



HAL
open science

Balances de agua y calor en la marisma de Doñana

A. Ramos-Fuertes, J. Prats, J. Dolz

► **To cite this version:**

A. Ramos-Fuertes, J. Prats, J. Dolz. Balances de agua y calor en la marisma de Doñana. Ingeniería del Agua, 2016, 20 (4), pp.169-179. 10.4995/ia.2016.4720 . hal-01439415

HAL Id: hal-01439415

<https://hal.science/hal-01439415>

Submitted on 6 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Balances de agua y calor en la marisma de Doñana

Water and heat balances in Doñana wetlands

Ramos-Fuertes, A.^{a1}, Prats, J.^b y Dolz, J.^{a2}

^aInstituto Flumen, ETS d'Enginyers de Camins, Campus Nord UPC, C. Jordi Girona 1-3, D1, 08034 Barcelona, España.
E-mail: ^{a1}anais.ramos@upc.edu, ^{a2}j.dolz@upc.edu

^bIrstea, UR RECOVER, Pôle Irstea-Onema "Plans d'eau", 3275 Route de Cézanne, 13182, Aix-en-Provence, Francia.
E-mail: jordi.prats@irstea.fr

Recibido: 23/02/2016

Aceptado: 11/10/2016

Publicado: 31/10/2016

RESUMEN

Este trabajo expone los principales resultados del estudio de los balances hídrico y térmico de la marisma de Doñana. El estudio se ha basado en una amplia base de datos hidrometeorológicos tomados a intervalos de 10 minutos entre los años 2006 y 2011 por una red de seis estaciones de medida localizadas en áreas no vegetadas de la marisma. Esta información ha permitido caracterizar, a diferente escala temporal, el comportamiento térmico de la marisma mediante la modelización y análisis de los flujos de calor entre el agua y el suelo inundado, así como los procesos de transferencia de calor entre la superficie libre del agua y la atmósfera. Se ha puesto especial atención en la cuantificación de la evaporación, de la que depende en gran medida el proceso de vaciado de la marisma.

Palabras clave | Doñana; balance térmico; balance hídrico; evaporación.

ABSTRACT

This paper presents the main results of the study of water balance and surface heat balance in the Doñana marshlands. The study was based on a broad base of hydrometeorological data taken at 10 minute intervals from 2006 to 2011 by a network of six measuring stations located in areas of vegetation-free marsh. This information is used to characterize, at different time scales, the thermal behavior of the marsh by analyzing its hydrometeorology centering on the surface heat fluxes. Thus, we have modeled and analyzed the heat flux between the water and flooded soil and the processes of heat transfer between the water surface and the atmosphere. Special attention has been paid to evaporation, on which the marsh draining process depends.

Key words | Doñana; heat balance; water balance; evaporation.

INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos, incluyendo las aguas superficiales y subterráneas, son un factor clave en el entorno de Doñana, ya que constituyen la base estratégica del mantenimiento de los ecosistemas en general, y en particular de los ambientes marismesños, los sistemas lagunares y los arroyos fluviales. El agua es un elemento esencial en la configuración de este territorio, tanto desde el punto de vista ecológico como económico y territorial (CICCP, 1977; Junta de Andalucía, 2010). Sin embargo, las marismas del Guadalquivir han sufrido en el último siglo una serie de afecciones que han reducido considerablemente su extensión y han afectado a su funcionamiento natural y calidad hídrica. Tras el accidente minero de Aznalcóllar en 1998, se intensificó la recuperación de la cantidad y calidad de las aportaciones hídricas a la marisma, así como de su funcionalidad hidrológica natural. El instituto de investigación Flumen UPC-CIMNE ha participado en esta labor mediante la implementación del modelo numérico bidimensional Iber, que permite conocer los campos de velocidades y profundidades de agua en la marisma ante diferentes escenarios de simulación (Dolz *et al.*, 2006; Bladé *et al.*, 2014; Ramos-Fuertes *et al.*, 2014). También ha participado en el seguimiento de masas de agua y comunidades vegetales mediante teledetección (Martí-Cardona *et al.*, 2010; Martí-Cardona, 2014) y en el estudio hidrometeorológico y de flujos de agua y calor en superficie y fondo (Prats *et al.*, 2011, 2012; Ramos Fuertes, 2012).

La limnología tiene un importante y creciente papel en la toma de decisiones en relación a la gestión del agua embalsada (Prats *et al.*, 2014). Dada la necesidad de profundizar en el conocimiento limnológico de la marisma, estudiar el balance térmico de la misma y comprender los procesos de intercambio de calor que ocurren en ella resulta de interés por diversas razones. En primer lugar, la temperatura es una de las variables físicas más importantes en los medios acuáticos, que afecta a un gran número de parámetros de calidad y a las reacciones químicas y biológicas que tienen lugar en ellos. En consecuencia, la evolución, distribución y ecología de los organismos acuáticos se encuentra profundamente afectada por la temperatura. Íntimamente relacionada con ella se encuentra el régimen de radiación solar en superficie y en el interior de la columna de agua, principal condicionante de la estructura térmica de la masa de agua y determinante del desarrollo de los organismos acuáticos fotosintéticos. Por último, un componente del balance térmico de gran importancia específicamente en el ámbito de Doñana es la evapotranspiración, flujo común a los balances de agua y calor que, como principal responsable del vaciado de la marisma, afecta a la disponibilidad de agua y al hidroperiodo o duración de la inundación. El trabajo aquí presentado tiene como objetivo la caracterización del balance térmico de la marisma de Doñana a escala horaria y estacional, haciendo especial énfasis en la evaporación y en el estudio del proceso de vaciado de la misma. Ello pretende contribuir al conocimiento de los procesos físicos que determinan la disponibilidad de agua en la marisma y a la toma de decisiones en el manejo hídrico de la misma.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

