



**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. IV Jornadas de Ingeniería del Agua, Oct 2015, Córdoba, España. pp.107-116. hal-01235644

**HAL Id: hal-01235644**

**<https://hal.science/hal-01235644>**

Submitted on 30 Nov 2015

**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

Anaïs Ramos Fuertes<sup>1</sup>, Jordi Prats Rodríguez<sup>2</sup>, Josep Dolz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Flumen, ETS d'Enginyers de Camins, Campus Nord UPC, C. Jordi Girona 1-3, D1, 08034 Barcelona (España), <sup>2</sup>Pôle Onema-Irstea "Plans d'eau", 3275 Route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5 (Francia)

### 1. Introducción

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 intensificaron las labores de restauración 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; Ramos-Fuertes *et al.* 2013; Bladé *et al.* 2014), el seguimiento de masas de agua y comunidades vegetales mediante teledetección (Marti-Cardona *et al.* 2010; Marti Cardona 2014) y el estudio hidrometeorológico y de flujos de agua y calor en superficie (Prats *et al.* 2012; Ramos Fuertes 2012).

Los recursos hídricos, incluyendo las aguas superficiales y subterráneas, son un factor clave en este espacio protegido, 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, reconocida como base estratégica de mantenimiento y desarrollo, tanto desde el punto de vista ecológico como económico y territorial (CICCP, 1977; Junta de Andalucía, 2010).

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 hidropereodo o duración de la inundación. El trabajo aquí presentado se centra en la caracterización del balance térmico de la marisma inundada a escala horaria y estacional, haciendo especial énfasis en la evaporación y en el estudio del proceso de vaciado de la misma.

## 2. Metodología

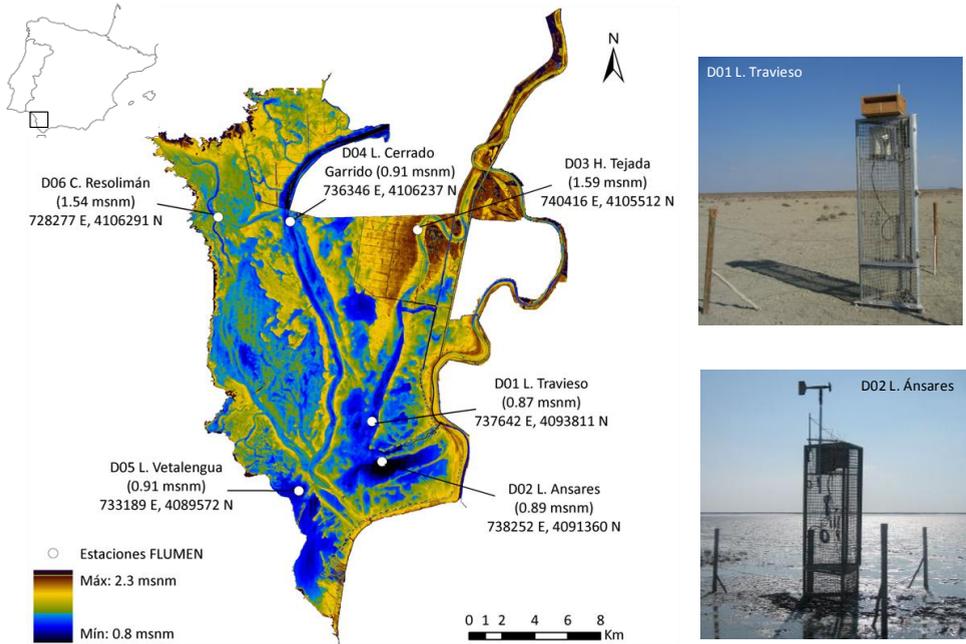
### 2.1 Área de estudio

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 km<sup>2</sup> en la margen derecha de la desembocadura del río Guadalquivir. Su conformación es el resultado de la colmatación del antiguo estuario del río, y presenta una práctica ausencia de relieve con la ocurrencia de procesos anuales de inundación y secado que se prolongan típicamente de mediados de otoño a mediados de verano. En el marco del presente estudio, la comunicación de la marisma con el estuario es prácticamente nula a efectos de balances de agua y calor.

