

Tendencias en la evapotranspiración y en el índice estandarizado de precipitación- evaporación (SPEI) en Asturias, 1970-2019

Diego González-Álvarez^{1*}, Sixto Herrera García², Arturo Colina Vuelta³, Fernando González Taboada⁴

¹Cátedra de Cambio Climático (CuCC), Universidad de Oviedo. E-mail: diegoglez.ep@gmail.com

²Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria.

³Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT), Campus de Mieres, C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, España.

⁴Centro Oceanográfico de Gijón, Instituto Español de Oceanografía-CSIC, 33212 Asturias, España.

* Autor al que debe dirigirse la correspondencia

Recibido: 23 de septiembre de 2025 / Aceptado: 26 de septiembre de 2025 / Publicado en línea: 14 de octubre de 2025

González-Álvarez, D., Herrera, S., Colina A. y Taboada F.G., 2025. Tendencias en la Evapotranspiración y en el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) en Asturias, 1970 – 2019. *Naturalia Cantabrica* 13(6): 137-148

RESUMEN: El cambio climático en la región mediterránea se refleja en una alta variabilidad climática, especialmente en los patrones de precipitación y sequía, los cuales están influenciados por la evapotranspiración local, es decir, la transferencia de agua desde la superficie a la atmósfera. Estudios recientes han confirmado un aumento global de la evapotranspiración, que en Europa podría estar vinculado al reverdecimiento de la vegetación en los últimos años, al igual que un incremento de los periodos de sequía en España. En Asturias se ha registrado un aumento de la masa forestal y una tendencia estable en la precipitación, aunque hasta ahora no se han desarrollado estudios que relacionen ambos fenómenos. Este trabajo evalúa esta relación mediante la evapotranspiración. También se analizó la incidencia de la sequía mediterránea en la región a través del Índice Estandarizado de Precipitación - Evapotranspiración (SPEI). Los resultados muestran un incremento de la evapotranspiración acumulada anual desde 1970 y un aumento en la magnitud, frecuencia y duración de los periodos extremos, tanto secos como húmedos, junto con una reducción de los considerados normales. Esto sugiere la influencia del crecimiento forestal en los patrones de precipitación y alerta sobre posibles efectos de la crisis climática, ya que el SPEI podría indicar el inicio de una sequía en Asturias, con implicaciones para el balance hídrico y la disponibilidad de agua.

PALABRAS CLAVE: Evapotranspiración, evapotranspiración potencial, evapotranspiración de referencia, SPEI, sequía, cambio climático, norte de España, Asturias.

González-Álvarez, D., Herrera, S., Colina A. & Taboada F.G., 2025. Trends in Evapotranspiration and the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) in Asturias, 1970–2019. *Naturalia Cantabrica* 13(6): 137-148

ABSTRACT

Climate change in the Mediterranean region is reflected in high climate variability, especially in precipitation and drought patterns, which are influenced by local evapotranspiration, i.e. the transfer of water from the surface to the atmosphere. Recent studies have confirmed a global increase in evapotranspiration, which in Europe could be linked to the greening of vegetation in recent years, as well as an increase in periods of drought in Spain. In Asturias, there has been an increase in forest mass and a stable trend in precipitation, although so far no studies have been carried out that link the two phenomena. This work evaluates this relationship through evapotranspiration. The incidence of Mediterranean drought in the region was also analysed through the SPEI index. The results show an increase in annual cumulative evapotranspiration since 1970 and an increase in the magnitude, frequency and duration of extreme periods, both dry and wet, together with a reduction in those considered normal. This suggests the influence of forest growth on precipitation patterns and warns of possible effects of the climate crisis, since the SPEI could indicate the onset of a drought in Asturias, with implications for the water balance and water availability.

KEYWORDS: Evapotranspiration, potential evapotranspiration, reference evapotranspiration, SPEI, drought, climate change, north of Spain, Asturias.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático (CC) afecta a un amplio conjunto de patrones climáticos. El efecto más evidente es el aumento de la temperatura en superficie a escala global, aunque también existe constancia de la alteración de los patrones de circulación y distribución de humedad en el planeta. En latitudes medias de zonas templadas, estos cambios incluyen la expansión de las células de Hadley, que a su vez promueve una reducción en las precipitaciones y en los recursos hídricos disponibles (Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC], 2021). La localización cercana a la transición entre la zona cálida y templada del hemisferio norte hace que la península ibérica sea especialmente vulnerable a la expansión de las células de Hadley. En la región Mediterránea, el aumento de temperatura ha sido mayor que el incremento global (IPCC, 2022), a lo que se le une la estacionalidad y torrencialidad habitual de la precipitación en esta región (Lionello y Scarascia, 2018; Vicente-Serrano *et al.*, 2025).