La marisma de Doñana es un humedal de reconocida importancia ecológica, principalmente como lugar de paso, cría e invernada de aves europeas y africanas. Situada en las provincias de Huelva y Sevilla, la actual marisma natural se extiende sobre aproximadamente 300 km² en la margen derecha de la desembocadura del río Guadalquivir. Su conformación es el resultado de la colmatación del antiguo estuario del río y carece prácticamente de relieve, si bien las pequeñas variaciones de nivel del terreno, visibles en la Figura 1, definen elementos microtopográficos como caños (cursos internos de agua) y lucios (depresiones) que determinan la circulación y almacenamiento del agua en la marisma. Los procesos anuales de inundación y secado se prolongan típicamente de mediados de otoño a mediados de verano (Aragonés *et al.*, 2005), con calados máximos del orden de 1 m. Tras diversas modificaciones de la red hídrica natural, la marisma recibe en la actualidad como aportes principales la precipitación directa (en torno a 160 hm³ anuales teniendo en cuenta el promedio histórico de precipitación) y la escorrentía superficial de arroyos tributarios por su límite noroeste (Dolz y Velasco, 1990). Los arroyos de mayor importancia son La Rocina (416 km² de cuenca) y El Partido (291 km² de cuenca), para los cuales no se dispone de datos de aforo. De manera orientativa, se asigna a las aguas dulces del arroyo de la Rocina y colindantes, con una cierta estabilidad en sus caudales a lo largo del año por la contribución de aguas subterráneas, una aportación media anual entre 1-1.5 hm³/año en ciclos de sequía y un máximo de 73 hm³/año (MMA, 2001). La cubeta de la

marisma es impermeable y la principal aportación freática se produce a través del caudal base de los arroyos tributarios. Entradas menores de agua procedente del acuífero se producen en las zonas de contacto con sustratos arenosos en los límites norte y oeste de la marisma, y en los denominados “ojos de la marisma”, pequeñas surgencias que atraviesan el sustrato arcilloso impermeable cuyo caudal es despreciable. La aportación freática actual se encuentra considerablemente mermada por la sobreexplotación del acuífero, y la descarga directa neta en los límites de la marisma se estima del orden de 15 hm³ anuales (Custodio, 2006). La comunicación de la marisma con el estuario se encuentra impedida por la presencia de la denominada Montaña del Río, dique o levé natural que ha sido artificialmente recrecido. Cuenta con una serie de compuertas que carecen igualmente de medidas de aforo.

En el marco del presente estudio, la comunicación de la marisma con el estuario y el acuífero subyacente se considera nula a efectos de balances de agua y calor. Los detalles de las hipótesis adoptadas sobre el comportamiento hídrico de la marisma se describen en la sección "Balance hídrico y curvas de agotamiento".

Instrumentación de medida

El estudio del balance térmico se ha basado en una amplia base de datos hidrometeorológicos tomados a intervalos de 10 minutos por una red de estaciones de medida localizadas en áreas no vegetadas de la marisma y que ha estado operativa entre los años 2006 y 2011 (Figura 1). La red de estaciones cuenta con un total de seis puntos de medida de cota de agua (D01 a D06 en la Figura 1), cinco de temperatura del agua a diferente profundidad (D01 a D05), tres de temperatura del suelo a diferente profundidad (D03, D04, D05) y dos estaciones meteorológicas completas (D04, D05). La información presentada en este trabajo consta de medidas de nivel de agua en todas las estaciones y de medidas térmicas y meteorológicas de la estación D04. La Tabla 1 lista el equipamiento completo de las estaciones de medida, cuyo detalle se puede consultar en Ramos Fuertes (2012).

Período de estudio

Dado el marcado carácter pluvial de la marisma y la alta variabilidad propia del clima mediterráneo, los aportes de agua superficial varían considerablemente de un año a otro, así como el régimen de inundación. Ello se puede comprobar en la figura 6 izquierda, que muestra medidas de profundidad de agua en diferentes puntos de la marisma y años hidrológicos. De los cinco años monitorizados, el año hidrológico 2006/2007 fue el más parecido al patrón medio histórico de inundación, según describen Aragonés *et al.* (2005) en base a imágenes satelitales del periodo 1975-2004. Los cinco años de medida del presente estudio no se consideran suficientes para establecer estadísticas climatológicas, por lo cual se ha seleccionado el más representativo de ellos para análisis (2006/2007).

El balance térmico presentado corresponde por tanto al periodo de inundación 2006/2007 (Figura 2). Este periodo se puede dividir en tres fases: llenado de la marisma (octubre-noviembre de 2006), mantenimiento de niveles de agua (diciembre de 2006-febrero de 2007) y vaciado (marzo-julio de 2007). El estudio del descenso del nivel de agua en la fase de secado (curvas de agotamiento) contempla todas las medidas de nivel disponibles a partir del mes de marzo de los años hidrológicos comprendidos entre 2006/2007 y 2010/2011.

