LOS CAUDALES ECOLOGICOS

4.1. ENFOQUE TRADICIONAL DE MÉTODOS: TIPOS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES.

En el panorama internacional se cuenta actualmente con numerosas metodologías para calcular los caudales ecológicos, pudiendo ser clasificadas en los siguientes grandes tipos (Dunbar *et al.*, 1998; Tharme, 2003; Dyson *et al.*, 2003; Acreman y Dunbar, 2004; Magdaleno, 2005; etc.):

1. Métodos hidrológicos: Considerados los métodos de cálculo más simples, se basan en el estudio de series hidrológicas (a escala diaria, mensual o anual) mediante operaciones aritméticas más o menos complejas. Se trata de identificar parámetros hidrológicos con significado ecológico y geomorfológico. A pesar de que estos métodos se basan exclusivamente en información hidrológica, el estudio de casos en diferentes países ha revelado la existencia de valores convergentes para establecer los caudales ecológicos.
2. Métodos hidráulicos: Definen el caudal mínimo a partir del estudio de la relación entre algún parámetro hidráulico del río (perímetro mojado, velocidad, profundidad, etc.) y los caudales circulantes. En este caso se relaciona la geometría hidráulica del lecho con el hábitat físico para determinados organismos acuáticos. A partir de estudios de reconocimiento se establecen valores limitantes para la fauna acuática de las variables hidráulicas consideradas.
3. Métodos hidrobiológicos: Estas metodologías han sido desarrolladas para analizar las respuestas bióticas según los cambios incrementales de caudal. Se denominan también métodos de simulación de hábitat, y definen los caudales ecológicos a partir de un estudio exhaustivo de todos los factores y condicionantes del hábitat de una especie representativa del ecosistema fluvial. La idea de conservación de todo el ecosistema queda implícita por el supuesto “efecto paraguas” de conservar una especie exigente. El método hidrobiológico por excelencia es el IFIM y su aplicación informatizada PHABSIM (Physical Habitat Simulation Methodology).
4. Métodos holísticos. Aunque a principios de los 90 no eran formalmente reconocidas, en la actualidad sus principios y métodos están emergiendo rápidamente en el ámbito internacional. Se trata de una aproximación global al sistema fluvial que incluye a todas sus formas de vida, así como al conjunto de procesos biológicos, físicos y químicos derivados de su propia organización estructural, funcional, espacial y temporal. La clave de su análisis radica en encontrar el papel que ejercen los caudales como soporte básico para todos los componentes o atributos del ecosistema fluvial.

Cada una de estas aproximaciones metodológicas presenta diferentes ventajas e inconvenientes, tanto en su aplicación como en los resultados obtenidos (Tharme, 2003). En la tabla 4 se muestra una comparación resumida entre los diferentes grupos de métodos.

Tabla 4. Cuadro comparativo de líneas metodológicas en el estudio de los caudales ambientales. (A: nivel alto; M: nivel medio; B: nivel bajo). FUENTE: Original en *King et al, 2000*.

TIPO	COMPONENTES CONSIDERADOS	NECESIDAD DE DATOS	NIVEL DE EXPERIENCIA	COMPLEJIDAD	INTENSIDAD RECURSOS	RESOLUCION RESULTADOS	FLEXIBILIDAD	COSTE
Hidrológico	Todo el ecosistema- no específico	B-M (principalmente de gabinete) Registros históricos de caudales vírgenes o naturalizados Uso de datos ecológicos históricos	B-M Hidrológica Alguna experiencia en ecología	B-M	B-M	B-M	B-M	B
Hidráulico	Requerimientos hidráulicos genéricos del hábitat acuático para especies objetivo.	B-M (gabinete y campo) Registros históricos de caudales Variables de descarga hidráulica típicamente de secciones Variables hidráulicas relacionadas con las necesidades de hábitat-caudal a nivel genérico.	M Hidrológica Algo de modelización hidráulica Alguna experiencia en ecología	B-M	B-M	B-M	B-M	B-M
Simulación de hábitat	Principalmente hábitat para especies objetivo. Algunos consideran: Forma del canal, transporte sedimentos, calidad del agua, vegetación de ribera, fauna silvestre	M-A (gabinete y campo) Registros históricos de caudales Numerosas secciones transversales con múltiples variables hidráulicas Datos de idoneidad del hábitat para las especies objeto	M-A Hidrológica Nivel avanzado en modelización hidráulica y del hábitat. Especialista en ecología sobre necesidades físicas de especies objetivo.	M-A	M-A	M-A	M-A	M-A
Holístico	Todo el ecosistema, Algunos consideran: Acuíferos, zonas húmedas, estuarios, llanura de inundación, dependencia social del ecosistema, así como los componentes acuáticos y de la ribera	M-A (gabinete y campo) Registros de caudales Numerosas secciones transversales con múltiples variables hidráulicas. Datos biológicos sobre caudales y hábitat relacionados con todos los requerimientos de la biota y de los componentes del ecosistema	M-A Hidrológica Nivel avanzado en modelización hidráulica. Modelización del hábitat en algunos casos. Especialistas en todos los componentes del ecosistema. Alguna experiencia en requerimientos socioeconómicos	M-A	M-A	M-A	A	M-A

4.2. CAUDALES ECOLOGICOS EN DOÑANA: UN CASO PARTICULAR

Las características hidrológicas y ecológicas de Doñana lo convierten en un sistema único en el contexto de la geografía peninsular. No resulta extraño afirmar que el estudio de sus necesidades hídricas debe requerir por tanto de un tratamiento diferencial, cuyas propuestas finales se deben formular atendiendo consecuentemente a estas particularidades. A continuación se desarrolla el proceso para formular la propuesta de las necesidades hídricas de la marisma de Doñana, junto con el marco científico y legal que lo justifica.

4.2.1. Ambito espacial de los caudales ecológicos en Doñana: zona protegida vs. zona de influencia

Como se ha señalado en apartados anteriores, la principal aportación de agua a la marisma proviene del conjunto de cauces que vierten a la misma (en condiciones naturales el río Guadiamar, La Rocina, El Partido, etc.). Abordar íntegramente el estudio de las necesidades hídricas de la marisma exige considerar la contribución potencial y real de estos aportes fluviales, y viceversa: los estudios de caudales ecológicos de los ríos que vierten a la marisma deben considerar la importancia que tienen estos caudales en el balance hídrico de la marisma y por ende, en la conservación de la misma.

En la Orden ARM/2656/2008 relativa a la Instrucción Técnica de Planificación Hidrológica se reconoce el tratamiento específico que se deben dar a las zonas protegidas, indicando que *“la determinación e implantación del régimen de caudales ecológicos no se referirá exclusivamente a la propia extensión de la zona protegida, sino también a los elementos del sistema hidrográfico que, pese a estar fuera de ella, puedan tener un impacto apreciable sobre dicha zona”*. Se trata de una referencia aplicable íntegramente al caso del río Guadiamar y otros arroyos que vierten en Doñana. A pesar de que la mayor parte de estas cuencas se localizan fuera de la zona protegida, la determinación de los caudales ecológicos en estos tramos debe considerar las particulares necesidades de la zona protegida.

Se pone de manifiesto que al menos en el marco legal está prevista la interdependencia de los caudales ecológicos en el sistema hidrográfico de una cuenca, incluyendo la relación de los caudales ecológicos entre diferentes ecosistemas (por ejemplo río-marisma). No obstante, su definición y coherencia en el caso de Doñana entraña enormes dificultades por la extrema complejidad de los procesos implicados, así como las grandes limitaciones que existen aún hoy día en su comprensión hidrológica y ecológica.

En estas circunstancias resulta necesario simplificar los múltiples factores implicados en el estudio de los caudales ecológicos en Doñana, sin que esto suponga un detrimento del rigor en el planteamiento. Los modelos conceptuales proporcionan una forma alternativa fácil y eficiente de comunicar y sintetizar procesos extremadamente complejos. La figura 23 muestra las relaciones de los caudales ecológicos, el hidroperiodo de la marisma y diferentes componentes bióticos del ecosistema.

En mayor o menor grado, todas estas relaciones encuentran claros ejemplos en Doñana. Efectivamente, el régimen hidráulico de la marisma está fundamentalmente condicionado por los aportes fluviales de los ríos que vierten a la misma (1). El balance hídrico de la marisma (considerando las entradas y salidas del sistema) y las

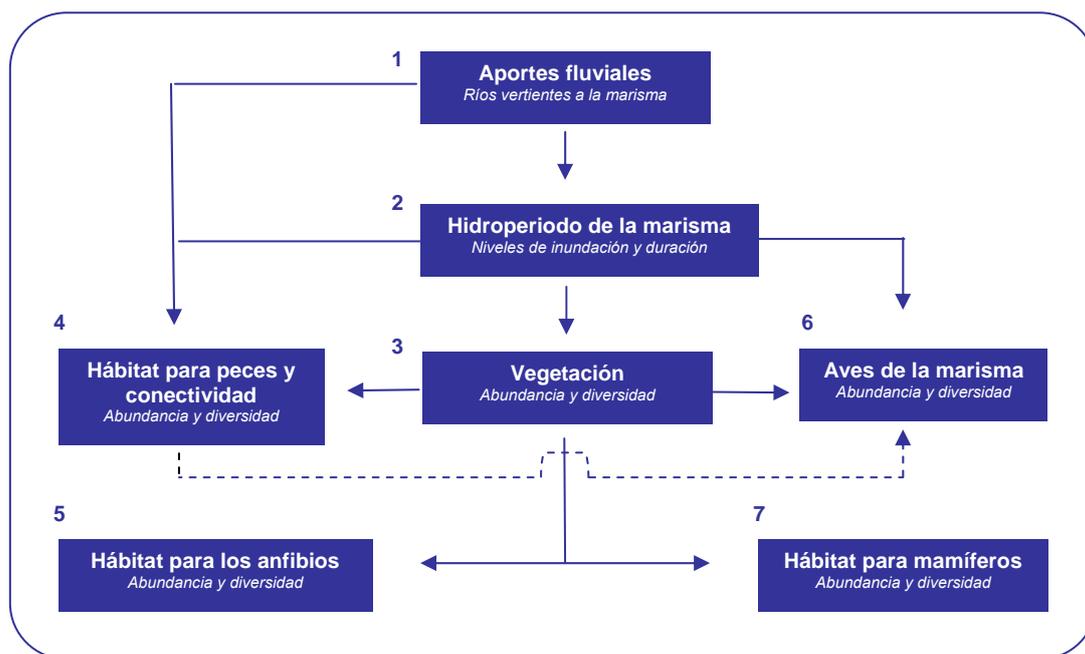


Figura 23. Marco conceptual para integrar las necesidades hídricas de la marisma, los caudales ecológicos de los ríos vertientes y diversos componentes bióticos del ecosistema. FUENTE: Original en *Limno Tech*, 2005. Modificado por el autor.

características topográficas del terreno determinan los niveles de inundación marismeños en cada momento del año. Este régimen de inundación (número de días de inundación, niveles máximos y mínimos de encharcamiento, distribución estacional, etc.) define el hidroperiodo de la marisma (2). El régimen de inundación se traduce al mismo tiempo en determinados parámetros hidráulicos (profundidad media de encharcamiento, duración, etc.) que ejercen una gran influencia en la presencia y distribución de las especies vegetales (3). Los diferentes niveles de inundación ponen en contacto diferentes partes de la marisma, favoreciendo la conectividad para las especies de peces (4). El desagüe natural de la marisma hacia el estuario a través de la Montaña de Río es un claro ejemplo de conectividad que permitía los movimientos migratorios de las especies acuáticas eurihalinas, que a su vez servían de alimento a las poblaciones de aves (4-6). La vegetación de la marisma ejerce un papel determinante en todas las épocas del ciclo biológico de peces (4), anfibios (5), aves (6) y mamíferos (7). Las distintas especies de aves están desagregadas según la estructura del hábitat y tipo de recursos que explotan (2-3-6). En las colonias de cría, la disponibilidad de aguas someras entre la vegetación (2-6), o la presencia de ramas y matorrales en el borde de las marismas (3-6) condicionan el éxito reproductivo de numerosas especies. Al final de la primavera, las marismas comienzan su proceso de secado, reduciéndose drásticamente la lámina de agua en toda su extensión. Cuando el descenso de los niveles de lámina de agua es demasiado rápido y los nidos quedan en seco (2-6), se reduce el éxito reproductivo de las especies.

En la descripción de este marco conceptual, los componentes abióticos (particularmente la hidrología) ejercen un fuerte control sobre los componentes bióticos. No obstante, en el estudio de los caudales ecológicos existe una relación determinante en el sentido inverso: para mantener ciertas comunidades biológicas en la marisma (objetivos de conservación) es necesario restaurar un determinado hidroperiodo, lo cual condiciona en gran medida los caudales ecológicos de sus ríos vertientes (Guadamar, La Rocina, El Partido, etc.).

4.2.2. Un nuevo enfoque: de los métodos simples a los marcos de decisión.

Tal como se ha descrito anteriormente, el trabajo de científicos y expertos relacionado con los métodos de cálculo de caudales ecológicos se ha incrementado notablemente en las últimas décadas, presentando hoy día una extraordinaria evolución en sus conceptos y técnicas de análisis. A pesar de estos avances, aún falta un gran consenso entre científicos y gestores para adoptar una aproximación metodológica plenamente satisfactoria (Arthington et al, 2006).

Esta falta de aceptación no impide visualizar que determinados métodos presentan enfoques, análisis y resultados claramente insuficientes para garantizar la conservación de los procesos y biocenosis característicos de un sistema natural (Poff et al, 1997; Richter, 1997; Lytle y Poff, 2004; Arthington et al, 2006). También se cumple lo contrario, es decir, existe cada vez una opinión más favorable hacia aquellas aproximaciones metodológicas que adoptan el “enfoque por ecosistemas”, prestando atención prioritaria a los procesos naturales de los ecosistemas e incorporando en mayor o menor grado los componentes del régimen natural de caudales. En este sentido, las metodologías holísticas son las mejor consideradas en la bibliografía especializada (Carreño et al, 2008).