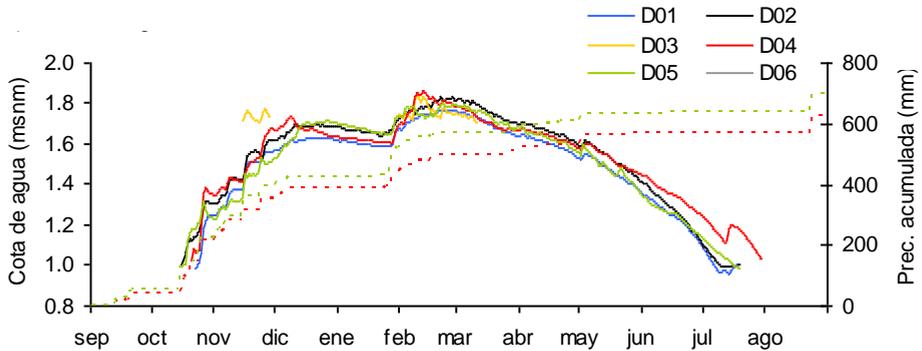
### 2.2 Instrumentación de medida

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 seis 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. Se puede consultar la descripción detallada de la instrumentación en Ramos Fuertes (2012).

El balance térmico presentado corresponde al periodo de inundación 2006/2007 (Figura 2), el más cercano al patrón medio histórico de inundación descrito por Aragonés *et al.* (2005). Este proceso 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 de las curvas de agotamiento de la lámina de agua contempla todas las medidas de nivel disponibles a partir del mes de marzo de cada año hidrológico.



**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.



**Figura 2.** Cotas de agua y precipitación acumulada en la marisma de Doñana. Medidas del año hidrológico 2006/2007, estaciones de medida mostradas en la Figura 1.

### 2.3 Balance térmico

El balance térmico superficial sobre la masa de agua se define por los flujos térmicos que lo componen o 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,  $\lambda E$  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 transmitido hacia el sedimento subyacente, todos en  $W\ m^{-2}$  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 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.

El único componente del balance térmico [1] medido directamente es  $R_N$ . El resto se calculan por las siguientes expresiones:

$$S = \int_0^h \frac{\Delta T_w \rho_w c_w}{\Delta t} dy \quad [2]$$

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

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

$$G_j = (H_j - H_{j-1})/\Delta t \quad [3]$$

$$H_j = \sum_{i=1}^3 C T_i \Delta z_i \quad [4]$$

siendo  $H_j$  el contenido de calor del suelo por unidad de volumen ( $J\ m^{-3}$ ),  $C$  la capacidad térmica volumétrica del suelo ( $3.7\ MJ\ m^{-3}\ K^{-1}$  según Ramos Fuertes, 2012),  $T_i$  la temperatura de la capa  $i$ , calculada como el promedio de las registradas en sus extremos, 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 ( $H$ ,  $\lambda E$ ) 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 ( $R_N - S - G$  en la ecuación [1]) se reparte en función del ratio de Bowen  $\beta$ , 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  $\gamma$  la constante psicrométrica ( $0.07 \text{ hPa K}^{-1}$  según Ramos Fuertes, 2012),  $T_{sw}$  la temperatura medida de la superficie del agua,  $T_a$  la temperatura medida del aire,  $e_{sw}$  la presión de vapor de saturación a temperatura de la superficie de agua y  $e_a$  la presión de vapor real del aire (ambas estimadas con medidas de temperatura del agua, del aire y humedad ambiental). Finalmente,  $H$  y  $\lambda E$  se definen como:

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

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

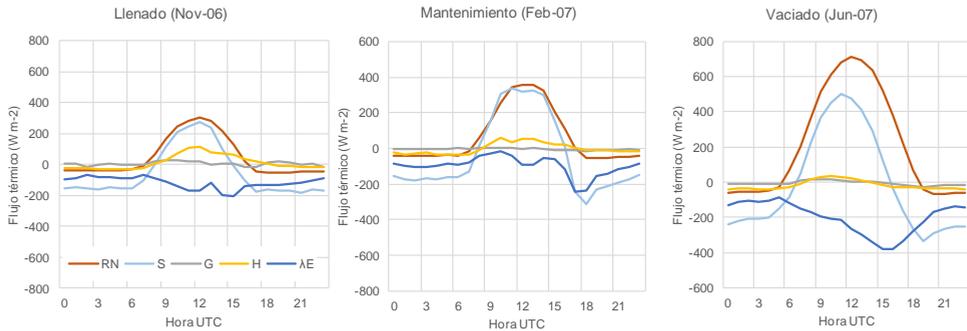
## 3. Resultados

### 3.1 Balance térmico diario

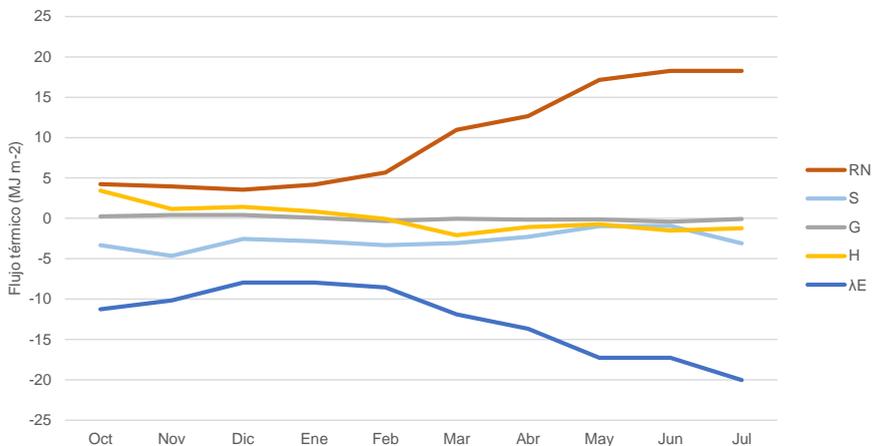
La evolución media horaria de los componentes del balance térmico superficial se muestra en la Figura 3 para tres meses representativos de las fases de inundación. En ella, se pone de manifiesto la relevancia de la radiación neta ( $R_N$ ) como aporte de calor al sistema, de intensidad creciente de principio 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 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 eq. [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 ( $\lambda E$ ) crece notablemente en la fase de vaciado, siendo predominante a partir del mediodía por la intensificación típica del viento 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.

### 3.2 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.



**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].



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

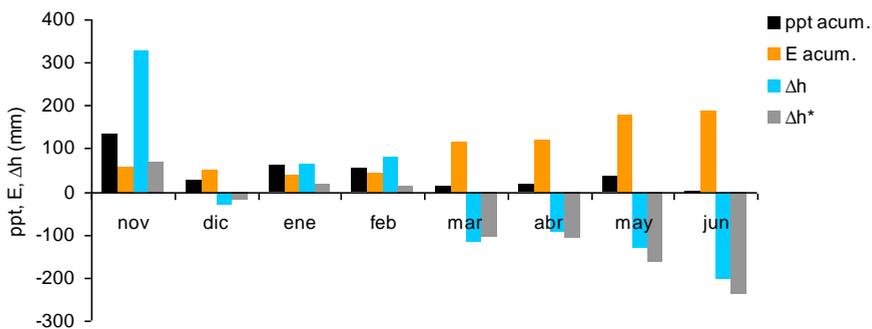
### 3.3 Balance de agua y proceso de vaciado

Suponiendo un sistema sin flujo de escorrentía superficial ni contacto con el acuífero subyacente, se puede describir un balance de agua simplificado en un punto dado de la marisma mediante la variación de calado, las entradas por precipitación directa y las pérdidas por evaporación.

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  $\Delta h^*$  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 (Cambronero y De Pourq, 2006).

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 de 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 de agua vertical, 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. 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.



