

## **Estudio del impacto económico de la evaporación de agua en balsas de riego ubicadas en zonas de clima semiárido: aplicación en la isla de La Palma**

Gerardo Castellanos Osorio<sup>1</sup>, Daniel Valverde Díaz<sup>1</sup>, Mónica Gómez Curiel<sup>2</sup>, Isabel Martínez Alcalá<sup>1</sup>, Francisco Pellicer Martínez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Católica San Antonio de Murcia

<sup>2</sup> Consorcio Balsa Montaña de Arco de La Palma.

### **Resumen**

La evaporación de agua en las balsas de riego supone una pérdida de los recursos hídricos disponibles. Generalmente se hace uso de estas infraestructuras hidráulicas en zonas con clima semiárido, ya que son áreas propicias para la agricultura en regadío y en las que, además, se hace necesario regular los recursos hídricos disponibles al ser éstos escasos y variables en el tiempo. Esta pérdida de agua termina generando un impacto económico negativo, al perder un recurso que previamente ha sido almacenado en la balsa de riego y que deja de ser empleado en la producción de nuevos bienes. Esta situación se ve agravada en zonas en las que no es posible recurrir a otras fuentes de suministro económicamente viables. Un claro ejemplo son las islas, en las que dado su carácter de insularidad es difícil acceder a recursos alternativos, como podría ser un trasvase. Si bien existe la posibilidad de la desalación, el coste de ésta puede no ser asumido por los regantes, y si además hay que elevar el agua hasta cotas elevadas, esta opción quedaría descartada. Dentro de esta casuística se encuentra la isla de La Palma en el archipiélago de las Canarias.

El objetivo de este trabajo es estudiar el fenómeno físico de la evaporación de agua dulce en la Balsa Montaña del Arco de isla de La Palma, con el fin valorar el impacto económico que genera y así justificar la implantación de medidas que reduzca evaporación.

Para ello, en primer lugar, se modeliza la evaporación durante el año 2017 mediante los métodos matemáticos que habitualmente se vienen aplicando. Dichos métodos son los aerodinámicos (o de transferencia de masa) y los combinados, que además incluyen un balance de energía en la superficie de la lámina de agua. Como estos métodos son aproximaciones matemáticas que se ven afectadas por las particularidades de cada caso concreto, deben ser ajustados mediante los resultados de un balance hídrico a partir de mediciones de campo.

Los resultados indican que las pérdidas por evaporación en la Balsa Montaña del Arco fueron de 29.397,29 m<sup>3</sup> y que los modelos matemáticos subestimaron este volumen entre un 12-35%. Por lo que a la hora de aplicar estas metodologías en años posteriores, se puede recurrir a un factor de corrección entre 1,12 – 1,35. Además, el hecho de contar con este recurso supondría el regadío, por ejemplo, de 8 hectáreas más de papas que generarían un impacto económico bruto y directo de unos 165.600 €/año, lo que da un orden de magnitud del coste de las medidas que se podrían implantar para reducir la evaporación de esta balsa, que con los medios convencionales podría llegar a reducir un 87% la evaporación.

**Palabras clave:** regadío, métodos aerodinámicos, métodos combinados.

## 1. Introducción

La evaporación es el proceso físico mediante el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso. A nivel global, la evaporación del agua en los océanos es el motor del ciclo hidrológico, ya que es a partir de este proceso físico (también se denomina proceso hidrológico dentro de la hidrológica) como el agua líquida vuelve a la atmósfera en forma de vapor. De hecho, alrededor del 90% de la humedad de la atmósfera procede de la evaporación del agua de los océanos, mares, lagos y ríos, mientras que el restante 10% procede de la transpiración de las plantas. Sin embargo, la evaporación terrestre se suele incluir dentro de la transpiración, que es proceso biológico resultante de las actividades fisiológicas de los vegetales cuyo resultado es la liberación de agua a la atmósfera. Generalmente, ambos procesos se estiman de forma conjunta, denominándose a este proceso combinado con el término de evapotranspiración (Tucci, 1993).

La energía es el motor de la evaporación. El calor facilita que las moléculas de agua se transfieran al aire, siendo máxima la evaporación cuando el agua alcanza el punto de ebullición (100 °C), ralentizándose cuando baja la temperatura al punto de congelación (0 °C). Además de la energía, otro importante condicionante es la humedad relativa del aire, que mide de forma porcentual la cantidad de vapor de agua que puede contener el aire. Cuando la humedad relativa se encuentra próxima al 100%, la tasa neta de evaporación es prácticamente nula (Gallego-Elvira, 2011).