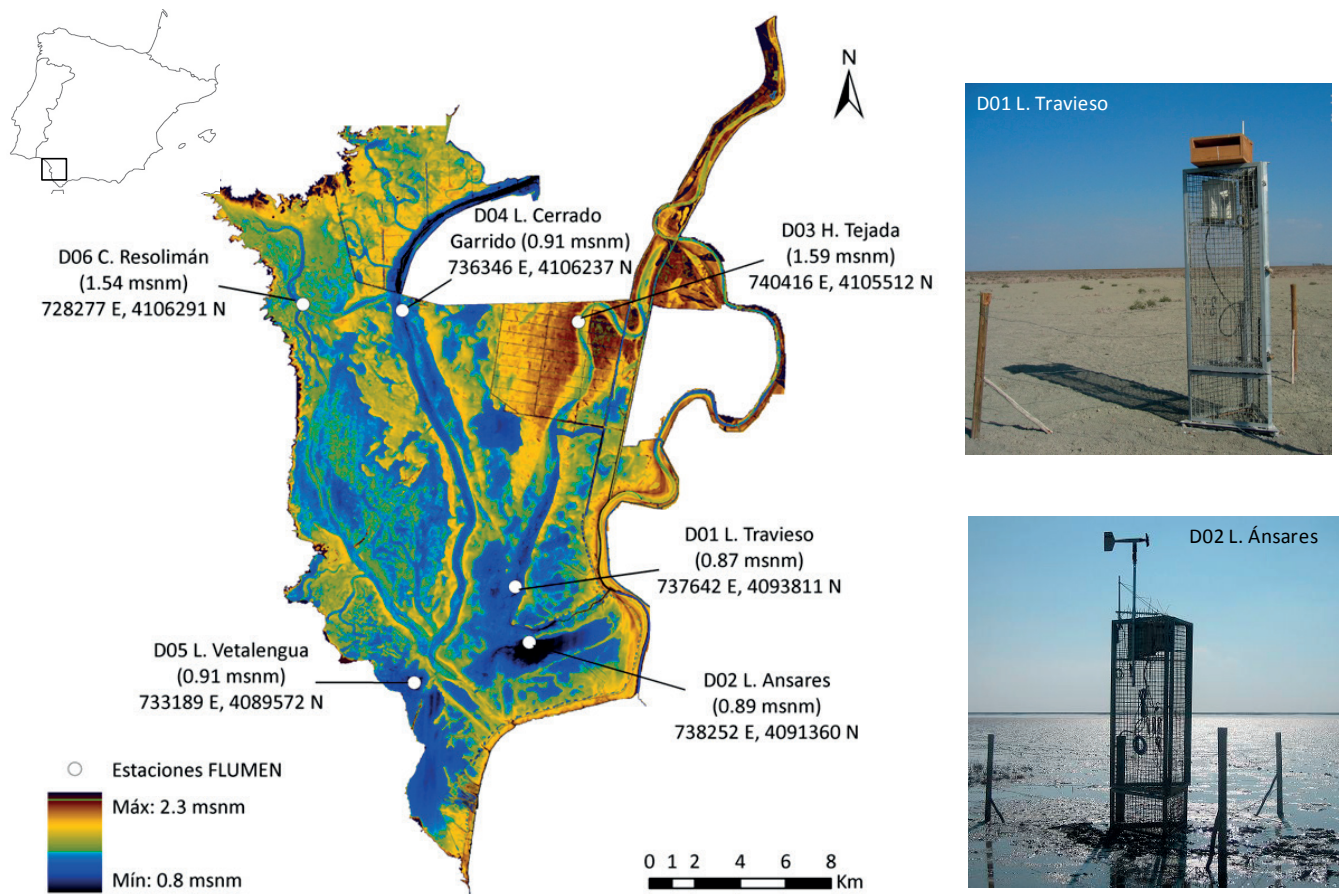


Figura 1 | Izquierda: localización de las estaciones de medida sobre el modelo digital del terreno de la marisma de Doñana, en metros sobre el nivel del mar (msnm). Derecha: fotografías de dos estaciones de la red.

Tabla 1 | Variables medidas por las estaciones hidrometeorológicas instaladas. Las casillas sombreadas corresponden a las variables utilizadas en este trabajo.

Estación de medida		D01	D02	D03	D04	D05	D06
Nivel del agua		x	x	x	x	x	x
Temperatura del agua	Temperatura a intervalos de profundidad de 20 o 30 cm, según estación	x	x	x	x	x	
Temperatura del suelo	Temperatura a intervalos de profundidad de 25 cm			x	x	x	
Meteorología	Temperatura del aire				x	x	
	Humedad relativa del aire				x	x	
	Velocidad y dirección del viento				x	x	
	Precipitación				x	x	
	Radiación solar incidente y reflejada				x	x	
	Radiación global neta				x	x	
	Radiación PAR reflejada sobre el agua*				x		
	Radiación PAR incidente y reflejada bajo el agua*				x		

* Radiación fotosintéticamente activa (longitud de onda 400-700 nm)

