

## **MODELIZACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN EN LOS EMBALSES DE LA PROVINCIA DE MÁLAGA**

Julián MOLINA<sup>1</sup>, José D. RUIZ SINOGA<sup>2</sup> y José A. SILLERO MEDINA<sup>2</sup>  
<sup>2</sup>*Laboratorio de Geomorfología y Suelos. Geografía. Universidad de Málaga. Avda.  
Arquitecto Peñalosa. Edificio Ada Byron, B-1-5.*  
<sup>1</sup>*Departamento de Economía Aplicada. Matemáticas. Universidad de Málaga.  
Facultad de Económicas.*

[julian.molina@uma.es](mailto:julian.molina@uma.es), [sinoga@uma.es](mailto:sinoga@uma.es), [jasillero@uma.es](mailto:jasillero@uma.es)

### **RESUMEN**

En este trabajo, partiendo de la modelización hidrológica, hemos elaborado un modelo de aprovechamiento de la lluvia en las cuencas vertientes de los embalses de la provincia de Málaga. Para ello hemos utilizado los datos de las aportaciones mensuales de los siete embalses de la provincia de Málaga, suministrados por la Red SAIH-Hidrosur, así como la precipitación y temperatura diaria de las estaciones de AEMET asociadas a las cuencas de cada uno de estos embalses. Hemos supuesto que la aportación a un embalse en un mes determinado debe depender de la temperatura de ese mes, de la lluvia de ese mes, la cantidad que ha caído y la intensidad con la que ha caído, así como la lluvia caída los meses anteriores, y la forma en que ha caído en esos meses anteriores. De esta forma, para cada embalse, planteamos un modelo en el que suponemos que hay tres factores de aprovechamiento de la lluvia, inferior, medio y superior, que dependen de que la precipitación diaria quede por debajo, entre o por encima de dos niveles determinados de precipitación, inferior y superior, así como del nivel de evapotranspiración en esa zona y en ese mes. Este modelo utiliza 23 parámetros, entre niveles de aprovechamiento, evapotranspiración y precipitación en los meses anteriores, que se ajustan a sus valores óptimos mediante un algoritmo de inteligencia artificial, que maximiza la correlación entre la aportación real y la simulada. Finalmente, se analizan los resultados para los distintos embalses.

**Palabras clave:** Embalses, Aprovechamiento, Hidrología de Suelos, Agua Útil, inteligencia artificial, ajuste paramétrico.

### **ABSTRACT**

In this work, based on hydrological modeling, we have elaborated a model of rainfall use in the catchment basins of the reservoirs of the province of Malaga. For this purpose, we have used the monthly inflow data of the seven reservoirs of the province of Malaga, supplied by the SAIH-Hidrosur Network, as well as the daily precipitation and temperature of the AEMET stations associated with the catchment areas of each of these reservoirs. We have assumed that the contribution to a reservoir in a given month should depend on the temperature of that month, the rainfall of that month, the amount that has fallen and the intensity with which it has fallen, as well as the rainfall in previous months, and the way it has fallen in those previous months. Thus, for each

reservoir, we propose a model in which we assume that there are three rainfall utilization factors, lower, middle and upper, which depend on the daily rainfall being below, between or above two given levels of rainfall, lower and upper, as well as the level of evapotranspiration in that area and in that month. This model uses 23 parameters, including levels of utilization, evapotranspiration and precipitation in previous months, which are adjusted to their optimal values by means of an artificial intelligence algorithm, which maximizes the correlation between the real and simulated contribution. Finally, the results are analyzed for the different reservoirs.

**Key words:** Reservoirs, Reservoir Development, Soil Hydrology, Useful Water, artificial intelligence, parametric adjustment.