La evaporación es un flujo esencial en el balance hídrico en todas las escalas, ya que es la fuente de alimentación de futuras precipitaciones. Sin embargo, en el área de gestión de recursos hídricos supone una pérdida de agua, por lo que su estudio es de vital importancia para muchos sectores económicos de la actividad humana que precisan de este recurso o bien. A pesar de la importancia que puede tener este proceso hidrológico, sobre todo en zonas áridas o semiáridas, no es posible su medición directa, debiendo recurrir a estimaciones indirectas como la modelización matemática (Hobbins & Huntington, 2016) o los balances hídricos. La cuantificación de la evaporación es fundamental en zonas en las que las precipitaciones son escasas y las pérdidas por esta vía pueden ser cuantiosas, como sucede en los embalses de regulación. Pero, no sólo son importantes en estas infraestructuras, sino que en balsas de menor tamaño, como son las de riego, puede tener una relevancia más directa al almacenar un recurso por el que se puede haber realizado ya un pago. Por este motivo, cuantificar y conocer la tasa de evaporación (E) es prioritario para un adecuado diseño de la gestión del agua, tanto a escalas de cuencas hidrográficas (en embalses de regulación) como a escala de explotación agraria (Stanhill, 2002). Un adecuado conocimiento del volumen que implica la evaporación en una balsa de riego de una comunidad de regantes, junto con una estimación del impacto económico que supone, puede alentar a la toma de medidas que mitiguen este proceso hidrológico. Así, es posible justificar una pequeña inversión que cambie la pérdida económica de un bien ya adquirido a unos beneficios económicos, al poder sacar productividad a dicho bien.

En este sentido, el objetivo principal de este trabajo es estudiar con mayor profundidad este proceso hidrológico esencial en la gestión de embalses y balsas de riego. Para ello, se van a aplicar los métodos de estimación que actualmente más se utilizan a una balsa de regulación de riego. Dicha balsa está ubicada en una zona con clima semiárido, en el que el destino de los caudales es la agricultura en regadío. La infraestructura se enmarca en el paraje de Montaña del Arco, situada a cota 915 sobre el nivel del mar y perteneciente al municipio de Puntagorda en la isla de La Palma (Islas Canarias). Los métodos matemáticos de estimación utilizan información de la estación

meteorológica más cercana, y sus resultados se contrastan con un balance hídrico basado fundamentalmente en mediciones reales. Este contraste permite evaluar los errores medios cometidos por estos métodos de estimación y determinar unos coeficientes de calibración. El resultado calculado por el método de balance se considera el más fiable y, a partir del mismo, se hace una pequeña estimación del impacto económico que supone esta pérdida de recurso. Este valor puede incentivar la implantación de medidas para mitigar esta pérdida de recurso y aumentar los beneficios de la zona, ya sea por no el simple hecho de comprar menos agua, por el aumento de la garantía de suministro, o por la entrada en regadío de otras parcelas que hasta ahora están en regadío.

A continuación se realiza una pequeña revisión del fenómeno de la evaporación, seguida de la descripción del caso de estudio. A continuación se definen los métodos utilizados y se presentan los resultados obtenidos. A partir de estos resultados se hace una breve discusión de los mismos y, por último, se sintetizan las conclusiones más relevantes que se derivan de este trabajo.

## **2. El fenómeno de la evaporación. Métodos de estimación.**

La evaporación se suele medir por unidad de superficie y depende fundamentalmente de factores meteorológicos. Los más determinantes son: energía (calor), viento y humedad relativa del aire. Pero, como la evaporación es un proceso de intercambio de energía, la radiación solar suele ser el factor más determinante. La temperatura del aire, que es una variable relacionada directamente con la energía, también influye en la evaporación, ya que el aumento de la temperatura hace que aumente la capacidad de absorción de vapor de agua por parte del aire, por lo que a mayor temperatura, mayor evaporación. Respecto a la humedad relativa del aire, la ley de Dalton establece que la tasa de evaporación es proporcional a la intensidad del gradiente de presión de vapor entre la superficie evaporada y el aire. Por lo que cuanto más saturado esté el aire, más baja es la evaporación y viceversa. En tercer lugar, el viento renueva el aire adyacente a las superficies libres de cuerpos de agua que se encuentra saturada por otra menos saturada. Por lo que a mayor viento, mayor es la evaporación, ya que el vapor de agua junto a la lámina de agua se transmite a mayor tasa a las capas superiores (Linsley et al., 1967).