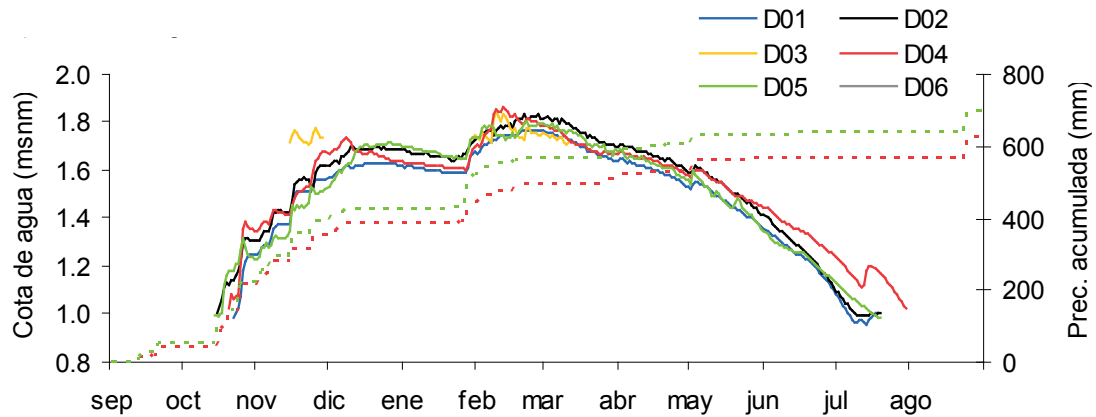


Figura 2 | Cotas de agua (líneas continuas) y precipitación acumulada (líneas discontinuas) en la marisma de Doñana. Medidas del año hidrológico 2006/2007, estaciones de medida mostradas en la Figura 1.

Balance térmico

El balance térmico superficial sobre la masa de agua se define por los flujos térmicos que lo componen, es decir, las cantidades de calor que atraviesan por unidad de tiempo una superficie unitaria en dirección vertical, expresados en W m^{-2} . En base al principio de conservación de la energía, el balance térmico de una columna de agua por unidad de área en ausencia de advección horizontal de flujos de calor se define como (Arya, 2001)

$$S = R_N + \lambda E + H + G \quad (1)$$

donde S es el cambio en el contenido de calor por unidad de tiempo y unidad de área aplicado a la columna de agua en su total profundidad, R_N es el balance de radiación neta en superficie de cualquier longitud de onda, λE el flujo de calor latente intercambiado con la atmósfera por cambios de estado del agua (perdido por evaporación o ganado por condensación), H el flujo de calor sensible intercambiado por contacto con la atmósfera y G el flujo de calor intercambiado con el sedimento subyacente, todos en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ y de signo positivo cuando suponen un aporte de calor para el agua. Se ignoran en este esquema otras entradas y salidas de calor consideradas de menor importancia como son los flujos de calor debidos a la precipitación, las reacciones bioquímicas o la conversión de energía cinética en calor. En base a la marcadamente plana topografía de la marisma, se presupone un lento movimiento de agua en la misma y no se considera la advección de calor en el plano horizontal. Ello no implica suposiciones sobre el comportamiento hídrico de la marisma, ya que se utilizan datos de profundidad medida del agua.

El único componente del balance térmico (Ecuación 1) medido directamente en campo es R_N . El resto de componentes se calculan por las expresiones que se presentan a continuación. El flujo neto de calor en la columna de agua S se calcula como:

$$S = \int_0^h \frac{\Delta T_w(y) \rho_w c_w}{\Delta t} dy \quad (2)$$

donde h representa el calado (m), $\Delta T_w(y)$ es la variación de temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$ o K) ocurrida en el intervalo de tiempo Δt (s) en una capa de grosor dy situada a una distancia y del suelo (m), ρ_w es la densidad del agua ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) y c_w el calor específico del agua ($4187 \text{ J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$).

El cálculo del calor transmitido al suelo G con medidas discretas en el espacio i y el tiempo j toma la siguiente forma:

$$G_j = \frac{(U_j - U_{j-1})}{\Delta t} \quad (3)$$

$$U_j = \sum_{i=1}^3 CT_i \Delta z_i \quad (4)$$

siendo U_j el contenido de calor del suelo por unidad de volumen ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$), C la capacidad térmica volumétrica del suelo ($3.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ según Ramos Fuertes, 2012), T_i la temperatura de la capa i (K), calculada como el promedio de las registradas en sus extremos, Δz_i es el grosor de la capa i (m) y $\Delta t=600$ s. Se consideran tres capas de suelo, delimitadas por los 4 sensores de temperatura instalados a 0, 0.25, 0.75 y 1 m de profundidad.

El intercambio de calor con la atmósfera (H , λE) se obtiene mediante el método del ratio de Bowen – balance de energía (Drexler, 2004). El calor disponible en la superficie del agua para estos intercambios térmicos ($S-R_N-G$ en la Ecuación 1) se reparte en función del ratio de Bowen β , dependiente de los gradientes observados de temperatura y humedad en superficie:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{T_{sw} - T_a}{e_{sw} - e_a} \quad (5)$$

siendo γ la constante psicrométrica ($0.07 \text{ hPa}\cdot\text{K}^{-1}$ según Ramos Fuertes, 2012), T_{sw} la temperatura medida de la superficie del agua ($^{\circ}\text{C}$ o K), T_a la temperatura medida del aire ($^{\circ}\text{C}$ o K), e_{sw} la presión de vapor de saturación a la temperatura de la superficie de agua (hPa) y e_a la presión de vapor del aire (hPa, ambas estimadas con medidas de temperatura del agua, del aire y humedad ambiental). Finalmente, H y λE se definen como:

$$\lambda E = \frac{1}{1 + \beta} (S - R_N - G) \quad (6)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (S - R_N - G) \quad (7)$$

Balance hídrico y curvas de agotamiento

Con el objetivo de evaluar la participación del balance térmico estimado en la evolución hídrica mensual de la marisma, se comparó un balance de agua basado en estas estimaciones con la variación de calado observada. El balance de agua es muy simplificado y contempla únicamente las entradas por precipitación directa y las pérdidas por evaporación. Este balance supone que no hay contacto con el acuífero subyacente ni flujo de escorrentía superficial. La primera de las hipótesis se justifica por la impermeabilidad del sedimento, compuesto principalmente por arcillas y limos (Ruiz *et al.*, 2004). Respecto a la segunda hipótesis, se puede suponer válida durante una gran parte del periodo de inundación, y en particular durante el periodo de vaciado, a causa de la reducción de caudales naturales de entrada y salida de agua por escorrentía superficial debida a la sobreexplotación de acuíferos y a la reconstrucción y prolongación del dique de la Montaña del Río (Bayán y Dolz, 1995; Rodríguez-Ramírez y Clemente Salas, 2002).

