



EL AGUA QUE NUTRE DOÑANA

LA RELACIÓN ENTRE EL ACUÍFERO Y LOS CAUCES
QUE ALIMENTAN LA MARISMA

ÍNDICE

ANTECEDENTES	2
DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO ALMONTE - MARISMAS	4
GEOLOGÍA	4
HIDROGEOLOGÍA	4
MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS	6
MODIFICACIÓN DE LA DINÁMICA HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS COMO CONSECUENCIA DE LA ACTIVIDAD HUMANA.....	7
UNIDADES DE GESTIÓN HIDROLÓGICA	14
MASB (05.51.01) - ALMONTE	14
MASB (05.51.04) - MANTO EÓLICO LITORAL DE DOÑANA .	18
MASB (05.51.03) - MARISMAS DE DOÑANA	24
MASB (05.51.02) - MARISMAS	25
MASB (05.51.05) LA ROCINA	28
MASB (030.595) EL CONDADO.....	33
TRANSFERENCIA DE RECURSOS HÍDRICOS ENTRE LAS DISTINTAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEAS	34
CONCLUSIONES	36
PETICIONES DE WWF	40
REFERENCIAS.....	43

Texto

Juan José Carmona, Alberto Fernández Lop y Rafael Seiz,

WWF España

Carolina Guardiola-Albert, *Instituto Geológico y Minero de España,*

CSIC

Maquetación

WWF España

Fotografía de portada

Cerceta pardilla en Doñana.

© Beltrán de Ceballos

© Texto: 2024, WWF Adena.

WWF/Adena agradece la reproducción y divulgación de los contenidos de esta publicación en cualquier tipo de medio, siempre y cuando se cite expresamente la fuente (título y propietario del copyright)

Las opiniones expresadas en este documento pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente la posición oficial del CSIC. La participación de C. Guardiola-Albert se refiere a la información científica e hidrogeológica sobre el sistema acuífero Almonte-Marismas. Ni el CSIC ni C. Guardiola-Albert serán responsables de daños, pérdidas o consecuencias derivadas del uso de la información proporcionada en esta publicación.

Cita sugerida:

Carmona, J.J.; Fernández Lop, A.; Guardiola-Albert, C.; Seiz Puyuelo, R. (2024). *El agua que nutre Doñana. La relación entre el acuífero y los cauces que alimentan la marisma.* WWF España.

ANTECEDENTES

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) definió los sistemas acuíferos de nuestro país en el Plan de Investigación de Aguas subterráneas (PIAS), entre los años 60 y 70 del siglo XX, con el objetivo de facilitar la gestión de las aguas subterráneas. En el caso particular de Doñana, las aguas subterráneas englobaban la totalidad del sistema acuífero Almonte-Marismas, y otros acuíferos conectados hidráulicamente al mismo, como son el Aljarafe, y el Aluvial y Terrazas del río Guadimar.

A partir de los estudios del PIAS, la evolución de la planificación hidrológica ha ido generando una separación administrativa en unidades hidrogeológicas interconectadas en diferentes sectores, con el fin de intentar desarrollar una gestión individualizada de las extracciones a escala local. Primero se definieron Unidades Hidrogeológicas (a partir de la aprobación RD 849/1986¹) y más adelante Masas de Agua Subterránea (MASb) (a partir de la aprobación del RDL 1/2001²). El segundo ciclo de planificación hidrológica de la demarcación del Guadalquivir (2015-2021) redefinió los límites de las MASb, pasando a dividir la MASb 05.51 (Almonte-Marismas) en 6 MASb diferentes, tal y como se refleja en la Figura 1.

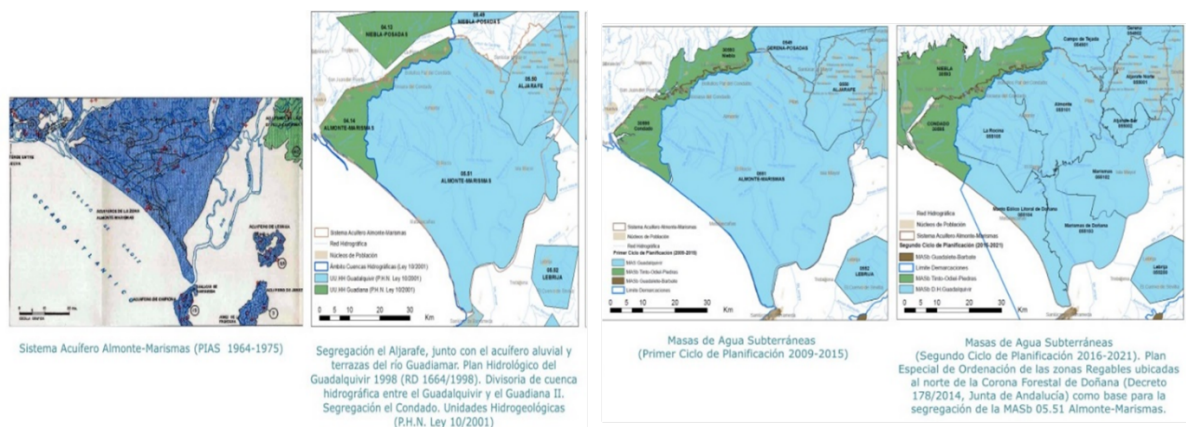


Figura 1. Evolución de los límites administrativos del sistema acuífero Almonte-Marismas a lo largo del tiempo hasta su delimitación actual. (Evolución de los límites administrativos del sistema acuífero Almonte-Marismas a lo largo del tiempo hasta su delimitación actual.

Fuente: Modificado de Mediavilla Laso *et al.* (2016)

La justificación aportada por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) en el segundo plan hidrológico se basa en el concepto de MASb esgrimido por la Directiva Marco del Agua (DMA)³. Según la definición de la DMA, una MASb es un volumen claramente diferenciado de

¹ [Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas](#)

² [Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas](#)

³ [Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas](#)

aguas subterráneas en un acuífero o en distintos acuíferos⁴. Es decir, una MASb puede reunir varios acuíferos, o un acuífero puede comprender más de una MASb.

La separación propuesta por las autoridades del agua del sistema acuífero Almonte-Marismas en 6 MASb, no responde a una diferenciación hidrológica-hidrogeológica, sino que se basa en criterios de gestión y/o fines administrativos. La CHG argumenta que esta división a partir de la base territorial e hidrológica sustenta la diversidad medioambiental de Doñana, e insiste en que dicha separación facilita una mejor gestión de sus recursos hídricos subterráneos, y permite compatibilizar el uso racional de los recursos para atender las actuales demandas (de abastecimiento urbano y agrícola) y reservar algunos para la conservación medioambiental.

Esta idea de gestión por sectores difiere de las propuestas del Dictamen de 1992 (CIED, 1992) y de la misión de la UNESCO, la IUCN (*International Union for Conservation of Nature*) y Ramsar realizada en febrero de 2020 (UNESCO *et al.*, 2021), en donde se reclamaba la necesidad de considerar la totalidad del sistema hidrogeológico en su conjunto, teniendo en cuenta que existen importantes dependencias de los ecosistemas asociadas a la dinámica hidrogeológica.

Actualmente las **6 MASb en las que ha quedado dividido el sistema acuífero Almonte-Marismas** en el entorno del Espacio Natural de Doñana en la demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG) son las siguientes; (05.51.01) Almonte, (05.51.04) Manto Eólico Litoral de Doñana, (05.51.03) Marismas de Doñana, (05.51.02) Marismas y (05.51.05) La Rocina. En la demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras (DHTOP) tan solo está la MASb (030.595) Condado.

Los respectivos planes hidrológicos de la DHTOP y de la DHG, enmarcan estas MASb dentro del denominado sistema único de explotación del DHTOP, y prácticamente todo en el sistema de explotación denominado "*Guadiamar*" en la DHG. Una pequeña superficie, tanto de la MASb 05.51.01 Almonte como de la 05.51.04 manto Eólico de Doñana, se localizan en el sistema de explotación de regulación general de la DHG.

Con este informe WWF España quiere contribuir a que el conocimiento científico del que disponemos en la actualidad sobre el acuífero de Almonte-Marismas se ponga a disposición de la gestión racional y sostenible de sus recursos. Es una labor imprescindible y urgente que hay que poner en marcha para asegurar el futuro de las especies, los hábitats y las gentes de Doñana.

⁴ De acuerdo con la definición de la Directiva Marco del Agua, un acuífero es una o más capas subterráneas de roca o de otros estratos geológicos que tienen la suficiente porosidad y permeabilidad para permitir un flujo significativo de aguas subterráneas, o la extracción de cantidades significativas de aguas subterráneas.

DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS

Geología

El sistema acuífero Almonte-Marismas está formado mayoritariamente por sedimentos, como son gravas, gravillas, arenas, limos y arcillas, con todas las texturas intermedias entre éstas (Custodio *et al.*, 2009). La base impermeable del acuífero la constituyen materiales de baja permeabilidad, como son las denominadas *margas azules* que son visibles en superficie en todo el borde norte del área, desde el municipio de Chucena hasta las proximidades del municipio de Moguer (Salvany y Custodio, 1995).

El sistema acuífero aumenta progresivamente su espesor en sentido norte-sur, pasando de unos 50 m. en la zona septentrional, hasta superar los 200 m. en sus límites meridionales (Naranjo-Fernández *et al.* 2019).

Hidrogeología

El sistema Almonte-Marismas se define como un acuífero multicapa condicionado por niveles intercalados de arcillas en la matriz de arena. En él se diferencian dos comportamientos hidrodinámicos:

(I) Parte del sistema acuífero se comporta como libre, representando aproximadamente 2/3 partes del sistema. Se trata de un acuífero aluvial multicapa de limos, arenas y gravas, de origen fluvial, deltaico y marino, que aflora a la superficie en la zona norte. El tramo permeable aumenta progresivamente su espesor de norte a sur, pasando de 15-20 m. en Almonte hasta 80-100 m. en el municipio de El Rocío.

La franja norte entre las localidades de Villamanrique de la Condesa y El Rocío, es la menos *"productiva en agua"* del acuífero, al tener un mayor contenido en limos y un menor espesor de la formación acuífera. Esto implica peores condiciones hidráulicas para el almacenamiento de recursos.

La parte libre en el sur posee menos fracción detrítica fina en el subsuelo, y un aumento tanto de la permeabilidad como del espesor de la formación (CHG, 2020a), por lo que es una zona más productiva hidráulicamente. Asimismo, en la margen derecha (sur) del arroyo de La Rocina, afloran arenas eólicas. Éstas forman un subsistema muy homogéneo en litología que se extiende hasta la línea de costa (Salvany y Custodio, 1995). Esta zona se conoce tradicionalmente como región del *"Abalarío"* y puede superar los 60 m. de espesor.

(II) Parte del sistema acuífero se comporta como confinada, representando 1/3 de la superficie del sistema. Es la parte del sistema acuífero recubierta por las arcillas y limos de baja permeabilidad que forman la base de la Marisma y actúan como un sistema confinado o semiconfinado. Además, y fuera de la Marisma, se encuentran con frecuencia niveles de

arcillas intercaladas entre las arenas que hacen que el sistema se comporte como un acuífero multicapa. Las arcillas confinantes de la Marisma presentan un aumento gradual de espesor de norte a sur, con potencias que van desde los 20 m. hasta los 80 m. en la zona de la desembocadura del Guadalquivir (Naranjo-Fernández *et al.*, 2019).

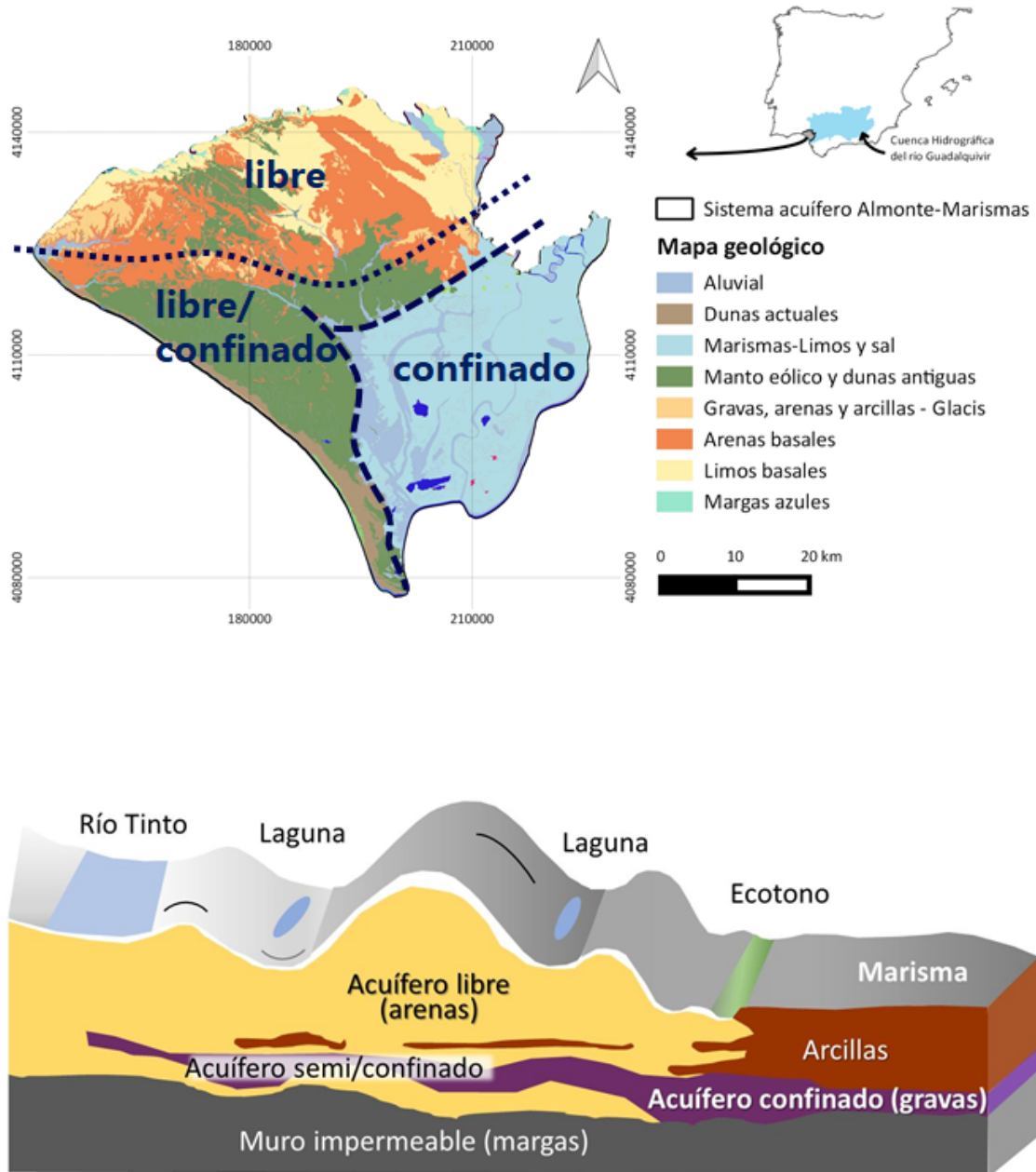


Figura 2. Descripción gráfica del sistema acuífero Almonte-Marismas y de su funcionamiento como acuífero libre o confinado (Fuente: elaboración propia). En la imagen de abajo, se presenta un corte hidrogeológico de este (*derecha*) a oeste (*izquierda*).

MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO ALMONTE-MARISMAS

Hace décadas que la explotación de las aguas subterráneas en Doñana ha modificado sustancialmente el funcionamiento natural del acuífero. Esto fue resultado de la fuerte expansión territorial agraria como consecuencia del desarrollo del Plan de Transformación Agraria de Almonte-Marismas (PTAAM) en los años 70 del siglo XX. Hoy debemos diferenciar claramente entre la situación natural del sistema antes de dicha expansión, y las condiciones alteradas por la intensa actividad antrópica posterior en toda el área.

Actualmente, la recarga del sistema acuífero se produce casi exclusivamente por la infiltración de la precipitación sobre los afloramientos de materiales permeables. El retorno de riego no genera recarga neta, ya que se realiza con aguas extraídas del propio acuífero, aunque puede modificar la calidad del agua subterránea localmente (Custodio *et al.*, 2009). El papel de las arenas eólicas como zona de recarga al sistema acuífero es de gran importancia. Al tratarse de arenas finas y medias, con una granulometría bastante regular, tienen una permeabilidad superficial elevada y una capacidad de campo⁵ relativamente baja. El resultado es una elevada tasa de recarga de las aguas subterráneas y una baja escorrentía superficial en esta zona.

Fuera de las arenas eólicas, en los sectores norte y noroeste del acuífero, las arenas son de granulometría más irregular, con una notable fracción fina de tamaño limo y arcilla, y por lo tanto es mayor la posibilidad de escorrentía superficial y menor la tasa de recarga respecto a la lluvia. También la capacidad de campo del suelo es mayor, lo que se refleja en la presencia de vegetación y masas forestales en mejores condiciones.

Como puede apreciarse el territorio no es homogéneo en lo que se refiere a su capacidad de recarga del acuífero. Existen numerosos estudios que han cuantificado la recarga sobre diferentes zonas del sistema acuífero Almonte-Marismas, con resultados variables en función de la precipitación, la metodología empleada, las características del suelo y la vegetación de la zona estudiada. Custodio *et al.* (2009) estiman la recarga media al acuífero por áreas, pero indican que las cifras son inciertas y deben tomarse como orientativas. La tasa de infiltración estimada varía entre los 40-60 mm/m² y año en las zonas situadas más al norte y los 150-250 mm/m² y año asociado a las arenas eólicas de la zona Costera y de *El Abalarío* en la parte sur. En todo caso, se tratan de cifras medias plurianuales, que no representan un año concreto, ni recogen de manera detallada la diferenciación entre periodos húmedos o secos.