La evaporación en una lámina libre de agua es, junto con la evapotranspiración, uno de los procesos hidrológicos más difíciles de cuantificar directamente en el medio natural. Existen técnicas de medición semi-directa, como son los tanques evaporímetros a los que se les aplica unos coeficientes de corrección para adaptar los valores de evaporación en una cubeta a la lámina de agua que se pretende estudiar (generalmente se ubican en grandes embalses de regulación). Otra técnica directa con un alto grado de precisión es la Eddy Correlation, que se debe calibrar mediante experimentación a partir de unas condiciones ideales para el entorno ambiental, considerando la configuración física del cuerpo de agua (Brutsaert, 2005). También existen los métodos indirectos, que estiman la evaporación a partir de mediciones de otras variables (Linsley et al., 1967). Entre ellas se encuentra el balance hídrico, los métodos de transferencia de masa, los métodos de transferencia de energía, y los métodos que combinados (masa y energía). Dentro de los métodos indirectos, el balance hídrico es el más preciso, ya que los flujos de agua considerados son medidos directamente.

En la mayoría de los casos, la falta de los datos hidrológicos y meteorológicos limita la aplicación de técnicas con un mayor fundamento físico (más complejas y robustas),

debiendo recurrir a metodologías empíricas (Hobbins & Huntington, 2016). Los métodos más sencillos se basan en los resultados de simples análisis estadísticos y suelen incorporar una o dos variables climáticas (normalmente radiación solar y/o temperatura el aire). Éstos últimos al poseer una base teórica menor deben ajustarse a las condiciones locales (De Bruin et al., 1990).

### **3. La Balsa Montaña del Arco en el municipio de Puntagorda (isla de La Palma).**

El archipiélago de las Islas Canarias se caracterizan por sus elevadas montañas en comparación con su extensión superficial. Se sitúan en el océano Atlántico, al nordeste del continente africano. Poseen un perfil muy variado y, como consecuencia de su origen volcánico, casi todas presentan (menos Lanzarote y Fuerteventura) unas cumbres centrales dominantes, tal y como sucede en La Palma, que es la isla del caso de estudio. La Palma tiene una altitud máxima de casi 2.500 metros y desde la parte central se descuelgan unas laderas de acusadas pendientes, acompañadas de profundos barrancos, hasta llegar al mar. Las precipitaciones son frecuentes en la parte norte de la isla y en las cotas altas, siendo su valor medio anual unos 740 mm. La temperatura media varía mensualmente entre 19 y 25°C, por lo que hay una evapotranspiración potencial que dobla la precipitación, presentado un clima semiárido (CIAP, 2015).

El municipio en el que se sitúa la balsa estudiada (La Balsa Montaña del Arco) se enclava en el municipio de Puntagorda, situado en el vértice noroccidental de La Palma, con una superficie de 31,10 km<sup>2</sup>, que representa el 4,39% de esta isla. La agricultura es la principal actividad económica. El plátano es uno de los principales cultivos, aunque el viñedo ha cobrado gran importancia en los últimos años. También el policultivo de medianías tiene en Puntagorda una destacada presencia de almendras, flores, hortalizas, verduras y frutas. Dentro del sector primario, también tienen cierta relevancia la comercialización de carnes, queso y miel. El porcentaje de personas empleadas en la agricultura en Puntagorda es muy superior a la media de ésta isla, lo que denota el carácter agrario del municipio. A pesar de la importancia del sector agrario, en el propio municipio de Puntagorda apenas se generan recursos hídricos. por lo que la demanda actual de 1,2 hm<sup>3</sup> (que se incrementa cada año), procede de galerías, pozos y nacientes de los municipios colindantes Garafía y Tijarafe (Figura 1).