Las observaciones de campo denotan una cierta concordancia de los ritmos de vaciado de la marisma con independencia del lugar de medida y del año hidrológico, especialmente sobre la cota aproximada de 1.3 msnm (Figura 6, izquierda). Con el objetivo de evaluar el grado de homogeneidad del proceso de vaciado, las series de cotas superiores a 1.3 msnm se filtraron y agruparon en el eje de ordenadas. En primer lugar, se seleccionaron sólo aquellos tramos de cota descendente (excluyendo avenidas y eventos de precipitación) con duración superior a 30 días (los huecos en las series inferiores a 5 días se interpolan linealmente). El resultado fueron 18 series de vaciado con duración media de 60 días, que pertenecen a un total de cinco puntos de medida, cinco años hidrológicos y contienen 1325 datos diarios de cota de agua. Dado que la magnitud de la inundación varía cada año, las series de vaciado necesitan una referencia común para ser comparables. Esta referencia se establece arbitrariamente como el polinomio que describe el descenso de nivel de la estación D01 L. Travieso durante el periodo de vaciado de 2006/2007 (una de las series de datos más completas). De esta manera, la cota inicial de cada serie de vaciado se traslada al valor correspondiente para el mismo día del año en ese polinomio (Figura 6, derecha). Ello permite evaluar el grado de concordancia de las curvas de agotamiento de la lámina de agua con independencia de las condiciones hídricas particulares de cada año hidrológico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balance térmico diario

La evolución media horaria de los componentes del balance térmico superficial se muestra en la Figura 3 para tres meses representativos de las fases de inundación. En ella, se pone de manifiesto la relevancia de la radiación neta (R_N) como aporte de calor al sistema, de intensidad creciente de principio a fin del periodo de inundación. El calentamiento del agua (S) es el principal destino del calor incorporado por radiación durante el día. R_N y S alternan valores positivos diurnos (ganancia de calor para el agua) y negativos nocturnos (pérdida de calor). Durante las fases de llenado y mantenimiento de nivel, el intercambio de calor sensible y latente entre agua y atmósfera ($H + \lambda E$) supone una leve pérdida de calor para el agua. Dada la permanente disponibilidad de agua en superficie, este intercambio es siempre favorable a la evaporación ($\beta < 1$ en la Ecuación 5). El intercambio de calor sensible en superficie (H) es en general poco relevante, si bien se intensifica en invierno cuando las condiciones meteorológicas son más desfavorables a la evaporación (alta humedad ambiental). La evaporación (λE) crece notablemente en la fase de vaciado, siendo predominante a partir del mediodía por la intensificación típica del viento y del gradiente de presión de vapor entre las 12 h y las 18 h en esa época. El calor intercambiado con el suelo inundado (G) resulta despreciable en las tres fases mostradas.

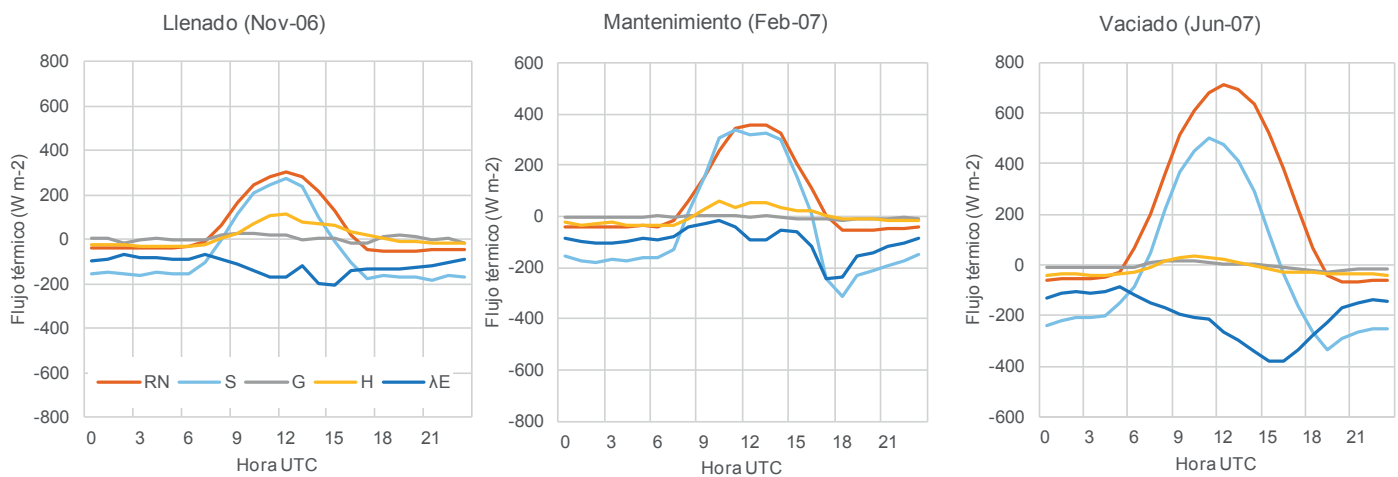


Figura 3 | Balance térmico medio horario de la marisma (estación D04) en sus tres fases de inundación: llenado (izquierda), mantenimiento de nivel de agua (centro) y vaciado (derecha). Variables descritas en la Ecuación (1).