El cambio climático, en relación con su efecto estimado de mayores temperaturas y menores precipitaciones en forma de lluvia, ya está teniendo influencia en el área de Doñana. En la última década y antes (2011-2023) no se ha registrado ningún año húmedo. Esto, junto con el incremento de las temperaturas, conlleva que haya una disminución de la recarga al acuífero y

⁵ Este concepto hace referencia al contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo después de haber sido saturado, y dejado drenar libremente. La FAO especifica que se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que se mantiene en un suelo saturado después de 48 horas de drenaje libre.

una mayor evaporación y evapotranspiración potencial (capacidad de traspiración de agua y evaporación de la vegetación y los cultivos en función de las variables atmosféricas).

Las recargas laterales subterráneas se producen desde el acuífero de El Aljarafe y el Aluvial del río Guadiamar. Estos flujos subterráneos entraron en funcionamiento de forma importante a raíz del cambio en la dirección del flujo subterráneo provocado por las grandes explotaciones de agua subterránea para el riego de las áreas agrícolas al sur del municipio de Villamanrique de la Condesa.

En general, el flujo subterráneo presenta actualmente una dirección norte-sur, hacia la Marisma y hacia el arroyo de La Rocina. Sin embargo, en la zona de *El Abalarío* se genera un domo piezométrico, favorecido por la topografía. Éste origina una divisoria subterránea hidrogeológica, paralela a la línea de costa. Este domo piezométrico propicia un flujo divergente, es decir, por un lado, hacia la vertiente hacia el este (arroyo La Rocina y Marisma de Doñana) y por otra hacia el suroeste, con descargas directas al mar (CHG, 2020b).

En condiciones naturales las zonas de descarga desde el acuífero se producían fundamentalmente hacia los cauces superficiales (CHG, 2020b), destacando el arroyo de La Rocina (y sus cauces tributarios, de forma lineal o difusa procedente tanto de flujos someros como profundos), y en menor medida hacia otros como el arroyo de El Partido o de La Cigüeña, contribuyendo a mantener sus caudales en superficie. También eran importantes las descargas hacia los ecotonos del norte y de la Vera–Retuerta. Estas aguas acababan alcanzando la Marisma por esorrentía superficial, siendo junto con la precipitación directa su fuente de alimentación.

Asimismo en *El Abalarío*, en condiciones naturales, se producían descargas subterráneas que alimentaban a más de un centenar de pequeñas lagunas estacionales en la zona de Ribetehilos (Custodio *et al.*, 2009). Más al sur el acuífero descargaba, y en menor medida sigue descargando, hacia una serie de lagunas peridunares entre las que destaca la Laguna de Santa Olalla, la única laguna considerada de carácter permanente en la franja dunar de Doñana.

Modificación de la dinámica hidrogeológica del acuífero Almonte-Marismas como consecuencia de la actividad humana

Los datos de la evolución de la superficie de regadío en la zona indican que se produjo un aumento desde los años 90' del siglo XX, a pesar de la existencia de figuras de protección del territorio que hay alrededor de los espacios protegidos de Doñana. A modo de ejemplo Paredes (2020) refleja cómo en La Rocina, Los Sotos y El Partido, se produjo un aumento de la superficie de invernaderos de un 487% entre los años 1995 y 2016, pasando de 939 ha a 5.510 ha. A pesar de que en el año 2018 se registró un descenso de dicha superficie, el aumento de superficie con invernaderos a partir del año 2000 es indicativo del crecimiento constante de la superficie con cultivos asociados mayores necesidades hídricas como son los frutos rojos. Estos datos pueden comprobarse en la Figura 3. Los planes hidrológicos del tercer ciclo de planificación reconocen una extensión en torno a las 19.000 ha de regadío con aguas subterráneas en el área de Doñana la demarcación del Guadalquivir y de 780 ha en la del Tinto-Odiel-Piedras.

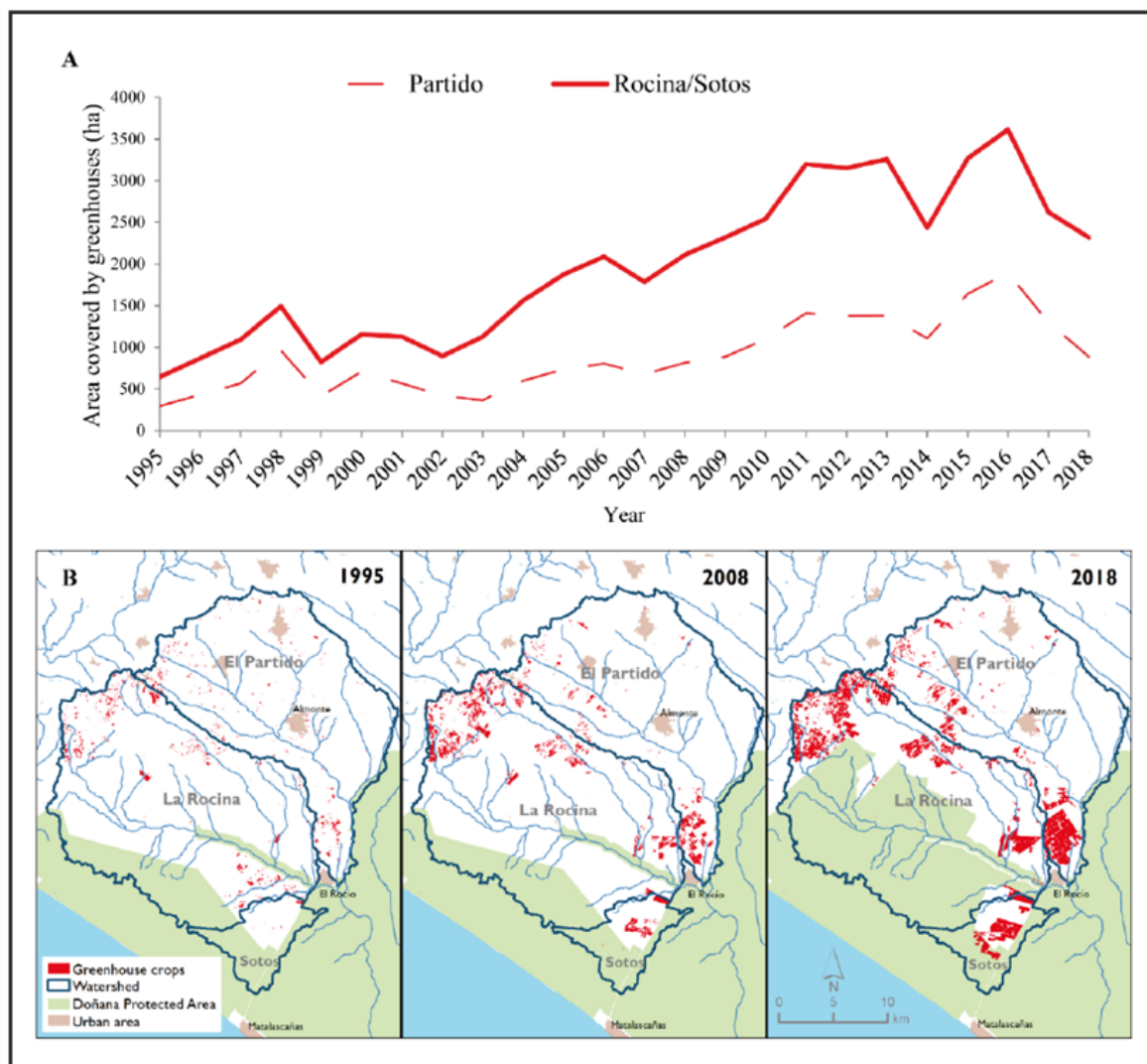


Figura 3. Evolución del crecimiento de la superficie de invernaderos entre 1995 y 2018 alrededor de los espacios protegidos de Doñana, sustentada con la extracción creciente de las aguas subterráneas del acuífero Almonte-Marismas. En la primera gráfica (A) se muestra la evolución en las cuencas de los arroyos de El Partido y de La Rocina. En la segunda gráfica (B) se muestra la distribución espacial de los invernaderos en 1995, 2008 y 2018 en la cuenca del río Guadiamar. Fuente: Paredes, 2020.

Esta explotación intensiva del acuífero desde hace más de 4 décadas ha generado alternaciones significativas en la hidrodinámica del sistema acuífero en comparación con las condiciones naturales de funcionamiento. Estos cambios básicamente son:

- a) Un descenso acumulado, tanto del nivel piezométrico medio del acuífero multicapa, como del freático⁶, formando un extenso cono de depresión piezométrica en la transición del acuífero libre al confinado (sur de Villamanrique de la Condesa y norte de la localidad

⁶ Se conoce como *nivel freático* a la profundidad (en relación a la superficie del suelo) del límite entre la capa freática (saturada en agua) y la zona vadosa (no saturada) en un acuífero. En un sondeo abierto, el nivel que alcanza la columna de agua cuando la presión del acuífero se iguala a la presión atmosférica se corresponde con el nivel freático. El *nivel piezométrico* corresponde en los acuíferos libres a la altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar. En los acuíferos confinados, se define como la altura que alcanzaría el agua en el interior de un sondeo hasta equilibrarse con la presión atmosférica. Por lo tanto, en cada punto donde exista una perforación de un acuífero confinado se tiene un nivel piezométrico propio y diferente.

de El Rocío) de unos 20 metros de profundidad (CHG, 2020a). En los últimos años se ha podido observar cierta estabilización en algunas zonas del acuífero profundo, aunque nunca una recuperación de los niveles. **El cono de depresión es el responsable del desplazamiento hacia el norte de agua salina atrapada en los niveles confinados profundos, y el incipiente inicio de procesos de salinización de algunos pozos agrícolas de esa zona.**

- b) El descenso de los niveles piezométricos ha provocado **cambios en la dirección de flujo en los límites con el acuífero aluvial del Guadiamar y con el acuífero de El Aljarafe. El aluvial ahora aporta agua al acuífero de Almonte-Marismas (se comporta como perdedor de recursos)**, a pesar de que en estado natural los dos acuíferos estaban en equilibrio hídrico (Ayora *et al.*, 2001). Además, el gradiente hidráulico⁷ en el contacto del acuífero Almonte-Marisma con el acuífero de El Aljarafe ha aumentado significativamente debido al cono de depresión del sur de Villamanrique de la Condesa.
- c) **Pérdida de las condiciones de surgencia en pozos y sondeos**, como por ejemplo los cercanos al ecotono oeste de La Vera-Retuerta.
- d) **Inversión del gradiente hidráulico del acuífero de Almonte-Marismas, haciendo que el nivel profundo no fluya hacia niveles superficiales.** Los niveles más someros pasan a alimentar al acuífero profundo, cuando esto no ocurría en condiciones naturales.
- e) **Descensos continuados del nivel freático. Aunque de media estos descensos no suelen superar los 2 metros**, tienen las siguientes consecuencias:
- Disminución de los flujos de alimentación a criptohumedales y ecotonos (Green *et al.*, 2023).
 - Reducción significativa de las descargas hacia los caños y los arroyos, en especial hacia el arroyo de La Rocina (de más del 60% según el PHG 202-2017).
 - Reducción del hidropериодо y de la superficie inundada de las lagunas de los mantos eólicos, desapareciendo algunas de ellas (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2021; de Felipe *et al.*, 2023).
 - Disminución de la descarga a la Marisma por los rezumaderos en el contacto arenas-arcillas en los ecotonos Norte y Oeste (Green *et al.*, 2023).
- f) Variación del balance hídrico, tal como se refleja en la **Tabla 1**, que muestra el balance propuesto por Custodio *et al.* (2009) y en el que se realiza el desglose de las salidas. En dicha tabla se compara el balance hídrico en condiciones naturales y en condiciones alteradas. **Se observa una importante reducción en las salidas naturales, del orden de 60-80 hm³ y estimándose los bombeos en más de 80 hm³.**

⁷ En este caso, se puede entender el concepto de gradiente hidráulico como la diferencia del nivel piezométrico entre dos puntos, dividido entre la distancia entre estos puntos según el recorrido del flujo de agua subterránea. Nos da una idea de la energía o la fuerza que "empuja" el agua de un acuífero a otro, en este caso desde el de El Aljarafe hacia el acuífero Almonte- Marismas.

Tabla 1. Balance hídrico medio del acuífero Almonte-Marismas (hm³/año) en situación natural, frente a la situación alterada a causa de las actividades humanas. (Fuente: Custodio *et al.*, 2009)

Condición	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)							
	Infiltración lluvia	Evapotranspiración freática	La Rocina	Resto de arroyos	Ecotono Norte	Ecotono Oeste	Mar	Bombeos	TOTAL
Natural	158 - 210	18 - 29	31 - 43	31 - 39	10 - 15	24 - 32	43 - 52		157 - 210
Alterada		7 - 13	13 - 15	24 - 37	0	16 - 20	38 - 48	81 - 98	179 - 231

Los datos del balance hídrico actualizados durante la revisión del tercer ciclo de planificación hidrológica (2021-2027) correspondientes a la demarcación del Guadalquivir están recogidos en la **Tabla 2**. Este balance muestra que **el intercambio del flujo lateral que hay entre las MASb en las que ha quedado dividido el sistema acuífero de Almonte-Marisma. Estos flujos entre masas no constituyen entradas externas al sistema acuífero y han sido asignados erróneamente como “recarga subterránea”**. Esta es la razón por la que el cómputo de la recarga anual media del Plan Hidrológico tiene un error conceptual importante que ha llevado a la **sobreestimación de las entradas a las MASb que conforman el sistema acuífero Almonte-Marismas**. En realidad, por los datos disponibles y la dinámica del sistema acuífero, las únicas entradas subterráneas externas que se pueden tener en cuenta en el balance son los flujos laterales desde el acuífero El Aljarafe y desde el acuífero del aluvial del Guadiamar a las MASb de Almonte y Marismas.

La sobreestimación de la recarga anual media implica, además, que **se está subestimando el índice de explotación que aparece en el plan hidrológico vigente de la demarcación del Guadalquivir**. Es más, en algunas MASb se obtienen valores negativos de recurso disponible que no tienen sentido físico. Adicionalmente, al dividir el sistema acuífero con límites que no se corresponden con límites hidrogeológicos, es casi imposible cuantificar sin importantes incertidumbres asociadas los flujos laterales entre las MASb, y en definitiva, el balance hídrico de las mismas. Por todo lo explicado, el cómputo del recurso disponible tiene más sentido si se suman los balances de las 6 MASb. Si se calcula el índice de explotación con esta suma y los bombeos totales, se obtiene un **valor global de un 109 %**.

Tabla 2. Balance hídrico actual del Acuífero Almonte-Marismas (hm³/año). Las cifras han sido modificadas con respecto a las correspondientes al tercer ciclo de planificación 2021-2027. En concreto, los valores de recurso disponible han sido modificados teniendo en cuenta que los flujos laterales entre las MASb el sistema acuífero Almonte-Marismas no constituyen entradas ni salidas externas al sistema.

MASb	ORIGEN DE LAS ENTRADAS					ORIGEN DE LAS SALIDAS					Recurso disponible*	Recurso disponible PH (2021-2027)	Índice explotación PH (2021-2027)	Índice explotación sin flujos laterales dentro del sistema*
	Infiltración precipitaciones	Recarga subterránea	Infiltración de escorrentía	Retornos de riego y otros	Recarga Anual media	Bombeos	Drenaje a cauces superficiales	Drenaje lateral subterráneo	Otros	Salidas totales				
Almonte	64	2	3	0	69	33	9	27	0	69	42	42	78%	78%
Marismas	0	29	0	0	3	29	0	0	0	29	-3	23	125%	-909%
Marismas de Doñana	0	12	0	0	0	0	0	0	0	12	-10	2	0%	0
Manto Eólico Litoral de Doñana	72	1	0	0	72	5	0	25	43	73	28	29	18%	18%
La Rocina	62	15	3	0	65	35	39	3	3	80	21	36	95%	162%
El Condado (TOP)	22	0	0	3	25	4	0	0	0	4	18	18	25%	22%
TOTAL	221	59	6	3	235	106	48	55	46	268	97	151		109%

Otro inconveniente a la hora de calcular los balances es que no se conoce el volumen anual extraído por bombeos con exactitud, ya que existen numerosas captaciones ilegales no identificadas y en las legales las extracciones son estimadas con métodos indirectos. Estos métodos indirectos para cuantificar la superficie regada, como el seguimiento por teledetección, tienen la limitación de emplear dotaciones estándar, que no recogen de forma suficiente la variabilidad de la práctica de riego que se dan entre unas parcelas y otras, además de no saber con exactitud qué cultivo hay bajo los invernaderos.

También cabe destacar que no hay garantía completa de que las extracciones legales extraigan el volumen del agua concedido a través de contadores, ya que éstos no están habilitados en todas las explotaciones del sistema acuífero o no se pueden comprobar los datos aportados con mediciones de contraste. Por tanto, los valores de las extracciones de aguas subterráneas que existen en la actualidad para riego sólo pueden considerarse como un estimador aproximado del consumo de agua del acuífero.