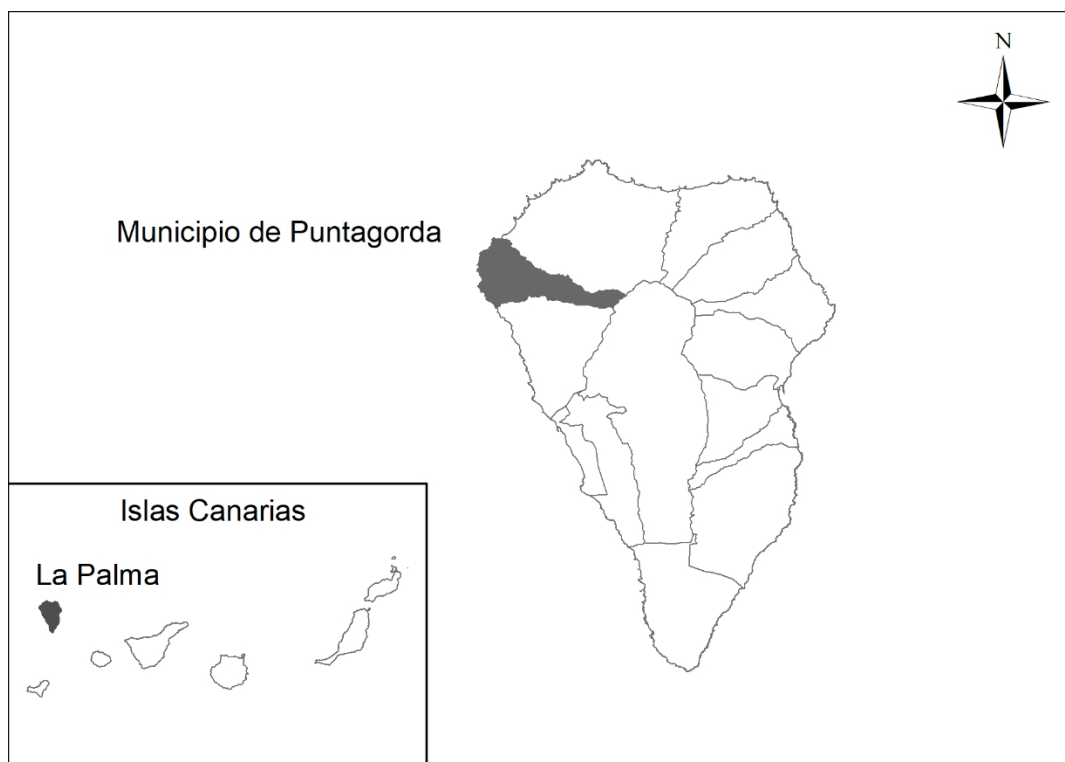


Figura 1. Localización geográfica de Puntagorda.

Las redes de transporte de las captaciones altas del término municipal de Garafía (G<sup>a</sup> Minaderos, Goteras, Unión de Aguas de Garafía) discurren a una cota elevada, por lo que se propuso la construcción de La Balsa Montaña del Arco como medio de regulación a la cota 911 m. La capacidad de esta balsa es de 107.000 m<sup>3</sup> y fue construida en el año 2003. Es una infraestructura estratégica dentro del sistema de explotación de la zona denominado “Sistema Hidráulico de Montaña del Arco”, y da servicio principalmente a la franja de cultivo de medianías, entre las cotas 910 y 570 m.s.n.m. El tipo de cultivo predominante en esta zona es la agricultura de autoabastecimiento (frutales y hortalizas), por tanto se trata de una agricultura no profesionalizada. Aunque también existe una pequeña producción de cultivos ornamentales de flores, así como de aguacates y cítricos que sí se comercializan.

Es importante reseñar que en el Consorcio Balsa Montaña del Arco los derechos de agua de galería, en su mayor parte, no son propiedad del usuario que lo disfruta. Por tanto, el acceso al agua de la mayoría de los comuneros es mediante el arrendamiento de las porciones normalizadas por cada Galería. Esta modalidad de contrato se renueva de forma anual (de enero a diciembre) mediante un único pago al inicio de dicho arrendamiento. Es un coste fijo que se imputa al agricultor de medianías que no obtiene ingresos por el cultivo, a diferencia de aquel que sí lleva a cabo una actividad económica y que le repercute significativamente en el precio final del producto. Esto hace que el policultivo de medianías sea predominantemente estacional y condiciona el funcionamiento de la balsa.

La Balsa Montaña del Arco, posee una altura de lámina máxima de 12,80 m y una impermeabilización realizada mediante Lámina de PVC-P sobre geotextil no tejido de polipropileno antipunzamiento. Su geometría irregular, adaptada al terreno del emplazamiento, es una balsa con dique de cierre de tierra compactada y cuyos taludes interiores son 2H:1V con bermas de 1,5 m de ancho que sirven como anclaje de la

lámina en talud, además de lastres de hormigón dispuestos a 3 y 7 m sobre la cota de fondo, tal y como se muestra en la imagen de la Figura 2.



**Figura 2.** Balsa Montaña del arco

Como la evaporación se calcula como una tasa por unidad de superficie (generalmente mm/m<sup>2</sup>), es preciso conocer correctamente cuál es la superficie de la lámina de agua en cada momento. En la Tabla 1 se muestra la relación entre el nivel de agua y la superficie de la lámina de agua. Con los valores de esta tabla es posible calcular, además de la cubicación de la balsa, la superficie por la que se tiene que multiplicar la tasa de evaporación y determinar la evaporación total.