## **1. INTRODUCCIÓN**

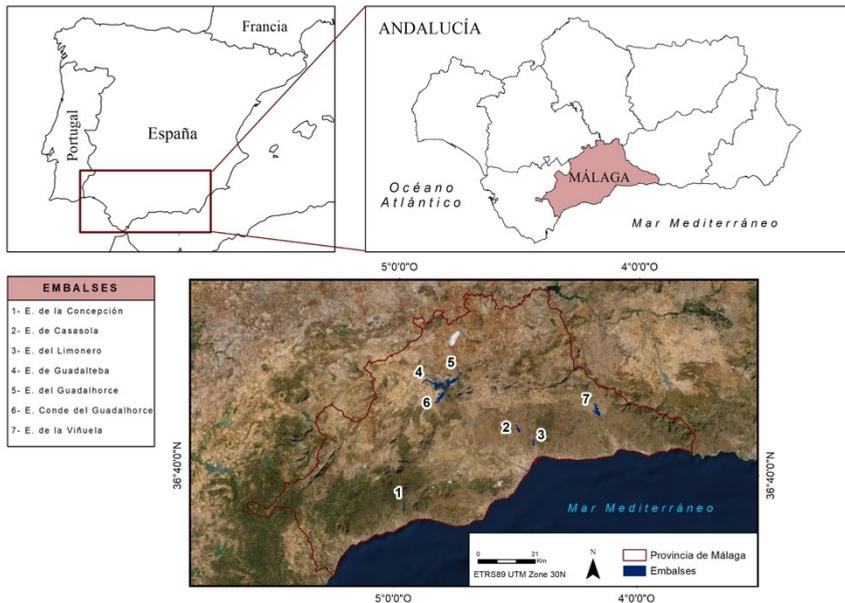
España y, más concretamente, la cuenca mediterránea, es catalogada, según el IPCC (2014, 2021), como zona de gran incertidumbre en el marco del cambio climático. Este informe proyecta para la región un aumento de los riesgos asociados al ascenso de la temperatura, la modificación en la dinámica pluviométrica y, en consecuencia, una reducción de la disponibilidad de recurso hídrico en todo el Mediterráneo. En esta línea, se espera también un incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos considerados extremos (Meehl et al., 2007; Ruiz-Sinoga et al., 2011; Fischer y Knutti, 2015), como, por ejemplo, un aumento de las rachas secas, de periodos extremos de sequías, las temperaturas anómalas, olas de calor, eventos torrenciales, noches ecuatoriales y tropicales, etc. (Beniston, 2004; Schär et al., 2004; González-Hidalgo et al., 2015, Marcos-García et al., 2017).

Estas modificaciones climáticas están dando lugar a una evolución hacia el déficit hídrico y hacia una mayor aridez del territorio (Moreno, 2005; Hueso-González et al., 2018). Así, los riesgos asociados al agua serán uno de los problemas más destacables en la sociedad (IPCC, 2014, 2021), que generarán una mayor preocupación en la población y en la investigación actual (Guijarro-Pastor, 2002; Katz et al., 2005; Negri et al., 2005; De Luis et al., 2011; Coscarelli y Caloiero, 2012; Lemus y López, 2016; Olcina, 2017). Bajo estas consideraciones, la disponibilidad de agua en el área mediterránea se concibe como uno de los aspectos de mayor relevancia en el contexto del Cambio Global, especialmente por la alta dependencia que presentan sectores como la agricultura (España es el país de la UE con mayor superficie regada) o el turismo de este recurso (Pulido-Velázquez et al., 2020). El acusado desajuste espaciotemporal entre la disponibilidad y la demanda de recursos hídricos ha dado lugar a un importante desarrollo de infraestructuras hidráulicas en toda España (Pulido-Velázquez et al., 2020). La importante tradición agrícola como su potencial hidroeléctrico han jugado un papel clave en la construcción de un gran número de embalses (Iglesias et al., 2005), generando una enorme tradición en materia de usos del agua. No obstante, el impacto del cambio climático está jugando un papel transcendental sobre estas reservas hídricas, poniendo en riesgo su actual potencialidad y capacidad de explotación (Garrote et al., 1999). Así, los embalses, pese a su localización específica, pueden ser objeto de modelizaciones para conocer la situación hídrica de áreas geográficas de mayor extensión alcanzando escalas de