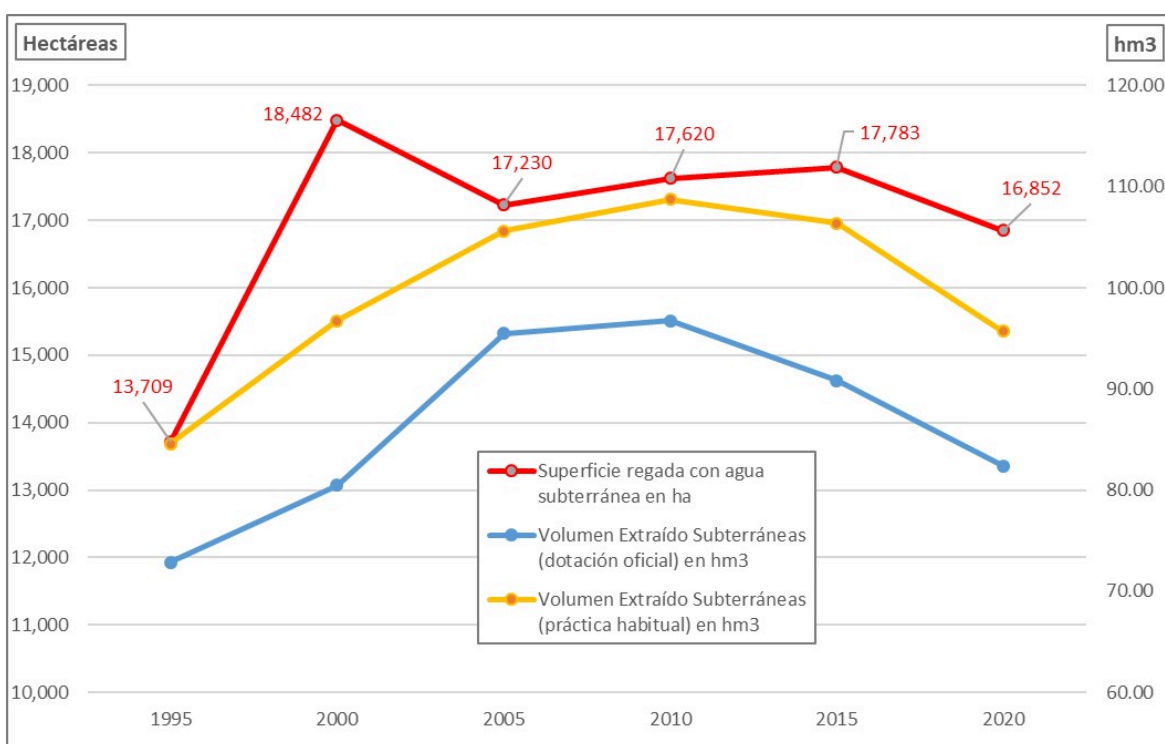


Figura 3 bis. Evolución temporal de la superficie regada con aguas subterráneas procedentes del acuífero Almonte-Marismas, obtenidas mediante imágenes de satélite, y volumen extraído de agua por parte de estas superficies según las dotaciones oficiales (Plan Hidrológico del Guadalquivir) y según la práctica habitual observada por los técnicos de WWF. Fuente: Elaboración propia.

Ante esta situación de falta de información sistemática, WWF España ha recopilado la información relativa a las superficies regadas con aguas subterráneas, obtenidas mediante los sucesivos estudios de imágenes de satélite de los acuíferos de Doñana durante los últimos años (1995-2020). El resultado obtenido se puede observar en la anterior **Figura 3 bis**. En ella se puede apreciar que, en torno al año 2000, se produjo una expansión de la superficie como consecuencia de inversiones y falta de control sobre los usos del territorio y del agua.

Posteriormente se estabiliza esta superficie hacia las 17.000 ha regadas. Cuando se aplican las dotaciones de riego, tanto las oficiales procedentes del Plan Hidrológico del Guadalquivir, como las observadas como práctica habitual por parte de los técnicos de WWF que han trabajado todo este tiempo asesorando explotaciones de regadío, se observa un máximo de consumo entre la primer y segunda décadas del presente siglo. Este valor llegó a alcanzar los 110 hm³/año. A partir de 2020 se observa una disminución hasta los 90 hm³, considerando solo las aguas subterráneas.



Ejemplo de pozo ilegal en el entorno de Doñana. Estas extracciones escapan al control de la administración pública del agua e impiden en conjunto completar de forma adecuada los balances hídricos del sistema acuífero Almonte-Marismas. © Jorge Sierra/ WWF España

UNIDADES DE GESTIÓN HIDROLÓGICA

En los siguientes apartados se analizan desde el punto de vista hidrogeológico los límites de las 6 MASb que han definido las autoridades del agua para el sistema acuífero Almonte-Marismas. Asimismo, se enumeran las evidencias que contribuyen a apoyar la continuidad hidrogeológica existente entre ellas. Estas certidumbres, más las recomendaciones de expertos internacionales de tener en cuenta las importantes dependencias de los ecosistemas asociados a la dinámica hidrogeológica, justifican la necesidad de hacer una gestión del sistema acuífero en conjunto, y no por sectores tal y como se plantea actualmente desde la administración del agua.

MASb (05.51.01) - Almonte

Descripción de los límites

Esta MASb se corresponde con un acuífero detrítico, permeable y de carácter libre, formado en su mayoría por arenas, gravas, limos y arcillas. **La evolución en paralelo de niveles superiores y profundos indica la buena conexión que hay entre las distintas capas.** Los límites de esta MASb (**Figura 4**) están detallados en el informe de la CHG para la declaración en riesgo de la masa (CHG, 2020a), y son los siguientes:

- **Límite norte:** afloramientos de las margas azules, zona impermeable del sistema acuífero Almonte-Marismas, que corresponde con un límite hidrogeológico.
- **Límite noreste:** MASb Campo de Tejada.
- **Límite noroeste:** divisoria hidrológica de la demarcación Hidrográfica del Tinto-Odiel-Piedras, en concreto con la MASb Condado. Hay continuidad hidrogeológica con esa masa al estar el límite ubicado dentro de los mismos materiales geológicos (arenas y limos). Este hecho se puede observar claramente los afloramientos del mapa geológico (**Figura 5**).
- **Límite oeste:** MASb de La Rocina. Este límite administrativo no se corresponde con ningún límite geológico. Hay continuidad de las arenas y limos como se muestra en el mapa geológico, tal y como puede verse en los perfiles geológicos de Salvany y Custodio (1995).
- **Límite este:** En su extremo más oriental la MASb integra el valle aluvial del río Guadiamar y contacta con la MASb Aljarafe Sur que, aunque tiene un origen y composición geológica semejante, no está conectado hidráulicamente a la MASb Almonte en superficie. Sí que hay interconexión hidráulica entre las MASb Almonte y la MASb Marismas en profundidad, por lo que las relaciones con las MASb Aljarafe Sur y MASb Marismas pueden incidir sobre los flujos laterales subterráneos hacia la MASb de Almonte.
- **Límite sur:** MASb Marismas y Marismas de Doñana, presentando una continuidad hidrogeológica con ambas y destacando la significativa interconexión y dependencia con la MASb Marismas.

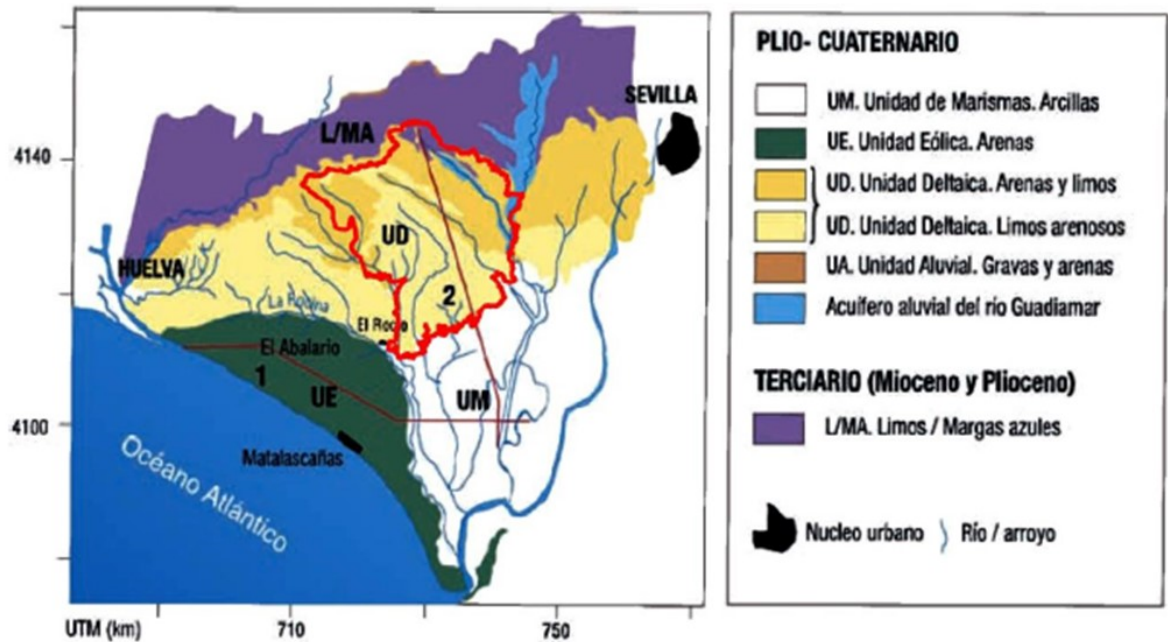


Figura 4. Delimitación administrativa de la MASb (05.51.01) Almonte y la geología sobre la que se asientan.
Fuente: CHG 2020⁹.

Alteración de los niveles piezométricos

El ecotono Norte de la Marisma de Doñana se ubica en el límite sur de la MASb Almonte. En la parte más superficial del acuífero hay una superficie de contacto entre materiales hidrogeológicos diferentes: las arenas situadas al norte y los materiales más finos de marisma (ver Figura 4).

En profundidad, en cambio, sí que existe una conexión hidrogeológica directa con las MASb colindantes en el límite sur (Marismas y Marismas de Doñana). Esta conexión está claramente reflejada en los mapas de isopiezas y su evolución temporal, donde puede observarse que la evolución del cono de depresión piezométrica en el entorno de Los Hatos se localizada a ambos lados de los límites administrativos de las MASb mencionadas (**Figura 5**).

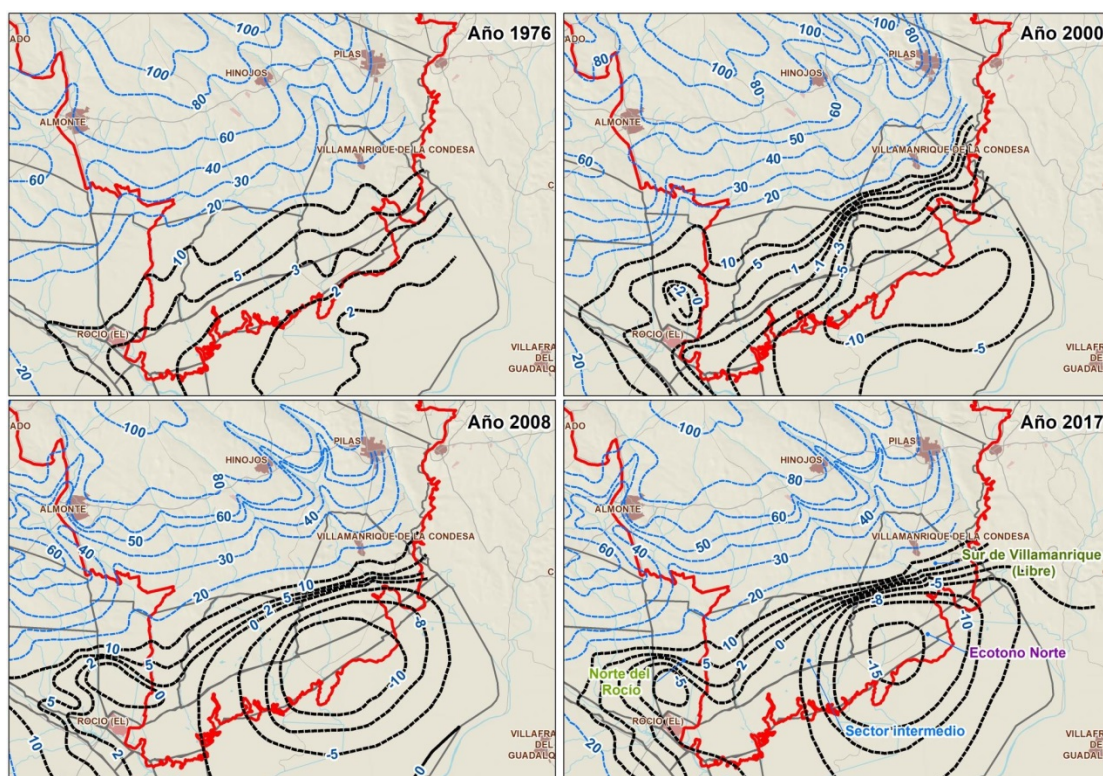


Figura 5. Evolución de las isopiezas desde el año 1976 hasta el año 2017, en el que puede apreciarse la formación del cono de depresión piezométrica de Los Hatos. En rojo, quedan marcados los límites administrativos de la actual MASB (05.51.01) Almonte. Fuente: elaboración propia.

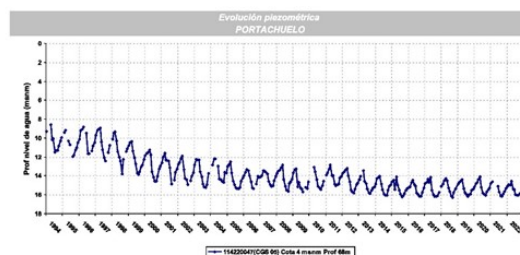
La evolución temporal de la piezometría en este límite se describe muy bien en el informe del estado de los acuíferos de 2021 que elaboró la CHG (CHG, 2022). En este trabajo se destacan los datos de nivel del acuífero que corroboran la progresiva disminución de los flujos de alimentación a los ecosistemas asociados al ecotono Norte. El nivel de la mayoría de los piezómetros en el ecotono Norte se encuentra en su nivel más bajo histórico o próximo a éste. Algunos parecen haberse estabilizado en los últimos 10 años, pero otros no han dejado de descender. Los niveles piezométricos que eran surgentes ya no lo son.

Según las medidas tomadas en 1996 en la *Campaña de investigación y evaluación de recursos hídricos previa al Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas*, existía un equilibrio entre los niveles freáticos del aluvial del Guadiamar y el sistema acuífero Almonte-Marismas. Según los datos observados por Ayora *et al.* (2001), así como los correspondientes a una campaña de seguimiento piezométrico realizada por el IGME en 2005, se observan fuertes descensos de los niveles piezométricos cercanos a los Hatos, estableciéndose un gradiente hidráulico importante. Esto implica que hay un **desequilibrio que se traduce en un nuevo flujo desde el acuífero aluvial del Guadiamar hacia el sistema acuífero Almonte-Marismas**, cuyos niveles piezométricos están por debajo del nivel freático del aluvial por la modificación de la hidrodinámica de la zona por las intensas extracciones para regadío.

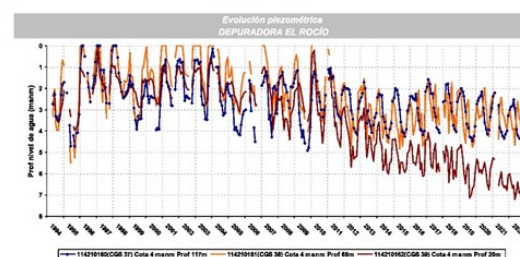
En la zona del límite con el acuífero de El Aljarafe, existía de forma natural un ligero gradiente hidráulico desde El Aljarafe a la Marisma, pero de poca entidad. La campaña piezométrica del

IGME en el año 2005 mostró, en cambio, una modificación en la dirección de flujo, pasando de ser norte-sur a tener una dirección preferente hacia las extracciones de los Hatos (el oeste), a causa de la formación del cono piezométrico en profundidad. Estos descensos piezométricos se pueden ver en la **Figura 6** que resume los datos de los informes de la CHG (2022 y 2023) en esta zona.

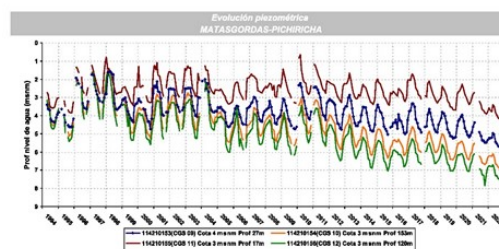
“Los datos más representativos proceden del multi-piezómetro “El Portachuelo” que controla tres niveles acuíferos (114220047, 48 y 49) y está influenciado por el régimen de extracciones de los Sectores I y II del PTAM. El nivel en los acuíferos intermedio y superficial se encuentra, desde hace años, por debajo de la rejilla de admisión. En el profundo (114220047) sigue un descenso continuado desde el inicio (acumula 4,8 m), aunque amortiguado desde 2001-2002. Apenas hay variación con el nivel del año pasado (+0,1 m).”



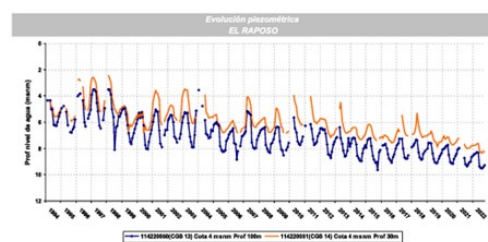
“Depuradora del Rocío. Los niveles captados mantuvieron cierta estabilidad hasta el año 2003 y una oscilación intra-anual de 2-3m. El nivel intermedio era el que presentaba el mayor potencial hidráulico, siendo surgente frecuentemente hasta el año 2010. Desde entonces se instala una tendencia descendente en todos los niveles, mucho más acusada en el nivel más somero, mientras que los niveles inferiores presentan una cierta estabilización desde 2012 hasta 2017 en el que retoman una ligera tendencia descendente. Hay que destacar este cambio de comportamiento del nivel más superficial a partir de 2010 con respecto a los niveles más profundos, pasando a situarse a una profundidad muy por debajo de los niveles inferiores y encontrarse actualmente en su mínimo histórico con un descenso acumulado de más de 5m.”