Dentro de la comunidad científica existen críticas crecientes acerca de la aplicación de métodos excesivamente simplistas, especialmente en lo que se refiere a la escasez de resultados experimentales, sus excesivas simplificaciones, arbitrariedades, alcances limitados, etc. (Arthington et al, 2006; Parasiewicz et al, 2008; Souchon et al, 2008). Más allá de la discusión de los métodos, la decisión de adoptar un régimen de caudales ecológicos es una elección entre alternativas donde se estiman los beneficios ecológicos de cada una de esas alternativas. El apoyo para adoptar esta decisión significa ayudar a los científicos y gestores a organizar los conocimientos, generar escenarios de caudales ecológicos vs. respuesta ecológica y tomar decisiones.

Se puede decir por tanto que existe un salto cualitativo entre los métodos tradicionales y los “marcos de decisión”. Esta nueva línea permite superar las grandes limitaciones de los métodos, adoptar decisiones según el mejor conocimiento disponible y orientar la puesta en práctica de los caudales ecológicos hacia una gestión basada en la evidencia.

En el caso de Doñana, los conocimientos aplicados deben permitir abordar de un modo racional los caudales ecológicos frente a una gama de posibles opciones de gestión (conservación, compatibilización de usos, minimización de impactos, etc.). En el supuesto de que se cuente con suficiente información numérica (modelos ecológicos, modelos hidráulicos, etc.), presumiblemente las propuestas se adecuarán mejor al objetivo de gestión establecido.

4.2.3. Proceso de formulación de la propuesta

Para formular la propuesta de necesidades hídricas de Doñana se ha empleado una aproximación basada en el marco ELOHA⁵. Se trata de un marco científicamente robusto y flexible para evaluar y gestionar los caudales ecológicos, donde el conocimiento se organiza sistemáticamente en torno al binomio alteración hidrológica vs. respuesta ecológica, dentro de un contexto más amplio de toma de decisión (Arthington et al, 2006; Poff et al, 2009).

⁵ Ecological Limits of Hydrologic Alteration

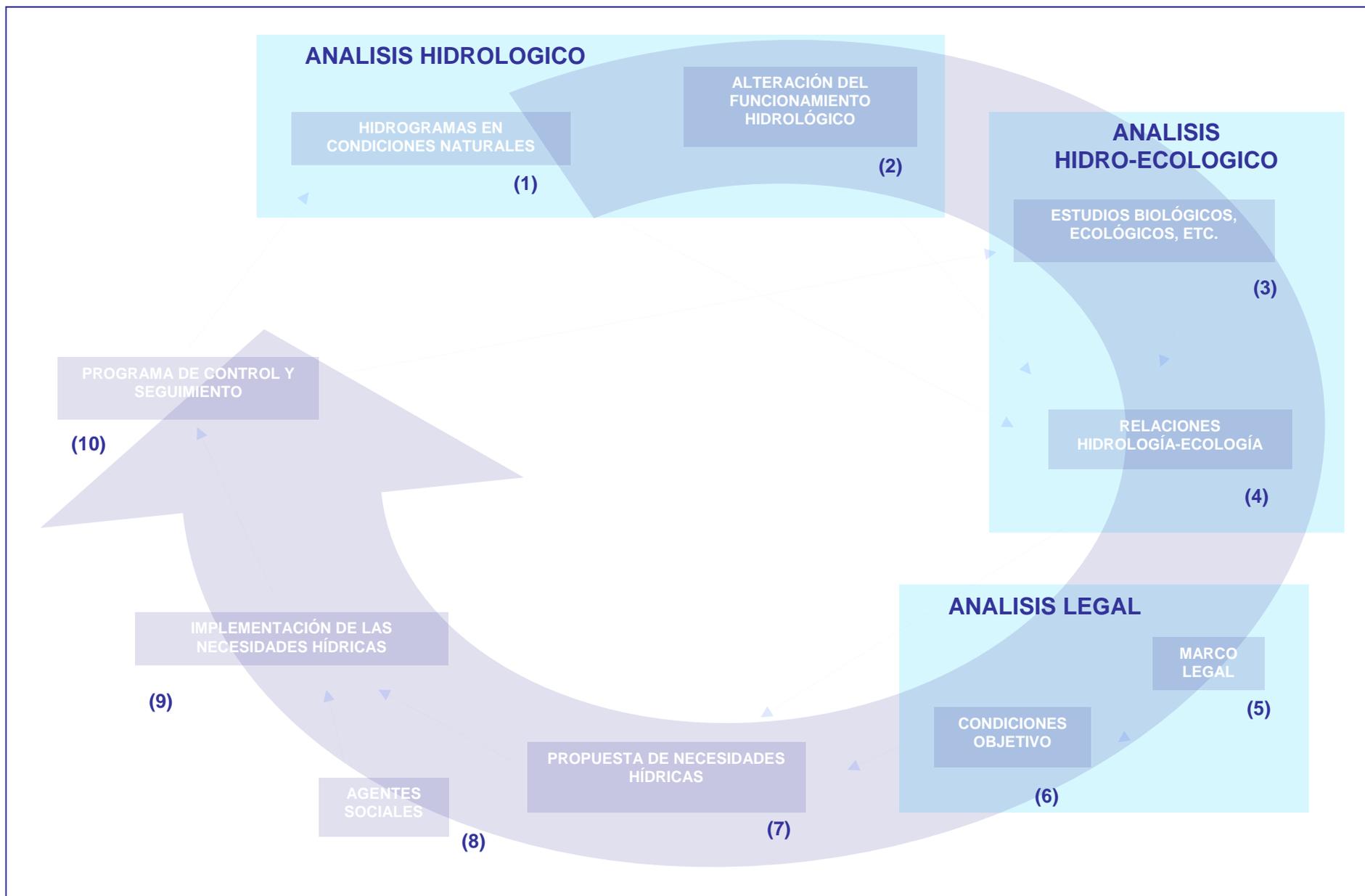


Figura 24. Proceso de formulación de la propuesta de las necesidades hídricas de la marisma. FUENTE: Original en *Conserveonline*. 2009. Modificado por el autor

La formulación de la propuesta de las necesidades hídricas de la marisma a partir de este marco conceptual (pasos 1 a 7 de la figura 24) ha implicado el desarrollo de los tres análisis fundamentales: hidrología, ecología y marco legal. Los contenidos básicos de cada uno de ellos han sido los siguientes:

1.- Análisis hidrológico.

A partir de la información disponible se ha analizado el funcionamiento hidrológico de la marisma y de sus ríos de influencia en condiciones naturales y alteradas (pasos 1 y 2). En la caracterización hidrológica se ha incluido el análisis de los estiajes naturales, el patrón estacional de caudales de base y el régimen de crecidas de cada sistema. Los aportes superficiales han sido complementados con los balances del sistema acuífero Almonte-Marismas. De la comparación de las series históricas naturales con las series observadas (registros en las estaciones de aforo, superficies de inundación, niveles de lámina de agua, etc.) se han evaluado los cambios hidrológicos observados, completando la cronología de estos cambios desde 1850 hasta la actualidad. Complementariamente, los estudios de las aguas subterráneas han permitido conocer los efectos de las actividades humanas sobre las descargas del sistema acuífero en forma de caudales de base de los ríos, alimentación de humedales, etc. El reconocimiento hidrológico a lo largo de los principales cursos también ha permitido identificar y cuantificar los cambios hidrológicos causados por las diferentes infraestructuras y sus agentes asociados. Este análisis ha sido ampliamente desarrollado en el capítulo 3.

2. Análisis hidro-ecológico.

El régimen hidrológico natural es un factor de control clave que marca en gran medida las pautas de cambio de los ecosistemas. Los hábitats y especies asociadas ofrecen respuestas a la dinámica hidrológica natural, entre las cuales se incluye la distribución y abundancia de los diferentes organismos. La relación hidrología-ecología es clave para entender la dinámica de los ecosistemas, hábitats y especies. En primer lugar se ha presentado un modelo general que muestra la relación entre el nivel de conservación y la alteración hidrológica (figura 25). Además, se ha explicitado la relación entre los aportes a la marisma y los diferentes grupos biológicos (modelo conceptual de la figura 23). Entre estos grupos biológicos se ha destacado la vegetación por su importancia intrínseca, por el papel que desempeña para los diferentes grupos faunísticos y por su capacidad indicadora de cambios. En relación a la vegetación se ha mostrado su zonación en función del régimen de inundación (figura 27), un modelo predictivo de cambios según escenarios hidrológicos (figura 28) y los cambios en la vegetación para el periodo 1990-2004 (figura 29). Complementariamente se ha mostrado el caso de otras especies indicadoras de los cambios hidro-ecológicos acaecidos en la marisma.

3. Análisis legal.

Los condicionantes impuestos desde el marco legal restringen en gran medida las posibles opciones de caudales ecológicos en el ámbito de Doñana. Los objetivos generales de conservación se complementan con los específicos como zona protegida (particularmente exigentes en el caso del Parque Nacional). En este estudio se ha revisado tanto el marco legal general de los caudales ecológicos como las disposiciones específicas de Doñana (apartado 4.3.2.). De esta forma se han podido explicitar los objetivos de conservación para los que se debe formular la propuesta de caudales ecológicos coherentemente.

4.3. APLICACIÓN DEL MARCO CONCEPTUAL

4.3.1. Relación Hidrología-Ecología

4.3.1.1. Hidrología vs. conservación: modelo general

Los primeros estudios de caudales ecológicos se abordaban desde planteamientos deterministas, donde se definía una frontera que separaba ecológico y no ecológico, conservación y no conservación (normalmente el límite era un número resultado de aplicar un método de cálculo también determinista). Actualmente los caudales ecológicos se abordan desde un planteamiento más abierto y complejo, asumiendo que diferentes caudales ecológicos proporcionarán diferentes condiciones de conservación (King y Brown, 2006). Un ejemplo se encuentra en el nuevo marco normativo español, donde los caudales exigibles para una masa de agua fuertemente modificada son inferiores a los correspondientes a una masa natural o una zona protegida (Orden ARM/2656/2008 por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica). Esta forma de relacionar los caudales ecológicos con los objetivos de conservación encuentra un apoyo fundamental en el modelo del Gradiente de la Condición Biológica (USEPA, 2005; Davies y Jackson, 2006).

El Gradiente de la Condición Biológica es un modelo científico que describe la respuesta biológica frente a niveles crecientes de presión, de tal forma que la condición biológica de un ecosistema se va deteriorando al incrementar un factor de estrés (por ejemplo la alteración hidrológica). De forma general se cumple que “a mayor alteración hidrológica menor condición biológica” (figura 25).



Figura 25. Principio del “Gradiente de la Condición Biológica” según un factor de estrés. FUENTE: Original en Davies y Jackson, 2006. Modificado por el autor.

Los caudales ecológicos entendidos en sentido amplio encajan bien en este esquema de razonamiento. De hecho, la lógica de los caudales ambientales se articula a través de los objetivos de conservación (“dime el río que quieres y te diré el agua que necesita”), cumpliéndose también de forma general que a mayor interés de

conservación mayores caudales ecológicos. Bajo este planteamiento, los objetivos de conservación son un elemento clave en la aplicación de los caudales ecológicos.

4.3.1.2. Hidrología vs. vegetación.

La elevada diversidad de las comunidades vegetales de Doñana presenta un valor natural intrínseco (García Murillo *et al*, 2007), doblemente incrementado por el papel determinante que desempeña la vegetación para otros grupos faunísticos (aves, anfibios, peces, etc.) y la dinámica ecológica de la marisma en diversos aspectos como el reciclaje de nutrientes, control sobre la fase de aguas turbias por efectos del viento, etc. (MMA, 2001).

Las vastas extensiones de Doñana son alteradas en una escala topográfica de pocos decímetros, diferenciándose en el terreno lagunas superficiales (localmente conocidos como “lucios”), depresiones de numerosos canales pequeños (“caños”), elevaciones de antiguos levés (“paciles”) y otras elevaciones que tienen la apariencia de islas emergidas durante el periodo inundado (“vetas”). La distribución de las diferentes comunidades vegetales concuerda con los elementos fisiográficos anteriormente descritos, distribución controlada en última instancia por la frecuencia y duración de los periodos de inundación (figura 24).

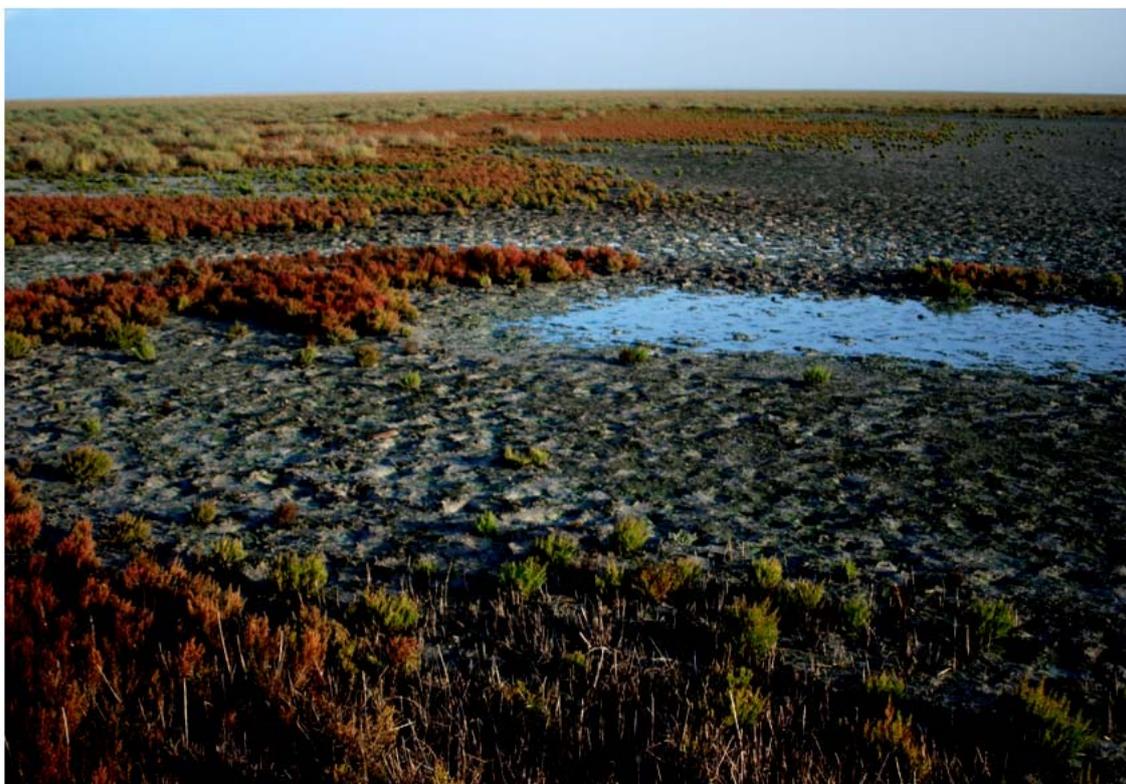


Figura 26. Distribución de las especies vegetales por la frecuencia y duración de los periodos de inundación a partir de variaciones topográficas decimétricas. Lucio del Lobo en el Parque Nacional de Doñana.