| Cota Altimétrica | Superficie (m <sup>2</sup> ) |
|------------------|------------------------------|
| 911,00           | 997,501                      |
| 912,00           | 3029,744                     |
| 913,00           | 4495,886                     |
| 914,00           | 5098,917                     |
| 915,00           | 5731,142                     |
| 916,00           | 6389,609                     |
| 917,00           | 7076,015                     |
| 918,00           | 7789,649                     |
| 918,46           | 8107,122                     |
| 918,47           | 8535,518                     |
| 919,00           | 8978,268                     |
| 920,00           | 9785,288                     |
| 921,00           | 10620,947                    |
| 922,00           | 11485,241                    |
| 922,46           | 11861,877                    |
| 922,47           | 12346,581                    |
| 923,00           | 12911,141                    |

Tabla 1. Relación cota-superficie de la lámina de agua

En las proximidades de la Balsa Montaña del Arco se encuentra la estación meteorológica Montaña de las Tricias que registra datos de temperatura, precipitación, presión y humedad cada 10 minutos. Los datos de esta estación son los que se emplean en los cálculos de las diferentes tasas de evaporación (Anexo 1).

#### 4. Métodos aplicados en la Balsa Montaña del Arco

A continuación se describen muy brevemente los cuatro métodos aplicados en este trabajo. Más información sobre metodologías a la hora de estimar la evaporación se pueden encontrar, por ejemplo, en Gallego-Elvira (2011).

##### 4.1. Método de balance hídrico

Mediante el balance hídrico en una balsa se puede estimar el flujo de agua debido a la evaporación. Para ello se aplica la ecuación de continuidad de masa a un volumen de control, que es la propia balsa. Las entradas a dicho volumen de control son la precipitación ( $P$ ), las aportaciones ( $Q$ ). Mientras que las salidas son las propias derivaciones de la balsa ( $S$ ) y la evaporación ( $E$ ). Los intercambios de flujo subterráneos ( $GW$ ) pueden ser positivos si son filtraciones hacia la balsa o negativos si son hacia el acuífero. Por último, la variación de volumen ( $\Delta V$ ) al final del periodo de control puede significar una salida no contemplada, si es negativa, o una entrada no contemplada si es positiva (1).

##### 4.2. Método de transferencia de masa: Ecuación de Romanenko

La ecuación de Romanenko se enmarca dentro de los métodos de transferencia de masa o aerodinámicos (2). Éstos son los métodos más antiguos, para valorar la tasa de evaporación ( $E$ ) debido a su simplicidad, por lo que se emplean frecuentemente. Se basan fundamentalmente en el mecanismo de transporte de agua hacia la atmósfera, en función de la velocidad del viento y la variación de la presión de vapor.

Donde  $T$  es la temperatura promedio del aire en  $^{\circ}\text{C}$  y  $RH$  es la humedad relativa en porcentaje.

##### 4.3. Método simplificados basados en la radiación solar y la temperatura del aire: Turc.

Son métodos sencillos basados en datos de radiación solar y temperatura del aire, por lo que tienen baja precisión y no se recomiendan para periodos temporales cortos si se pretende una calidad de estimación aceptable. Entre ellos se encuentran la ecuación de Turc que se aplica en este trabajo (3) y que utiliza en sus cálculos la temperatura del aire ( $T$ ), la radiación solar ( $R$ ) y la humedad relativa ( $HR$ ).

Donde:

- : es un factor de corrección para zonas áridas, que depende de la humedad

relativa del mes. Si la humedad relativa es mayor a 50%, el valor es igual a 1. En el caso contrario (4):

- : es la humedad relativa media mensual en %.
- : es un factor de corrección mensual y sus valores son: 0,40 para meses de 30 y 31 días, 0,37 para febrero y 0,13 para períodos de 10 días.
- : es la temperatura media mensual del aire expresada en °C
- : es la radiación global incidente o radiación de onda corta que alcanza la superficie de la tierra, expresada en cal/cm<sup>2</sup>día.

#### 4.4. Método combinado (balance de energía y transferencia de masa): Penman

Es el método más extendido para estimar la evaporación en lámina libre. A diferencia con otras fórmulas derivadas del método de transferencia de masa, la fórmula de Penman presenta como gran ventaja que no requiere conocer temperatura superficial del agua. Por lo que asume que la humedad específica superficial se encuentra saturada a la temperatura de la superficie, permitiendo simplificar la ecuación. Por este motivo se ha generalizado su uso para el cálculo de la evaporación en cualquier cuerpo de agua, incluso en lagos, grandes embalses y embalses de riego.

Penman divide la evaporación ( $E$ ) en dos componentes (5), la componente advectiva o aerodinámica y la componente radiativa o evaporación de equilibrio :

Esta ecuación se expresa como (6):

En la que  $R_n$  es la radiación neta,  $\Delta$  es la pendiente de la curva de saturación de vapor a la temperatura de aire,  $\gamma$  la constante psicométrica, y  $\lambda$  el calor latente de vaporización. Por último, la componente advectiva ( $E_a$ ) se determina a partir de una función ( $f$ ) que depende de la velocidad del viento a 2 metros de altura y la diferencia de presión de vapor de saturación y actual (DPV) (8).