“El piezómetro múltiple de Matagorda (114210153-154-155-156, mantiene constante la relación hidráulica entre los niveles del acuífero multicapa. El potencial hidráulico disminuye en profundidad y predomina el flujo vertical descendente. La comparación entre la situación actual y la inicial refleja la constancia del nivel superficial con un descenso acumulado de 1,5 m, y el descenso en los demás, aumentando el acumulado con la profundidad de los piezómetros (entre 2,5 m y 3,3 m). Los cuatro niveles se encuentran en su mínimo histórico.”



“En el piezómetro doble de El Raposo (114220050-51), refleja un paralelismo evolutivo y ambos descienden de forma similar entre 3,1 m y 3,2 m desde el año 1995. El mayor potencial hidráulico corresponde a la formación más superficial. Las oscilaciones intra-anales, relacionadas con la lluvia, son de 1-2 m desde el año 1995. Ambos piezómetros se encuentran en su mínimo histórico.”



“El punto 031201 “Coto del Rey”/114210114), se sitúa en el ecotono, tiene un descenso continuado desde el inicio, acumulando 9 m desde 1973, 3,50m desde 1995, 0,37 m con respecto al año 2020, presentando su mínimo histórico”.

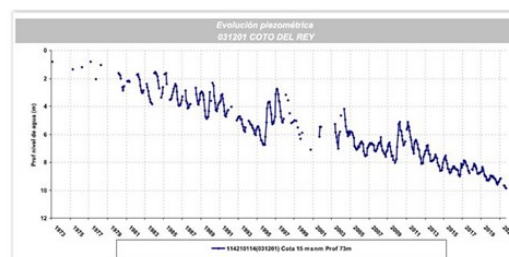


Figura 6. Evolución piezométrica en algunos sondeos representativos en el ecotono Norte según los datos del informe del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG. En el caso del punto “Coto del Rey” los datos provienen del informe del periodo 2020-2021, ya que este punto ha sido eliminado del informe 2021-2022. El texto que aparece en la figura está copiado literalmente de los informes de la CHG.

Fuente: CHG 2022 y 2023.

MASb (05.51.04) - Manto Eólico Litoral de Doñana

Descripción de los límites

En la parte más superficial esta MASb está compuesta en su práctica totalidad por las arenas del Manto Eólico Litoral de Doñana en el ámbito de *El Abalarío* (CHG, 2015; Salvany *et al.*, 2010) En profundidad esta MASb está constituida por el acuífero de arenas y gravas. El espesor va aumentando de norte a sur, pasando por unos 100-120 m en el sector de *Ribetehilos* hasta los 150 m en la línea de costa, a superar los 170 m en la zona de Matalascañas. Constituye la principal área de recarga del acuífero detrítico libre.

Resulta difícil de precisar cuál es el límite impermeable en profundidad ya que depende de los cambios laterales de facies sedimentaria. Sin embargo, **la evolución paralela de niveles piezométricos medidos a diferentes profundidades muestra la conexión que hay entre el acuífero superior y el profundo en esta MASb.**

Los límites de la MASb son:

- **Límite norte dentro del Abalarío:** está en contacto y continuidad hidrogeológica con las MASb Condado, de la demarcación hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras, y La Rocina. Las arenas eólicas que conforman esta MASb tienen continuidad lateral con la MASb de La Rocina.
- **Límite noreste:** MASb Marismas de Doñana. Este borde constituye el contacto entre dos litologías diferentes. Esta es una zona de descarga subterránea desde las arenas del manto eólico a la Marisma conocida como el ecotono de La Vera-Retuerta, o ecotono Sur. En profundidad hay alternancia de arenas, gravas y arcillas y existe continuidad hidrogeológica como acuífero confinado bajo las arcillas de marisma.
- **Límite suroeste:** océano Atlántico. Es una zona de descarga al mar desde las arenas eólicas

Alteración de los niveles piezométricos

Esta MASb se ve afectada por dos áreas de bombeo bien diferenciadas. Por un lado, cerca del arroyo de La Rocina donde hay una importante concentración de áreas de cultivo (*El Alamillo, Pequeña Holanda, etc.*) y en la que **existen descensos de los niveles piezométricos profundos**. Esta zona está muy cerca del ecotono de La Vera.

En general la **disminución del nivel freático en el ecotono de La Vera-Retuerta tiene órdenes de magnitud pequeños, pero lo suficientemente importantes para disminuir el caudal de los caños que desembocan en la Marisma** y hacer que varios pozos dejen de ser surgentes. Un descenso del orden de los decímetros en el nivel freático es crítico ya que hace que el agua capilar no llegue a las raíces o a las surgencias en superficie.

Como consecuencia de ello, se han secado muchos árboles y pequeños humedales han pasado de ser permanentes a estacionales o sólo verse inundados en años húmedos (Custodio *et al.*, 2009). Los niveles profundos han disminuido tanto que ahora **el nivel superficial debe**

alimentar tanto a los humedales y hábitats como a los niveles piezométricos de más profundidad que han disminuido. Resulta particularmente difícil cuantificar su impacto, pero las evidencias de las que se dispone indican que la oscilación intra-anual de los piezómetros en esta zona es mayor cuanto más cerca se encuentran de las zonas de explotación agrícola de regadío (CHG, 2022).

En el caso del ecotono de La Retuerta la situación es bastante estable y los niveles superficiales muestran oscilaciones intra-anales pequeñas, pero no por ello poco importantes, tal y como se ha mencionado antes. Hay piezómetros con descensos acumulados de hasta 2 m. y otros piezómetros con variaciones medias anuales muy pequeñas. Cabe destacar aquellos *multipiezómetros* que miden varios niveles, donde **se observa una inversión de la relación hidráulica entre los distintos niveles medidos, lo que es un síntoma de una disminución de las reservas hídricas en el acuífero profundo (Figura 7).**



Estado de la laguna de Santa Olalla, completamente seca, en 2022. © Juan José Carmona / WWF España



Ejemplo de explotaciones de cultivo de frutos rojos con indicios de ilegalidad en el entorno de Doñana, cerca del ecotono La Vera-Retuerta. © Jorge Sierra/ WWF España

“próximo a la marisma el 114210076 ...presenta un hidrograma descendente que desde 2015 tiende a la estabilización, en torno a 7-8 m de profundidad.”

“El nivel superficial, de mayor potencial hidráulico permanece estable desde 2002.... Su situación con respecto al año crítico de 1995 es favorable y registra un ascenso de en torno 1 m. En relación con el año anterior ha presentado un ligero descenso de 0,05 m.

En los tramos intermedio y profundo, el nivel de ambos fue similar hasta que en el año 2003 se independizan dos niveles con el profundo por debajo del intermedio. La oscilación intra-anual se ha reducido desde 4 m al inicio hasta 2 m en los últimos años. Probablemente la mayor oscilación esté relacionada con la influencia de los bombesos al sur de La Rocina. ... Se observa un ascenso de niveles desde 2015 hasta 2017 en que se estabiliza, probablemente se deba al cese de bombesos de Los Mimbrales. En el último año ambos niveles acuíferos han registrado un descenso, de 0,22 m y 0,45 m.”

“Los niveles piezométricos en “Aguaperal” estaban acoplados en todos los tramos y marcaban un nivel piezométrico similar hasta que en 2007 se han independizado, alcanzando 1 m de diferencia entre ambos, e invirtiéndose la relación hidráulica entre ellos (menor potencial en el nivel más profundo).... Ambos se mantienen prácticamente estables con respecto al año anterior y sus cotas son superiores al año 1995.”

“..., hacia el sur la piezometría es mayor en superficie (situación de recarga)... en todos los casos se mantienen estables o en ligero descenso... En el sector predominan los piezómetros someros... en el último año la mayoría de los piezómetros han registrado un leve descenso del nivel, en coherencia con la menor lluvia de 2021/22, respecto al año anterior.”

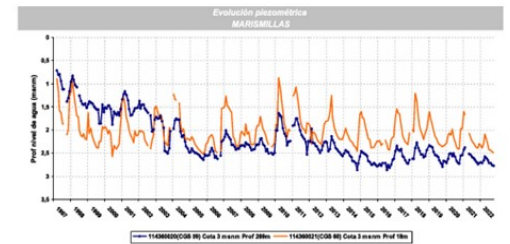
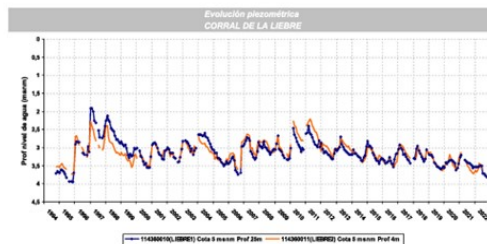
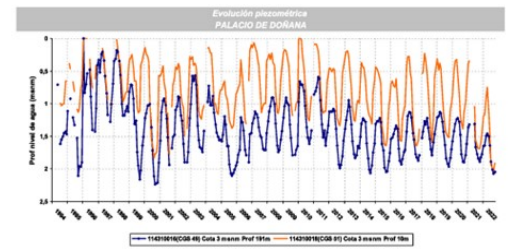
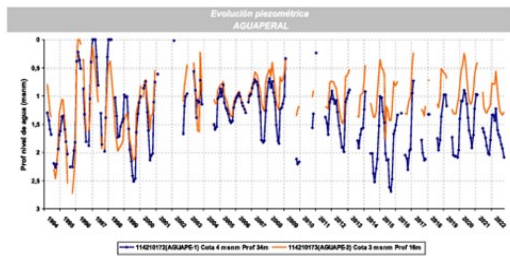
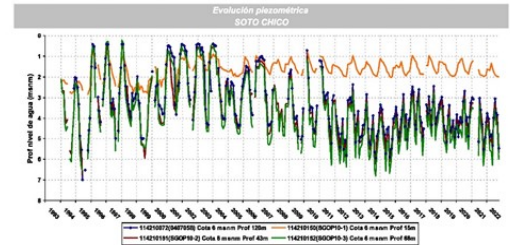
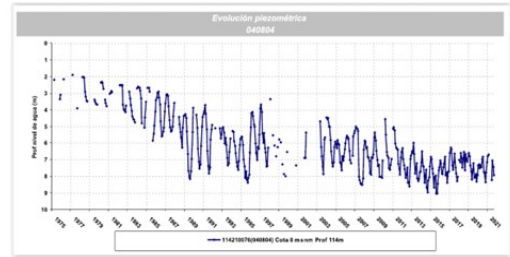


Figura 7. Evolución piezométrica en algunos puntos representativos en el entorno de La Vera-Retuerta según los datos del informe del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG. En el primer punto de la figura los datos provienen del informe del periodo 2020-2021, ya que este punto ha sido eliminado del informe 2021-2022. El texto que aparece en la figura está copiado literalmente de los informes de la CHG. Fuente: CHG 2022 y 2023.

Las lagunas peridunares de Doñana están asociadas a la descarga local de aguas freáticas en pequeñas depresiones eólicas, consecuencia de un nivel freático poco profundo que intercepta fácilmente la topografía del terreno. Generalmente son de carácter temporal. La variabilidad temporal de los niveles medidos es similar a la de la precipitación. Si se compara el nivel actual con el nivel de la sequía de 1995, se puede afirmar que estamos con niveles ligeramente superiores.

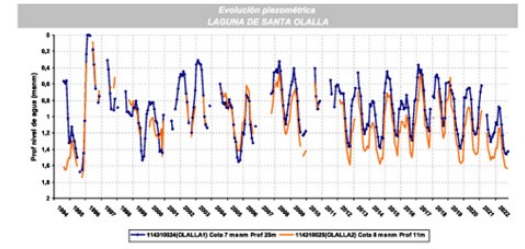
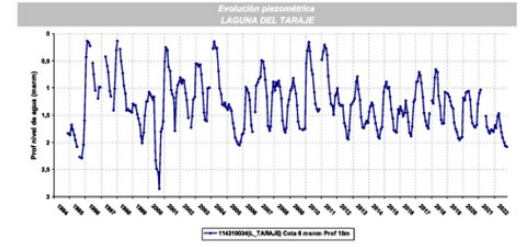
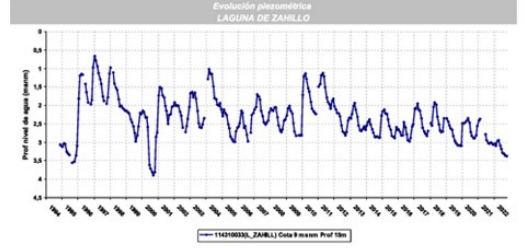
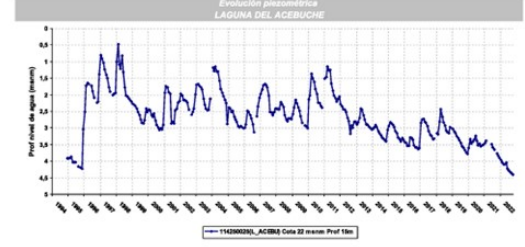
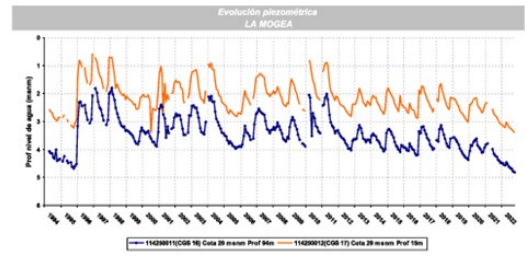
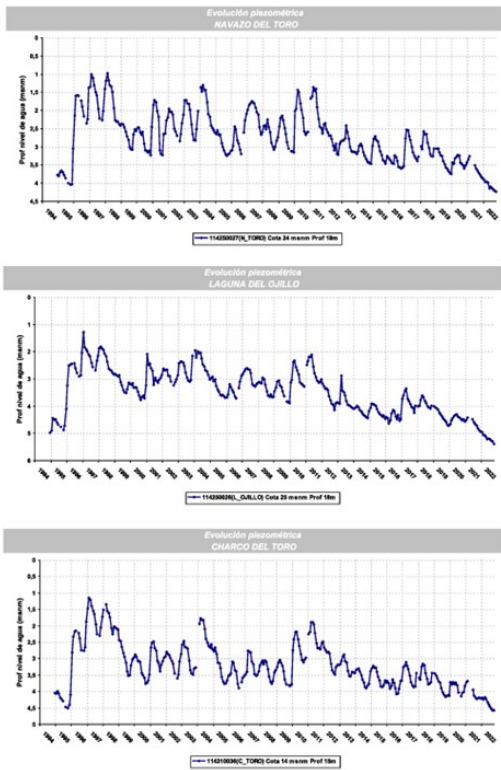
En cambio, **sí se observa la tendencia de todos los piezómetros. Se puede concluir que ha habido una disminución del nivel piezométrico en todas las lagunas respecto a los años 90', de entre 2 y 3 m.** Este descenso de nivel se explica por la cercanía a la zona turística de Matalascañas, cuyos bombeos suponen algo menos de 3 hm³/año. No hay datos para poder establecer una relación directa entre estos descensos de las lagunas peridunares y las grandes explotaciones agrícolas.

Por otro lado, de forma similar, cerca de la costa también han disminuido los niveles profundos por las extracciones ligadas a Matalascañas. La variabilidad temporal de los niveles medidos es similar a la de la precipitación. Si se compara el nivel actual con el nivel de la sequía de 1995, se puede afirmar que de nuevo estamos con niveles ligeramente superiores. Y también **sí se observa la tendencia de todos los piezómetros, se puede concluir que ha habido una disminución del nivel piezométrico en todas las lagunas respecto a los años 90', de entre 2 y 3 m. (Figura 8).** Este descenso de nivel se explica por la cercanía a la zona turística de Matalascañas, cuyos bombeos suponen algo menos de 3 hm³/año.

Esta bajada de los niveles **afecta a las lagunas peridunares ya que hay conexión entre niveles profundos y superficiales;** las lagunas se alimentan con la descarga local de aguas freáticas en pequeñas depresiones eólicas, consecuencia de un nivel freático poco profundo que intercepta fácilmente la topografía del terreno. Varias de las lagunas peridunares (entre ellas Charco del Toro, Zahílllo o Taraje) se han visto directamente afectadas y ahora han pasado a depender exclusivamente de la lluvia y a recargar al acuífero, en lugar de alimentarse de él (Lozano 2004; Manzano y Custodio, 2005; Fernández-Ayuso, 2020; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2021, ver **Figura 9**). La laguna del Charco del Toro es la que se encuentra en situación más dramática ya que casi todo el año se seca, incluso después de eventos de lluvia. La laguna del Brezo se desecó en 1976 con el comienzo del funcionamiento de la urbanización de Matalascañas y es difícil ubicarla con la vegetación que la ha repoblado (Díaz-Paniagua y Alba, 2015).

La laguna de Santa Olalla se diferencia de las demás lagunas por ser un sistema semi-permanente que recibe más del 80% de sus aportes por descarga de aguas subterráneas (Sacks *et al.*, 1992; Fernández-Ayuso *et al.*, 2018) y que únicamente se ha secado en los años 1983, 1995, 2022 y 2023, coincidiendo con periodos de sequía intensa. Hasta el momento no existen evidencias de la afección del descenso de los niveles freáticos profundos a esta laguna.

“En el grupo de piezómetros de la zona centro todos los piezómetros se encuentra en su mínimo histórico. Acebuche (114250025), Ojillo (114250026) y Navazo del Toro descendiendo 0,7, 0,6 y 0,5 m respectivamente con respecto al año pasado. En el piezómetro múltiple Casa la Mogeja (114250011-12) los niveles han descendido 0,5 m en los dos piezómetros con respecto al año 2021.”