cuenca o subcuenca. La elaboración de predicciones sobre la disponibilidad y las variaciones del agua en el territorio en estas reservas hídricas son de gran interés (Qin et al., 2020), especialmente en un paradigma de crisis climática, energética y alimentaria (SPANCOLD, 2013). Estas metodologías ofrecen resultados trascendentales para llevar a cabo una correcta planificación y gestión del territorio desde una perspectiva sostenible y en consecuencia con los objetivos y metas de Desarrollo Sostenible, impulsados por la Organización de las Naciones Unidas en la Agenda 2030. En base a estas modificaciones climáticas, con mayor atención a los cambios en el patrón y dinámica pluviométrica y a la actual preocupación por los riesgos hídricos y la disponibilidad de agua, el presente estudio pretende estudiar la relación entre el nivel de precipitación y el aporte a los embalses en la provincia de Málaga, es decir, elaborar un modelo para conocer la forma en que cada embalse aprovecha la lluvia que cae en su cuenca de atracción, para determinar qué episodios e intensidades de precipitación tienen una mejor respuesta en el nivel de cada embalse en la provincia de Málaga.

## 2. DATOS

En primer lugar, en cuanto a los datos utilizados, toda la información sobre los embalses proviene de la Red SAIH (<http://www.redhidrosurmedioambiente.es>), siglas del Sistema Automático de Información Hidrológica, que registra los datos de la aportación mensual, es decir, el total de agua, en Hm<sup>3</sup>, que llega a los embalses cada mes, para cada uno de los siete embalses de Málaga, que se muestran a continuación:



*Fig. 1: Embalses de la provincia de Málaga.*

Estos datos mensuales abarcan distintos períodos de tiempo, que se muestran en la siguiente tabla:

<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Año Ini</b>	<b>Año Fin</b>
1	EMBALSE DE LA CONCEPCIÓN	1970	2020
2	EMBALSE DE CASASOLA	2004	2020
3	EMBALSE DEL LIMONERO	1983	2020
4	EMBALSE DEL GUADALTEBA	1974	2010
5	EMBALSE DEL GUADALHORCE	1973	2010
6	EMBALSE CONDE DE GUADALHORCE	1974	2010
7	EMBALSE DE LA VIÑUELA	1992	2020

Tabla 1: Embalses de la provincia de Málaga, y horizonte temporal de los datos.

Puesto que los datos de los embalses están en  $\text{Hm}^3$  y los datos de precipitación de las estaciones están en litros por metro cuadrado, vamos a normalizar ambas cantidades, eliminando la unidad de medida, para poder establecer un modelo que compare ambas magnitudes. Así, para cada embalse normalizamos los datos de las aportaciones de la siguiente forma:

$$AportN_i = \frac{(Aport_i - \min)}{(max - \min)}$$

Donde *max* y *min* son respectivamente la máxima y mínima aportación en ese embalse durante todo su horizonte de estudio. De esta forma, la aportación máxima pasa a ser 1, la aportación mínima pasa a ser 0, y el resto toma valores intermedios.

En cuanto a los datos de precipitación, utilizaremos datos de precipitación diaria de las estaciones de AEMET asociadas a la cuenca de cada embalse, que por motivos de espacio no mostramos, pero que abarcan toda la cuenca y todo el horizonte temporal de cada uno de los embalses. De nuevo, estos datos de precipitación se normalizan también entre 0 y 1, para eliminar la unidad de medida. Para ello, análogamente, se normaliza utilizando la máxima y mínima precipitación de todas las estaciones asociadas al embalse en todo el período de estudio:

$$pN_i = \frac{(p_i - \min)}{(max - \min)}$$

Por otra parte, cada observación de precipitación normalizada,  $pN_{ij}$ , se asocia a la observación de aportación del embalse correspondiente a su mismo mes y año. Así, para cada dato  $AportN_i$ , correspondiente a un mes y año, tenemos un número  $n_i$  de datos de precipitación,  $pN_{ij}$ ,  $j=1, \dots, n_i$ , correspondientes a las estaciones meteorológicas asociadas a ese embalse en ese mes y año.