Varios estudios han demostrado que la disponibilidad de agua en la península ibérica ha disminuido en las últimas décadas (García-Ruiz *et al.*, 2011; CLIVAR-España, 2025), debido tanto a la menor precipitación anual como al aumento de las temperaturas. No obstante, estos cambios no se han manifestado de igual manera en todo el territorio. En el caso concreto de Asturias, no se ha constatado un descenso significativo en la precipitación durante los últimos 50 años (Taboada *et al.*, 2024), pese a los cambios esperables a partir de los patrones de circulación atmosférica y fuentes de humedad (Gimeno-Sotelo *et al.*, 2024; CLIVAR-España, 2024) y en la estacionalidad de la precipitación (Gonzalez-Hidalgo *et al.*, 2024).

En relación a la estabilidad del ciclo del agua, la evapotranspiración (ET) es un proceso clave para analizar la sensibilidad hidrológica frente al cambio climático (Roderick *et al.*, 2014). La ET es el proceso por el cual el agua se transfiere desde la superficie terrestre a la atmósfera (Yang *et al.*, 2023), combinando tanto la evaporación del agua desde el suelo y otras superficies, como la transpiración del agua a través de los tejidos vasculares de las plantas (Allen *et al.*, 1998). Las tendencias en ET permiten analizar el aporte de vapor de agua a la atmósfera desde la superficie de los océanos y de los continentes (Vicente-Serrano *et al.*, 2014), así como el transporte y reciclado de la humedad, y su contribución a la precipitación local (Ellison *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2024).

La humedad procedente de la ET local es una de las tres fuentes de humedad de las que depende la precipitación, junto con la ya presente en la atmósfera y la asociada a los transportes atmosféricos (CLIVAR-Espa-

ña, 2025). Los cambios en ET también permiten identificar periodos de sequía, cuantificar su magnitud e incluso prever su ocurrencia (Vicente-Serrano *et al.*, 2010), para lo cual se pueden utilizar indicadores que tengan en cuenta el balance hídrico acumulado como el índice estandarizado de evaporación-precipitación (SPEI) de Vicente-Serrano y colaboradores (2010).

Al estudiar la ET se distingue entre la evapotranspiración actual (ET_a), que es la cantidad real de agua que se transfiere a la atmósfera en las condiciones reales de disponibilidad de agua, tipo de vegetación o clima, entre otros (Xiang *et al.*, 2020; Vicente-Serrano *et al.*, 2014); y la evapotranspiración de referencia (ET_0 o ET_{ref}), que es, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), “la tasa de evaporación de un hipotético terreno de césped verde uniforme, creciendo y no escaso de agua, de 12 cm de alto, una resistencia fija de 70 s/m y albedo de 0.23” (Allen *et al.*, 1998; ASCE Environmental and Water Resources Institute, 2025). Si bien existen ambigüedades respecto a la terminología usada, especialmente en el caso de la evapotranspiración potencial (Xiang *et al.*, 2020; ASCE Environmental and Water Resources Institute, 2025), este trabajo adoptará la definición de la FAO y se referirá a ella como ET_0 (equivalente a ET_{ref}).

Para el cálculo de la ET_0 , es necesario aportar datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Por el contrario, la necesidad de incorporar variables como la resistencia aerodinámica de la vegetación o el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) complica el cálculo empírico de la ET_a (Yang *et al.*, 2023). Por ello, la FAO estandarizó la fórmula para obtener la ET_0 con las condiciones de la vegetación en las cuáles se alcanzaría la tasa máxima de ET (Allen *et al.*, 1998). Por tanto, la ET_a siempre será inferior o igual a ET_0 , pero nunca superior (Vicente-Serrano *et al.*, 2014).