Con la finalidad de conocer las variables hidráulicas que controlaban la distribución de la vegetación en la marisma de Doñana, desde 1998 hasta el año 2000 se llevó a cabo un extenso muestreo sobre la base de una red topográfica de alta resolución para recopilar información acerca de la localización y composición de las comunidades vegetales (García Viñas, *et al*. 2005).

A partir de esta información y del estudio de los niveles de agua en las diferentes áreas de la marisma, se calcularon diversos parámetros hidráulicos para cada una de las parcelas de estudio (nº de días con agua, suma de los cm de agua-día, etc.). Los resultados obtenidos permitían agrupar las diferentes asociaciones vegetales según su régimen hidráulico (tabla 5 y figura 27).

Comunidad vegetal	Especies dominantes	Cota* (m.s.n.m.)	Días de inundación
Almajar	<i>Arthrocnemum macrostachyum</i>	1,58 - 1,83	57
Almajar mixto	<i>A. macrostachyum/Juncus subilatus</i>	1,60 - 1,36	95
Junquillar negro	<i>Eleocharis palustris</i>	1,54 - 1,34	166
Castañuelar	<i>Scirpus maritimus</i>	1,35 - 1,18	139
Bayuncar	<i>Scirpus litoralis</i>	1,21 - 1,00	184
Lucio	Sin helófitos	1,28 - 0,821	179

*Localización del 80% de las parcelas muestreadas

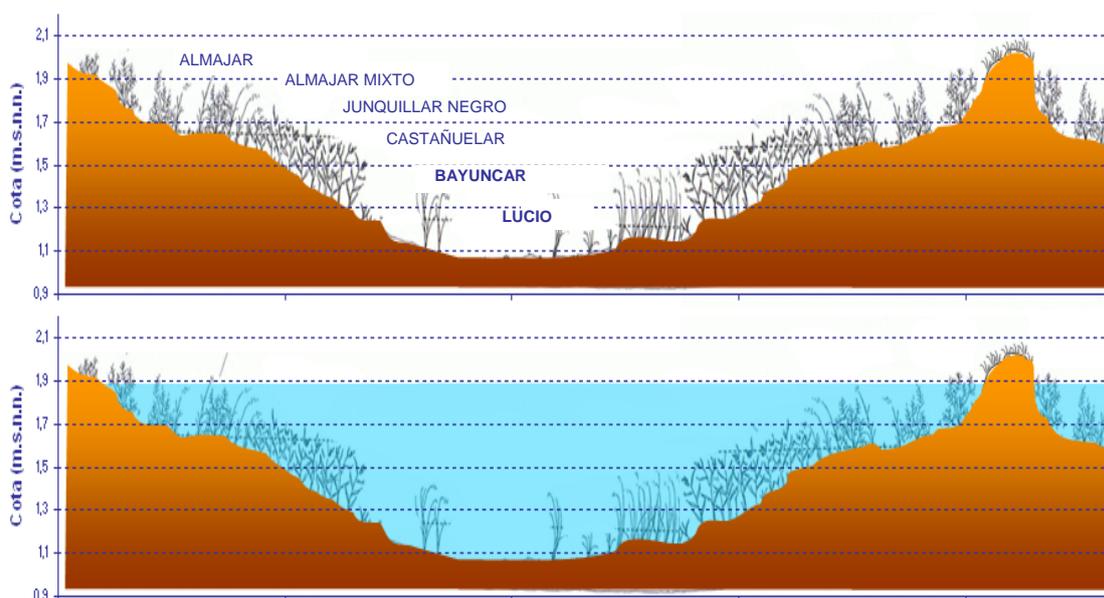


Tabla 5 y Figura 27. Distribución de las comunidades vegetales de la marisma de Doñana según la cota y días de inundación y modelo idealizado de la distribución de la vegetación según la cota del terreno. FUENTE: Original en *García Viñas et al, 2005*. Modificado por el autor.

De acuerdo con las características mesológicas de las agrupaciones vegetales estudiadas, se analizaron las tendencias de la sucesión vegetal en relación a su régimen hidráulico. Los resultados permitieron desarrollar un modelo de vegetación que predice los cambios en las comunidades vegetales en función del régimen de inundación de la marisma, utilizando por ejemplo el número de días de inundación (figura 28).

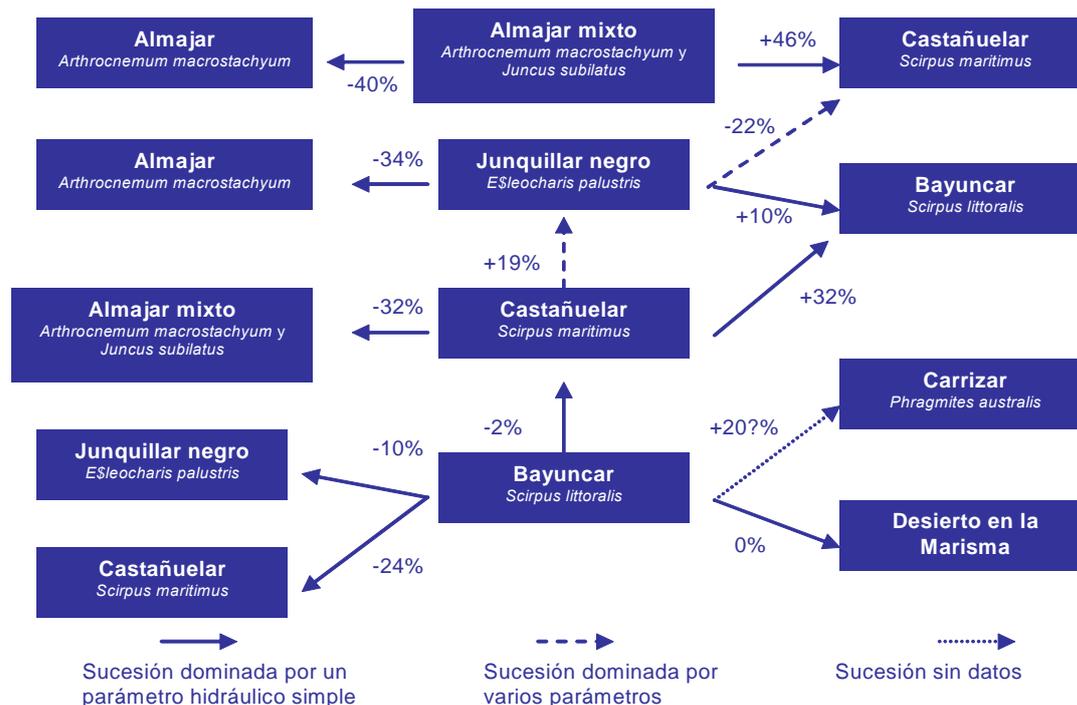


Figura 28. Modelo predictivo de cambios en la vegetación según los días de inundación. FUENTE: Original en García Viñas et al, 2005. Modificado por el autor.

Dentro del Programa de Seguimiento de Procesos y Recursos Naturales en el Parque Nacional de Doñana (subprograma 2 relativo al Medio Biológico), la Estación Biológica de Doñana ha evaluado los cambios en la vegetación de la marisma para el periodo 1990-2004 comparando el Mapa Ecológico de Doñana (Bravo et al. 1998) con el Mapa de Vegetación de Marisma⁶ (EBD-CSIC, 2009).

Los principales cambios observados en la vegetación de la marisma (figura 29) se pueden resumir en:

Sustitución del Bayuncar por el Castañuelar. Se produce una drástica reducción en la parte central de la marisma. En términos globales se produce una reducción del Bayuncar en el conjunto de la marisma próxima al 60%. En cambio, el Castañuelar incrementa su presencia multiplicando casi por 2,5 la superficie ocupada en 1990.

Sustitución del Candilejo por el Almajar. El Candilejo ocupa cotas inferiores, donde puede disfrutar de un período más prolongado de inundación. Se trata de la agrupación vegetal que sufre la mayor reducción en la marisma (80% de reducción). Esta reducción favorece la presencia del Almajar, que incrementa su superficie casi en un 50%.

Sustitución del Juncar por el Castañuelar. Los juncos característicos de la Vera-Retuerta sufren una reducción en su superficie superior al 60%. Su espacio es colonizado por el Castañuelar, que tal como se indicaba anteriormente, multiplica en el conjunto de la marisma su presencia por 2,5 la superficie de 1990.

⁶ Trabajo inédito realizado por el Dto. de Biología Vegetal de la Universidad de Sevilla en 2004 por encargo de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

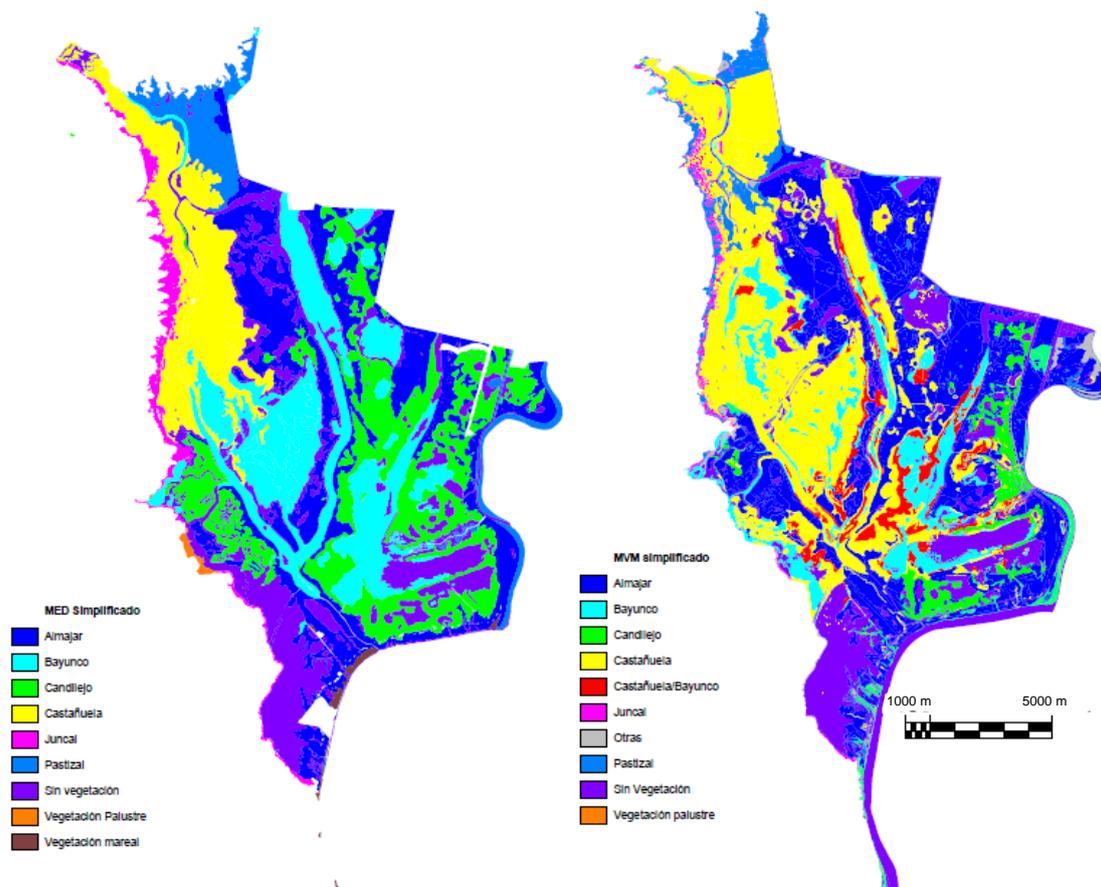


Figura 29. Cambios en la vegetación de la marisma de Doñana para el periodo 1990-2004. FUENTE: Original en EBD-CSIC. 2009.

Los cambios observados pueden ser interpretados en términos de balance hídrico a partir del modelo predictivo de vegetación, correspondiendo en este caso a 14 años caracterizados de forma general por la reducción del hidroperiodo.

Efectivamente, según Viñas y colaboradores (2005), *“la reducción prolongada del hidroperiodo impulsaría la sucesión vegetal en el sentido de favorecer las agrupaciones vegetales menos exigentes y hacer retroceder a las más necesitadas de agua (...). Si la reducción del régimen de inundación fuera muy drástica, las agrupaciones vegetales más exigentes podrían perder su hábitat en la marisma”*

Estos resultados son coherentes con el análisis hidrológico. Como se indicaba en el apartado 3.2.5., las series mensuales de inundación de la marisma del Parque Nacional de Doñana para el periodo 1975-2004 mostraban valores de inundación muy reducidos (Aragón et al, 2005). En el caso de los niveles mínimos observados, durante el mes de febrero no se alcanzó el 5% de inundación, con 8 meses presentando un nivel de inundación inferior al 1%.