Finalmente, en cuanto a los datos de temperatura, tenemos asimismo datos de temperatura diaria de las estaciones de AEMET asociadas a la cuenca de cada embalse, que por motivos de espacio tampoco mostramos, pero que abarcan toda la cuenca y todo el horizonte temporal de cada uno de los embalses. Puesto que el fenómeno que queremos modelizar es la pérdida de aportaciones de un embalse en un

mes determinado debido a la evotranspiración, que es un fenómeno que depende de la temperatura, lo que hemos hecho es calcular la temperatura media de cada cuenca embalse en cada mes en todo el horizonte temporal,  $tm_i$ . De nuevo, estos datos de temperatura media mensual se normalizan también entre 0 y 1, para eliminar la unidad de medida. Para ello, análogamente, se normaliza utilizando la máxima y mínima temperatura media mensual de todas las estaciones asociadas al embalse en todo el periodo de estudio:

$$tmN_i = \frac{(tm_i - \min)}{(\max - \min)}$$

### 3. MODELO MATEMÁTICO

En esta sección vamos a describir el modelo matemático propuesto para el aprovechamiento de la precipitación en los siete embalses de la provincia de Málaga. En primer lugar, tenemos  $NumObsEmb$  datos mensuales normalizados de aportación al embalse,  $AportN_i$ ,  $i=1, \dots, NumObsEmb$ . Cada una de estas observaciones se corresponde con un mes y un año del período de estudio, del que tenemos la temperatura media normalizada,  $tmN_i$ . Por otra parte, tenemos  $n_i$  observaciones de precipitación normalizadas correspondientes a ese embalse en ese mes y año. Y lo que queremos es relacionar esas aportaciones con esas precipitaciones y con la temperatura media de ese mes, para cada uno de los meses en los que tenemos datos, para intentar averiguar cómo se traducen las precipitaciones en aportaciones al embalse en cada caso. Proponemos el siguiente modelo:

- En primer lugar, vamos a fijar tres niveles de aprovechamiento, lluvia débil, lluvia normal y lluvia fuerte, según que estén por debajo, entre o por encima de los siguientes valores:

- Lluvia débil: por debajo de  $NI$
- Lluvia normal: por encima de  $NI$  y por debajo de  $NS$
- Lluvia fuerte: por encima de  $NS$

Estos dos valores,  $NI$  y  $NS$ , son los dos primeros parámetros del modelo, que habrá que ajustar. Para cada uno de esos tipos de lluvia, débil, normal o fuerte, vamos a suponer que hay un nivel de aprovechamiento distinto,  $AI$ ,  $AN$  y  $AS$ , que son los 3 siguientes parámetros para ajustar del modelo. Lo que supondremos es que el embalse aprovecha un  $AI\%$  de la lluvia débil, un  $AN\%$  de la lluvia normal y un  $AS\%$  de la lluvia fuerte. Es decir, para un mes determinado, supondremos que el aprovechamiento es:

$$Aprov_i = \sum_{k=1}^{n_i} Factor_k * pN_k, \text{ donde:}$$

$$Factor_k = \begin{cases} AI & \text{si } p_k < NI \\ AN & \text{si } p_k \geq NI \text{ y } p_k \leq NS \\ AS & \text{si } p_k > NS \end{cases}$$

Por otra parte, supondremos que parte de esa precipitación se pierde en forma de evapotranspiración, que será tanto mayor cuanto mayor sea la temperatura media de ese mes, dependiendo de un parámetro,  $PesoEvapo$ , que mide la sensibilidad el embalse a la temperatura:

$$Aprov_i = Aprev_i - PesoEvapo * tmN_i$$

Finalmente, el nivel de aportación en un embalse no depende únicamente de la precipitación de ese mes, sino que puede haber aportaciones que se deben a

precipitaciones del pasado que tardan cierto tiempo en llegar al embalse, ya sea por los cauces de los ríos o por infiltración a través del suelo. De la misma forma, entendemos que el aprovechamiento de la precipitación será mayor o menor según las condiciones de humedad del suelo debidas a la precipitación de los meses anteriores. Un suelo más húmedo permite aprovechar mejor la precipitación actual. Por ello, en nuestro modelo consideraremos que el aprovechamiento final es una función de la precipitación del mes actual y de los cinco meses anteriores. Para ello, asumiremos que el embalse aprovecha una cierta proporción de la lluvia del mes actual,  $R_0$ , más una cierta proporción de la lluvia de los cinco meses anteriores:  $R_{-i}$ ,  $i=1, \dots, 5$ :