Análisis recientes sugieren un aumento de la ET a nivel global (Vicente-Serrano *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2023). Yang y colaboradores (2023) aventuran que estos cambios se podrían relacionar, en el caso concreto del continente europeo, con el reverdecimiento de la vegetación. Este trabajo revisita la relación entre precipitación, reverdecimiento y la ET en el caso concreto de Asturias para examinar la posibilidad de que la sequía en la que está sumida la península ibérica esté también afectando a la región asturiana. La detección temprana podría ayudar en la prevención de eventos extremos, como la ola de incendios del verano de 2025 en el noroeste de la península ibérica. Este trabajo evalúa y estudia las tendencias en la ET (estimada a partir de la ET_0) con el objetivo de valorar si el aumento de la masa forestal podría haber

contribuido a la tendencia estable en precipitación en Asturias. Además, se analizan las tendencias del SPEI para estudiar la posible incidencia de períodos de sequía, aspecto clave para valorar las consecuencias del cambio global en la región.

2. METODOLOGÍA

2.1. Obtención de datos

El cálculo de la ETO y del SPEI requiere series temporales de temperatura, humedad, radiación solar, velocidad del viento y precipitación. Para obtenerlas, en este estudio utilizamos datos de las estaciones meteorológicas del repositorio europeo “ECA&D: European Climate Assessment y Dataset” (Klein Tank *et al.*, 2002), que en España incluye estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) y del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC).

El proyecto ECA&D recopila y cura información de estaciones meteorológicas de distintas fuentes a lo largo de toda Europa. El repositorio es público y de fácil acceso, y proporciona todas las variables necesarias para el cálculo de la ETO. Concretamente, utilizamos la base de datos “*blended*”, estándar a escala europea, que ha sido utilizada, entre otras aplicaciones, para el desarrollo de la base de datos interpolados E-OBS (Cornes *et al.*, 2018). Las series “*blended*” se generan tras la homogeneización y relleno de lagunas de los datos recogidas en una o más estaciones

cercanas y de diferentes fuentes. No obstante, en la región de estudio considerada, la AEMet es la única fuente de datos disponible. Entre las más de 1000 estaciones disponibles en España, se seleccionaron aquellas que cumplen los siguientes requisitos:

- Pertenecer a alguna de las siguientes regiones o provincia del norte del país: Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, León, Palencia o Burgos.
- Disponer de series de datos a partir de 1970.
- Disponer de series de datos de: temperatura (máxima, mínima y promedio), humedad relativa, precipitación, radiación solar y velocidad de viento.

En total, 21 estaciones cumplieron estos requisitos. Los datos de las variables anteriormente mencionadas se descargaron y procesaron del repositorio público del proyecto ECA&D (<https://www.ecad.eu/dailydata/predefinedseries.php>). Para asegurar la homogeneidad de las series de ETO y SPEI derivadas de las variables meteorológicas, se establecieron criterios al respecto del tratamiento de las lagunas existentes en las series: un mes se consideró válido si tiene al menos un 70% de días con registros no vacíos; del mismo modo, un año se consideró válido si tiene 10 o más meses válidos. 7 de las 21 estaciones no presentaron más de 10 años válidos, por lo que fueron descartadas, evaluando únicamente las 14 restantes (Figura 1).