4.3.1.3. Hidrología vs. vegetación vs. aves.

A pesar de las limitaciones y precauciones necesarias a la hora de utilizar las aves acuáticas como bioindicadores en los humedales (Green y Figuerola, 2003), el estado de conservación de algunas especies reflejan el alcance de la alteración del régimen

hidrológico de Doñana (directa o indirectamente a través de los cambios en la vegetación), y, por extensión, los beneficios potenciales de restaurarlo. A pesar de que no se ha abordado en términos cuantitativos la relación de estas especies con el régimen hidrológico, al menos se pone de manifiesto esta relación. Estas especies mantenían una cierta presencia en el área cuando el funcionamiento de la marisma era más o menos natural, llegando a alcanzar abundancias relativas importantes. Hoy día han desaparecido o se encuentran gravemente amenazadas.

El **Avetoro común** (*Botaurus stellaris*) mantiene una población actual que no debe superar los 25 machos territoriales en España y 200 en el conjunto de las poblaciones Mediterráneas (España, Francia e Italia). Antaño era una especie con presencia constante en ciertos humedales españoles, pero a partir de la segunda mitad del siglo XX se produjo el mayor declive poblacional, llevando a los efectivos poblacionales hasta el borde mismo de la extinción en los años 80. En la década de los 90 se estimó la presencia de 8 machos territoriales en las Marismas del Guadalquivir, que desaparecieron tras el ciclo de sequía de 1992, no habiéndose vuelto a citar como especie reproductora. La degradación y pérdida de sus hábitats naturales ha sido identificada como la principal causa del declive de la especie, destacando entre otros factores la escasez de extensos carrizales (con ausencia de diferentes etapas de desarrollo) y los efectos de la gestión del agua (manipulación de niveles, drenajes, abstracciones, etc.). Otro de los factores señalados apunta al control del régimen hídrico que se realiza en la mayoría de los humedales, tendentes a convertir los carrizales en formaciones muy densas e inapropiadas para la especie. Una de las acciones prioritarias del Plan de Acción Europeo para la especie recomienda la adecuada gestión y protección de las zonas de reproducción.

La **Cerceta Pardilla** (*Marmaronetta angustirostris*) es otra especie que refleja los cambios en el régimen hidrológico de Doñana. Esta especie era la anátida nidificante más común en las marismas del Guadalquivir a finales del siglo XIX. La alteración de los humedales someros y estacionales es la amenaza más importante para la especie, ya que raramente utiliza los humedales artificiales y permanentes (Green, 1993 y 1996; Martí y del Moral, 2003). El éxito reproductivo de la especie necesita dos factores fundamentales: la existencia de abundantes praderas de macrófitos sumergidos y la duración del periodo de inundación hasta bien entrado el verano, ya que es un reproductor tardío. El acortamiento del ciclo hidrológico (MMA, 2001) hace casi imposible su reproducción con éxito en Doñana.

Otras especies reflejan también el impacto de los cambios hidrológicos en el mantenimiento de unas condiciones adecuadas del hábitat. Por ejemplo, como consecuencia de la colmatación, cambios del régimen hidrológico y sobreexplotación de acuíferos, el hábitat disponible de la **Focha Moruna** (*Fulica cristata*) en el ámbito de Doñana es el 18% del que existía en la década de 1950 (Martí y del Moral, 2003). La **Malvasía Cabeciblanca** (*Oxyura leucocephala*) es otra especie extinguida como reproductor muy sensible a las condiciones hidrológicas. Con un mínimo histórico de la población española cifrado en 1977 de 22 ejemplares, sufrió un espectacular incremento hasta alcanzar en el año 2000 un número de 4489 ejemplares. Sólo unos meses después desaparecieron más de 2000 ejemplares como consecuencia de la escasez de precipitaciones y la falta de humedales que ofrecieran buenas condiciones (Martí y del Moral, 2003).

4.3.2. Marco legal de los caudales ecológicos en Doñana: objetivos y criterios

4.3.2.1. Los caudales ecológicos dentro de un marco legal general.

Los caudales ecológicos (o ambientales) han ido adquiriendo durante las últimas décadas una presencia creciente tanto en la gestión del agua como en la conservación ambiental. La planificación hidrológica en España es un claro ejemplo de su relevancia (considerados como una restricción previa en el balance de recursos de las cuencas hidrológicas) y su evolución reciente en aspectos como su definición, cálculo y proceso de implantación (Sánchez y Martínez, 2008).

Más allá de las diferentes percepciones en cuanto a su alcance y objetivos, en términos generales no se cuestiona la enorme importancia de los caudales ecológicos para mantener el estado de conservación de los ecosistemas acuáticos (Poff *et al*, 1997; Richter *et al*, 1997; Bunn y Arthington, 2002). De hecho, a partir de ciertos niveles de alteración hidrológica de los ríos y humedales se producen cambios en los procesos ecológicos que ponen en claro riesgo la conservación a medio plazo de la biodiversidad (Naiman *et al.*, 1995; Ward *et al.*, 1999). No cabe duda de que los caudales ecológicos son un puente entre los usos del agua y la conservación, y una pieza clave para alcanzar uno de los objetivos básicos del nuevo ciclo de la planificación hidrológica: el Buen Estado Ecológico.

Efectivamente, la Directiva Marco del Agua (DMA) constituye un nuevo escenario para la mejora y uso sostenible de los ecosistemas acuáticos europeos. A pesar de que en la DMA no aparece explícitamente el término “*caudales ecológicos*”, en su Anexo V se establece que el régimen hidrológico de los ríos para conseguir el Buen Estado debe ser aquel que “*permita niveles bajos de distorsión en los valores de los indicadores de calidad biológicos, desviándose sólo ligeramente de los valores propios en condiciones inalteradas*”.

En el caso de los lagos (y humedales) también se alude en términos similares a su régimen de necesidades hídricas, definido como aquel régimen que “*mantiene unas variaciones de nivel, tiempo de permanencia y conexión con las aguas subterráneas, de tal forma que los indicadores de calidad biológicos se desvíen sólo ligeramente de los valores propios en condiciones inalteradas*”. De nuevo sin mencionar explícitamente los requerimientos hídricos de lagos y humedales, implícitamente se establece la necesidad de mantener determinados balances hídricos y sus correspondientes hidroperiodos según las condiciones de referencia naturales.

La obligación de alcanzar el Buen Estado Ecológico vincula a los caudales ecológicos, ya que sin agua los indicadores biológicos (por ejemplo los peces) no alcanzarían los niveles mínimos exigidos. No obstante, este objetivo general puede ser aún más riguroso cuando se trata de zonas protegidas. En el artículo 4 (1) (c) de la DMA, relativo a los objetivos ambientales de las zonas protegidas, se establece que los Estados miembros habrán de lograr el cumplimiento de todas las normas y objetivos, a menos que se especifique otra cosa en el acto legislativo comunitario en virtud del cual haya sido establecida cada una de las zonas protegidas. Además, la propia Directiva establece en su artículo 4 (2) que cuando más de uno de los objetivos establecidos en el apartado 1 se refieran a una determinada masa de agua, se aplicará el más riguroso.

Pero no es exclusivamente el ámbito de aguas donde deben enmarcarse los caudales ecológicos. Dentro de Doñana y en su entorno, existen diversos tramos y zonas que forman parte de la Red Natura 2000. Según establece la Directiva 92/42/CEE, los objetivos ambientales que deben perseguir los caudales ecológicos en estas zonas

protegidas son los de conseguir el estado de “*conservación favorable*” de los hábitats o especies con presencia significativa en tales lugares. Además, para las especies listadas del anexo IV (a) de dicha Directiva, se establecerán unas condiciones de caudales ambientales adecuadas para salvaguardar la continua funcionalidad ecológica de sus áreas de cría y descanso que contribuya eficazmente al sistema de estricta protección de las mismas.

Desde esta perspectiva, los caudales ecológicos constituyen el puente esencial entre dos políticas fundamentales para la conservación, como son el agua y el medio ambiente. De la buena comprensión y aplicación de los caudales ecológicos dependerá en gran medida la integración efectiva de tales políticas hacia un verdadero desarrollo sostenible.

4.3.2.2. Marco normativo específico para Doñana

Además de otras menciones en la legislación sectorial de aguas (Ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional, Ley 11/2005, Real Decreto 907/2007 del Reglamento de Planificación Hidrológica, etc.), la Orden ARM/2656/2008 establece que “*las demandas hídricas ambientales de los humedales deberán definirse en los planes hidrológicos de cuenca, considerando en este caso los aportes hídricos necesarios para conseguir los objetivos ambientales de dichos humedales*”.

Una nueva figura de protección legal concebida exclusivamente para la conservación de los ríos son las “Reservas Naturales Fluviales”. Esta nueva figura proviene del ámbito de la política de aguas (LEY 11/2005, de 22 de junio), donde se definen las RNF como “*ríos o tramos de ríos con escasa o nula intervención humana, cuyo objetivo es garantizar su alto nivel de conservación*”. Hasta el momento, no existía ninguna figura de legal que garantizase estos niveles de protección de las aguas. Sirva como ejemplo las áreas protegidas: a pesar de que los ecosistemas acuáticos son un criterio principal de designación en al menos 258 de los espacios protegidos españoles, su conservación en el ámbito de la gestión del agua no queda garantizada por problemas competenciales, descoordinación entre administraciones, etc. (EUROPARC, 2008). En este caso, las Reservas Naturales Fluviales sustentan el mayor nivel de conservación de las aguas, donde los caudales ecológicos no pueden ser otros que los regímenes hidrológicos naturales.

Complementariamente, el REAL DECRETO 907/2007, por el que se aprueba el Reglamento de Planificación Hidrológica, en su artículo 23 introduce la posibilidad de declarar un “*régimen de protección especial*” para determinadas zonas, cuencas o tramos de cuencas, acuíferos o masas de agua por sus características naturales o interés ecológico. No cabe duda de que Doñana es meritoria de este régimen de protección especial (tanto las aguas superficiales como las subterráneas), que pudiera hacerse extensible a los ríos que vierten a la marisma por el interés ambiental y estratégico de los mismos. En su caso, el Plan Hidrológico del Guadalquivir deberá recoger la clasificación de dichas zonas y las condiciones específicas para su protección.

Además de estas disposiciones generales, la legislación básica se complementa con las características particulares de Doñana como zona protegida. Así, los objetivos de conservación del Parque Nacional de Doñana quedan recogidos en la Ley 91/1978 (régimen jurídico especial orientado a la protección de la integridad de la gea, fauna, flora, aguas y atmósfera). En este sentido, en cumplimiento del Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional de Doñana (aprobado por R.D. 1772/1991), fue aprobado en 1994 el “*Desarrollo Sectorial del Parque Nacional de Doñana en materia de manejo*”.

de los recursos hídricos” (ICONA, 1994) donde se especificaban, entre otros aspectos, las condiciones de manejo del agua dentro del Parque Nacional y las medidas de actuación necesarias.

En este plan de manejo se establece como objetivo mantener los procesos ecológicos esenciales que permitan la conservación (y recuperación, en su caso) de la biodiversidad ligada a las zonas húmedas, para lo cual la gestión del agua dentro del Parque Nacional debería simular un funcionamiento hídrico lo más parecido posible a las condiciones naturales. Este planteamiento llevó a un modelo de gestión que se ha regido por los siguientes criterios de manejo (ICONA, 1994):

- Las aguas deberán fluir por sus cauces tradicionales, en cantidad y calidad similares a las del régimen histórico.
- Las aguas no deberán permanecer quietas en un punto determinado más tiempo del que lo estarían en condiciones naturales.
- Las aguas no deberán cubrir zonas que nunca serían inundadas en condiciones naturales
- Las aguas deberán poder mantener un flujo de intercambio periódico y libre con el estuario.
- Deberá asegurarse un mínimo de marisma inundada en años de sequía.

En el caso del Parque Natural de Doñana (declarado por la Ley 2/ 1989), sus objetivos ambientales quedan establecidos en el Plan de Ordenación de Recursos Naturales, destacando entre ellos la *“conservación y restauración de la dinámica hidrológica natural que permita la existencia de los sistemas de marisma y lagunares”*.

4.3.3. Formulación de la propuesta de caudales ecológicos en Doñana.

Como se ha descrito anteriormente, frente a la elección de un método individual para formular la propuesta de necesidades hídricas de Doñana, en este estudio se ha preferido adoptar un marco de decisión basado en ELOHA. Se entiende de esta forma que una propuesta de caudales ambientales es una síntesis ordenada de conocimientos puesta al servicio de la toma de decisiones, que busque en última instancia la conformidad y coherencia entre los compromisos legales y dichos conocimientos.