$$AprovFinal_i = \sum_{k=0}^5 R_{-k} * Aprov_{i-k}$$

Para ajustar estos 6 parámetros, asumimos que  $R_0 = 1$  y que a partir de ahí los  $R_{-i}$  van en proporción decreciente. Es decir, que lo que más se aprovecha es la lluvia de ese mes y que de los meses anteriores se aprovecha una proporción cada vez menor. Para ello, proponemos que cada uno de los  $R_{-i}$  se calcule de la siguiente forma:

$$R_{-i} = (R_{-i+1})^\alpha, i = 2, \dots, 5$$

Es decir, cada  $R_{-i}$  a partir de  $R_{-2}$  se calcula como el  $R_{-i}$  anterior elevado a una potencia  $\alpha$  del anterior. Esto nos permite calcular una serie decreciente de  $R_{-i}$  solo ajustando 2 parámetros:  $R_{-1}$  y  $\alpha$ . Con este modelo, para cada embalse tenemos, por tanto, 8 parámetros que ajustar:

- $NI$  y  $NS$ , los umbrales para el tipo de lluvia débil, normal y fuerte.
- $AI$ ,  $AN$  y  $AS$ , los factores de aprovechamiento para cada tipo de lluvia.
- $PesoEvapo$ , el factor de evapotranspiración.
- $R_{-1}$  y  $\alpha$ , la influencia en el aprovechamiento de la precipitación de los meses anteriores.

En definitiva, para calibrar el modelo para cada embalse necesitamos encontrar los valores óptimos de estos 8 parámetros. Para ello hemos implementado en Python un algoritmo de búsqueda local, que trata de encontrar estos valores óptimos construyendo el índice,  $AprovFinal_i$ , para cada combinación de parámetros, y calculando su correlación con el aprovechamiento real conocido,  $AportN_i$ . Es decir, hemos implementado un algoritmo de búsqueda local para encontrar, para cada embalse, los parámetros que maximizan la correlación entre la aportación calculada por nuestro modelo y la aportación real del embalse.

#### 4. RESULTADOS

En la siguiente tabla, mostramos los resultados para cada embalse, así como la correlación final del modelo para cada uno de ellos:

En primer lugar, lo que observamos es que el modelo ajusta bien. Para los embalses de Concepción, Casasola y Viñuela, la correlación entre la aportación del modelo y la real es de más de 0.8, 0,77 en el caso del Limonero, más de 0.6 en Guadalteba y Conde de Guadalhorce, y el único caso donde baja ligeramente de 0.6 es en el embalse del Guadalhorce.

Param	CONCEPCIÓN	CASASOLA	LIMONERO	GUADALTEBA	GUADALHORCE	CONDE DE GUAD	VIÑUELA
ROpt	0.8348	0.8217	0.7746	0.6706	0.5827	0.6244	0.8287
PesoEvapo	0.938	0.744	0.319	0.667	0.769	0.256	0.985
AS	0.492	0.127	0.634	0.502	0.635	0.840	0.809
AN	0.440	0.674	0.083	0.063	0.023	0.113	0.135
AI	0.068	0.199	0.283	0.435	0.342	0.047	0.056
NS	172.55	137.12	112.27	249.97	244.10	155.10	147.81
NI	50.20	78.93	0.97	2.28	38.27	61.95	9.53
R-1	63.0%	54.0%	68.4%	86.4%	37.8%	92.7%	84.6%
R-2	9.9%	29.2%	46.8%	64.6%	5.4%	68.3%	51.2%
R-3	0.0%	8.5%	21.9%	26.9%	0.0%	14.9%	6.9%
R-4	0.0%	0.7%	4.8%	2.0%	0.0%	0.0%	0.0%
R-5	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 2: Resultados para cada embalse. Valor óptimo de R (ROpt), Peso de la Evapotranspiración (PesoEvapo) AI, AN, AS: factores de aprovechamiento. NI, NS: umbrales del tipo de lluvia. R-i: influencia de la precipitación de los meses anteriores.