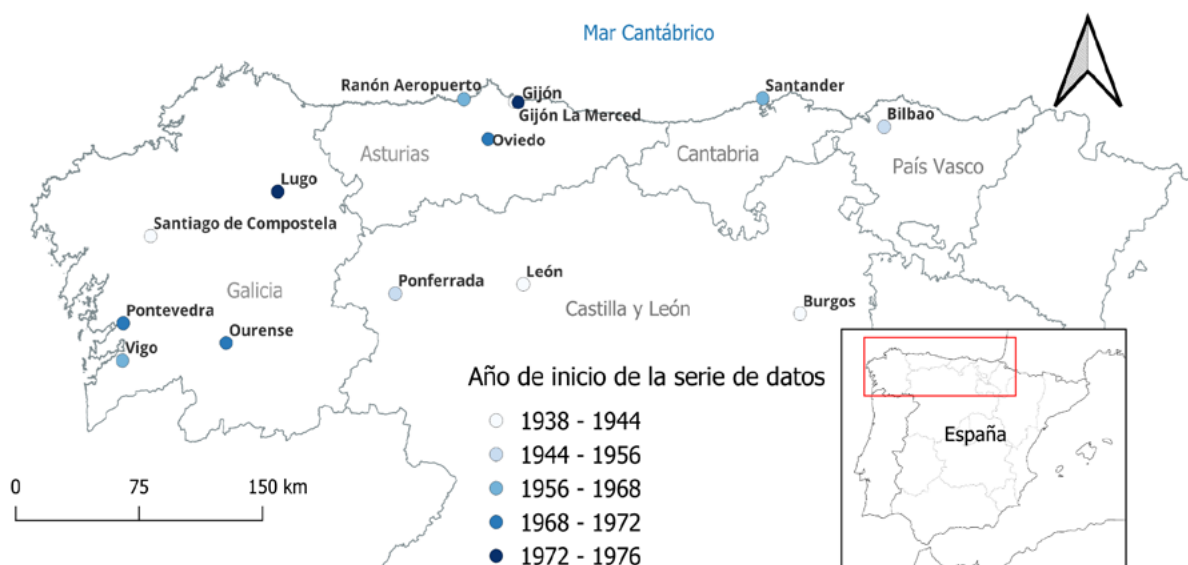


Figura 1. Las series de datos fueron obtenidas directamente de las estaciones meteorológicas del norte de España que cumplían con ciertos requisitos previos. Algunas de ellas comenzaron en el año 1972 (Lugo y Gijón-La Merced).

Figure 1. The datasets were obtained directly from meteorological stations from the north of Spain that met certain predefined requirements. Some of them had record starting in 1972 (Lugo and Gijón-La Merced).

2.2 Cálculo de la ET_0

Siguiendo las recomendaciones de la FAO (Allen *et al.*, 2006), se estimó ET_0 utilizando el método de Penman-Montheit (PM) (Ec. 1) (Allen, 2000):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900 u_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad \text{Ec. 1}$$

La ecuación FAO-PM parte de la ecuación original de Penman-Montheit e incluye la resistencia aerodinámica y de la superficie (Allen, 2000). El cálculo de ET_0 requiere las siguientes variables climáticas: Radiación solar ($R_n - G$), Temperatura (T) y Velocidad del viento (u_2), la pendiente de la curva de presión de vapor (Δ), la constante psicrométrica (γ) y el déficit de saturación de presión de vapor ($e_s - e_a$). Estas tres últimas variables se derivan de la humedad relativa media, máxima y mínima (Vremec *et al.*, 2024).

Los cálculos y visualizaciones se realizaron en Python (Python Software Foundation, 2023) utilizando el editor Pycharm (JetBrains, 2023), y el software de control de versiones Git (Software Freedom Conservancy, 2023) en la plataforma GitLab (GitLab Inc., 2023) (gitlab.com/cucc3/pet). Asimismo, se utilizó el paquete “pyet” (Vremec *et al.*, 2024) para estimar ET_0 a partir de los datos climáticos del proyecto ECA&D durante el período 1970-2020. Solo se consideraron los meses y los años clasificados como válidos de acuerdo a los criterios de calidad descritos anteriormente. De los años válidos, se calculó la media diaria a partir de estimas de ET_0 basadas en datos meteorológicos diarios. Finalmente, esta media se multiplicó por el número de días del año para estimar la ET_0 anual acumulada. Para evitar comparar años con distinto número de datos, aunque fuesen válidos, no se obtuvo directamente la suma anual.

2.3 Obtención del SPEI

El SPEI es un índice multiescalar basado en datos climáticos que mide la severidad de la sequía a través de su intensidad y duración, y que permite identificar el comienzo y final de los episodios de sequía (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). El índice SPEI parte del balance entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, PET (así referida en Beguería *et al.*, 2010 y 2014; en nuestro caso, ET_0), acumulada para el mes i , denominada D_i :

$$D_i = P_i - PET_i = P_i - ET_{0,i} \quad \text{Ec. 2}$$

Frente a otros índices, la incorporación de la PET al cálculo del SPEI permite considerar el impacto de la temperatura y la ET_0 sobre la sequía. Los valores D_i se pueden agregar a diferentes escalas temporales, k (normalmente, $k = 6, 12$ ó 18 meses) (Beguería *et al.*, 2010). De este modo, el balance del SPEI evalúa la situación actual respecto a meses anteriores:

$$\delta D_{i,t^k} = \sum_{j=t-k+1}^t D_{i,j} \quad \text{Ec. 3}$$

Para que los datos del SPEI resulten homogéneos y comparables sin importar el territorio, la escala o el clima en el que se evalúa, las series temporales obtenidas para las diferencias δD_i se estandarizaron según Beguería y colaboradores (2010). Dicha estandarización se basa en el ajuste de una distribución log-logística de tres parámetros (escala, forma y localización; Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Las estimas de la mediana y otros percentiles a partir de esta distribución permite determinar si una anomalía de δD_i se sitúa por encima o por debajo de los valores normales para una localidad. Si el resultado es negativo, se considera un periodo seco, ya que la demanda de humedad en la atmósfera fue mayor que la que precipitó. Para evaluar los resultados, se siguió la categorización recomendada por Vicente-Serrano y colaboradores (2010) (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis de los resultados del SPEI según Vicente-Serrano y colaboradores (2010).

Table 1. Analysis of the SPEI results according to Vicente-Serrano *et al.* (2010).

SPEI	Interpretación
> 2,00	Extremadamente húmedo (EM)
1,50 – 1,99	Muy húmedo (Muy H)
1,00 – 1,49	Moderadamente húmedo (MH)
-0,99 – 0,99	Normal
-1,49 – -1,00	Sequía moderada (SM)
-1,99 – -1,50	Sequía severa (SS)
< -2,00	Sequía extrema (SE)

Se utilizó la librería “spei” (Vonk, 2024) de Python para calcular el SPEI a distintas escalas temporales utilizando como datos de entrada las series temporales de la ET_0 calculadas previamente y las series de precipitación ECA&D. Se da la circunstancia de que, al aplicar el criterio de validez en las distintas series de datos de las variables (Sección 2.2), en ciertos meses la ET_0 acumulada sea igual a 0. En estos casos, para no obtener resultados irreales del SPEI, sólo se calculó el índice cuando ambos acumulados (de precipitación y ET_0) fueran superiores a 0. Tal y como se indicó en la Sección 2.2, el acumulado de precipitación se calculó del mismo modo considerado para la ET_0 .

3. RESULTADOS

La aplicación de los filtros de cobertura mínima de datos resultó en series temporales de precipitación y ET_0 acumulada fiables para todas las localidades de interés, aunque con una duración distinta – p. ej., la serie de Ranón comienza en 1968, León en 1938, Ourense, Pontevedra y Lugo sólo tuvieron datos válidos a partir de 1985, etc. (ver Figura 1). Ninguna estación cuenta con datos fiables entre los años 2020 y 2023, a fecha de redacción, por lo que se excluyeron del estudio.

Pese a estas limitaciones, ha sido posible evaluar las tendencias temporales en la ET_0 y para el SPEI para un periodo de 50 años (1970 - 2019). De este modo, para el cálculo de las tendencias se han considerado 50 años, superando los 30 años considerados habitualmente como periodo de referencia en estudios climatológicos.

3.1 Tendencias temporales de la ET_0

El promedio de la ET_0 anual mostró una gran variabilidad entre las estaciones meteorológicas situadas en cada comunidad autónoma (Tabla 2). Las estaciones localizadas en Asturias muestran una tendencia positiva y significativa para la ET_0 , más notoria en las estaciones cercanas a la costa (Figura 2). Aunque la tendencia es más variable en las otras regiones, en general estas son positivas (incremento de la ET_0), con las excepciones de Pontevedra, con tendencia negativa, y Lugo y Santander, donde no se obtienen resultados significativos (Tabla 2). De entre las comunidades consideradas, Castilla y León presenta la menor variabilidad entre estaciones, tanto para la ET_0 anual como para las tendencias, siendo Galicia la que muestra más variabilidad, con tendencias significativas oscilando desde -2.95 a 9.10 (mm/año^2).

Tabla 2. Tabla de las estaciones evaluadas con los valores promedio de ET_0 para todo el período analizado y la tendencia asociada.

Table 2. Table of the evaluated stations showing the average ET_0 values for the entire study period and the associated trend.