Balance térmico estacional

La Figura 4 muestra el balance térmico mensual de la marisma inundada. En ella, destaca la diferente importancia relativa de los componentes del balance con respecto al análisis horario (Figura 3): dada la alternancia de ganancias y pérdidas de calor por parte de la columna de agua durante el día y la noche, respectivamente, el valor neto de S es poco relevante a escala mensual. En su lugar, la evaporación destaca como principal destino del calor entrante en la marisma a largo plazo, incorporando la intensificación de la radiación neta entre los meses de febrero y julio, consecuencia de la mayor radiación solar incidente. El intercambio de calor por conducción con la atmósfera H y con el suelo G son por lo general poco importantes.

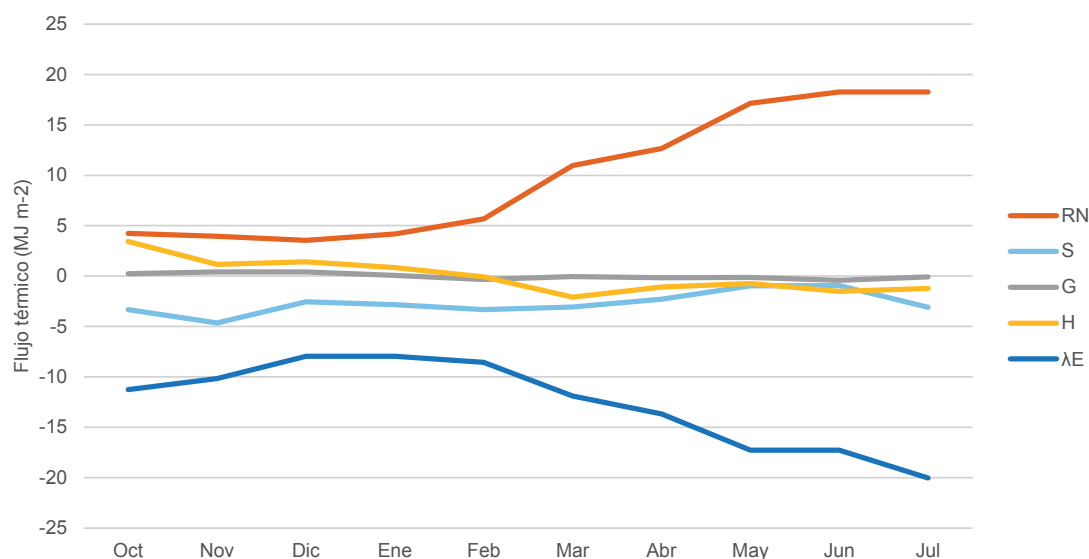


Figura 4 | Balance térmico mensual de la marisma inundada (estación D04), año hidrológico 2006/2007. Variables descritas en la Ecuación (1).

Entre los meses de noviembre y febrero, la pérdida de calor por evaporación supera a la entrada de calor por radiación y por conducción. El resultado es una pérdida neta de calor y una disminución de la temperatura del agua en este periodo. A partir del mes de marzo la evaporación y la radiación neta tienden a igualarse, resultando en una pérdida de calor neta menor. Aunque el balance térmico sea ligeramente negativo en este periodo, la temperatura aumenta a causa de la acusada reducción del volumen de agua (Figura 2).

Balance de agua y proceso de vaciado

El balance de agua de la Figura 5 muestra los volúmenes mensuales de precipitación acumulada, evaporación acumulada y la variación de profundidad del agua observada durante el periodo de inundación 2006/2007 en la estación D04 L. Cerrado Garrido. No se incluye el mes de julio porque presenta una entrada de agua anómala, que seguramente procede del vaciado del lucio artificial contiguo. En esta imagen, la variable Δh^* representa una estimación de la variación de calado obtenida a partir del balance de agua simplificado, igual al volumen neto de precipitación menos evaporación por unidad de área. A esta estimación se le aplica un coeficiente corrector que convierte el cambio de cota teórico (aplicable a un volumen de agua de paredes verticales) al cambio de cota real de la marisma (área inundada variable con la cota), información obtenida del modelo digital del terreno (Cambroner y De Pourq, 2006; Ramos Fuertes, 2012).

Los meses más lluviosos (noviembre, enero y febrero) presentan una discordancia importante entre el balance simplificado de agua y la variación real del calado, debido a que se producen entradas de agua por escorrentía superficial procedentes de los arroyos tributarios a la marisma. Estos meses, el ascenso de calado estimado supone en torno a un 20% del observado. El resto de estimaciones de variación de la profundidad de la columna de agua, de signo negativo, son similares a las obtenidas por el balance simplificado, lo cual resalta la importancia de la evaporación como salida principal de agua de la marisma. El error absoluto del balance estimado es entre un 14% y un 25% de la variación real del calado en los meses de marzo a junio, y de un 36% en diciembre. Las causas más probables del mismo son la existencia de advección de caudal en el plano horizontal (más probable en otoño-invierno) y la influencia de la transpiración vegetal en la fase de vaciado (primavera-verano). Este error podría ser mayor en el caso de que la variación de cota observada esté influida además por los desagües de las compuertas que conectan la marisma con el estuario, información que no se encuentra disponible.