Se puede decir que el modelo ajusta bien a los datos reales, salvo quizá algo menos en el caso del embalse de Guadalhorce. En segundo lugar, vemos que la sensibilidad a la evapotranspiración es muy distinta según el embalse, yendo desde casi 1 (el máximo del parámetro) en Viñuela o Concepción, a 0.256 en el caso de Conde de Guadalhorce. Es decir, el efecto de la evapotranspiración puede ser muy distinto para cada embalse, y eso es clave por dos motivos:

- Un cambio en las fechas en las que se produce la precipitación, hacia meses más cálidos producirá aprovechamiento sensiblemente peor en aquellos embalses con más sensibilidad a la temperatura, como Concepción o Viñuela.

- El calentamiento global producirá, en general, un peor aprovechamiento de la precipitación en todos ellos.

En cuanto a los niveles de aprovechamiento, observamos también una gran variedad en los valores, dependiendo del embalse, tanto en los niveles superiores como inferiores. El nivel superior varía entre los 112 litros del Limonero a los casi 250 litros de Guadalteba. De la misma forma, los niveles inferiores varían desde los prácticamente cero del Limonero hasta los casi 80 de Casasola. Esto quiere que hay embalses para los que realmente solo hay dos tipos de lluvia, como es el caso de Limonero: menor de 112 litros o mayor de 112 litros. Y hay otros, como Guadalteba, para los que realmente solo hay un único intervalo de aprovechamiento: entre 2 y 250 litros. Más adelante en esta sección analizaremos estos niveles junto con la precipitación real en cada uno de los intervalos que conforman. En cuanto a los factores de aprovechamiento, vemos de nuevo que se observan dinámicas muy distintas. En algunos casos, como el Limonero, vemos que en dos intervalos consecutivos, lluvia normal y lluvia fuerte,

los coeficientes son casi idénticos, lo cual quiere decir que realmente solo hay dos intervalos de aprovechamiento: lluvia mayor de 50 litros, donde se aprovecha con un factor de 0.44~0.49, y lluvia menor de 50 litros, que se aprovecha a un nivel muy inferior, 0.06. En otros casos, como Guadalhorce, vemos que realmente solo hay dos intervalos también, lluvia mayor de 38 litros, que se aprovecha muy poco, con un factor de 0.02, y lluvia menor de 38 litros, que es donde el factor es realmente determinante, 0.34. Por encima de 244 litros el factor es mucho mayor, pero es que realmente no hay prácticamente lluvia por encima de 244 litros en un día en esa cuenca. En general, lo que podemos ver con claridad en esta tabla es cuál es el intervalo donde el embalse aprovecha realmente la precipitación. Por encima de 50 litros en Concepción, por encima de 80 en Casasola, por debajo de 38 en Guadalhorce o por encima de 60 en Conde de Guadalhorce. Más adelante en esta sección analizaremos esta información conjuntamente con la cantidad de lluvia que se produce en cada uno de esos intervalos. Finalmente, en cuanto al aprovechamiento de la lluvia de meses anteriores, o el efecto en el aprovechamiento de la lluvia actual por efecto de la lluvia de meses anteriores, vemos también una gran variedad de patrones. Hay embalses como la Concepción, que solo aprovechan la lluvia del mes anterior, o, viéndolo de otra forma, que no tienen un mayor aprovechamiento de la lluvia actual por venir de un período de varios meses de lluvia. Hay embalses, sin embargo, como Limonero cuyo aprovechamiento del mes actual se ve incrementado por las precipitaciones de hasta cuatro meses atrás. Esto se puede deber a que parte de la precipitación tarda hasta cuatro meses en llegar al embalse, o a que una precipitación sobre un suelo que viene de tres meses de lluvias llega de forma más eficiente al embalse. Esta información también resulta clave en el aprovechamiento de la precipitación, porque si la esta tiene a concentrarse en menos meses, embalses como el Limonero tendrán un peor aprovechamiento, puesto que son sensibles a la precipitación recibida hasta cuatro meses atrás. Es decir, tienen un mayor aprovechamiento si los períodos de lluvia abarcan hasta cuatro meses. Por el contrario, embalses como la Concepción sufrirían menos por una mayor concentración de la lluvia. Tal y como se ha señalado antes, otro aspecto importante es considerar qué porcentaje de lluvia recibe cada embalse en cada uno de los intervalos de lluvia fijados por el modelo,  $pI$ ,  $pN$ ,  $pS$ . Esto nos permite además calcular un índice de aprovechamiento de la precipitación para cada embalse, teniendo en cuenta el factor de aprovechamiento y el porcentaje de lluvia de cada uno de esos intervalos. Un embalse será tanto más eficiente recogiendo la precipitación cuanto mayor sea la suma de los productos de los factores de aprovechamiento de cada intervalo por la proporción de lluvia en ese intervalo. Por otra parte, el aprovechamiento de un embalse será también tanto mejor cuanto menor sea su sensibilidad a la evapotranspiración. Teniendo todo esto en cuenta, podemos calcular un índice de aprovechamiento de la precipitación,  $IAP$ , para cada embalse de la siguiente forma:

$$IAP = \frac{pI * AI + pN * AN + pS * AS}{PesoEvapo}$$

Y la siguiente tabla muestra los porcentajes de aprovechamiento de cada embalse, así como sus Índices de Aprovechamiento de la Precipitación:

Embalse	CONCEPCIÓN	CASASOLA	LIMONERO	GUADALTEBA	GUADALHORCE	CONDE DE GUAD	VIÑUELA
R <sub>Opt</sub>	0.8348	0.8217	0.7746	0.6706	0.5827	0.6244	0.8287
PesoEvapo	0.938	0.744	0.319	0.667	0.769	0.256	0.985
AS	0.492	0.127	0.634	0.502	0.635	0.840	0.809
AN	0.440	0.674	0.083	0.063	0.023	0.113	0.135
AI	0.068	0.199	0.283	0.435	0.342	0.047	0.056
p <sub>S</sub>	0.96%	1.63%	1.36%	0.42%	0.15%	0.75%	0.23%
p <sub>N</sub>	23.74%	1.90%	98.05%	96.39%	17.75%	8.63%	81.24%
p <sub>I</sub>	75.30%	96.47%	0.58%	3.19%	82.09%	90.62%	18.53%
<b>IAP</b>	<b>0.171</b>	<b>0.278</b>	<b>0.286</b>	<b>0.116</b>	<b>0.372</b>	<b>0.229</b>	<b>0.123</b>

*Tabla 3: IAP y porcentajes de lluvia en cada intervalo para cada embalse.*

Esto nos permite determinar que el embalse más eficiente para recoger la precipitación es Guadalhorce, seguido de Limonero. Nos muestra también que los dos embalses más ineficientes son Guadalteba y Viñuela, y que para algunos embalses, como Limonero, Casasola o Guadalteba, prácticamente toda la precipitación se concentra en un solo intervalo, con porcentajes por encima del 95% de la lluvia total.

## 5. DISCUSIÓN

En este trabajo hemos elaborado un modelo para representar la relación entre el nivel de precipitación y el aporte a los embalses en la provincia de Málaga, es decir, un modelo para simular la dinámica por la que cada embalse aprovecha la lluvia que cae en su cuenca de atracción. Este modelo ha sido ajustado para cada embalse mediante un algoritmo de búsqueda local, ofreciendo un buen ajuste final, en algunos casos incluso superior al 0.8. Una vez ajustado, el modelo nos permite determinar qué episodios e intensidades de precipitación tienen una mejor respuesta en el nivel de cada embalse en la provincia de Málaga, así como la sensibilidad de cada uno de ellos a la temperatura media. Esta información consideramos que puede ser de suma importancia a la hora de predecir a largo plazo el nivel de dichos embalses, puesto que nos permite predecir cómo afectarán los cambios futuros en el patrón de precipitación y temperatura al aprovechamiento de la precipitación de cada uno de ellos. Es decir, nos permite predecir cómo se verá reducida la cantidad de agua que llega al embalse no solo por una reducción en la precipitación, sino también por una concentración de la misma, un aumento de la torrencialidad o a un aumento de las temperaturas, que son escenarios que debemos esperar en los próximos años, teniendo en cuenta las previsiones del IPCC. De hecho, la próxima etapa de este proyecto consistirá en integrar dichos escenarios en el modelo para cada uno de los embalses, para poder analizar así los escenarios futuros para el nivel de estos embalses.