Estación	Ubicación	Elevación (m.s.n.m.)	$ET_0 \pm \text{SD}$ (mm/año)	Tendencia $\pm \text{SD}$ (mm/año^2)
Asturias				
Gijón – La Merced	43,54° N; 5,66° O	22	1083,26 $\pm$ 139,24	5,93 $\pm$ 1,02
Gijón	43,54° N; 5,64° O	3	1064,63 $\pm$ 128,21	4,21 $\pm$ 1,07
Oviedo	43,35° N; 5,87° O	336	1083,03 $\pm$ 99,94	1,56 $\pm$ 1,02
Ranón (Aeropuerto)	43,57° N; 6,04° O	127	1043,06 $\pm$ 118,37	5,40 $\pm$ 0,84
Cantabria				
Santander	43,49° N; 3,80° O	52	1236,22 $\pm$ 110,39	-0,61 $\pm$ 1,04
Castilla y León (CL)				
Burgos (Aeropuerto)	42,36° N; 3,62° O	891	1477,04 $\pm$ 228,12	12,08 $\pm$ 1,30
León	42,59° N; 5,65° O	916	1598,94 $\pm$ 236,31	12,50 $\pm$ 1,37
Ponferrada	42,56° N; 6,60° O	532	1671,67 $\pm$ 228,65	11,96 $\pm$ 1,58
Galicia				
Lugo	43,11° N; 7,46° O	442	1102,74 $\pm$ 75,13	-0,80 $\pm$ 1,27
Ourense	42,33° N; 7,86° O	146	1650,05 $\pm$ 160,00	9,10 $\pm$ 2,12
Pontevedra	42,43° N; 8,62° O	113	1362,33 $\pm$ 154,31	-2,95 $\pm$ 2,52
Santiago de Compostela	42,88° N; 8,41° O	370	1129,75 $\pm$ 128,97	4,42 $\pm$ 1,05
Vigo (Aeropuerto)	42,24° N; 8,62° O	255	1315,22 $\pm$ 167,99	7,11 $\pm$ 1,66
País Vasco				
Bilbao (Aeropuerto)	43,30° N; 2,91° O	42	1542,07 $\pm$ 166,59	4,94 $\pm$ 1,43

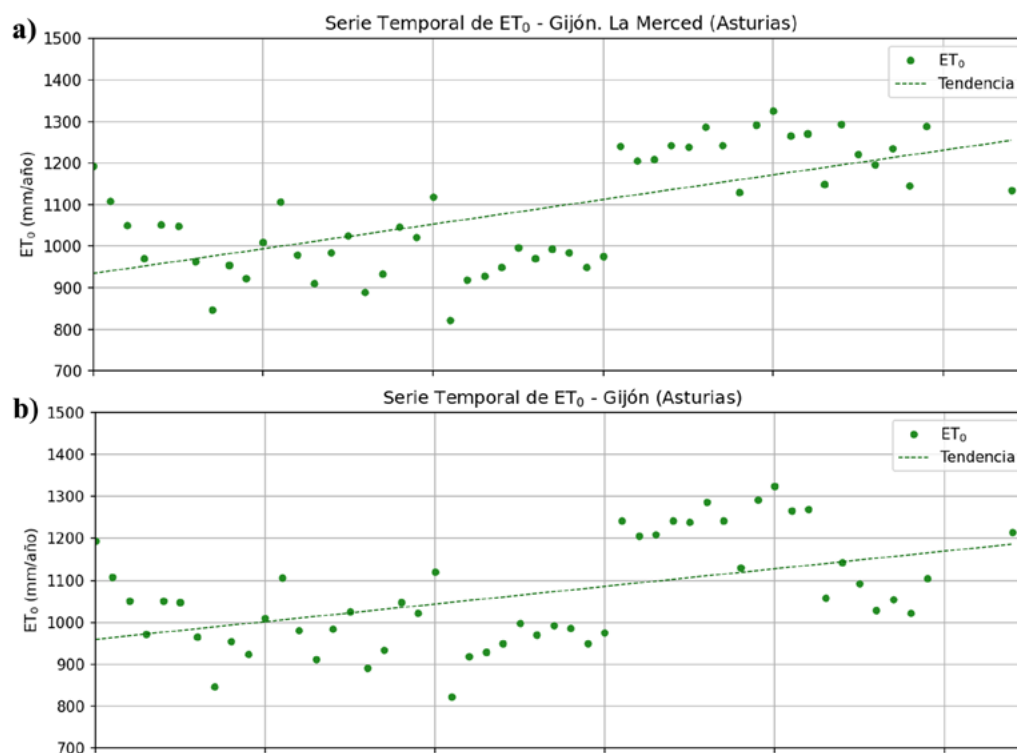


Figura 2. Series temporales de la ET_0 a lo largo de los 50 años de estudio para las cuatro estaciones del Principado de Asturias: Gijón (a) y Gijón – La Merced (b)

Figure 2. Time dataset of the ET_0 over the 50 years of study for the four stations of the Principality of Asturias: Gijón (a) and Gijón – La Merced (b).