“Los piezómetros en el límite del cordón dunar muestran un comportamiento dispar con un gradiente oeste-este. Los dos más próximos a Matalascañas (Brezo y Charco del Toro), están en mínimos históricos... Al desplazarnos hacia el este la situación mejora gradualmente. Los piezómetros Zahillo y Taraje presentan descenso de 0,32 y 0,22 m respectivamente respecto al año 2021, pero están por encima de 1995. Más hacia el este en los piezómetros de Laguna Dulce, Santa Olalla Las Pajas y Hermanillos los descensos con respecto a 2021 son menores y los niveles se mantienen por encima del año de referencia, 1995, salvo en Hermanillos, que está al mismo nivel. La tendencia general es descendente desde 2017, coherente con la evolución piezométrica. ... aunque la Laguna de Santa Olalla se considera permanente manteniendo agua prácticamente durante todo el año, hay que destacar el hecho de que la laguna en este último periodo de control ha llegado a secarse por completo, hecho que no acontecía desde 1995.”

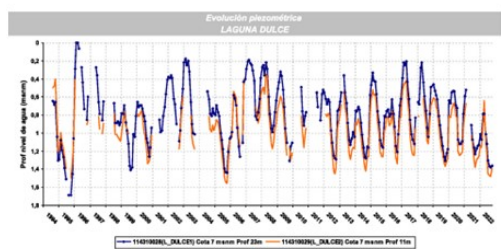


Figura 8. Evolución piezométrica en algunos puntos representativos en el entorno de las lagunas peridunares según los datos del informe del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG.

Las figuras y el texto han sido tomas de dicho informe.

Fuente: CHG 2023.

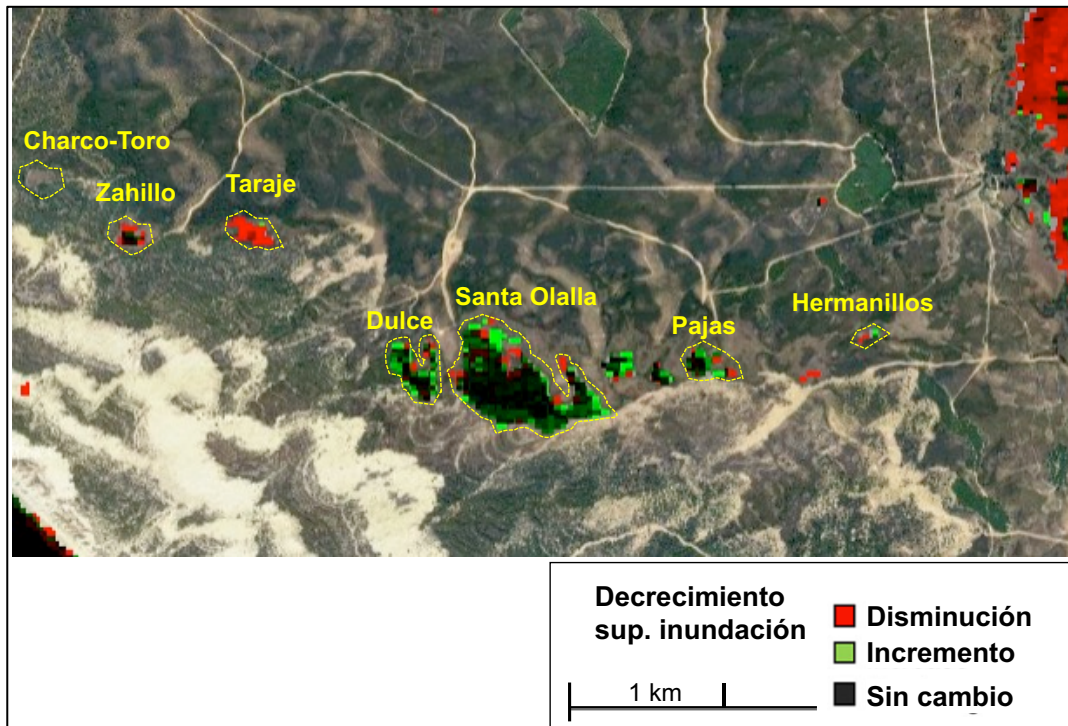


Figura 9. Imagen del cambio de la presencia de agua en las diferentes lagunas peridunares comparando el periodo 1984-1999 y el periodo 2000-2021. Fuente: Modificado de Rodríguez-Rodríguez *et al.* (2021) y actualizado en <https://global-surface-water.appspot.com/map>

La revisión actual del plan hidrológico de la demarcación del Guadalquivir (2022-2027) incluye medidas enfocadas a la sustitución de las extracciones subterráneas en esta zona por la conexión con la ETAP en Palos de la Frontera, a medio plazo. Sin embargo, a corto plazo está previsto que se van a sustituir los sondeos más cercanos por otros nuevos en una zona un poco más alejada de los límites del Parque Nacional de Doñana. Dada la conexión hidráulica de ambas zonas, esta solución, aún temporal, puede afectar a otros ecosistemas cercanos a los nuevos sondeos.

Otra zona de esta MASb que parece estar afectada por las extracciones es la de *Ribetehilos*, en la zona de *El Abalarío*. En esta zona había una gran cantidad de pequeñas lagunas, cuyo origen son los sedimentos de turberas impermeables que impiden el paso del agua al subsuelo (Manzano *et al.*, 2002). Son lagunas descolgadas, estimadas en más de 3.000 (Bustamante *et al.*, 2016). Según Díaz-Paniagua (comunicación personal), han desaparecido un 60% de las mismas.

Desde el punto de vista hidrogeológico se observa en esta zona un descenso regional de orden centimétrico del nivel freático. Según Trick (1998) este descenso se debió al incremento de la evapotranspiración por la introducción de los eucaliptos. La mayoría de las masas forestales de eucaliptos fueron eliminadas a finales de los años 90 del siglo XX y principios del XXI, pero en cambio esto no ha traído como consecuencia la recuperación de estas lagunas. El aumento de las extracciones para atender las demandas de regadío en esta zona a finales de los años 90 y principios de los años 2000, la misma época en que se eliminaron los eucaliptos, podrían ser la causa de que en el área de *Ribetehilos* no hayan podido recuperarse los niveles freáticos (Custodio *et al.*, 2009). No hay un inventario de lagunas desaparecidas o existentes hoy en día, por lo que es difícil comprobar estas hipótesis.

MASb (05.51.03) - Marismas de Doñana

Descripción de los límites

Esta MASb está constituida por sedimentos detríticos (arenas y gravas), y por niveles de paleocanales que se intercalan sin continuidad con una litología más arcillosa. Aumentan progresivamente su espesor de norte a sur, con espesores que pueden alcanzar los 200 m. Estas formaciones están cubiertas por un gran espesor de materiales arcillosos, muy impermeables.

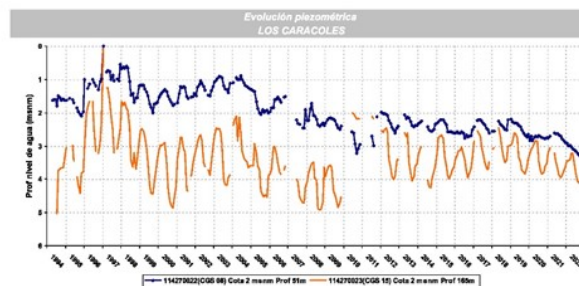
Como en superficie es totalmente impermeable no se produce recarga directa al acuífero por lluvia a través de ella, y el acuífero está confinado. Lateralmente el acuífero confinado está conectado en profundidad con los materiales permeables de la parte del acuífero que se comporta como libre y que permite la recarga del mismo. Los límites son los siguientes:

- **Límite norte:** MASb Marismas. La geología y la formación de las MASb Marismas y Marismas de Doñana es exactamente la misma. El contacto entre estas dos masas coincide, con los límites administrativos del Parque Nacional de Doñana.
- **Límite noroeste:** MASbs Almonte y La Rocina. En superficie las características hidrogeológicas son diferenciadas, por la presencia de las arcillas de la Marisma. En profundidad hay mucha variabilidad lateral, pero estas variaciones laterales no tienen por qué coincidir con el límite de la MASb.
- **Límite suroeste:** MASb Manto Eólico. Al igual que en el límite anterior, en superficie existe una clara diferenciación de materiales. En profundidad el acuífero confinado tiene continuidad entre una MASb y otra. Este límite administrativo coincide con la zona de descarga del ecotono de La Vera-Retuerta.
- **Límite este:** el río Guadalquivir. Bajo el cauce del Guadalquivir y en su margen izquierda el acuífero se extiende con los sedimentos del antiguo estuario (Salvany y Custodio, 1995). En esa zona el acuífero es pobre y contiene agua salobre y salina (Custodio *et al.*, 2009). En todo caso, la información geológica de ese límite es escasa y parece correcto considerar que el río Guadalquivir no tiene conexión con el acuífero en esta zona (Custodio *et al.*, 2009).

Alteración de los niveles piezométricos

Los dos únicos piezómetros medidos por la CHG dentro de los límites de la masa indican una disminución de nivel de entre 1 y 2 m, dejando ambos pozos de ser surgentes (**Figura 10**). La disminución de los niveles profundos en los límites de las MASb de Almonte, La Rocina y Manto eólico se ha detallado en las descripciones anteriores realizadas para los ecotonos Norte y de La Vera-Retuerta. Por ello, **se puede concluir que esta MASb está afectada tanto por las extracciones como por la disminución de la lluvia en la última década.**

“El multi-piezómetro Los Caracoles (114270022-23) controla dos niveles confinados: el profundo con una mayor oscilación piezométrica, semejante a las observadas al norte (sector Sur de Villamanrique), por lo que **se infiere relación hidráulica entre ambas e influencia del régimen de bombeo de aquel sector....** en el piezómetro profundo las variaciones interanuales son muy marcadas (1 m.), en el somero se han ido amortiguando... **Como tendencia general se destaca que desde el año 2010 se ha instalado un periodo de estabilidad piezométrica.**”



“... cerca del ecotono de La Vera el piezómetro Vetalengua (114360009) es un piezómetro poco profundo. Tiene una estrecha dependencia del régimen pluviométrico.... Aunque la **tendencia de los últimos desde 2011 es descendente, durante los último 3 años se mantiene más o menos estable.**”

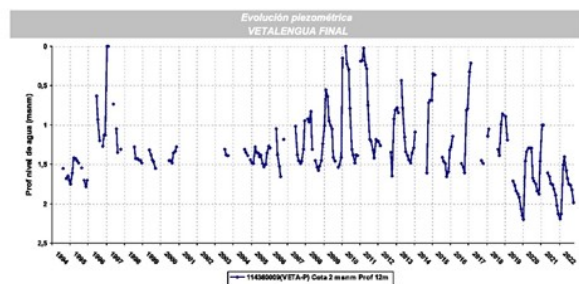


Figura 10. Evolución piezométrica en algunos sondeos representativos la masa de agua subterránea de Marismas de Doñana según los datos del informe del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG.

Fuente: CHG 2023.

MASb (05.51.02) - Marismas

Descripción de los límites

En la parte sur, tal y como se ha mencionado, esta MASb tiene continuidad hidrogeológica con la MASb Marismas de Doñana, presentando un comportamiento confinado bajo la Marisma. La parte norte, dónde no hay presencia de arcillas de la Marisma, tiene un comportamiento de acuífero libre. Los límites son los siguientes:

- **Límite norte:** MASb Aljarafe Sur y MASb Almonte. En superficie las características hidrogeológicas son diferenciadas, por la presencia de las arcillas de la Marisma. En profundidad hay mucha variabilidad lateral, pero estas variaciones laterales pueden no coincidir con el límite de la MASb.
- **Límite este:** el río Guadalquivir. Bajo el cauce del Guadalquivir y en su margen izquierda el acuífero se extiende con los sedimentos del antiguo estuario (Salvany y Custodio, 1995). En esa zona el acuífero es pobre y contiene agua salobre y salina (Custodio *et al.* 2009). En todo caso, la información geológica de ese límite es escasa y parece correcto considerar que el río Guadalquivir no tiene conexión con el acuífero en esta zona (Custodio *et al.*, 2009).
- **Límite sur:** MASb Marismas de Doñana. La geología y la formación de las MASb Marismas y Marismas de Doñana es la misma. El contacto entre estas dos masas coincide los límites administrativos del Parque Nacional de Doñana.

Alteración de los niveles piezométricos

Esta MASb tiene una concentración importante de puntos de extracción para el riego de cultivos en los enclaves de Hato Ratón, Hato Blanco, Pichardo Banco, Pescante, etc.

En la parte libre de esta MASb todos los piezómetros reflejan un descenso sostenido desde mediados de los años 70', con bajadas acumuladas superiores a 20 metros (Figura 11). En la zona confinada existen piezómetros con medidas a varias profundidades, en los que se ha podido constatar la influencia de los bombeos, hasta el punto de invertir la relación hidráulica entre el piezómetro profundo y el medio y produciendo un ascenso de las aguas (Figura 12). Las variaciones intra- anuales pueden llegar a los 5 metros. La disminución de los niveles profundos en el límite de la MASb de Almonte se ha detallado en las descripciones anteriores realizadas para el ecotono Norte. Por todo lo explicado en ese punto, **se puede concluir que esta MASb está afectada tanto por las extracciones como por la disminución de la lluvia en la última década.**

“Informe 2021-22: En la parte libre ...el registro de.. 114170040 está influenciado por los bombeos, no así el piezómetro situado en una latitud similar. En ambos casos el nivel tiende al descenso... Entre 2010 y 2022 se registra un descenso acumulado de más de 11m. ... La tendencia descendente de I-2-5 se ha suavizado recientemente... en este piezómetro se refleja un descenso sostenido desde el inicio de la serie histórica, en 1976, con bajadas acumuladas superiores a los 27 m... Aproximadamente el 70% del descenso acumulado se registra después del año 1995. Hay periodos con escasa correlación entre la recarga por pluviometría y la cota piezométrica debido, probablemente, a variaciones en los bombeos.”

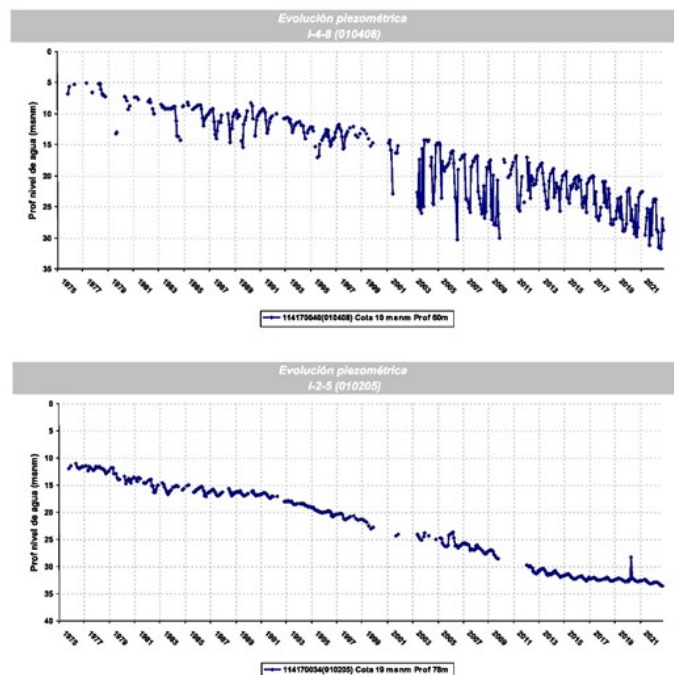


Figura 11. Evolución piezométrica en algunos sondeos representativos la masa de agua subterránea de Marismas en la parte en la que se comporta como acuífero libre, según los datos de los informes del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG. Fuente: CHG 2023.

“En la zona confinada Partido Resina son piezómetros múltiples que comparten emplazamiento, pero controlan distintos niveles del acuífero multicapa. Ambos están influenciados por bombeos hasta el punto de invertir la relación hidráulica entre ellos, coincidiendo con aguas bajas y mayores extracciones ... El descenso acumulado es, desde el año 1994, superior a 7 m en el nivel profundo y algo menos de 7 m en el superficial.”

“... El resto de piezómetros del sector tienen tramos filtrantes enfrentados a distintos niveles del acuífero multicapa por lo que el nivel piezométrico medido es el resultado de los distintos potenciales atravesados. El registro histórico de los niveles sigue una cierta estabilización...”

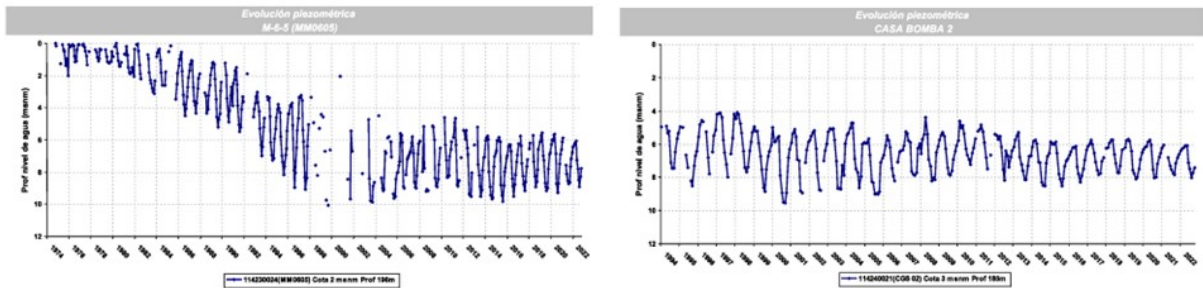


Figura 12. Evolución piezométrica en algunos sondeos representativos la masa de agua subterránea de Marismas en la parte en la que se comporta como acuífero confinado, según los datos del informe del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG.

Fuente: CHG 2023.

MASb (05.51.05) La Rocina

Descripción de los límites

Esta zona constituye el área de recarga occidental del acuífero detrítico libre, abarcando una buena parte de la cuenca del arroyo de La Rocina, que a su vez constituye el principal aporte fluvial de agua a la Marisma en las condiciones actuales alteradas. Esta MASb está formada por arenas basales que actúan como acuífero libre. Localmente, y en determinados casos, también pueden constituir un acuífero multicapa, en condiciones de semi-confinamiento, debido a la presencia de intercalaciones arcillosas.