Una vez completados los análisis en el ámbito hidrológico (capítulo 3), ecológico (apartado 4.3.1.) y normativo (apartado 4.3.2.), para Doñana y su área de influencia se adoptan las siguientes propuestas:

- 1. Para cada uno de los ríos y arroyos que vierten en la marisma, la propuesta de caudales ecológicos estará conformada por el conjunto de valores propios de su régimen hidrológico natural.**
- 2. En coherencia con las propuestas formuladas para los ríos y arroyos, la propuesta de las necesidades hídricas de la marisma estará configurada por el conjunto de volúmenes que vertían a la misma en condiciones naturales.**

Entre los argumentos que apoyan estas propuestas destacan los siguientes:

- a) Los objetivos de conservación para el Espacio Natural de Doñana están establecidos en las diferentes disposiciones legales que le afectan. En general se ha adoptado para este espacio *“la obligación de proteger (o restaurar en su caso) la integridad de la gea, fauna, flora, aguas y atmósfera”* (Ley 91/1978) y en particular que *“las aguas deberán fluir por sus cauces tradicionales, en cantidad y calidad similares a las del régimen histórico”* (ICONA, 1994). En ausencia de otras presiones, con el régimen hidrológico natural se puede garantizar la conservación de la integridad ecológica de este espacio.
- b) A tenor de los documentos analizados en este estudio, se puede afirmar que la recuperación de una dinámica hidrológica más natural de los ríos, arroyos y la marisma es una condición imprescindible para lograr los objetivos de conservación del Espacio Natural de Doñana. Como norma general, el modelo del Gradiente de la Condición Biológica explica que *“a mayor alteración hidrológica mayor pérdida de la integridad ecológica del espacio”*, y viceversa. En particular ha sido relevante conocer la tendencia de cambios en la vegetación (reducción drástica de las especies más hidrófilas) y el declive de algunas especies de aves indicadoras de los efectos de la alteración hidrológica (Avetoro común, Cerceta pardilla, Focha Moruna, Morito, etc.).
- c) Reconociendo que existen limitaciones e incertidumbres en el conocimiento de los procesos hidrológicos y ecológicos en Doñana (en particular en lo relativo a la cuantificación del régimen hidrológico natural de los ríos y la marisma, la respuesta de las especies a los cambios ambientales, etc.), se parte de un nivel de conocimiento suficiente para adoptar una propuesta de caudales ambientales en el ámbito de Doñana. La aproximación adoptada es coherente con las recomendaciones de la Convención Ramsar⁷, en particular con los *“Lineamientos dirigidos a las Partes Contratantes en relación con el mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales para conservar los humedales”*. y más concretamente cuando se hace referencia a que *“cuando la información disponible no baste para tomar una decisión definitiva sobre el caudal óptimo requerido, se deberá aplicar el principio de precaución para mantener una situación tan natural como sea posible”*.
- d) Los caudales ecológicos de los ríos que vierten a Doñana quedan vinculados a la misma en virtud de la Orden ARM/2656/2008. En esta norma se establece que *“la determinación e implantación del régimen de caudales ecológicos no se referirá exclusivamente a la propia extensión de la zona protegida, sino también a los elementos del sistema hidrográfico que, pese a estar fuera de ella, puedan tener un impacto apreciable sobre dicha zona*. En el caso de Doñana es fundamental la relación de las cuencas vertientes con la marisma y de las aguas subterráneas y superficiales. La gestión sostenible de las cuencas vertientes será un elemento clave para alcanzar la gestión sostenible de Doñana. En este sentido cabe recordar la recomendación del Consejo de Europa para renovar el Diploma Europeo del Parque Nacional de Doñana, donde se especifica que la explotación del acuífero Almonte-Marismas debe permitir la recuperación de las marismas con un aporte adecuado de agua tanto en cantidad como en calidad.

⁷ La Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971) es un tratado intergubernamental cuya misión es *“la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo”*. En junio de 2007 el total de naciones adheridas a la Convención como Partes Contratantes era de 155, y había más de 1.700 humedales de todo el mundo, con una superficie mayor de 151 millones de hectáreas.

4.4. PROPUESTA DE CAUDALES ECOLOGICOS EN EL AMBITO DE DOÑANA

En la figura 30 se muestran los puntos de cálculo de caudales ecológicos abordados en este estudio, además del balance hídrico general de la marisma.

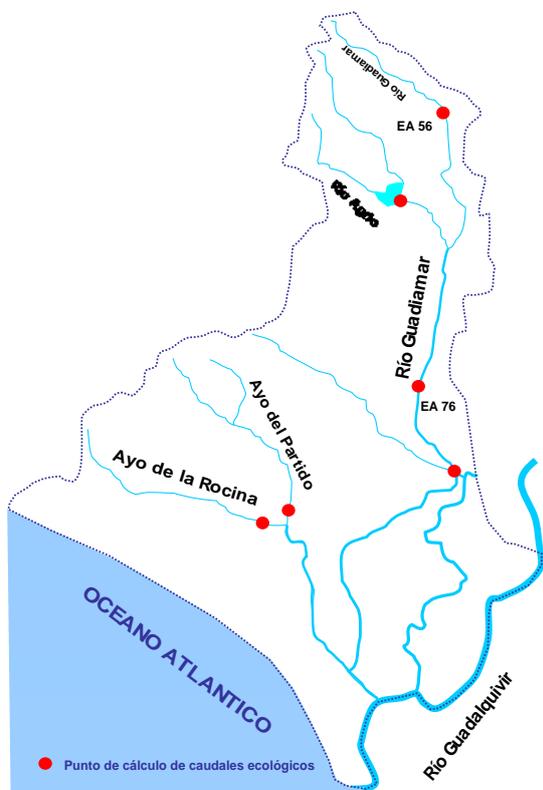


Figura 30. Localización de los tramos de estudio de caudales ecológicos FUENTE: Elaboración propia

En total se han considerado 6 tramos de estudio en cursos fluviales (4 en la cuenca del río Guadamar) y las aportaciones características de la marisma asimiladas en este caso a las aportaciones acumuladas de sus tributarios.

Para la selección de los tramos de estudio se ha considerado la disponibilidad de información hidrológica, la representatividad de los principales elementos del sistema hidrográfico y su importancia desde el punto de vista ambiental y estratégico en el sistema de explotación.

En las siguientes tablas y gráficas se muestran las propuestas de caudales ecológicos obtenidos para los diferentes tramos analizados. Para cada uno de estos tramos aparece el régimen hidrológico natural (caracterizado en diferentes tonalidades de azul según su frecuencia de ocurrencia⁸) y las propuestas de caudales mínimos para años secos y medios.

Los datos hidrológicos empleados corresponden al modelo SACRAMENTO para la para el periodo 1940-1996 (CHG, 1998). Los resultados obtenidos se ajustaban mejor a los datos de las estaciones de aforo en régimen natural que los ofrecidos por el modelo SIMPA.

Llegados a este punto, convendría diferenciar dos aspectos. A pesar de que las propuestas persiguen alcanzar el régimen hidrológico natural (objetivo general), a los efectos de gestión se deberían considerar unos “caudales objetivo” que se deben mantener en el río (objetivos operativos de gestión). En este sentido se han definido las propuestas que se muestran a continuación. Para cuantificar estos caudales se ha caracterizado el régimen hidrológico natural en dos situaciones hidrológicas: “año medio” y “año seco”, adaptación simplificada del método del Rango de la Variabilidad Natural⁹ (Richter *et al*, 1997).

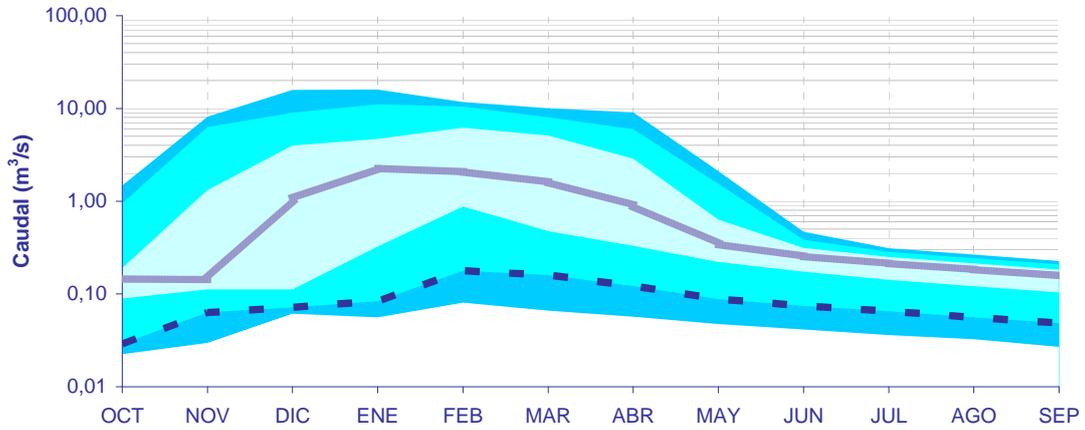
De esta forma queda abierta la puerta a la compatibilización de determinados usos con sus correspondientes caudales ecológicos, entendiendo que estos usos pueden existir siempre y cuando no impidiesen circular los valores de caudal ecológico previamente establecidos.

⁸ Los códigos de colores son: azul cielo rango entre el percentil 5-95; azul turquesa rango entre el percentil 10-90 y azul turquesa claro rango entre el percentil 25-75

⁹ Traducción del método Range of Variability Approach con sus siglas RVA

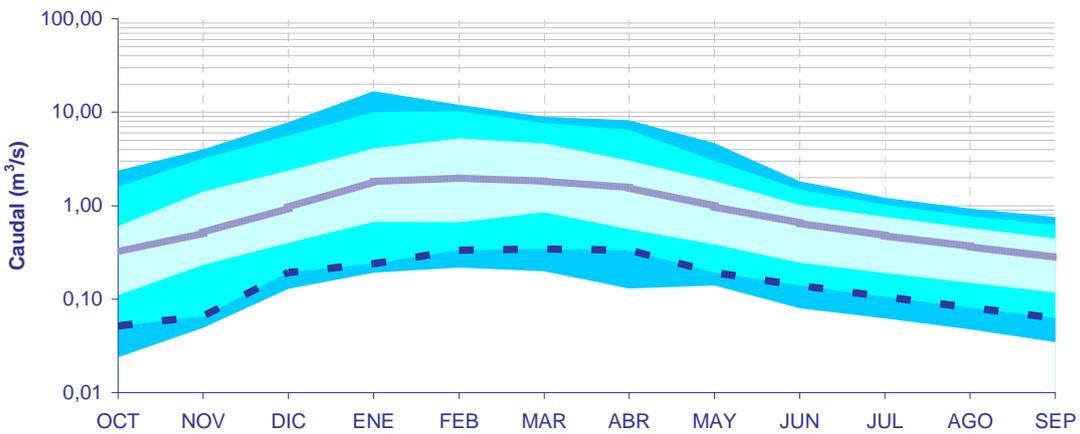
LA ROCINA

		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
CAUDAL ECOLOGICO	Años secos	0,03	0,06	0,07	0,08	0,18	0,16	0,12	0,09	0,07	0,06	0,06	0,05
	Años medios	0,15	0,14	1,06	2,26	2,08	1,60	0,90	0,34	0,25	0,21	0,18	0,16



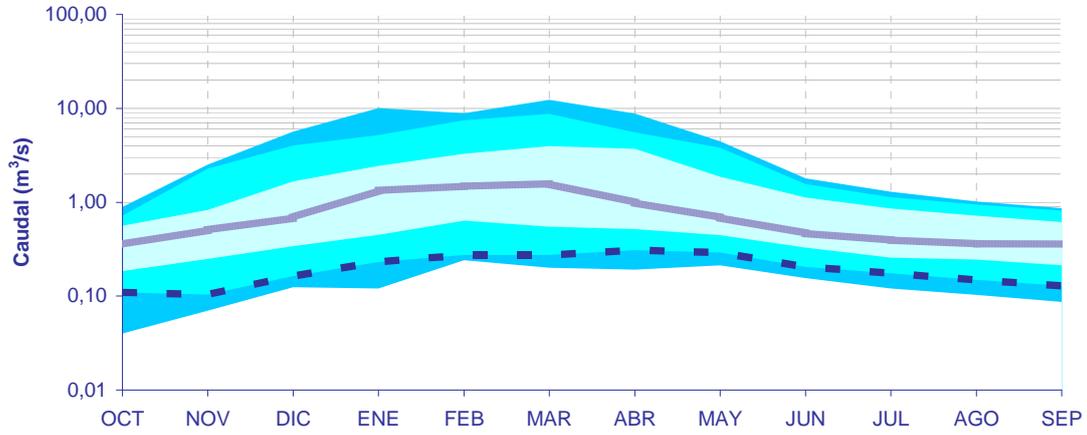
ARROYO EL PARTIDO

		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
CAUDAL ECOLOGICO	Años secos	0,05	0,07	0,19	0,24	0,33	0,34	0,33	0,19	0,14	0,11	0,08	0,06
	Años medios	0,32	0,51	0,94	1,81	1,96	1,82	1,56	0,98	0,65	0,48	0,37	0,28



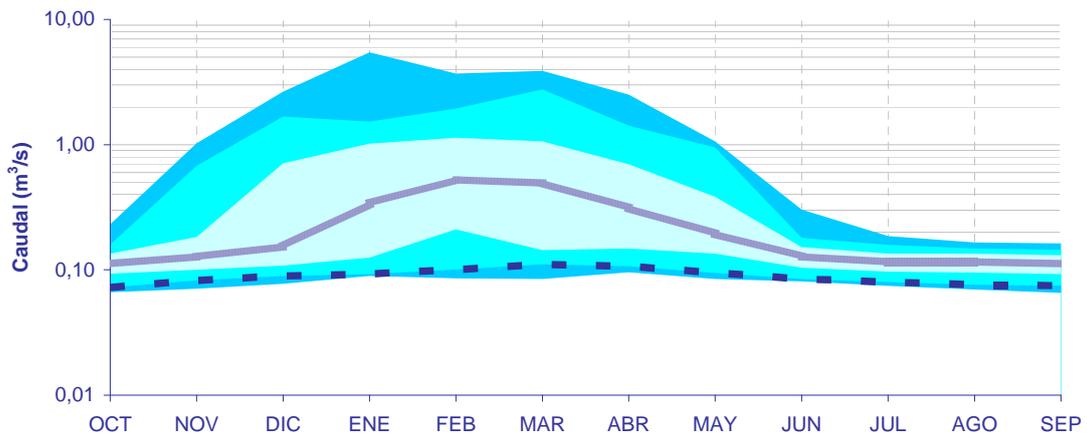
RIO GUADAMAR EN E. EL AGRIO

		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
CAUDAL ECOLOGICO	Años secos	0,11	0,10	0,16	0,23	0,27	0,27	0,31	0,29	0,21	0,17	0,15	0,13
	Años medios	0,35	0,51	0,68	1,33	1,48	1,57	0,99	0,69	0,47	0,40	0,36	0,36