## 5. Resultados

### 5.1. Balance hídrico

La evaporación ( $E$ ) en la Balsa Montaña del Arco se estima a través del balance hídrico. La precipitación ( $P$ ) media anual del año 2017 que registró la estación meteorológica próxima (Montaña de las Tricias) fue de 361 mm, por lo que para la superficie de toda la balsa (**Tabla 1**) supone una entrada en dicho año de 4.665 m<sup>3</sup>. La balsa tiene tres aportaciones de caudal ( $Q$ ) medidas con caudalímetro (Goteras, Unión de Aguas, Excedentes Ayuntamiento). El volumen suministrado a lo largo de 2017, y registrado por los diferentes contadores de entrada, fue de 185.517,14 m<sup>3</sup> (**Tabla 2**).



| <b>Aportaciones</b>            | <b>m<sup>3</sup></b> |
|--------------------------------|----------------------|
| <i>Goteras</i>                 | 121.911,59           |
| <i>Unión de Aguas</i>          | 43.647,55            |
| <i>Excedentes Ayuntamiento</i> | 19.958,00            |
| <b>Total</b>                   | <b>185.517,14</b>    |

Tabla 2. Entradas a la Balsa Montaña del Arco en el año 2017

La balsa está debidamente impermeabilizada, por lo que se asume que no hay interacción con las aguas subterráneas, ni de entrada ni de salida ( $GW = 0$ ). El registro del contador de salida general (S) de la balsa indica un volumen de gasto de 176.435 m<sup>3</sup>, medido a la salida del embalse. Y por último, analizado la diferencia de volumen embalsado a lo largo del año, basado en los niveles registrados por la sonda instalada en la balsa y la base de datos de la cubicación (Tabla 1), esto nos arroja una pérdida de volumen embalsado de 15.650,15 m<sup>3</sup> ( $\Delta V$ ). Aplicando la formulación espuesta en la metodología, se extrae una pérdida por evaporación (E) de 29.397,29 m<sup>3</sup>. Esto supone, en términos porcentuales, una merma del 14,28 % y, en tasa de evaporación media mensual, un valor de 189,74 mm/mes.

## 5.2. Métodos de transferencia de masa, de energía y combinados

Los métodos presentados en la metodología (secciones 4.2, 4.3 y 4.4) utilizan los datos de la estación meteorológica "Montaña de las Tricias" (Anexo 1).

Los resultados del método empírico aerodinámico de masa definido por Romanenko (Tabla 3) indican una evaporación media mensual de 140,1 mm/mes que, agregada para todo el año asciende a 1.820 mm/año. Multiplicando por la superficie acontecida en cada mes de la balsa supone un volumen de evaporación total de 21.700,64 m<sup>3</sup>.

| <b>Mes</b> | <b>Evaporación (mm/mes)</b> |             |                     |               |
|------------|-----------------------------|-------------|---------------------|---------------|
|            | <b>Romanenko</b>            | <b>Turc</b> | <b>Thornthwaite</b> | <b>Penman</b> |
| Enero      | 82,0                        | 78,4        | 94,6                | 135,1         |
| Febrero    | 58,2                        | 85,5        | 71,7                | 82,2          |
| Marzo      | 115,8                       | 127,6       | 48,4                | 147,3         |
| Abril      | 90,5                        | 144,6       | 28,1                | 154,1         |
| Mayo       | 90,2                        | 159,8       | 26,7                | 165,5         |
| Junio      | 187,8                       | 194,1       | 24,5                | 214,3         |
| Julio      | 235,0                       | 219,4       | 46,1                | 275,1         |
| Agosto     | 302,7                       | 240,6       | 46,8                | 252,7         |
| Septiembre | 191,2                       | 163,9       | 56,8                | 196,7         |
| Octubre    | 147,7                       | 131,6       | 98,1                | 152,2         |
| Noviembre  | 105,1                       | 100,6       | 120,3               | 144,2         |
| Diciembre  | 74,5                        | 75,9        | 143,7               | 111,7         |

Tabla 3. Datos meteorológicos de la estación meteorológica Montaña de las Tricias y resultados del método de Romanenko.