En la zona de acuífero libre el tramo permeable aumenta progresivamente su espesor de norte a sur, pasando desde unos 15-20 m en la zona de Almonte, 80 m en el entorno de la localidad de El Rocío, hasta alcanzar los 100-120 m en el sector más meridional de la MASb. El sustrato impermeable de las formaciones acuíferas de esta zona corresponde a unos niveles con presencia de margas azules. Resulta difícil de precisar en profundidad su localización ya que depende de los cambios laterales de las facies sedimentarias.

Los límites de esta MASb son artificiales y vienen impuestos por el propio "*Plan Especial de Ordenación de las Zonas de Regadío ubicadas al norte de la corona forestal de Doñana*"⁸, dentro de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Este hecho también ha condicionado la delimitación de las MASb de su entorno. A continuación, se analiza la continuidad hidrogeológica de cada límite:

- **Límite norte:** MASb Campo Tejada y MASb de El Condado, de la demarcación hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras. Hidrogeológicamente constituyen el mismo acuífero por su probada interconexión.
- **Límite este:** MASb Gerena, MASb Aljarafe Norte y MASb Aljarafe Sur.
- **Límite sureste:** MASb Marismas de Doñana, pero solo a través de la zona de contacto entre La Rocina y la Marisma. Se identifica en superficie una zona de contacto con materiales de baja permeabilidad de la Marisma. Existe continuidad hidrogeológica como acuífero confinado bajo las arcillas de la Marisma.
- **Límite sur y suroeste:** MASb Manto Eólico Litoral de Doñana. En esta zona son las mismas arenas eólicas las de las dos MASb, existiendo entre ellas continuidad hidrogeológica.

⁸ Se puede descargar en <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2014/254/18>

Alteración de los niveles piezométricos

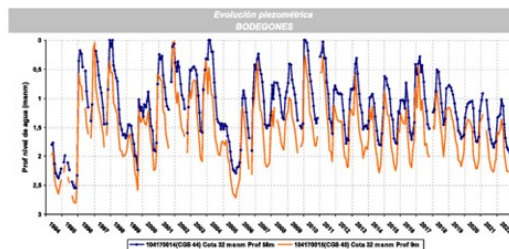
En condiciones naturales (sin influencia de las extracciones) los niveles del acuífero profundo eran superiores a los niveles del acuífero superior, incluso llegando a haber niveles surgentes. Esto significa que el acuífero profundo podía llegar a alimentar al acuífero superior, y que el acuífero superior descargaba directamente hacia los arroyos, caños y pequeños humedales. Además, la evolución en paralelo de los niveles indica la **gran conexión que hay entre el acuífero somero y el profundo.**

Actualmente, con las condiciones alteradas en los piezómetros más cercanos al arroyo de La Rocina, se observa una inversión del gradiente hidráulico, por lo que muchos pozos han dejado de ser surgentes. **Los niveles superiores se vacían rápidamente (afectando a humedales y criptohumedales) y ahora no sólo se descargan hacia los arroyos y pequeños humedales, sino que también fluyen hacia el acuífero profundo.** Los descensos piezométricos en estos piezómetros cercanos al cauce pueden alcanzar valores acumulados de hasta 4 metros (Figura 13).

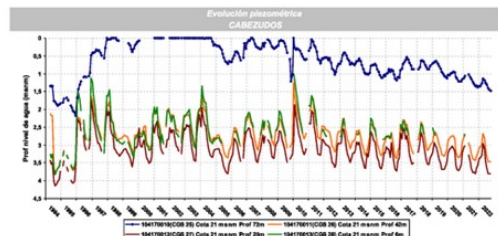


Arroyo de la Rocina cuando alcanza la localidad de El Rocío, con niveles altos resultado de las precipitaciones de primavera. © Rafael Seiz / WWF España

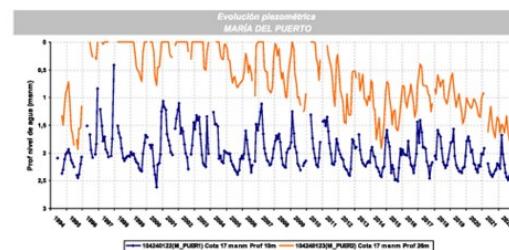
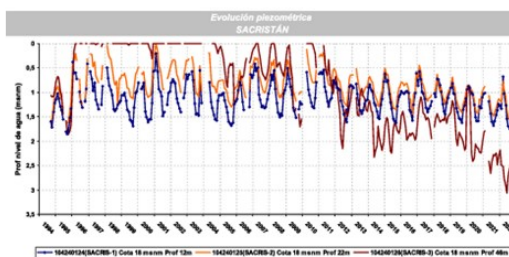
“Bodegones (104170014-15) se ubica en un ámbito relativamente alejado de las explotaciones agrícolas.... El hidrograma de la serie histórica está marcado por una oscilación intra-anual de 1 m asociada a la precipitación. La componente vertical de flujo es ascendente, desde los niveles profundos hacia los someros que alimentan el cauce. **La situación de artesianismo frecuente hasta el año 2010, con al menos 5 episodios de aguas surgentes, no se ha vuelto a producir durante la última década (2011-2022).**”



“El multi-piezómetro Los Cabezudos (104170010-11-12) funciona de forma similar, el nivel más profundo tendería a alimentar los más someros. El punto de control profundo (104170010) registraba surgencias durante buena parte de la serie hasta 2010. El descenso progresivo del nivel ha alcanzado, en el último periodo de aguas bajas, más de 1 m de profundidad. Los otros niveles captados reflejan una evolución similar con variación intra-anual media de 1 m. Destaca la inversión del potencial hidráulico entre los piezómetros 104170011 y 104170013.”



“Sacristán (104240124-125-126) y María del Puerto (104240122-123) ... Los niveles someros de ambos tienen un comportamiento muy similar, aunque Sacristán presenta una mayor tendencia al descenso que María del Puerto. ... en los niveles más profundos, entre 1995 y 2010 los niveles eran surgentes y presentaban un comportamiento similar, sin embargo, a partir de 2011 el profundo de Sacristán descende mucho más...el profundo de Sacristán ... **situándose en su mínimo histórico.**”



“La Canariega (114210141-142-143-144 es el más cercano a la desembocadura del arroyo de La Rocina en la marisma. ... (nivel superficial): evolución piezométrica muy regular durante toda la serie, se caracteriza por una oscilación intra-anual de 1,5 m, y rara vez el nivel se encuentra a profundidad inferior a 3,5 m. (nivel profundo): ... presentaba una situación de artesianismo frecuente hasta 2010. Posteriormente, se registra una profundización del nivel hasta 2015. Desde esta fecha (compra Finca los Mimbrales) el nivel presenta una tendencia ascendente hasta 2020, a partir de la cual presenta una ligera tendencia al descenso, sobre todo en el nivel más profundo. La variación intra-anual es mayor que la de los piezómetros del sector (unos 4 m.)”

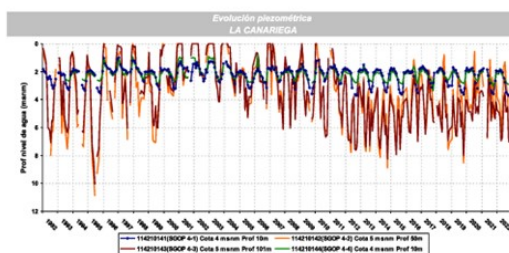
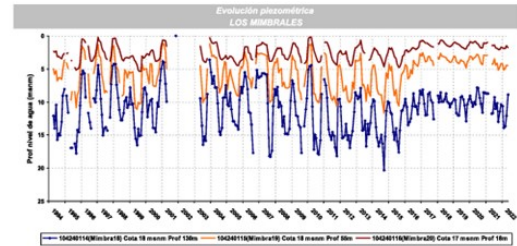


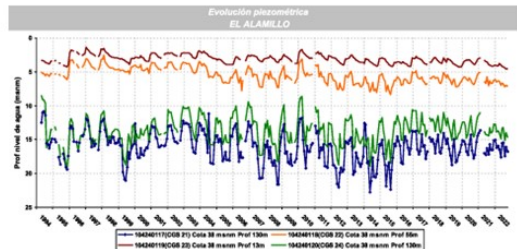
Figura 13. Evolución piezométrica en algunos sondeos cercanos al arroyo de La Rocina según los datos del informe del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG. Fuente: CHG 2023.

En zonas más alejadas del propio cauce del arroyo de La Rocina, tanto en su margen derecha (**Figura 14**) como izquierda (**Figura 15**), los piezómetros presentan evolución sostenida en el tiempo de descenso de varios de hasta 10 metros. Los cercanos a la finca de *Los Mimbrales* y otro cercano a *El Condado* parecen haberse estabilizado después de la compra de dicha finca. **En la margen izquierda se identifica un cono de depresión al menos desde el año 2000, que tiene su centro al norte de la localidad de El Rocío. Este cono alcanza el cono de bombeo del sur de Villamanrique de la Condesa.**

“La compra, por parte de la CHG, a finales de 2015 de la finca de Los Mimbrales... supuso una reducción del uso del agua... y un cambio significativo en la evolución piezométrica. ... Como puede observarse en el multi-piezómetro Los Mimbrales (104240114-115-116) ahora la variación intra-anual es inferior a la precedente... en 2014 el nivel estaba próximo al mínimo histórico (20 m)... y en 2018 ascendió hasta los 8 m ... Desde entonces la piezometría está estable sobre los 10 m de profundidad, si bien se observa una tendencia descendente desde el año 2020.”



“El Alamillo (104240117-118-119-120)... (nivel superficial): Mientras el punto 104240118 registra algo más de 1,5 m de descenso acumulado, el piezómetro 104240119 presenta un descenso acumulado inferior al 1 m (nivel profundo): Tendencia constante variando sobre los 15 m de profundidad, si bien en el periodo 2007-2015 registró oscilaciones intra-anales máximas (> 5 m) y se alcanzó la mayor profundidad de nivel (23 m).”



“El multi-piezómetro Pequeña Holanda (104280064-65-66)... la amplitud aumenta con la profundidad del tramo del acuífero controlado. Así en el someros de 1m, mientras que en el profundo es de > 5 m y ha llegado a ser > 10 m. Esta evolución sugiere la buena conexión hidráulica entre el acuífero profundo y los bombeos cercanos.”

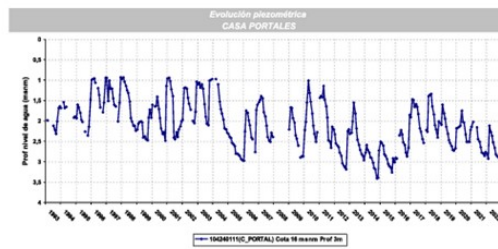
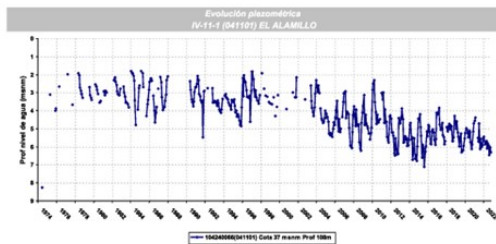
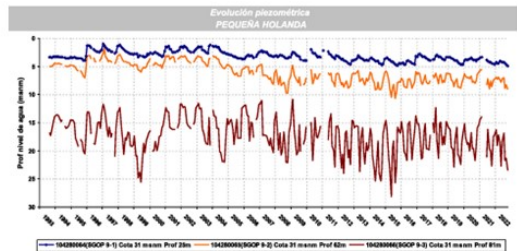


Figura 14. Evolución piezométrica en algunos sondeos de la margen derecha, lejos del propio cauce del arroyo de La Rocina, según los datos del informe del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG. Fuente: CHG 2023.

“El piezómetro Arroyo de la Cañada (104180031-32-33) ... **El nivel profundo presenta mayor potencial hidráulico aunque registra inversiones puntuales en épocas de riego.** En el periodo 2003-2014 los niveles siguieron una tendencia descendente acumulando 2,5 m, dato relevante para la zona de descarga. Pasaron a una cierta estabilización en 2018, pero en los últimos años registra de nuevo una tendencia descendente, llegando todos los niveles a registrar su **mínimo histórico (el piezómetro más somero se encuentra seco desde mayo de 2020) con un descenso acumulado de 3 m.**”

“104180021 Cañadas Reales ... con tramos filtrantes a distintas profundidades. Su larga serie refleja una **evolución sostenida de descenso desde 1978** hasta la actualidad (**10 m acumulados**), puntualmente alterada por los periodos húmedos de 1996 o 2010. **Actualmente presenta su mínimo histórico.**”

“104240082 Camino de Moguer... discernir cuatro fases: 1978-88: descenso de nivel, la profundidad pasa de 6 m a 16 m; 1988-2002: recuperación de la situación inicial, ascenso acumulado de 10m; **2002-2014: mayor descenso de nivel y llegada al mínimo histórico (18 m), 2014-Actualidad: estabilización, oscilación anual del nivel (10-16 m).**”

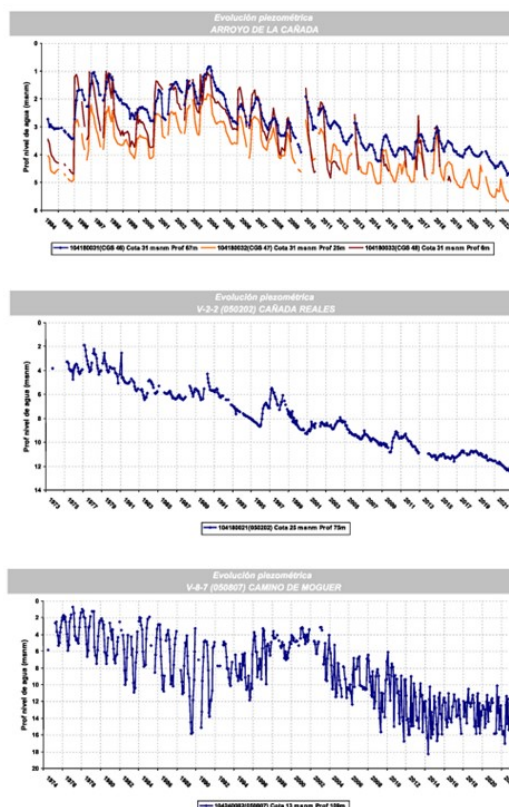


Figura 15. Evolución piezométrica en algunos sondeos de la margen izquierda, lejos del propio cauce del arroyo de La Rocina, según los datos del informe del estado de los acuíferos de Doñana 2021-2022 elaborado por la CHG.

Fuente: CHG 2023.

Por otro lado, los datos de la estación de aforos 5150 Arroyo de La Rocina (en la localidad de El Rocío), aunque fragmentados e incompletos, permiten hacer una primera aproximación a la evolución de los caudales circulantes por el arroyo de La Rocina⁹. Si se comparan los datos anteriores y posteriores al año 2004, el primer periodo de 93 meses y con una precipitación media anual 480 mm, y el segundo de 91 meses y con una precipitación media de 463 mm, **se observa una disminución de los caudales circulantes de más del 60%** (de 775 l/s a 292 l/s) (PHG, 2021-2027). Al ser dos periodos de precipitación media anual similar, el descenso piezométrico es el que explica este descenso del caudal circulante en superficie.

⁹ Más detalles en la [Ficha de Temas Importantes de Doñana. PHG 2021-2027](#)

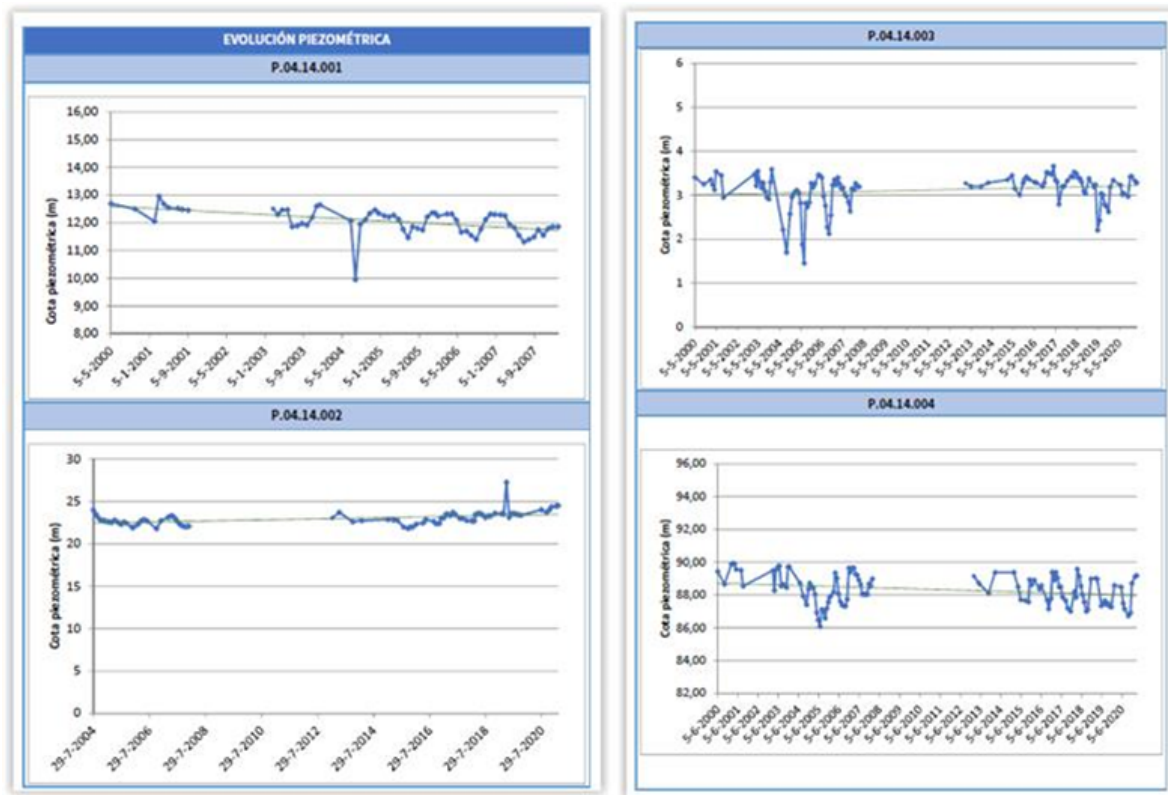
MASb (030.595) El Condado

Descripción de los límites

Esta es la única MASb que pertenece a la demarcación Tinto-Odiel-Piedras. Los principales niveles permeables vienen dados por los limos arenosos y arenas, por las arenas y gravas fluviales, y por las arenas eólicas. Estos materiales constituyen un acuífero libre cuya base impermeable son las margas azules propias de la zona. Debajo de las margas azules se encuentran las calcarenitas, conglomerados y arenas que forman un acuífero confinado en continuidad con los mismos materiales de la MASb de Niebla. La recarga del acuífero libre se produce fundamentalmente a partir de la infiltración de las precipitaciones. Sus límites son los siguientes:

- **Límite este:** la divisoria de aguas entre los ríos Tinto y La Rocina, con continuidad hidrogeológica con las MASb de Almonte, Manto Eólico Litoral de Doñana y La Rocina.
- **Límite norte:** los límites de las poblaciones de Lucena del Puerto, Bonares y Villalba del Alcor

Esta MASb tiene sólo 7 puntos de control piezométrico. 3 de ellos muestran una tendencia descendente de sus niveles, con descensos de unos 2 metros (PHTOP, 2022-2017, **Figura 16**). No se tiene información clara sobre la situación de las rejillas de los 7 piezómetros de control.