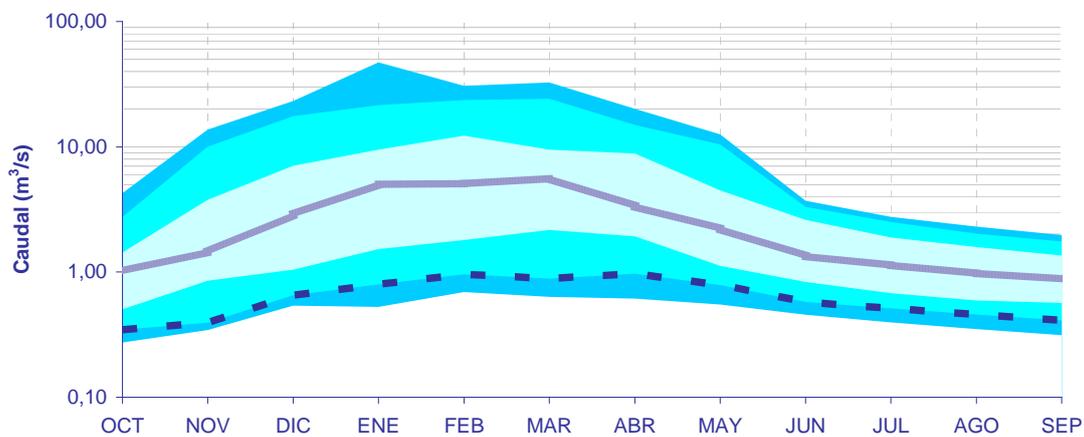
RIO GUADAMAR EN E. A. 56

		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
CAUDAL ECOLOGICO	Años secos	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07
	Años medios	0,11	0,13	0,15	0,34	0,52	0,49	0,31	0,19	0,13	0,12	0,12	0,11



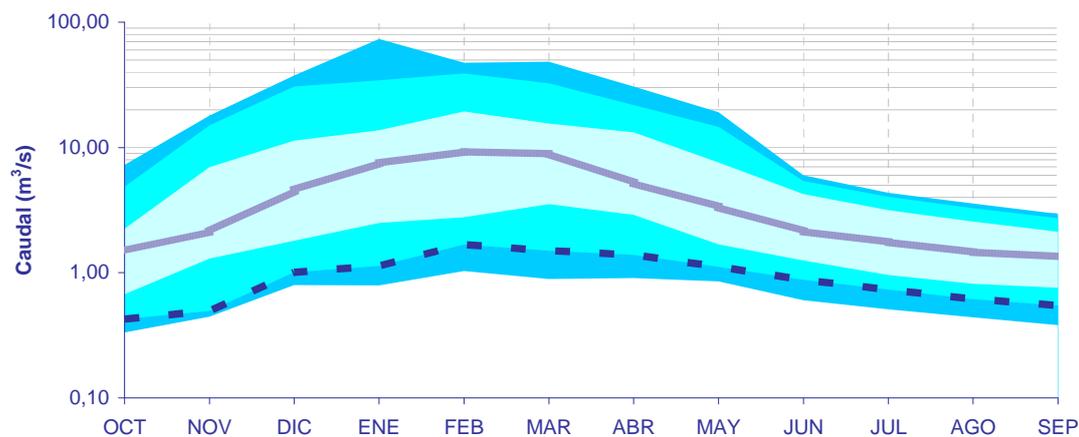
RIO GUADIMAR EN E. A. 76

		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
CAUDAL ECOLOGICO	Años secos	0,35	0,39	0,65	0,80	0,96	0,88	0,97	0,79	0,57	0,51	0,46	0,41
	Años medios	1,02	1,44	2,86	5,03	5,06	5,59	3,33	2,20	1,33	1,13	0,97	0,88



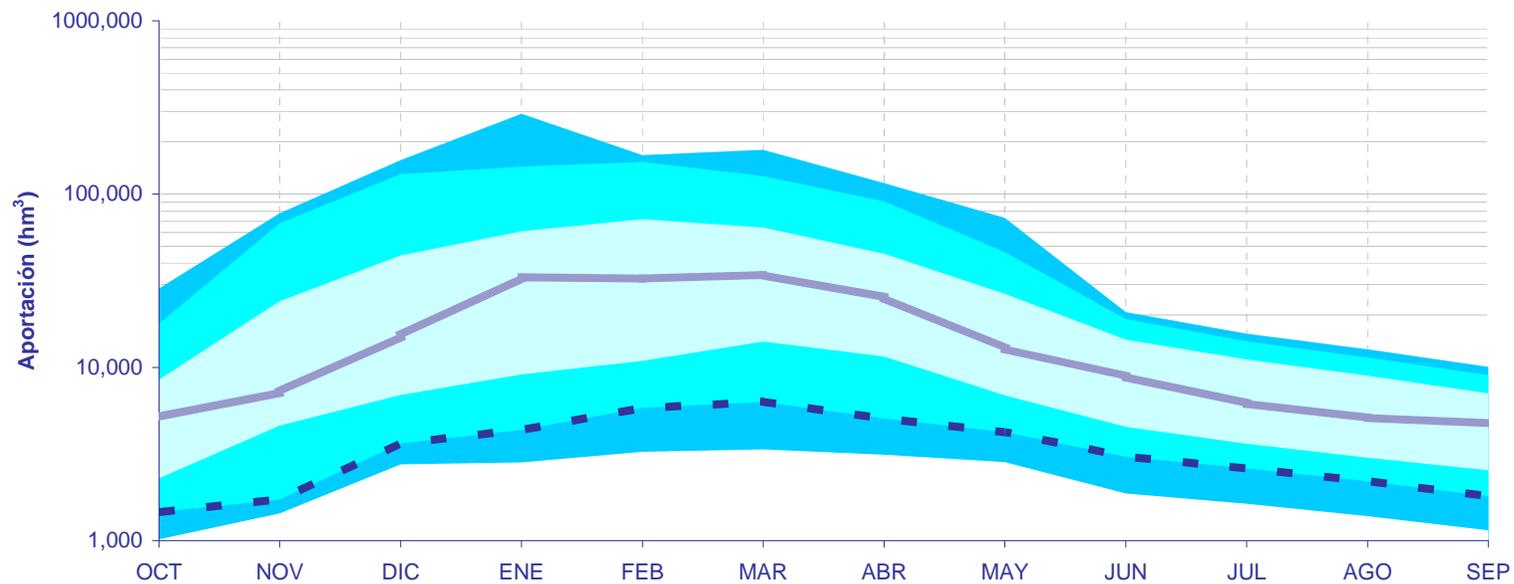
RIO GUADIMAR EN EL BRAZO DE LA TORRE

		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
CAUDAL ECOLOGICO	Años secos	0,43	0,49	1,01	1,13	1,67	1,50	1,38	1,11	0,88	0,73	0,62	0,55
	Años medios	1,49	2,12	4,54	7,49	9,24	8,91	5,19	3,33	2,14	1,75	1,46	1,35



APORTACIONES CARACTERISTICAS A LA MARISMA

		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	TOTAL
APORTES CARACTERISTICOS	Muy secos	1,5	1,7	3,6	4,4	5,8	6,3	5,1	4,2	3,1	2,6	2,2	1,8	42,3
	Seco	2,3	4,6	6,9	9,1	10,9	14,1	11,5	6,9	4,5	3,6	3,0	2,6	80,1
	Años medios	5,2	7,2	15,2	33,2	32,6	34,1	25,3	12,8	8,8	6,2	5,1	4,8	190,3
	Húmedo	8,5	24,1	44,3	61,1	71,5	64,2	45,3	26,6	14,5	11,1	9,0	7,1	387,2
	Muy húmedo	17,8	67,8	130,7	144,2	153,4	127,3	91,1	46,3	19,0	14,2	11,4	9,0	832,3



5. CONCLUSIONES

1. Las grandes transformaciones acontecidas en el ámbito de Doñana, han producido una drástica reducción en los aportes de agua a la marisma. Actualmente la marisma recibe menos del 20% de sus aportes característicos en régimen natural.
2. En las últimas décadas se han observado claras tendencias de cambio en las comunidades biológicas que indican inequívocamente el efecto de la reducción de los aportes de agua. Así por ejemplo, para el periodo 1990-2004 algunas de las agrupaciones vegetales que necesitan más agua han reducido su superficie más del 60%, llegando en algún caso al 80% de reducción. Estos cambios en la vegetación han tenido consecuencias nefastas para algunas especies singulares como el avetoro común, la cerceta pardilla o la focha moruna.
3. En base al conocimiento actual se puede afirmar que difícilmente se lograrán alcanzar los objetivos globales de conservación para Doñana si no cambian las condiciones hidrológicas actuales. La recuperación efectiva de los aportes a la marisma se debe convertir en un objetivo operativo clave para la gestión del espacio natural. En este sentido cabe recordar la necesidad de completar el Proyecto “Doñana 2005” (en particular la recuperación de los aportes del río Guadiamar a la marisma) y reordenar los aprovechamientos del acuífero Almonte-Marismas para evitar los efectos negativos sobre los ríos y humedales asociados.
4. La propuesta de caudales ecológicos para recuperar la integridad ecológica de Doñana debe ser la propia de su régimen natural de caudales. Así está establecido en el marco legal y lo confirman los estudios hidrológicos y ecológicos realizados al efecto. En términos cuantitativos supone aportar a la marisma del orden de 200 hm³ en años medios y 80 hm³ en años secos.
5. Los caudales ecológicos de los ríos que vierten a Doñana están legalmente vinculados a la misma. La gestión sostenible de las cuencas vertientes será un elemento clave para alcanzar la gestión sostenible de Doñana.

6. RECOMENDACIONES FINALES

RECOMENDACION 1

Incorporar en el Plan Hidrológico de la Demarcación del Guadalquivir una propuesta de caudales ecológicos que considere las características excepcionales de Doñana y sea plenamente coherente con el marco legal establecido. En ausencia de la misma, se recomienda incorporar la propuesta formulada en este informe.

Justificación

Reconociendo en primer lugar el gran esfuerzo realizado por las diferentes administraciones y organizaciones en favor de la conservación de este espacio, el proceso de planificación hidrológica sitúa en estos momentos el debate sobre las necesidades hídricas de Doñana que deberán ser incorporadas en el plan hidrológico de la demarcación (prevista su aprobación para finales de 2009).

A pesar de la urgente necesidad de definir numéricamente las necesidades hídricas de Doñana (deben ser incorporadas como restricción previa¹⁰ en los balances de recursos), la propuesta se debe formular considerando las particularidades de Doñana, sobre la base de la mejor información disponible y en estricta coherencia con el marco legal establecido.

La propuesta formulada en este informe sintetiza y organiza sobre la “lógica de los caudales ecológicos”, información procedente de organismos responsables en la gestión de Doñana (aguas, medio natural, etc.), centros de investigación y organizaciones con una larga trayectoria en el área. Aún reconociendo las limitaciones e incertidumbres inherentes a la formulación de esta propuesta, actualmente se parte de un nivel de conocimiento suficiente para adoptar esta primera propuesta de necesidades hídricas que en su caso será susceptible de ser revisada y mejorada (no pretende ser una propuesta cerrada ni exclusivista).

Precisamente ahora es el momento de impulsar un profundo debate científico acerca de las necesidades hídricas de Doñana. Un primer paso importante podría consistir en resumir y sintetizar la gran cantidad de información hidrológica y ecológica existente, situar de forma precisa el papel de los caudales ecológicos (*sensu lato*) en un contexto de recuperación ambiental y lanzar unas primeras cifras tentativas.

¹⁰ No debe olvidarse que según el artículo 57 (7) de la Ley 46/1999, “*los caudales ecológicos o demandas ambientales no tendrán el carácter de uso (...), debiendo considerarse como una restricción que se impone con carácter general a los sistemas de explotación*”, a excepción de la regla sobre supremacía del uso para abastecimiento de poblaciones.

Propuesta de WWF

Para activar, enriquecer y consolidar el proceso de incorporación de las necesidades hídricas de Doñana en el plan hidrológico de la Demarcación del Guadalquivir, se recomienda incorporar la propuesta formulada en este informe, y más concretamente:

- Iniciar un debate técnico-científico sobre las necesidades hídricas de Doñana y de su área de influencia.
- Solicitar el pronunciamiento de los responsables de la gestión de los espacios naturales implicados (Espacio Natural Doñana, Paisaje Protegido del Corredor Verde del Guadiamar, etc.), acerca de los caudales ecológicos y necesidades hídricas de Doñana, revisando la congruencia de los mismos con sus objetivos y normas de gestión (PORN y PRUG respectivos).
- Integrar la presente propuesta dentro del futuro *Plan Sectorial de Manejo de Recursos Hídricos* del Parque Nacional de Doñana¹¹, sin que esto vaya en detrimento de posibles revisiones y mejoras.
- Analizar la propuesta de caudales ecológicos del curso inferior del río Guadalquivir y su idoneidad en la conservación del conjunto de sistemas naturales funcional y estructuralmente conectados (en particular la relación río-marisma).

RECOMENDACION 2

Iniciar con urgencia un proceso de concertación entre las partes interesadas¹², donde se analicen específicamente los usos y demandas de agua en el ámbito de Doñana, sus necesidades hídricas, las posibilidades de implantación de caudales ecológicos y las medidas necesarias para lograrlo.

Justificación

La puesta en práctica de los caudales ecológicos es un proceso complejo donde convergen diferentes ámbitos competenciales, diversidad de intereses, áreas dispares de conocimiento, etc. En este estudio se ha contemplado como un paso posterior a la elaboración de la propuesta de necesidades hídricas para Doñana (pasos 7, 8 y 9 de la figura 24). Afortunadamente existen los mecanismos legales para arbitrar en este complejo proceso, que se canaliza fundamentalmente a través de la legislación de aguas y que debe concretarse en el plan hidrológico de la demarcación del Guadalquivir.

¹¹ El DECRETO 48/2004 por el que se aprueba el Plan Rector de Uso y Gestión establece dentro de la Programación de Actividades de Gestión que en el plazo de dos años se elaborará “un nuevo Plan Sectorial de Manejo de Recursos Hídricos, teniendo en cuenta el modelo hidráulico de la marisma que incorporará nuevos patrones, cotas de inundación y criterios de manejo de agua y el modelo hidrogeológico del acuífero”.