Los resultados del método de Turc son levemente superiores a los del método de Romanenko (Tabla 3), ya que presenta una evaporación media 143,5 mm/mes. Y en el global resulta un volumen perdido a lo largo del año de 22.232,80 m<sup>3</sup>. En cambio, el método de Penman es el que proporciona unos valores superiores de evaporación (Tabla 3), en torno a 169,3 mm/mes de media, que agregados supone un volumen perdido de 26.223,34 m<sup>3</sup>. Por lo tanto, si se comparan estos valores con los realmente medidos, que son los del método de balance hídrico (29.397,29 m<sup>3</sup>), todos los métodos subestiman el valor de la evaporación siendo el de Penman el que más se ajusta a la realidad.

### 5.3. Calibración de los métodos

Los resultados que proporcionan los métodos de Romanenko, Turc y Penman difieren de los del balance hídrico, considerado como más fiable. Por tanto, se van a ajustar de forma sencilla las formulaciones aplicadas a la zona de estudio, tal y como viene siendo recomendado (De Bruin et al., 1990). Este ajuste o calibración se va a realizar comparando los volúmenes de evaporación agregados a escala anual, por lo que si se quiere emplear este coeficiente corrector en un futuro se debería hacer a la misma escala temporal. Este coeficiente concentra en un año todas las diferencias a escala mensual, por lo que tiene un efecto compensador y no se debería de aplicar a escala mensual. Para el método de Romanenko, que es el que menor volumen de evaporación anual proporciona, el coeficiente de corrección sería de 1,355. Este coeficiente indica que los resultados de este método se deben incrementar en un 35,5 % una vez aplicado con datos meteorológicos. Para el método de Turc este coeficiente se reduce levemente a 1,322 y para el método de Penman, el resultado es de 1,121. El error cometido por el método de Penman respecto al balance hídrico es el menor de los tres, solamente se desvía un 12,1 %.

## 6. Discusión

Las pérdidas por evaporación calculadas en este trabajo nos arroja el dato de 29.397 m<sup>3</sup>. Este volumen es relativamente alto para el año estudiado y refleja la pérdida de un volumen que podría ser aprovechado por los usuarios del Consorcio Balsa Montaña del Arco. De hecho, este volumen representa, aproximadamente, el agua necesaria para el cultivo de 8 hectáreas de papa canaria, que es una variedad de patata muy extendida en la zona de estudio. Si se considera la producción media de 23.000 kg/ha que estipula el agrocalbido de La Palma, supondría una cantidad de 184.000 kg de papas. El precio medio de venta se encuentra entre 0,90 €/kg, lo que implicaría un impacto económico positivo en la zona de 165.600 €/año.

A partir de este sencillo análisis puede surgir la opción de tomar medidas para prevenir las pérdidas por evaporación en balsas. Sobre todo en lugares con climas áridos o semiáridos, en los que los recursos son escasos y la competencia por su uso elevada (Pellicer-Martínez & Martínez-Paz, 2018). Para reducir la tasa de evaporación existen diversas técnicas que pueden clasificarse en físicas, operacionales, químicas y estructurales. Entre ellas están las coberturas o módulos flotantes y las coberturas de sombreado (Martínez-Alvarez et al., 2006), que reducen al mínimo los intercambios de masa y energía entre la superficie de agua y el aire que se encuentra a su alrededor,

permitiendo reducir la evaporación más de un 87%. Si se alcanzaran estos rendimientos en la Balsa Montaña del Arco, se lograría un ahorro de 25.575 m<sup>3</sup> que podrían servir para aumentar la zona de regadío o para ayudar a mitigar los desequilibrios interanuales producidos en la zona de estudio.

## 7. Conclusiones

Los resultados que han proporcionado los métodos aplicados (Romanenko, Turc, Penman) mediante modelización matemática son menores que el que arroja el método de balance hídrico, considerado más fiable al proceder su resultado de mediciones de campo. Por lo que se puede deducir, para este caso concreto, que estos métodos subestiman la tasa de evaporación, debiendo ser corregidos por unos coeficientes. El método de Penman es el que comete el menor error, sólo un 12,1 %. Esto indica que si bien es el método más complejo, al requerir más información meteorológica, también es el que mejor aproxima esta variable, por lo que en caso de disponer de información para aplicarlo se debe recurrir a él frente a otros más sencillos.

Los resultados para el caso particular estudiado en la Balsa Montaña del Arco indican que la evaporación en dicho embalse constituye una pérdida anual de 29.397 m<sup>3</sup>, suponiendo este valor el 30% de la capacidad de embalsamiento disponible. Esto evidencia que existe la necesidad de barajar la opción de realizar una cubierta para reducir las pérdidas producidas en el embalse.