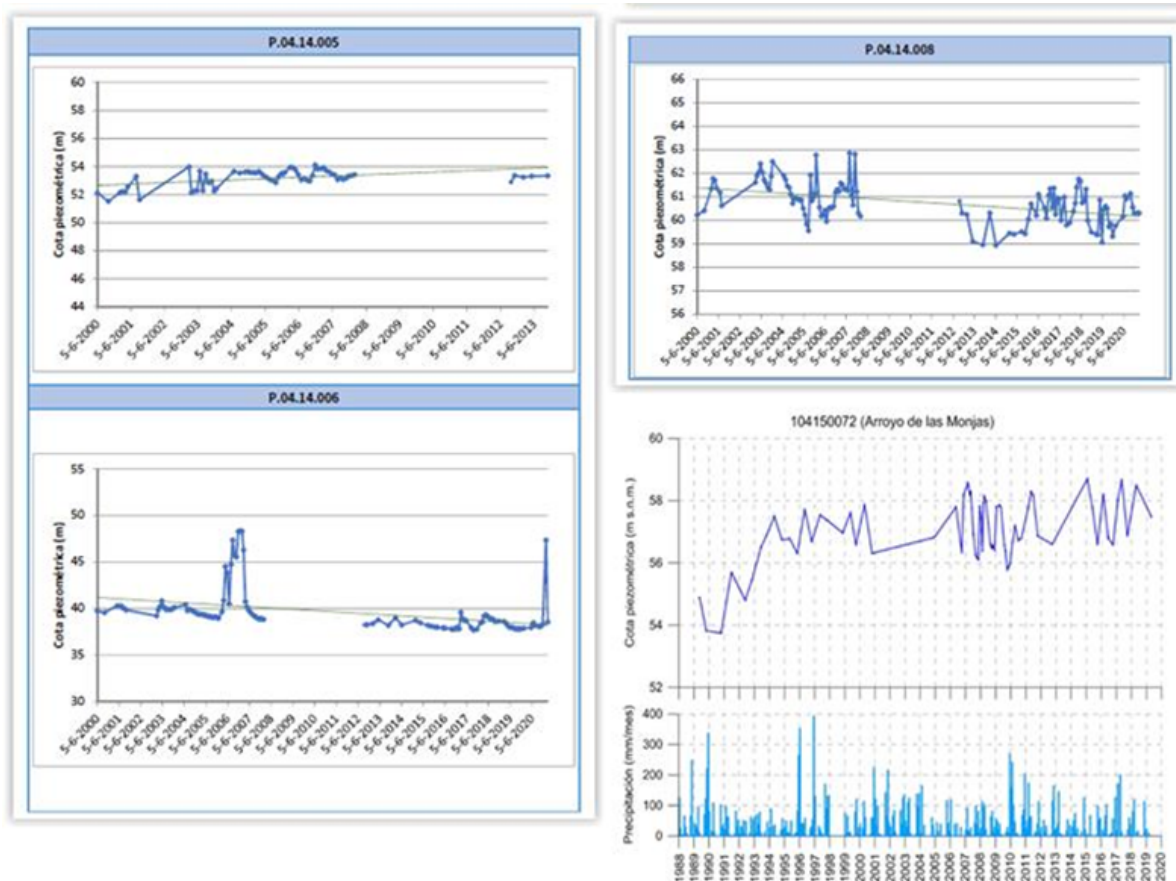


Figura 16. Gráficas que muestran la evolución de los niveles piezométricos de la MASb de El condado de acuerdo con los datos provenientes de los 7 sondeos de seguimiento con los que cuenta la Junta de Andalucía (autoridad del agua en esta demarcación). Fuente: Junta de Andalucía.

Transferencia de recursos hídricos entre las distintas masas de agua subterráneas

El volumen de transferencia entre las MASb no se conoce de forma precisa. Es más, resulta difícil de cuantificar ya que todas las MASb del sistema acuífero Almonte-Marismas tienen continuidad, bien en superficie o en profundidad. En realidad, **forman parte de un mismo sistema acuífero y no existen límites hidrogeológicos claros entre las mismas, por lo que tiene gran incertidumbre plantear el análisis de transferencias de recursos hídricos.**

En cualquier caso, y dada la división administrativa definida por las autoridades con competencias en gestión del agua, la solución que se ha aportado es la aplicación de un modelo hidrogeológico matemático de aguas subterráneas. En dicho modelo es posible definir los límites administrativos entre las MASb, como “*subzonas*” en las que poder extraer los balances de agua “*parciales*”, y calcular así las transferencias entre las distintas masas. Esto se realizó para la actualización del modelo matemático del sistema acuífero Almonte-Marismas, que el IGME hizo en 2014.

Un ejemplo de la obtención de estos flujos de agua entre MASb con esta metodología se expresa en la **Figura 17** (Guardiola-Albert *et al.*, 2016). Los valores que aparecen al lado de cada flecha y

el sentido de ésta indica sí se considera un valor de entrada o de salida de la MASb en particular. Cabe destacar los altos valores de los flujos, un hecho que apoya la continuidad hidrogeológica entre las MASb definidas administrativamente. Así, por ejemplo, para el año mostrado (2012), la cantidad de agua que entró desde la MASb Almonte a la MASb Marismas estimada por el modelo alcanzaba casi 20 hm³. Sin embargo, estos valores deben tomarse con precaución ya que **la calibración del modelo se hizo sin valores reales medidos de las extracciones**, y tuvieron que ser estimados de forma indirecta, con la incertidumbre que esto conlleva.

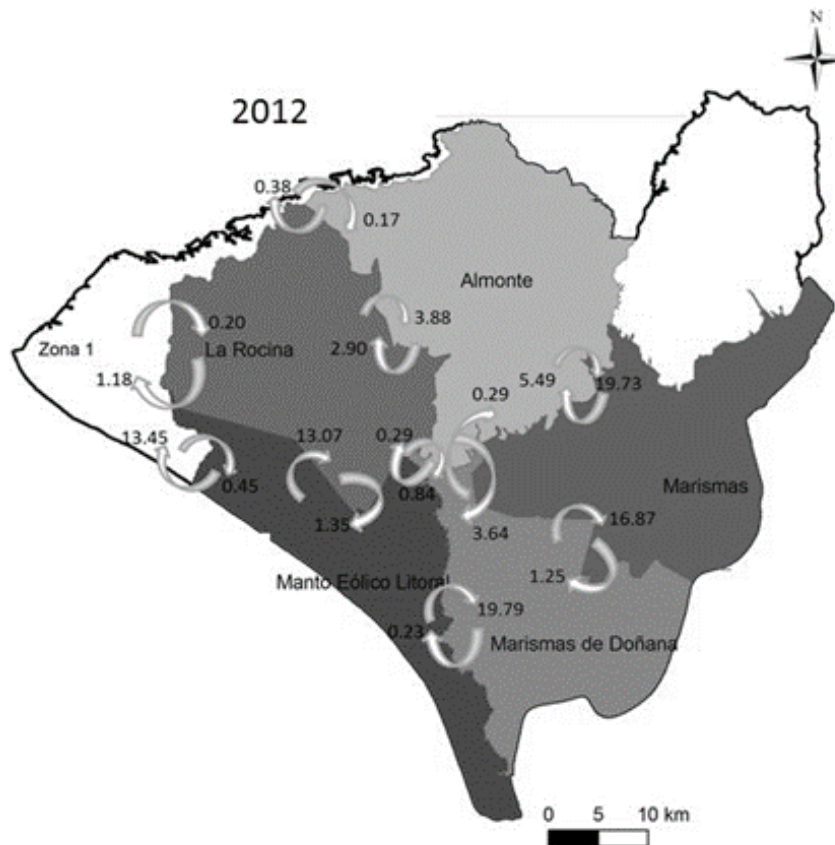


Figura 17. Ejemplo de resultados estimados con el modelo hidrogeológico desarrollado para calcular las transferencias laterales de agua en hm³ entre MASb en el ámbito de Doñana para el año 2012. Fuente: IGME.

CONCLUSIONES

De acuerdo con lo establecido por la Directiva Marco del Agua (DMA) el concepto de masa de agua subterránea (MASb) hace referencia a un volumen de agua subterránea claramente diferenciado. Por su parte parte, un sistema acuífero está compuesto por aquellas capas de suelo capaces de almacenar y movilizar recursos hídricos. La MASb puede comprender varios acuíferos, o bien, un sistema acuífero puede comprender más de una MASb de acuerdo con lo establecido por la DMA. Esta norma europea introdujo el concepto de MASb como unidad básica de gestión, poniendo el foco en el recurso hídrico, y no a la dimensión hidrogeológica del sistema acuífero (continente del agua) y su dinámica.

En el caso que ocupa el análisis del presente informe, la separación del sistema acuífero Almonte-Marismas en 6 MASb, no se ha realizado utilizando criterios hidrogeológicos, sino que se ha promovido con fines administrativos. **WWF España considera que obviar el funcionamiento del mismo como un único sistema acuífero complica en gran medida poder llegar a un cálculo de las dotaciones para cada pozo, y para cada MASb administrativa, con criterios técnicos y científicos.**

Así, la propuesta de gestión por sectores del plan hidrológico vigente (2021-2027) de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir contrasta con las propuestas del Dictamen de 1992 (CIED, 1992) y del informe de 2020 (UNESCO *et al.*, 2021), dónde se resalta la necesidad de considerar la totalidad el sistema hidrogeológico en su conjunto, teniendo en cuenta las dependencias de la dinámica de las aguas subterráneas por parte de los ecosistemas en la zona.

La recarga del acuífero Almonte-Marismas no es homogénea en todo el territorio que ocupa, y varía significativamente de unas zonas a otras. Esto dificulta aún más la estimación de los intercambios de flujo entre las divisiones administrativas de las masas de agua subterráneas propuestas, y complica el cálculo de las dotaciones realistas para cada pozo. Afortunadamente, no se trata de un acuífero especialmente complicado para modelizar y por ahora, los modelos hidrogeológicos que se han desarrollado son técnicamente viables y fiables a pesar de las incertidumbres.

Sin embargo, es esencial señalar que hay datos relacionados con el funcionamiento del acuífero Almonte-Marismas que por ahora no se han medido, no se han estudiado de forma completa, o bien, generan dudas importantes. Un claro ejemplo de esto es que **no se conoce el volumen total anual extraído por bombeo de forma exacta, y, además, existen numerosas captaciones ilegales no caracterizadas** o sólo estimadas con métodos indirectos mediante técnicas de teledetección e imágenes de satélite. Para reducir estas incertidumbres **WWF España considera imprescindible acometer estudios y análisis complementarios, así como poner en marcha mecanismos de control más eficaces del funcionamiento del acuífero.** Estos últimos sí son técnicamente posibles, aunque económicamente y socialmente, plantean un reto para las autoridades responsables.

En los balances hídricos "*parciales*" (los de cada MASb) que considera la planificación hidrológica vigente de la Demarcación del Guadalquivir, **el intercambio del flujo lateral que hay entre las diferentes masas de agua se considera erróneamente como "recarga subterránea", y se contabiliza en el cómputo de la "recarga anual media" de la totalidad del acuífero.** En términos hidrogeológicos, estas transferencias no son entradas externas al sistema. Esto es un error importante que ha llevado a la sobreestimación de las entradas a las MASb que conforman el conjunto sistema acuífero Almonte-Marismas. Sólo existen dos entradas externas subterráneas comprobadas a las MASb de Almonte y de Marismas; una desde la MASb de El Aljarafe, y otra desde la MASb el aluvial del Guadiamar.

El volumen de transferencia entre las MASb no se conoce de forma exacta. Es más, es algo difícil de cuantificar ya que todas las MASb del sistema acuífero Almonte-Marismas tienen entre ellas continuidad hidrogeológica, bien en superficie o en profundidad. En realidad, **todas pertenecen a un mismo sistema y no existe límite hidrogeológico claro entre las mismas.**

Es por ello que los valores de recargas y transferencias que establece el PHG para cada MASb deben tomarse con mucha precaución dadas las incertidumbres que existen, ya que la calibración del modelo de funcionamiento hidrogeológico se hizo sin valores reales medidos de las extracciones. Además, para cuantificar el uso del agua subterránea ligado a la superficie regada se emplean dotaciones (expresadas en m³/ha y tipo de cultivo), que pueden ser muy variables, y no reflejar bien la práctica de riego real (el consumo de agua).

Hacer un cómputo erróneo de la recarga anual media y de las extracciones reales de cada MASb da como resultado la subestimación del índice de explotación en el plan hidrológico de la demarcación del Guadalquivir vigente. Es más, en los balances de algunas de las MASb definidas se obtienen valores negativos de recurso disponible que no tienen sentido físico, ni funcional.

La división de carácter administrativo del acuífero de Almonte-Marismas en 6 MASb no es adecuada para caracterizar el funcionamiento del sistema en conjunto, el efecto sobre el sistema hídrico superficial que alimenta a la Marisma, ni tampoco para atender de forma adecuada las demandas y las necesidades de agua de los ecosistemas. Todo ello tiene graves consecuencias para los hábitats y la biodiversidad de Doñana.

Los resultados de este análisis muestran que no hay evidencias que indiquen que en las actuales MASb del entorno de Doñana exista una dinámica diferenciada entre ellas que permita gestionarlas de forma individual. En concreto:

- La MASb Almonte y la MASb Marismas no se pueden gestionar de forma independiente, ya que el cono de depresión piezométrica más importante del acuífero de Doñana está compartido entre las dos, al situarse su centro justo en su límite administrativo.
- Los límites definidos para las MASb Marismas y MASb Marismas de Doñana no responden a ningún límite físico o funcional. Ambas son el mismo acuífero y tan sólo se diferencian porque una pertenece al Parque Nacional de Doñana y la otra no.
- En el caso de las MASb La Rocina y la MASb de Manto Eólico Litoral, el límite sur divide lo que en realidad es un único sistema acuífero libre, que es el que está constituido por toda la extensión geológica de las arenas eólicas, que es una unidad litológica.

- El límite oeste de la MASb del Condado, ha sido establecido por la Administración en la divisoria de aguas entre la demarcación hidrográfica del Guadalquivir y la demarcación del Tinto-Odiel-Piedras, respondiendo con ello a criterios de escorrentía superficial. Sin embargo, bajo la superficie existe una conexión hidrogeológica manifiesta entre ellas, así como con el resto de las MASb en las que la CHG ha dividido el acuífero Almonte-Marismas.

A pesar de lo anterior, la propuesta de la CHG para utilizar la división en 6 MASb es la aplicación de un modelo matemático de aguas subterráneas en el que se introducen los límites entre las mismas como “subzonas”, se calculan los balances de agua “parciales”, y, por tanto, las “transferencias” entre estas subdivisiones. **Los altos valores de estas “transferencias” obtenidos por el modelo hidrogeológico evidencian que existe una alta conectividad entre las MASb definidas administrativamente.** Al mismo tiempo, estos valores deben tomarse con mucha precaución, como ya se ha manifestado en líneas anteriores.

Dados estos problemas, **WWF España considera que no es adecuado utilizar esta división administrativa para determinar los recursos subterráneos disponibles para cada MASb** que puedan ser distribuidos para atender a las diferentes demandas en base a las dotaciones en la zona (m³/ha y tipo de cultivos). Esta división “artificial” crea inseguridad jurídica entre los usuarios al no poder garantizar el cálculo adecuado de los balances hídricos entre las MASb, por estar basada en estimaciones a partir de modelos matemáticos con una importante incertidumbre. Tampoco garantiza los aportes hídricos superficiales que son necesarios para cubrir las necesidades hídricas de los hábitats y especies de Doñana.