¹² Según establece específicamente la Orden ARM/2656/2008

Según el epígrafe 3.4.6. de la Instrucción de Planificación Hidrológica, con la finalidad de compatibilizar los derechos al uso del agua con el régimen de caudales ecológicos, la implantación de estos caudales “*se desarrollará conforme a un proceso de concertación que tendrá en cuenta los usos y demandas actualmente existentes y su régimen concesional, así como las buenas prácticas*”. En la misma IPH, se especifica que en este proceso se deberá:

1. Valorar su integridad hidrológica y ambiental.
2. Analizar la viabilidad técnica, económica y social de su implantación efectiva.
3. Proponer un plan de implantación y gestión adaptativa.

Teniendo en cuenta que en el caso de Doñana el régimen de caudales ecológicos puede condicionar las asignaciones y reservas del plan hidrológico, el proceso de concertación deberá incluir “*una fase de negociación o resolución de alternativas, donde estén representados adecuadamente todos los actores afectados: organismos oficiales, usuarios, organizaciones económicas sociales y ambientales y expertos. Este proceso deberá ser previo a la inclusión del régimen de caudales en el plan hidrológico*”.

Propuestas de WWF

Para impulsar y asegurar este proceso de implantación de caudales ecológicos, se recomienda específicamente:

- Instar a todas las administraciones y partes interesadas (a través del Organismo de cuenca) a poner en marcha el proceso de concertación sobre la puesta en práctica de las necesidades hídricas de Doñana y su área de influencia.
- Fijar los plazos y programa de elaboración del futuro *Plan de implantación de los caudales ecológicos y su gestión adaptativa*, tal como establece la Instrucción de Planificación Hidrológica.

RECOMENDACION 3

Declarar en “Régimen de Protección Especial” las cuencas de los ríos y arroyos vertientes a Doñana, así como el sistema acuífero subyacente.

Justificación

Según el artículo 23 del Real Decreto 907/2007 del Reglamento de Planificación Hidrológica, “*podrán ser declaradas de protección especial determinadas zonas, cuencas o tramos de cuencas, acuíferos o masas de agua por sus características naturales o interés ecológico*”. Indudablemente Doñana es meritoria de este régimen de protección especial (tanto las aguas superficiales como las subterráneas), estatus que se debería extender a los ríos y arroyos en su ámbito de influencia por su indiscutible valor estratégico (para más información ver apartado 4.2.1.).

Debe ser en el Plan Hidrológico del Guadalquivir donde se recoja la clasificación de dichas zonas (previa petición de las administraciones competentes y bajo la supervisión del Comité de Autoridades Competentes de la demarcación) y las condiciones específicas para su protección. Abordar bajo esta figura de protección todo el ámbito espacial de las aguas que vierten a Doñana, permitiría elaborar un conjunto de medidas coherente que supere los actuales límites administrativos.

Por otra parte, la puesta en práctica de los caudales ecológicos adquiere una dimensión novedosa cuando se trata de ríos no regulados, es decir, ríos que no disponen de obras de regulación. Así por ejemplo, cuando se comparan las aportaciones en régimen natural del Arroyo de La Rocina con los registros de las estaciones de aforo (régimen real), se observa como los caudales de base han desaparecido durante varios meses al año, dejando sus cauces secos. Los caudales ecológicos determinados en este estudio podrán reclamar 30 l/s en el mes de octubre, pero estos caudales nunca se alcanzarán mientras que la gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas no permita circular estos caudales.

En realidad se trata de ríos que presentan condiciones particulares para su gestión, donde cobran especial relevancia dos aspectos:

1. Control de las extracciones que permita dejar circular por el río los valores de caudales ambientales requeridos. En esta situación particular, el desarrollo de normas de decisión (reglas tipo "cutoff") y los sistemas de control continuo son los nuevos elementos básicos
2. La ordenación en las extracciones del sistema acuífero Almonte-Marismas. A partir de la información disponible, los cambios en el régimen de descargas del sistema acuífero Almonte-Marismas al Arroyo de la Rocina se pueden resumir de la siguiente forma:
 - Los aportes del acuífero al Arroyo de la Rocina se estiman en condiciones naturales en una horquilla entre 31 y 43 hm³, mientras que en condiciones de explotación se estima que descarga entre 3 y 5 hm³.
 - La propuesta de caudales ecológicos establece unos valores para los años secos de 8 hm³, los cuales provendrán en su mayor parte de las descargas del acuífero.
 - Teniendo en cuenta las extracciones de las últimas 3 décadas y la respuesta lenta del acuífero en las descargas al río para los puntos de extracción más alejados, durante los próximos años es previsible que se siga produciendo la reducción de los caudales del río.
 - Aún en el caso de producirse una reducción drástica en las extracciones de agua del acuífero, se necesitarían un tiempo (aún indeterminado) para recuperar los niveles de descarga propios del régimen natural.
 - El horizonte de aplicación de los caudales ambientales se extiende al periodo de vigencia del futuro plan de cuenca, es decir, previsiblemente hasta el año 2015. Es en esta fecha cuando se debe revisar el plan de cuenca, las previsiones del mismo incluyendo los caudales ambientales y los propios objetivos ambientales, incluyendo la designación de las masas de agua como fuertemente modificadas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones del funcionamiento del sistema hidrológico, la puesta en práctica de los caudales ecológicos (que implican unas descargas permanentes del acuífero al río) es del todo “irrealista” para el arroyo de la Rocina. En esta situación de fuertes condicionantes hidrológicos del acuífero, resulta recomendable profundizar en el conocimiento del sistema acuífero, en particular en lo referente a la evaluación de escenarios de extracciones al mismo y la respuesta previsible en las descargas al río, determinando en su caso el máximo nivel de extracciones.

Propuestas de WWF

Para mejorar la coherencia y gestión de las aguas en el ámbito de Doñana y su área de influencia, WWF propone:

- Instar a las administraciones competentes (Junta de Andalucía, Organismo de cuenca, etc.) a que declaren las cuencas de los ríos vertientes a Doñana y su sistema acuífero subyacente en “Régimen de Protección Especial” (según el Real Decreto 907/2007).
- En el ámbito de las aguas superficiales y dentro del *Plan de implantación de caudales ecológicos y su gestión adaptativa* referido en la recomendación 2, desarrollar una estrategia de gestión de las extracciones, donde se defina la sensibilidad a la extracción por tramos y los valores umbrales de caudal a partir de los cuales se debe producir el cese en la extracción.
- En el ámbito de las aguas subterráneas, declarar provisionalmente el sistema acuífero Almonte-Marismas en riesgo de sobreexplotación y en proceso de salinización, según establecen los artículos 171 y 244 del Reglamento de Domino Público Hidráulico (Real Decreto 849/1986 modificado por el Real Decreto 606/2003).
- Elaborar un Plan de Ordenación de Extracciones del sistema acuífero Almonte-Marismas, donde:
 - Se definan las descargas del acuífero necesarias para mantener el caudal ecológico de los ríos y arroyos asociados al mismo (en coherencia con el objetivo de alcanzar el Buen Estado Cuantitativo de las masas de agua subterránea en los términos que define la Directiva Marco del Agua). Estos volúmenes de descarga serían asimilables a los caudales ecológicos propuestos en el presente informe, y constituyen la única forma de proveer el caudal ecológico, por ejemplo. del Arroyo de la Rocina.
 - Se definan las descargas necesarias para mantener en Buen Estado Ecológico los humedales¹³ asociados al acuífero (de nuevo en coherencia con el objetivo de alcanzar el Buen Estado Cuantitativo).

¹³ Según el anexo V de la DMA, se deberán *mantener unas variaciones de nivel y tiempo de permanencia de las aguas de los humedales, de tal forma que los indicadores de calidad biológicos se desvíen sólo ligeramente de los valores propios en condiciones inalteradas.*

- En función de los valores anteriores, definir las máximas extracciones para el sistema acuífero¹⁴ y las zonas de ubicación de las mismas.
 - Las normas que definen el Plan permitan regular las extracciones según diferentes situaciones de gestión (sequía prolongada, años secos, años húmedos, etc.), que permitan aproximar la flexibilidad en la gestión con la variabilidad natural.
- En la medida que corresponda, condicionar el futuro “*Plan Especial de Ordenación Territorial de las zonas de cultivos en regadío para la zona comprendida al norte de la corona forestal*” a las zonas y volúmenes de extracción designadas por el anterior Plan de Ordenación de Extracciones del sistema acuífero Almonte-Marismas.

RECOMENDACION 4

Impulsar y proseguir con las iniciativas destinadas a conseguir la recuperación óptima de la conectividad fluvial y mareal de la marisma.

Justificación

A lo largo del siglo XX se emprendieron toda una serie de actuaciones que alteraron profundamente el funcionamiento hidrológico de la marisma de Doñana. Como consecuencia de estas intervenciones, el río Guadalquivir ha dejado de entrar en la marisma en las últimas décadas, los intercambios de marea han sido minimizados y las aportaciones fundamentales del río Guadiamar pasan de largo por Entremuros hacia el tramo final del Guadalquivir.

El conjunto de acciones emprendidas a partir de la década de los ochenta encuentra un espaldarazo definitivo a fines de los noventa con el Proyecto “Doñana 2005”. Por primera vez se aborda a gran escala la recuperación de las aportaciones de agua a la marisma necesarias para restaurar su dinámica hídrica característica. Al 85% de su ejecución (primavera de 2008), actuaciones fundamentales como la restauración de la Marisma Gallega y su conexión con el Parque Nacional o la restauración del tramo medio del caño Travieso en la finca de Caracoles han sido concluidas y puestas en servicio. No obstante, algunas actuaciones clave para recuperar los aportes hídricos a la marisma se encuentran retrasadas o aplazadas sin fecha.

Dando por hecho que las aguas entrantes en Doñana deben tener las condiciones de calidad adecuadas, solamente se alcanzará la recuperación de la dinámica hidrológica característica de la marisma cuando las actuaciones previstas en el Proyecto Doñana 2005 hayan sido concluidas y demostrada su eficiencia.

¹⁴ Según la Orden ARM/2656/2008, en el cálculo del recurso disponible de las masas de agua subterráneas se deducirá el flujo requerido para conseguir los objetivos de calidad ecológica de las masas de agua superficial asociadas, de tal forma que se evite cualquier disminución en el estado ecológico en las mismas y/o cualquier daño significativo a los ecosistemas terrestres asociados.

Propuestas WWF

Entendiendo que la recuperación óptima de la conectividad fluvial y mareal es un elemento clave para la recuperación ecológica de la marisma, sin la cual, los caudales ecológicos no podrán intervenir en dicha recuperación (particularmente el río Guadiamar), se solicita:

- Concluir el conjunto de actuaciones inacabadas del Proyecto “Doñana 2005”, particularmente las actuaciones referidas a restauración del Brazo de la Torre, la conexión permeable de la marisma con el estuario, río Guadalquivir y Brazo de la Torre o la recuperación del Caño Guadiamar.
- Más allá de la Actuación 5 del Proyecto “Doñana 2005” relativa a la recuperación de la funcionalidad hidrológica del Caño Guadiamar (actualmente aplazada sin fecha), se insta a las partes interesadas a abrir un amplio debate técnico y social acerca de la “Solución Norte” (para más detalles ver apartado 3.3.1.). Según se indica en el Documento Marco para el Desarrollo del Proyecto Doñana 2005 (MMA, 2001), en ese futuro debate WWF propone:
 - Retirada por completo los muros del encauzamiento de la Cigüeña
 - Retirada del muro derecho del encauzamiento del Guadiamar desde su comienzo hasta el puente de Don Simón.
 - Retirada de la zona regable del Sector III de Almonte-Marisma por ser incompatible con las avenidas que llegarían al caño Guadiamar procedentes del río Guadiamar y del arroyo de la Cigüeña.
- Complementar las actuaciones de mejora en la conectividad fluvial con las mejoras en la funcionalidad natural (restauración de riberas, espacio de libertad fluvial, ordenación de usos en el espacio fluvial, etc.), particularmente en el conjunto de arroyos que vierten a la marisma (la Rocina, Algive-Cigüeña-Pilas, El Partido, etc.).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acreman, M. C. y M. J. Dunbar. 2004. "Methods for defining environmental river flow requirements - a review." *Hydrology and Earth System Sciences*, 8: 861-876.
- Aragonés, D., R. Díaz-Delgado y J. Bustamante. 2005. "Tratamiento de una serie temporal larga de imágenes Landsat para la cartografía de la inundación histórica de las marismas de Doñana". *Actas del XI Congreso Nacional de Teledetección*. Tenerife.
- Arthington, A.H., S.E. Bunn, N.L. Poff y R.J. Naiman. 2006. "The challenge of providing environmental environmental flow rules to sustain river ecosystems". *Ecological Applications* 16:1311-1318.
- AYESA. 2004. "Asistencia Técnica para la realización de un modelo numérico de hidrodinámica de las marismas del Parque Nacional de Doñana y su entorno". Informe técnico.
- Batzer D., R. Sharitz, (ed.). 2006. "Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands". University of California Press, Berkeley, California, USA. xiii þ 568 pp.
- Baonza, E.; Plata, A. y Silgado, A. (1982). "Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia". *Cuadernos de Investigaciones, C7*, CDX. Madrid, 139 pp.
- Bayán, B. y J. Dolz, 1995. "Las aguas superficiales y la Marisma del Parque Nacional de Doñana". *Revista de Obras Públicas* vol. 3340: pg.17-29.
- Bayley, P. B. 1995. "Understanding large river-floodplain ecosystems". *BioScience* 45: 153–158.
- Bravo, M.A., F. Borja, C. Montes y F. Díaz del Olmo, 1998. "Mapa ecológico de Doñana" en *Reconocimiento Biofísico de Espacios Naturales Protegidos. Doñana: una aproximación ecosistémica*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla. 1998.
- Bunn, S E. y A.H. Arthington. 2002. "Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity". *Environmental Management* 30:492-507.
- Carreño, M.F., J. Martínez, M. R. Vidal-Abarca y M.L. Suárez. 2008. "Indicadores bibliográficos para la valoración de las metodologías de determinación de los caudales ambientales". *Actas del VI Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua*. Fundación Nueva Cultura del Agua. Vitoria.
- CEDEX. 2007. "Actualización del Estudio de Recursos Hidráulicos con la aplicación del modelo SIMPA". CEDEX, Ministerio de Medio Ambiente.
- CIED.1992. "Dictamen sobre estrategias para el desarrollo socioeconómico sostenible del entorno de Doñana". Comisión Internacional de Expertos sobre el Desarrollo del Entorno de Doñana. Junta de Andalucía. Sevilla: 1–123.