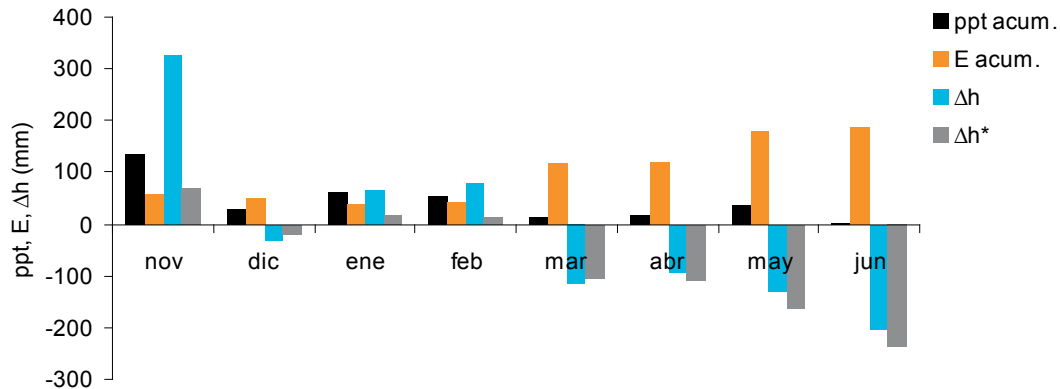


Figura 5 | Componentes mensuales del balance simplificado de agua en Doñana: precipitación acumulada (*ppt acum.*), evaporación acumulada (*E acum.*), variación observada de nivel (Δh) y variación estimada de nivel (Δh^*). Datos de la estación D04, año hidrológico 2006/2007.

La cota de la lámina de agua en diferentes puntos de medida y años hidrológicos presenta un ritmo de agotamiento similar con independencia de la cota de partida, en especial por encima de la cota aproximada de 1.3 msnm (Figura 6, izquierda). Este valor coincide, según la clasificación altimétrica realizada por Mintegui Aguirre *et al.* (2004), con el límite superior de los principales lucios y caños de la marisma. Bajo esta cota, la marisma se encuentra en gran medida desconectada y las diferentes masas de agua se comportan en su vaciado final de forma independiente, de acuerdo a la morfología del vaso y las condiciones hidrometeorológicas de cada periodo.

Al analizar las series de vaciado sobre la cota 1.3 msnm se observa una gran coincidencia de la evolución temporal de todas ellas (Figura 6, derecha). La parábola que describe el conjunto es producto del ritmo creciente de evaporación a causa de la intensificación de la radiación solar de marzo a julio (Figura 4), y de la curva de capacidad de la marisma conectada. La pendiente de esta parábola define el ritmo de descenso de la cota de agua con respecto al día del año, que crece de manera aproximadamente lineal durante el periodo de vaciado, tal como se mostró en la Figura 4.

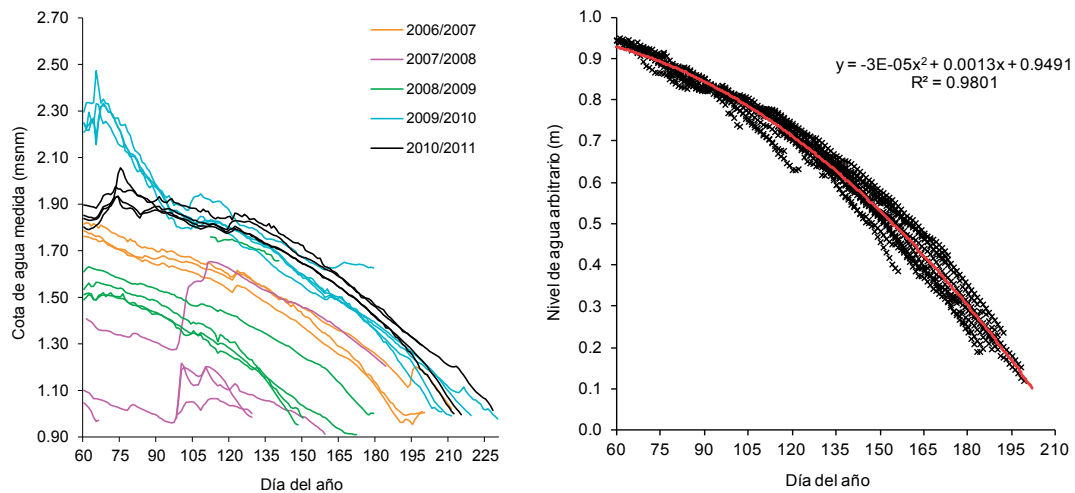


Figura 6 | Izquierda: series de cota de agua registradas por la red de medida en la marisma de Doñana entre los años hidrológicos 2006/2007 y 2010/2011. Derecha: agrupamiento de los tramos descendentes de las series de vaciado.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha caracterizado el comportamiento térmico superficial de la marisma de Doñana durante un ciclo típico de inundación a escalas temporales horaria y mensual. A escala horaria, destaca el papel del flujo de calor que absorbe o libera la columna de agua como principal sumidero y fuente de la radiación neta en superficie. El intercambio térmico con la atmósfera es siempre favorable a la evaporación y se intensifica notablemente después del mediodía en la fase de vaciado de la marisma. El intercambio térmico con el suelo inundado es poco relevante en el punto de estudio.

A escala mensual, las ganancias y pérdidas de calor por parte del agua se compensan y resulta en un balance térmico reducido. El creciente aporte de calor a través de la radiación neta de diciembre a junio se refleja en la intensificación de la tasa diaria de evaporación.