## REFERENCIAS

- Beniston, M. (2004). The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, 31, 2022–2026.
- Coscarelli, R.; Caloiero, T. (2012). Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy, Calabria region. *Journal of Hydrology*, 416–417, 145–156.
- De Luis, M.; Gonzalez Hidalgo J.C.; Brunetti, M.; Longares, L.A. (2011). Precipitation concentration changes in Spain 1946–2005. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1259–1265.
- Fischer, E. M.; Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy precipitation and high-temperature extremes. *Nat Clim Chang*, 5, 560–564.
- Garrote, L., Rodríguez, I.C., & Estrada, F. (1999). Una evaluación de la capacidad de regulación de las cuencas de la España peninsular. VI Jornadas Españolas de Presas. Vol.2, Málaga, pp. 645–656.
- González Hidalgo, J.C.; Peña Angulo, D.; Brunetti, M.; Cortesi, N. (2015). MOTEDAS: A new monthly temperature database for mainland Spain and the trend in temperature (1951–2010). *International Journal of Climatology*, 35, 4444–4463.
- Guijarro Pastor, J.A. (2002). Tendencias de la precipitación en el litoral mediterráneo español. In *El Agua y el Clima* (pp. 237–246). En J. A. Guijarro, M. Grimalt, M. Laita, S. Alonso (Eds.), *El Agua y el Clima*, AEC, Serie A, 3 (pp. 427–436). Palma de Mallorca: Gráficas Loyse.
- Hueso González, P.; Martínez Murillo, J.F.; Muñoz Rojas, M. (2018). The role of Organic amendments in drylands restoration. *Current Opinion in Environmental Sciences and Health*, 5, 1–6.
- Iglesias, A., Estrela, T., & Gallart, F. (2005). Impactos sobre los recursos hídricos. Evaluación Preliminar de los Impactos en España for Efecto del Cambio Climático, 303–353.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Fifth Assessment Report.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*.
- Katz, R.; Brush, G.; Parlange, M. (2005). Statistics of extremes: Modeling ecological disturbances. *Ecology*, 86, 1124–1134.
- Lemus-Canovas, M.; Lopez-Bustins, J. (2016). Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en el sur de Cataluña y su relación con la oscilación del mediterráneo occidental (WEMO). In: *Actas del X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*. Alicante.
- Marcos-García, P., Lopez-Nicolas, A., Pulido-Velazquez, M., 2017. Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology* 554, 292–305.
- Meehl, G.A.; Stocker, T.F.; Collins, W.D.; Friedlingstein, P.; Gaye, A.T.; Gregory, J.M.; ... Zhao, C.Z. (2007). Global Climate Projections. En S. Solomon, D., Qin, M., Manning, Z., Chen, M., Marquis, K.B., Averyt, M., Tignor, & H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I*

to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 747–846). Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Moreno, J. M. (2005). Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid: Universidad de Castilla-La Mancha.

Negri, D.H.; Gollehon, N.R.; Aillery, M.P. (2005). The effects of climatic variability on US irrigation adoption. *Climatic Change*, 69, 299–323.

Olcina Cantos, J. (2017). Incremento de episodios de inundación por lluvias de intensidad horaria en el sector central del litoral mediterráneo español: análisis de tendencias en Alicante. *Sémata. Ciências Sociais e Humanidades*, 29, 143–163.

Pulido-Velázquez, M., Escrivá-Bou, A., & Macián Sorribes, H. (2020). Balance hídrico actual y futuro en las cuencas en España, déficits estructurales e implicaciones socioeconómicas. *Studies on the Spanish Economy* eee2020-38, FEDEA.

Qin, P., Xu, H., Liu, M., Du, L., Xiao, C., Liu, L., Tarroja, B. (2020) Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation, *Journal of Hydrology*, 580, 123922. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.123922.

Ruiz Sinoga, J. D., García Marín, R., Martínez Murillo, J. F., & Gabarron Galeote, M. A. (2011). Precipitation dynamics in southern Spain: Trends and cycles. *International Journal of Climatology*, 31, 2281–2289.

Schär, C.; Vidale, P.L.; Lüthi, D.; Frei, C.; Häberli, C.; Liniger, M.; Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332–336.

SPANCOLD. Comité Nacional Español de Grandes Presas (2013). Embalses y planificación hidrológica: Grandes Cuestiones. Jornada Técnica: Sostenibilidad económica de presas y embalses.