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), 1998. "Estudio de Recursos Hidráulicos de la cuenca del Guadalquivir". Informe Técnico.

Consejería de Obras Públicas y Transportes. *Plan Director Territorial de Coordinación de Doñana y su entorno*. Granada: Junta de Andalucía, 1989, 2 vols.

Conserveonline, 2009. "El proceso ELOHA" (en línea). <http://conserveonline.org/workspaces/eloha/documents/flow-chart-spanish>. (consultado en mayo de 2009)

Casas, J. y C. Urdiales. 1995. "Introducción a la Gestión Hidráulica de las Marismas del Parque Nacional de Doñana" en *Bases ecológicas para la restauración de humedales en la cuenca Mediterránea*. Montes, C. (ed.) Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla.

Custodio, E. (1995). "Comportamiento y papel de las aguas subterráneas en Doñana: consecuencia de las extracciones". *Hidrogeología y recursos hidráulicos*, XX: 281310.

Custodio, E., M. Manzano y J. Dolz. 2006a. "El agua en Doñana: una perspectiva general". Informe Técnico.

Custodio, E., M. Manzano y J. Dolz. 2006b. "Recursos de agua en la Comarca de Doñana". II Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana. Informe Técnico.

Davies S. P. y Jackson S.K. 2006. "The Biological Condition Gradient: A Descriptive Model for Interpreting Change in Aquatic Ecosystems". *Ecological Applications*: Vol. 16, No. 4 pp. 1251–1266

Díaz-Paniagua, C., C. Gómez Rodríguez, A. Portheault y W. de Vries. 2005. "Los anfibios de Doñana". Serie Técnica Naturaleza y Parques Nacionales. Ed. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid. 181 pp.

Dolz, J., E. Bladé, M. Sánchez-Juny, D. Sempere, M. Berenguer y C. Corral. 2001. "Estudio Hidrológico-hidráulico de la cuenca del río Guadiamar". Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. Informe final.

Dunbar, M. J., A. Gustard, M. C. Acreman, and C. R. N. Elliot. 1998. "Overseas approaches to setting river flow objectives". Institute of Hydrology, Wallingford, Oxon, United Kingdom. R&D Technical Report W6-161. 83pp.

Dyson, M., G. Bergkamp, y J. Scanlon, (eds). 2003. "Flow. The Essentials of Environmental Flows". IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. xiv + 118 pp.

EBD_CSIC, 2009. "Protocolo de seguimiento de la vegetación en la marisma". www-rbd.ebd.csic.es/Seguimiento/mediobiologico/formacionesvegetales/dinamicamarisma/ProtocoloVegetacionMarisma.pdf. (Consulta en mayo de 2009).

EUROPARC-España. 2008. Anuario EUROPARC-España del estado de los espacios naturales protegidos 2007. Ed. Fundación Fernando González-Bernáldez. Madrid. 224 pp.

Fernández-Delgado, C., P. Drake, A. M. Arias y D. García. 2000. "Peces de Doñana y su entorno". Ed. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 272 pp.

Foster, L.D. 2007. "Using Frequency Analysis to Determine Wetland Hydroperiod". Thesis. University of South Florida.

García Murillo, P., J. R. Fernández, S. Cirujano, A. Sousa. 2006. "Aquatic Macrophytes in Doñana Protected Area (SW Spain): an Overview". *Limnetica*. Vol. 25. Núm. 1-2. Pag. 71-80

García Murillo, P. J., R. Fernández, S. Cirujano, A. Sousa, I. Nieto, J. Andújar y D. León. 2007. "Flora y Vegetación de la Marisma de Doñana en el Marco del Proyecto de Restauración Ecológica Doñana 2005". *Limnetica*. Vol. 26. Núm. 2. Pág. 319-330

García Novo, F. y C. Marín. 2005. "Doñana: Agua y Biosfera". Ed. Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Madrid. ISBN: 84-609-6326-8.

García Viñas, J. I., Mintegui, J.A. y J. C. Robredo. 2005. "La vegetación en la marisma del Parque Nacional de Doñana en relación a su régimen hidráulico". Serie Técnica Naturaleza y Parques Nacionales. Ed. Organismo Autónomo Parques Nacionales. 297 pp.

Green, A.J. 1993. "Action plan for the Marbled Teal". *Oryx* 27: 196-197.

Green, A.J. 1996. "Analyses of globally threatened Anatidae in relation to threats, distribution, migration patterns and habitat use". *Conservation Biology* 10: 1435-1445.

Green, A., y J. Figuerola. (2003). "Aves acuáticas como bioindicadores en los humedales". En, Paracuellos, M. (ed.): *Ecología, manejo y conservación de los humedales*, pp. 47-60. Colección Actas, 49. Instituto de Estudios Almerienses (Diputación de Almería). Almería.

IGME. 1972. "Proyecto Piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir". Memoria final. Madrid.

IGME. 1976. "Modelo matemático del acuífero de Almonte-Marismas". Memoria final. Madrid.

IGME. 1982. "Actualización de los datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base, 1982. Modelo matemático bidimensional del sistema acuífero núm. 27. Unidad Almonte-Marismas". Memoria, planos y anejos. Madrid, 50 pp.

IGME, 1992. "Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno". Madrid.

IGME. 2001. "Revisión y actualización de las normas de explotación de las Unidades Hidrogeológicas de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete - Barbate. Propuesta de normativa y definición de nuevas Unidades Hidrogeológicas".

ITGE. 1998. "Atlas Hidrogeológico de Andalucía".

ITGE.1989. "Las aguas subterráneas en España. Estudio de síntesis".

ICONA. 1994. "Desarrollo Sectorial del Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional de Doñana en Materia de Manejo de los Recursos Hídricos". Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

IGME. 1998. "El Agua en Andalucía". Madrid

IUCN, 2000. "Vision for water and nature. A world strategy for conservation and sustainable management of water resources in the 21st century".

Junk, W. J.; P. B Bayley y R.E. Sparks. 1989. "The Flood Pulse Concept In River-Floodplain Systems". In: Doge, D.P.(Ed.). Proc. Int. Large River Symp (Lars) – *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, 106: 110-127.

Junk, W. J. 1999. "The flood pulse concept of large rivers: Learning from the tropics". *Archiv für Hydrobiologie* 115: 261–280.

King, J. M., R. E. Tharme, y M. S. de Villiers, editors. 2000. "Environmental flow assessments for rivers: manual for the Building Block Methodology". WRC Report TT 131/00. Water Research Commission, Pretoria, South Africa.

King, J., C. Brown y H. Sabet. 2003. "A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers". *Regulated Rivers: Research and Assessment*. Volume 19 Issue 5-6, Pages 619 - 639

King, J., C. Brown. 2004. "Development of Drift, a Scenario-Based Methodology for Environmental Flow Assessments". Report No 1159/1/04

King, J., C. Brown. 2006. "Environmental Flows: Striking the Balance between Development and Resource Protection". *Ecology and Society* 11(2): 26

Limno Tech, Inc. 2005. "Development of an Integrated Ecological Response Model (IERM) for the Lake Ontario-St. Lawrence River Study". Technical report.

Lytle, D.A., y N.L. Poff. 2004. "Adaptation to natural flow regimes". *Trends in Ecology & Evolution* 19:94-100.

Magdaleno, F. 2005. "Caudales ecológicos: conceptos, métodos e interpretaciones". Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, Madrid.

Manzano, M. C. Ayora, O. Bernet, J. Bolzicco, J. Carrera, C. Domènech, J. C. Cerón, I. Fernández, P. Gómez, M. Jaén, R. Mantecón, M. Martín Machuca, C. Mediavilla, L. Moreno, P. Navarrete, y J. M. Salvany. "Hidrogeología del Valle del Guadiamar y zonas colindantes. Funcionamiento del sistema acuífero". En: Las Aguas y los Suelos tras el accidente de Aznalcóllar. Boletín Geológico y Minero, edición especial, Ayora, Baretino, Carrera, Manzano y Mediavilla eds.), 112: 69 – 92.

Martí, R. y J.C. del Moral (Eds.). "Atlas de las Aves Reproductoras de España". Dirección General de Conservación de la Naturaleza – Sociedad Española de Ornitología. Madrid.

Menanteau, L. 1982. "Les Marismas du Guadalquivir. Exemple de transformation d'un paysage alluvial au cours du Quaternaire récent". Thésis. Universidad de la Sorbona. París. 2 tomos. 255 pp.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU). 1990. "Estudio de las zonas húmedas de la España peninsular. Inventario y tipificación". Dirección General de Obras Hidráulicas. Madrid.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU). 1993. "La gestión hidráulica en el Parque Nacional de Doñana". Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente (1995). "Plan Hidrológico del Guadalquivir. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir". Oficina de Planificación Hidrológica.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 1999. "1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana". Ponencias y conclusiones. Huelva.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2000. "Plan Estratégico Español para la Conservación y el Uso Racional de los Humedales". Dirección General de Conservación de la Naturaleza.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2001. "Documento Marco para el Desarrollo del Proyecto Doñana 2005". Regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana. Informe técnico. Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). 2008. "Informe del estado actual de las actuaciones del proyecto "Doñana 2005". Informe técnico.

Mitsch, W. y J. Gosselink. 2000. "Wetlands". 3rd Edition. Wiley and Sons, Nueva Cork. 920 pp.

Naiman, R. J., J. J. Magnuson, D. M. McKnight, and J. A. Stanford. 1995. "The freshwater imperative: A research agenda". Island Press, Washington, DC, 165 pp.

Olden, J.D., y N.L. Poff. 2003. "Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes". *River Research and Applications* 19:101-121.

OMICRON, S.A. 1999. "Caracterización del área de Doñana en materia de agua". Enc. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Parasiewicz, P., J. Nestler, N. L. Poff y R. A. Goodwin. 2008. "Virtual reference river: a model for scientific discovery and reconciliation". Pages 189-206 in M. S. Alonso and I. M. Rubio, editors, *Ecological Management: New Research*. Editors, Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY (ISBN: 978-1-60456-786-1)

Poff, N.L., J.D. Allan, M. B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestegard, B. Richter, R. Sparks, y J. Stromberg. 1997. "The natural flow regime: a new paradigm for riverine conservation and restoration". *BioScience* 47:769-784.

Poff N.L., Richter B., Arthington A.H., Bunn S.E., Naiman R.J., Kendy E., Acreman M., Apse C., Bledsoe B.P., Freeman M., Henriksen J., Jacobson R.B., Kennen J., Merritt D.M., O'Keefe J., Olden J.D., Rogers K., Tharme R.E. y Warner A. 2009. "The Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards". *Freshwater Biology*, (In Press).

Richter B. D., J.V. Baumgartner, J. Powell y D.P. Braun. 1996. "A method for assessing hydrological alteration within ecosystems". *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174.

Richter B. D., J.V. Baumgartner, R. Wigington y D.P. Braun. 1997. "How much water does a river need?" *Freshwater Biology* 37: 231-249.

- Richter, B. D., A. T. Warner, J. L. Meyer, y K. Lutz. 2006. "A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations". *River Research and Applications*, 22, 297-318.
- Smakhtin, V y M. Amputas. 2006. "An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins". Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 42p. IWMI Research Report 107.
- Sánchez, R. y J. Martínez. 2008. "Los caudales ambientales. Diagnóstico y perspectivas" en *Panel Científico-Técnico de Seguimiento de la Política de Agua*. Universidad de Sevilla, Sevilla. Sevilla, España. Fundación Nueva Cultura del Agua.
- Stanford, J., M. Lorang and F. R. Hauer. 2005. "The shifting habitat mosaic of river ecosystems". *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*. 29(1):123-136.
- Souchon, Y., C. Sabaton, R. Deibel, D. Reiser, J. Kershner, M. Gard, C. Katopodis, P. Leonard, N.L. Poff, W.J. Miller, and B.L. Lamb. 2008. "Detecting biological responses to flow management: missed opportunities, future directions". *River Research & Applications* 24:506-518
- Suso, J. M. y R. Llamas. 1990. "El impacto de la extracción de aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana". *Estudios Geológicos* 46: 317-345.
- Tharme, R. 2003. "A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers". *River Research and Applications* 19: 397-441.
- Tratamientos y Proyectos Medioambientales, S. L. (TyP). 1996. "Criterios y bases ecológicas para la regeneración de la Marisma Gallega (Parque Natural de Doñana)". Informe técnico.
- UPC. 1999, "Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su entorno". Grupo de Hidrología Subterránea. UPC. Barcelona. 114 pp + anex. Informe inédito.
- USEPA, 2005. "Use of Biological Information to Better Define Designated Aquatic Life Uses in State and Tribal Water Quality Standards: Tiered Aquatic Life Uses".
- Valverde, J. A. 1960. "Vertebrados de las Marismas del Guadalquivir". Instituto de Aclimatación. Vol. IX. Almería
- Vanney, J. R. 1970. "L' Hydrologie du bass Guadalquivir". C.S.I.C. Madrid. 176 pp.
- Ward, J. V., K. Tockner, and F. Schiemer. 1999. "Biodiversity of floodplain ecosystems: Ecotones and connectivity". *Regulated Rivers: Research and Management* 15:125-139.
- Waterkeyn, A. P. Grillas, B. Vanschoenwinkel y L. Brendonck. 2008. "Invertebrate community patterns in Mediterranean temporary wetlands along hydroperiod and salinity gradients". *Freshwater Biology* 53, 1808-1822



WWF trabaja por un planeta vivo y su misión es detener la degradación ambiental de la Tierra y construir un futuro en el que el ser humano viva en armonía con la naturaleza:

- Conservando la diversidad biológica mundial.
- Asegurando que el uso de los recursos naturales renovables sea sostenible.
- Promoviendo la reducción de la contaminación y del consumo desmedido.



por un planeta vivo[®]