## Referencias:

- BRUTSAERT W. Hydrology: An Introduction. Cambridge University Press, 2005, pp. 618. ISBN: 1107268796
- DE BRUIN H. Temperature and energy balance of a water reservoir determined from standard weather data of a land station. En: *Journal of Hydrology*, 1982, nº59, pp. 261–274.
- GALLEGO-ELVIRA B. Análisis de la evaporación en embalses de riego y de su reducción con cobertura sombrero. Directores: Alain Baile y Victoriano Martínez Álvarez. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Forestal, 2011.
- CIAP. Plan Hidrológico Insular de La Palma de segundo ciclo (2015-2021) [en línea], Consejo Insular de Aguas de La Palma (CIAP) [ref. 10 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://lapalmaaguas.com/planificacion/planificacion-hidrologica/>
- HOBBS M, HUNTINGTON J. Evapotranspiration and Evaporative Demand. En: Handbook of applied Hydrology, Second Edition, Nueva York: McGraw-Hill Education. 2016.
- LINSLEY RK, KOHLER MA, PAULUS LH. Hidrología para Ingenieros. Kohler, Max A.; Paulhus, Joseph L.; Fe Serra, Miguel (trad.); Domínguez Aparicio, Francisco (trad.); New York: McGraw-Hill, 1967. 348 p.
- MARTÍNEZ-ALVAREZ V, BAILLE A, MOLINA MARTÍNEZ JM, GONZALEZ- REAL M. Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces.



En: *Agricultural Water Management*, 2006, n° 84, pp. 229–239.

PELLICER-MARTÍNEZ F, MARTÍNEZ-PAZ JM.. Probabilistic evaluation of the water footprint of a river basin: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain. En: *Science of the Total Environment*, 2018, n° 627: 28-38.

STANHILL G. Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements. En: *Agricultural and forest Meteorology*. 2002, n° 112, 233-236.

TUCCI, CEM. Hidrologia, ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora UFRGS/EDUSP/ABRH, 1993. 952p.

## Anexo 1. Datos de la estación meteorológica de Montaña de las Tricias

| Variables  | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temperatura media °C   | 10,79 | 10,51 | 13,81 | 13,63 | 14,50 | 20,08 | 22,37 | 25,53 | 21,12 | 18,33 | 15,44 | 11,24 |
| Calor vaporización "Cv" (MJ/kg)                                | 2,48  | 2,48  | 2,47  | 2,47  | 2,47  | 2,45  | 2,45  | 2,44  | 2,45  | 2,46  | 2,46  | 2,47  |
| Velocidad del viento a 2 m (m/s)                               | 8,52  | 3,84  | 3,84  | 3,84  | 3,84  | 3,84  | 4,67  | 3,84  | 3,84  | 3,84  | 6,85  | 7,68  |
| Tensión de vapor saturación T (máxima kPa "e <sup>om</sup> ")  | 2,20  | 2,34  | 3,36  | 3,57  | 3,17  | 4,49  | 5,94  | 6,27  | 5,32  | 4,01  | 3,17  | 2,20  |
| Tensión de vapor saturación t (mínima) kPa "e <sup>om</sup> ") | 0,94  | 0,94  | 0,87  | 0,94  | 1,07  | 1,31  | 1,31  | 1,50  | 1,40  | 1,40  | 1,31  | 0,94  |
| Tensión de vapor real kPa "ea"                                 | 1,01  | 1,22  | 1,21  | 1,49  | 1,44  | 1,41  | 1,52  | 1,33  | 1,68  | 1,52  | 1,44  | 1,07  |
| DPV = e <sup>o</sup> -ea                                       | 0,56  | 0,42  | 0,90  | 0,76  | 0,68  | 1,49  | 2,11  | 2,56  | 1,68  | 1,18  | 0,80  | 0,49  |
| Función del viento "f(u)"                                      | 26,99 | 12,19 | 12,05 | 12,06 | 12,02 | 11,79 | 14,23 | 11,58 | 11,75 | 11,86 | 21,37 | 24,32 |
| Eadv   | 15,04 | 5,11  | 10,90 | 9,13  | 8,19  | 17,57 | 30,03 | 29,63 | 19,72 | 14,02 | 17,09 | 12,01 |
| Radiación neta "R <sub>n</sub> "                               | 6,36  | 9,55  | 12,46 | 15,79 | 17,34 | 17,51 | 17,17 | 15,36 | 13,94 | 10,74 | 7,67  | 5,77  |
| Gradiente presión vapor satur "Gsv" (kPa/°C)                   | 0,20  | 0,29  | 0,33  | 0,33  | 0,34  | 0,41  | 0,41  | 0,48  | 0,43  | 0,39  | 0,27  | 0,21  |
| Constante Psicrométrica kPa/°C                                 | 0,21  | 0,31  | 0,29  | 0,29  | 0,29  | 0,25  | 0,23  | 0,22  | 0,25  | 0,26  | 0,22  | 0,22  |