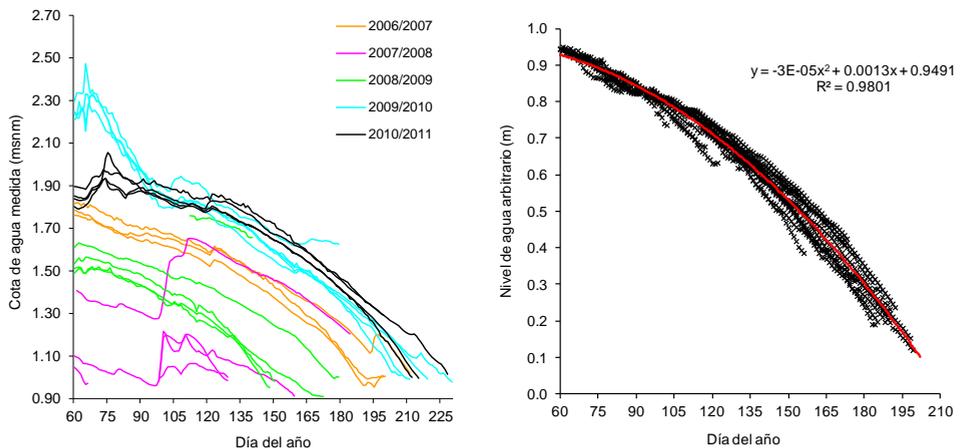
**Figura 5.** Componentes mensuales del balance simplificado de agua en Doñana: precipitación acumulada (ppt acum), evaporación acumulada (E acum), variación observada de nivel ( $\Delta h$ ) y variación estimada de nivel ( $\Delta h^* = \text{ppt acum} - E \text{ acum}$ ). Datos de la estación D04, 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 *et al.* (2004), con el límite superior de los principales lucios y caños de la marisma. Bajo esta cota, la marisma se encuentra 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.

Con el objetivo de evaluar el grado de homogeneidad de estos procesos 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 descendiente (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.

Estas series de vaciado, correspondientes a diferentes años y estaciones de media, se agruparon estableciendo un origen arbitrario común en el eje de ordenadas, coincidente con el polinomio que describe el descenso de nivel de la estación D01 L. Travieso durante el periodo de vaciado de 2006/2007. De esta manera, la cota inicial de las series de vaciado se traslada al valor correspondiente para el mismo día del año en ese polinomio. El resultado es una gran coincidencia de la evolución temporal de todas las series (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 linealmente durante el periodo de vaciado.



**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.

## 4. 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, 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.

## Referencias

*Aragónés, D., Díaz-Delgado, R., y Bustamante, J. 2005. Tratamiento de una serie temporal larga de imágenes Landsat para la cartografía de la inundación histórica de las marismas de Doñana. X Congreso Nacional de Teledetección. Puerto de la Cruz, Tenerife.*

*Arya, S. 2001. Introduction to micrometeorology. (2ª ed.). San Diego: Academic Press.*

*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), pp.1–10.*

*Cambronero, G. y De Pourq, K. 2006. Modelo Digital del Terreno de la Marisma de Doñana obtenido a partir de un vuelo láser escáner (LIDAR). Barcelona: Grupo de Investigación Flumen, E.T.S. d'Enginyers de Camins Canals i Ports de la Universitat Politècnica de Catalunya.*

*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), pp. 91-114.*

*Dolz, J., Bladé, E. y Gili, J. 2006. A numerical hydrodynamic model for the marshes of Doñana National Park. En F. García Novo & C. Marín, eds. Doñana: Water and biosphere. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente., pp. 157–158.*

*Drexler, J. Z., Snyder, R. L., Spano, D., y Paw U, K. T. 2004. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. Hydrological Processes, 18(11), 2071–2101.*

*Junta de Andalucía. 2010. II Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana. Consejería de Medio Ambiente.*

*Marti 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.*

*Marti-Cardona, B., Lopez-Martinez, C., Dolz-Ripolles, J., Bladè-Castellet, E. 2010. ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring. Remote Sensing of Environment, 114(11), pp.2802–2815.*

*Mintegui Aguirre, J. A., Robredo Sánchez, J. C., y 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. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).*

*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, pp.188–190.*

*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.*

*Ramos-Fuertes, A. et al., 2013. Envisat/ASAR Images for the Calibration of Wind Drag Action in the Doñana Wetlands 2D Hydrodynamic Model. Remote Sensing, 6(1), pp.379–406.*