Para ordenar correctamente las extracciones posibles y garantizar el agua que necesita Doñana es imprescindible contar con un modelo hidrogeológico global, que contemple entre sus objetivos la recuperación de los niveles piezométricos, así como un nivel adecuado de descarga a los ríos, arroyos, lagunas y a la Marisma en distintas zonas dentro de la extensión del sistema acuífero de Almonte-Marismas. Por tanto, los informes medioambientales e hidrogeológicos que se presenten en el Consejo de Participación del Parque Nacional de Doñana tienen que basarse en el funcionamiento integrado de todo el sistema acuífero de Almonte – Marismas, y no contar sólo con datos parciales y medios de sectores o de las MASb definidas, para tomar decisiones de gestión del espacio bien informadas.

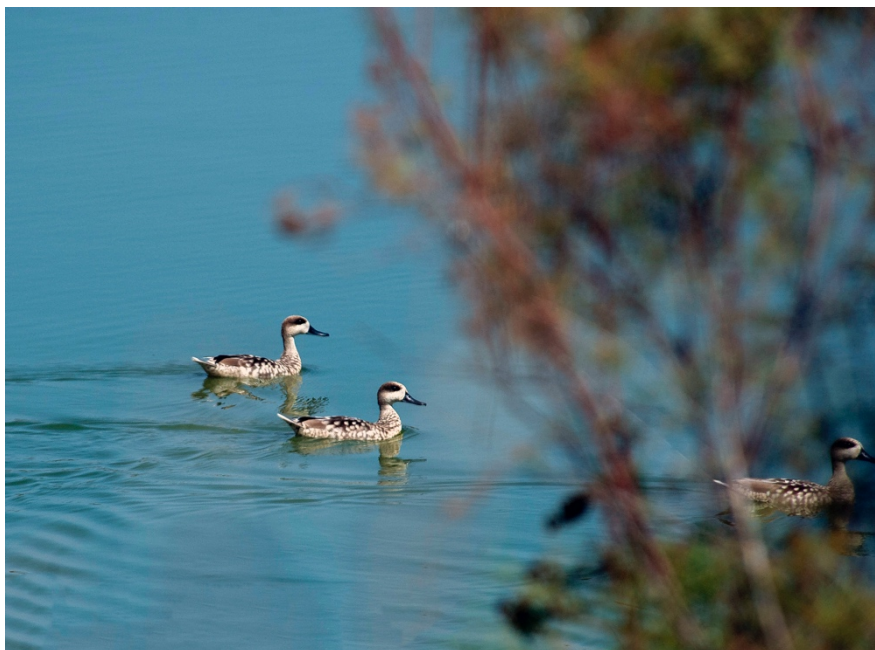
La prioridad en la disminución de las dotaciones para regadío de cualquier lugar del acuífero Almonte-Marismas debería estar al servicio de la eficacia en la corrección de los conos de hundimiento de los niveles freáticos y la restitución de las descargas de agua a los ecosistemas acuáticos naturales. Para ello es muy importante actualizar el modelo hidrogeológico con datos reales de extracciones, que ayude a tomar decisiones bien informadas. También es esencial mantener actualizados los datos sobre el acuífero Almonte-Marismas y el modelo hidrogeológico de todo el sistema. Esta actualización debe ser transparente, pública y contrastada.

En este sentido, WWF España quiere recalcar que las influencias negativas de las extracciones para riego se encuentran alejadas de la Marisma, aunque existe una amplia circulación regional del agua subterránea, y por tanto ésta se ve afectada. **Las extracciones autorizadas y coordinadas por los Programas de Actuación de las masas de agua declaradas en riesgo de**

no alcanzar el buen estado deberían ser tales que permitan mantener la presión hidrostática ascendente natural de los niveles inferiores del sistema acuífero que alimenta a los niveles superiores, impidiendo con ello el descenso del nivel de base de los arroyos y la pérdida de alimentación al afloramiento de agua en los ecotonos. A día de hoy, no se han aprobado aún ninguno de dichos Programas de actuación a pesar de las obligaciones de plazo marcadas por la legislación vigente.

La disminución tan significativa de la descarga de agua subterránea hacia los diferentes arroyos y caños que alimentan la Marisma se produce por la sobreexplotación de los acuíferos, que provoca una bajada de niveles freáticos y de base de los arroyos. En cuanto a las precipitaciones, con sus periodos secos y húmedos, las evidencias apuntan a que aportan un volumen promedio similar al sistema del acuífero Almonte-Marismas observado a largo plazo. Si bien se debe resaltar que la última década (2010-2020) ha sido especialmente escasa en cuanto a precipitaciones en Doñana, el hecho de que se hayan extendido las extracciones legales e ilegales de forma continua es lo que están provocando en mayor medida la falta de aportes de agua dulce al humedal.

Para WWF España, en base al conocimiento científico, resulta evidente que existe una relación directa entre el periodo de tiempo en el que se produce un mayor bombeo y el periodo en que se produce una menor descarga de agua subterránea a ríos y humedales.



El mantenimiento de las entradas e intercambios de aguas superficiales y subterráneas en las diferentes zonas de Doñana, es la que convierten a este humedal en un lugar único en el mundo. La supervivencia de los hábitats y especies de este enclave depende directamente de que estos aportes de agua, en cantidad y calidad suficiente, estén garantizados.
© Beltrán de Ceballos

PETICIONES DE WWF

El acuífero de Almonte-Marismas es uno de los sistemas más estudiados y con series de datos que se remontan a más de cuatro décadas. Esto permite inferir conclusiones claras sobre su funcionamiento, tanto natural, como en condiciones alteradas por las presiones antrópicas, tal y como se ha mostrado este informe.

Sin embargo, la gestión de los recursos hídricos en el entorno de Doñana exige un compromiso por parte de las autoridades responsables para aplicar y alimentar este conocimiento científico, con el que tomar decisiones mejor informadas sobre cómo distribuir los recursos para atender las demandas, sin poner en riesgo los valores naturales sobresalientes de Doñana.

A LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR

WWF España solicita a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, siendo la responsable directa de la gestión de las aguas subterráneas:

- **Asegurar el control y el seguimiento de todas las extracciones de agua del sistema acuífero de Almonte-Marismas.** Esto es esencial para poder establecer los límites a las extracciones legales, para proceder al cese inmediato de todas aquellas que son ilegales, y para garantizar una explotación racional compatible con la conservación de Doñana.
- **Proceder al cierre cautelar de todas las extracciones de agua con indicios de ilegalidad del sistema acuífero de Almonte - Marismas, para ayudar a frenar el deterioro del mismo.** Asimismo, no debe permitirse ningún incremento en la superficie de regadío en el entorno de Doñana, dado el mal estado, en términos de calidad y de cantidad de agua, en el que se encuentra el acuífero de Almonte-Marismas.
- **Poner en marcha todas las acciones contempladas por el vigente Plan Hidrológico del Guadalquivir (2021-2027) para mejorar la red de seguimiento piezométrico e hidrológico,** en tiempo real, del sistema Almonte-Marismas y de los cauces que alimentan Doñana. Esta red de seguimiento debe servir para la correcta aplicación de la modelización hidrogeológica a la gestión del acuífero de Doñana.
- **Desarrollar un modelo hidrogeológico global para el acuífero Almonte-Marismas,** en coordinación con el Instituto Geológico Minero de España, y con la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía por sus competencias en la demarcación hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras. Este modelo debe servir como apoyo para el desarrollo y ejecución del Plan Especial de ordenación de las zonas de regadío ubicadas al norte de la corona forestal de Doñana y de los futuros Programas de Actuación para las masas de agua subterráneas en riesgo de no alcanzar el buen estado.

- **Poner en marcha urgentemente los Programas de Actuación para las masas de agua subterráneas declaradas en riesgo de no alcanzar el buen estado** de acuerdo con las exigencias de la Directiva Marco del Agua. Éstos deben desarrollarse considerando el sistema acuífero de Almonte-Marismas como una unidad hidrogeológica, para garantizar los niveles piezométricos adecuados en todo el sistema, las aportaciones a los cauces superficiales que nutren a la Marisma de agua dulce y las surgencias en los distintos ecotonos de Doñana. Hay que desbancar la idea de que los pozos más alejados de la Marisma y el límite del Parque Nacional no tienen impacto sobre el conjunto del acuífero Almonte-Marismas. De acuerdo a los datos científicos disponibles existe una amplia circulación regional del agua subterránea, y debe mantenerse la presión hidrostática ascendente natural que alimenta a los niveles superiores, a los cauces y los afloramientos en la Marisma, y a los diferentes ecotonos de Doñana.

A LA CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA, AGUA Y DESARROLLO RURAL

De forma complementaria a estas acciones imprescindibles del Organismo de cuenca, WWF España solicita a la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía:

- **Reducir y ordenar las superficies agrícolas regables del entorno de Doñana**, aplicando el Plan Especial de ordenación de las zonas de regadío ubicadas al norte de la corona forestal de Doñana en coordinación con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ambas administraciones deben promover el uso combinado y racional de fuentes de recursos superficiales y subterráneos en diferentes zonas, para reducir la presión por extracción, y contribuir a la recuperación del sistema acuífero de Almonte-Marismas, y de los cauces que aportan agua a Doñana.
- **Garantizar la correcta aplicación de los programas de actuación (códigos de buenas prácticas) para las Zonas Vulnerables a la contaminación por nitratos**, en coordinación con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, y declaradas a raíz de la Decreto 36/2008 y su modificación mediante la Orden de 23 de noviembre de 2020¹⁰, con el fin de reducir las presiones de fuentes de contaminación difusa sobre el sistema acuífero de Almonte – Marismas y los cauces superficiales de Doñana.

AL MINISTERIO DE TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y RETO DEMOGRÁFICO

- **El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico**, quién debe promover y coordinar un estudio sobre el impacto del cambio climático en la dinámica

¹⁰ Más información en [Orden de 23 de noviembre de 2020, por la que se aprueba la modificación de las zonas vulnerables definidas en el Decreto 36/2008, de 5 de febrero, por el que se designan las zonas vulnerables y se establecen medidas contra la contaminación por nitratos de origen agrario, al amparo de su disposición adicional primera](#)

natural de los hábitat y especies protegidos, en el que se establezcan sus necesidades hídricas, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, y en colaboración con la Dirección General del Agua, la Dirección General de la Costa y el Mar, la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación. Doñana debe ser un caso de análisis en el citado estudio.

Asimismo, la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, debe apoyar el control y el seguimiento exhaustivo de las extracciones, incrementando los equipos de Guardería Fluvial y de Comisaria de Aguas, con medios humanos y materiales adecuados, para hacer frente a la gestión de la complejidad del sistema acuífero de Almonte-Marismas.

A LOS ORGANISMOS INTERNACIONALES

- **Los organismos internacionales implicados en la conservación y la gestión del sitio Patrimonio de la Humanidad Parque Nacional de Doñana**, deben exigir a las autoridades españolas los informes hidrológicos e hidrogeológicos oficiales que estén basados en el funcionamiento del acuífero Almonte-Marismas como una unidad hidrogeológica. Es fundamental que todos los organismos que colaboran en la gestión y conocimiento del agua en Doñana unifiquen criterios y coordinen las acciones para mejorar la gestión de las aguas subterráneas.
- **Los organismos internacionales** deben asegurar el cumplimiento de las recomendaciones tales como la aplicación de un Plan de Extracciones, el cierre definitivo de los pozos de Matalascañas o la aplicación del Plan de la Fresa, tal y como fue redactado cuando se aprobó.

REFERENCIAS

1. Ayora, C., Bernet, O., Bolzicco, J., Carrera, J., Domènech, C., Cerón, J. C., Fernández, I., Gómez, P., Jaén, M., Mantecón, R., Manzano, M., Martín Machuca, M., Mediavilla, C., Moreno, L., Navarrete, P. & Salvany, J. M. (2001). Hidrogeología del Valle del Guadiamar y zonas colindantes. Funcionamiento del sistema acuifero. Boletín Geológico y Minero. Vol. Especial, 69-92.
2. Bustamante, J., Aragonés, D. & Afán, I. (2016). Effect of Protection Level in the Hydroperiod of Water Bodies on Doñana's Aeolian Sands. *Remote Sensing*, 8(10), 867. <https://doi.org/10.3390/rs8100867>
3. CHG (2015) Caracterización adicional de las Masas de Agua Subterránea.
4. CHG (2020a). Propuesta para la declaración de la masa de agua subterránea ES050MSBT000055101 Almonte en riesgo de no alcanzar un buen estado cuantitativo I) Documento técnico. Recuperado a partir de: <https://www.chguadalquivir.es/documents/10182/41541/almonte.pdf/b71bd651-5544-74a4-6799-119343e1f6f5>
5. CGH (2020b). Propuesta para la declaración de la masa de agua subterránea ES050MSBT000055105 La Rocina en riesgo de no alcanzar un buen estado cuantitativo y químico. Recuperado a partir de: https://www.chguadalquivir.es/documents/10182/41541/la_rocina.pdf/79a36acc-2581-c18f-ffb4-d94c2bf6cefb.
6. CHG (2022). Informe sobre los acuíferos de Doñana 2020-2021. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. 23 pp. + Anexos.
7. CHG (2023). Informe sobre los acuíferos de Doñana 2021-2022. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. 233 pp.
8. Custodio, E., Manzano, M. & Montes, C. (2009). Las aguas subterráneas en Doñana: Aspectos ecológicos y sociales. Junta de Andalucía.
9. Díaz-Paniagua, C., & Alba, M. A. (2015). El Sistema de Lagunas Temporales de Doñana, una red de hábitats acuáticos singulares. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
10. De Felipe, M., Aragonés, D. & Díaz-Paniagua, C. (2023) Thirty-four years of Landsat monitoring reveal long-term effects of groundwater abstractions on a World Heritage Site wetland, *Science of The Total Environment*, 163329, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163329>.
11. Fernández-Ayuso, A., Rodríguez-Rodríguez, M., & Benavente, J. (2018). Assessment of the hydrological status of Doñana dune ponds: a natural World Heritage Site under threat. *Hydrological Sciences Journal*, 63(15-16), 2048-2059. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1560449>
12. Fernández-Ayuso, A. (2020). Surface Water-Groundwater interactions in sand dune ponds located in Doñana National Park. Tesis doctoral, Universidad Pablo de Olavide.
13. Green, A. J., Guardiola-Albert, C., Bravo-Utrera, M. Á., Bustamante, J., Camacho, A., Camacho, C., ... & Díaz-Delgado, R. (2023). Groundwater abstraction has caused extensive ecological damage to the Doñana World Heritage Site, Spain. Preprint recuperado a partir de: <http://hdl.handle.net/10261/310794>.
14. C. Guardiola-Albert, C. Mediavilla-Laso, H. Aguilera, N. Fernández Naranjo, F. Ruíz Bermudo, N. García-Bravo (2016) Recurso natural o recarga en la gestión del sistema acuifero Almonte-Marismas (Doñana) según la revisión del Plan Hidrológico (2016-2021) de la Demarcación del Guadalquivir. Las aguas subterráneas y la planificación hidrológica. Congreso hispano-luso. AIH-GE ISBN: 978-84-938046-5-7, 193-199.
15. Lozano, E. (2004). Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su relación con las lagunas. Tesis doctoral, ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña.
16. Manzano, M., Borja, F., & Montes, C. (2002). Metodología de tipificación hidrológica de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional ya su gestión. Aplicación a los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 113(3), 313-330.
17. Manzano, M., & Custodio E. (2005). El acuífero de Doñana y su relación con el medio natural. En *Doñana: agua y biosfera*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
18. Mediavilla Laso, C., Guardiola-Albert, C., Ruíz Bermudo, F., García, N. & Naranjo Fernández, N. (2016). La planificación hidrológica en el ámbito del sistema acuifero Almonte-Marismas: el caso Doñana. *Hidrogeología emergente FCIHS 2016*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27205.45281>.
19. Naranjo-Fernández, N., Guardiola-Albert, C., Montero-González, E. Applying 3D Geostatistical Simulation to Improve the Groundwater Management Modelling of Sedimentary Aquifers: The Case of Doñana (Southwest Spain). *Water* 2019, 11, 39. <https://doi.org/10.3390/w11010039>.
20. Paredes, I. (2020) Presiones antrópicas y eutrofización en la marisma de Doñana y sus cuencas vertientes. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla.
21. Rodríguez-Rodríguez, M., Aguilera, H., Guardiola-Albert, C., & Fernández-Ayuso, A. (2021). Climate influence vs. local drivers in surface water-groundwater interactions in eight ponds of Doñana National Park (southern Spain). *Wetlands*, 41(2), 25
22. Sacks, L. A., Herman, J. S., Konikow, L. F., & Vela, A. L. (1992). Seasonal dynamics of groundwater-lake interactions at Doñana National Park, Spain. *Journal of Hydrology*, 136(1-4), 123-154.
23. Salvany, J. M., & Custodio, E. (1995). Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8(1-2), 21-31.
24. Salvany, J. M., Mediavilla, C. & Rebollo, A. (2010). Las Formaciones Plio-Cuaternarias de El Abalarío, en el litoral de la provincia de Huelva (España). *Estudios Geológicos*, 66(2) <https://doi.org/10.3989/egool.39953.072>
25. Trick, T. M. (1998). Impactos de las extracciones de agua subterránea en doñana aplicación de un modelo numerico con consideracion de la variabilidad de la recarga. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
26. UNESCO, IUCN & Ramsar. (2021), Joint Reactive Monitoring Mission to Doñana National Park (Spain). Recuperado a partir de: https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RAM/RAM_095_ES_en.pdf



Trabajamos para conservar
la naturaleza para las
personas y la vida silvestre.

juntos es posible. wwf.es

© 2024

© 1986 Logotipo del Panda de WWF-World Wide Fund for Nature (Inicialmente World Wildlife Fund). © "WWF" es Marca Registrada de WWF.

WWF España, Gran Vía de San Francisco 8-D, 28005 Madrid. Tel.: 91 354 0578.
Email: info@wwf.es

Para más información visite wwf.es