La evaporación como principal salida de agua en la marisma se ha constatado mediante la comparación de un balance simplificado de masa, basado en la precipitación medida y la evaporación estimada, comparado con la variación de calado observada. Utilizando 18 series de vaciado de diferentes puntos de medida y años hidrológicos, se ha establecido un patrón de agotamiento de la lámina de agua en la marisma conectada, dependiente del día del año e independiente de la cota de partida. Ello es consecuencia de la variación estacional de la evaporación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la asistencia del Espacio Natural Doñana y de la Estación Biológica de Doñana en la instalación y mantenimiento de la instrumentación de medida, labores esenciales realizadas por D. Ninyerola y J. Rabadà (Flumen, UPC-CINME). Este estudio ha contado con la financiación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, de un convenio con la Empresa de Gestión Ambiental (EGMASA) adscrita a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, de la acción complementaria CMT2007-30881-E/TECNO del Ministerio de Educación y Cultura, y del contrato GOCE-CT-2006-037081 del programa FP6 de la Unión Europea. Uno de los autores (ARF) contó con una beca FPI del Ministerio de Educación y Ciencia.

REFERENCIAS

- Aragónés, D., Díaz-Delgado, R., Bustamante, J. (2005). Tratamiento de una serie temporal larga de imágenes Landsat para la cartografía de la inundación histórica de las marismas de Doñana. *XI Congreso Nacional de Teledetección*, 21-23 Septiembre, Puerto de la Cruz, Tenerife, España.
- Arya, S. (2001). *Introduction to micrometeorology*. (2ª ed.). Academic Press, San Diego, CA.
- Bayán, B.J., Dolz, J. (1995). Las aguas superficiales del Parque Nacional de Doñana. *Revista de Obras Públicas*, 142(3340), 17-29.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10, doi:10.1016/j.rimni.2012.07.004
- Cambronero, G., De Pourq, K. (2006). *Modelo Digital del Terreno de la Marisma de Doñana obtenido a partir de un vuelo láser escáner (LIDAR)*. Grupo de Investigación Flumen, E.T.S. d'Enginyers de Camins Canals i Ports de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- CICCP (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos). (1977). Informe sobre los problemas del Parque Nacional de Doñana. *Revista de Obras Públicas*, 124(3142), 91-114.
- Custodio, E., Dolz, J., Manzano, M. (2006). *Recursos de agua de la comarca de Doñana*. Almonte, Huelva: Fundación Doñana 21.

- Dolz, J., Velasco, E. (1990). *Análisis cualitativo de la hidrología superficial de las cuencas vertientes a la marisma del Parque Nacional de Doñana*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Dolz, J., Bladé, E., Gili, J. (2006). Modelo numérico de la hidrodinámica de la Marisma. En: *Doñana: Agua y biosfera* (F. García Novo y C. Marín, eds.). Ministerio de Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Sevilla, España, 149–150.
- Drexler, J.Z., Snyder, R.L., Spano, D., Paw U, K.T. (2004). A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processes*, 18(11), 2071–2101, doi:10.1002/hyp.1462
- Junta de Andalucía. (2010). *II Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana*. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, España.
- Martí-Cardona, B. (2014). *Spaceborne SAR Imagery for Monitoring the Inundation in the Doñana Wetlands*. Tesis doctoral. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Martí-Cardona, B., Lopez-Martinez, C., Dolz-Ripolles, J., Bladé-Castellet, E. (2010). ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2802–2815, doi:10.1016/j.rse.2010.06.015
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2001). *Documento marco para el desarrollo del Proyecto Doñana 2005: regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana*. Madrid, España.
- Mintegui Aguirre, J.A., Robredo Sánchez, J.C., García Viñas, J.I. (2004). Importancia de los trabajos de campo en la confección del modelo del terreno para aplicaciones en ecología. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 13(Nº Extra 1), 164–175.
- Prats, J., Ramos, A., Armengol, J., Dolz, J. (2011). Comparison of models for calculation of diel sediment-water heat flux from water temperatures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(10), 1135–1147, doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000434
- Prats, J., Ramos, A., Armengol, J., Dolz, J. (2012). Discussion on “Experimental determination of soil heat storage for the simulation of heat transport in a coastal wetland.” *Journal of Hydrology*, 466–467, 188–190, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.060
- Prats, J., Morales-Baquero, R., Dolz, J., Armengol, J. (2014). Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 83–97. doi:10.4995/ia.2014.3145
- Ramos Fuertes, A. (2012). *Hidrometeorología y balance térmico de la marisma de Doñana*. Tesis doctoral. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Ramos-Fuertes, A., Martí-Cardona, B., Bladé, E., Dolz, J. (2014). Envisat/ASAR Images for the Calibration of Wind Drag Action in the Doñana Wetlands 2D Hydrodynamic Model. *Remote Sensing*, 6(1), 379–406, doi:10.3390/rs6010379
- Rodríguez-Ramírez, A., Clemente Salas, L. (2002). Hidrología superficial. En: *Parque Nacional de Doñana*. Canseco Editores, Talavera de la Reina, España, 57–68.
- Ruiz, F., Rodríguez-Ramírez, A., Cáceres, L.M., Rodríguez Vidal, J., Carretero, M.I., Clemente, L., Muñoz, J.M., Yañez, C., Abad, M. (2004). Late Holocene evolution of the southwestern Doñana National Park (Guadalquivir Estuary, SW Spain): a multivariate approach. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 204(1–2), 47–64, doi:10.1016/S0031-0182(03)00721-1