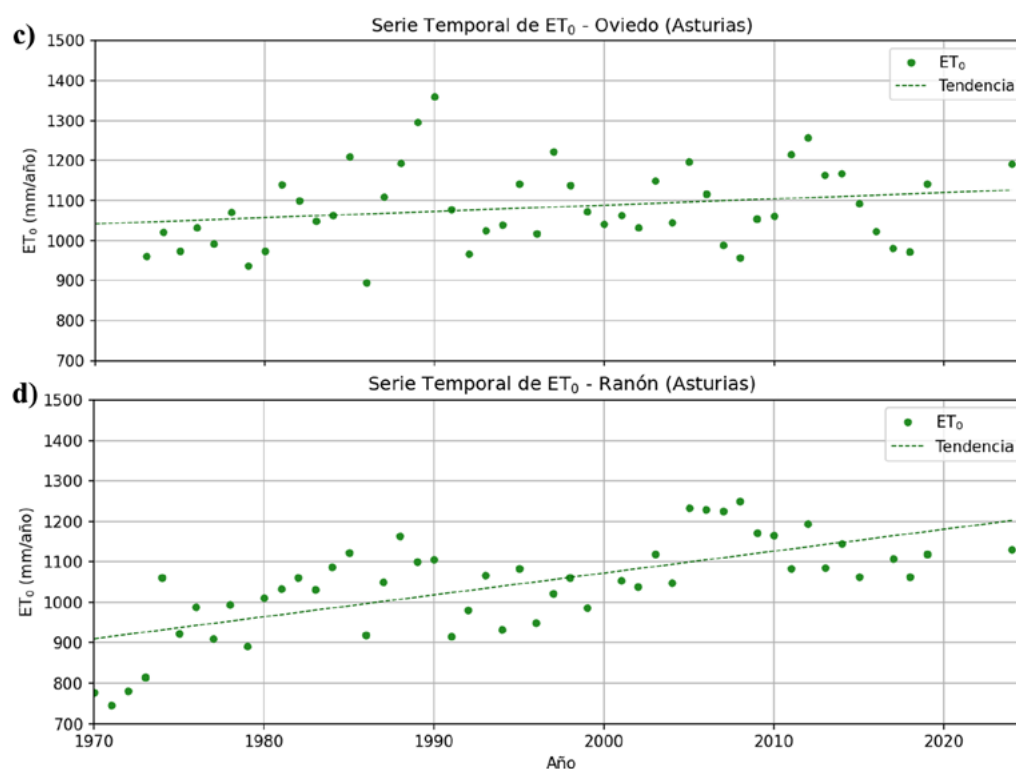


Figura 2. Continuación. Series temporales de la ET_0 a lo largo de los 50 años de estudio para las cuatro estaciones del Principado de Asturias: Oviedo (c) y Ranón, aeropuerto de Asturias (d).

Figure 2. Continuation. Time dataset of the ET_0 over the 50 years of study for the four stations of the Principality of Asturias: Oviedo (c) and Ranón, aeropuerto de Asturias (d).

3.2 Tendencias temporales del SPEI en Asturias

Las figuras 3 a 6 muestran los resultados del índice SPEI para las tres agregaciones temporales consideradas (6, 12, y 18 meses) y las 4 estaciones de Asturias. Si bien el SPEI-6 (6 meses) permite identificar la estacionalidad del índice, con los periodos secos y húmedos propios del clima oceánico que impera en la región, en las agregaciones temporales más largas, 12 y 18 meses, se identifican los periodos de sequía a lo largo de la serie. En este sentido, los resultados del balance hídrico en las estaciones de Asturias mostraron, en general, una acumulación de meses secos, es decir, de balance negativo (en rojo) entre los años 1982 y 1992 aproximadamente, acrecentado sobre todo en Oviedo (Figura 5). Además, en las estaciones de Gijón (Figura 3 y 4) y en el aeropuerto de Ranón (Figura 6), los meses más secos se acumularon en los últimos 20 años.

Las tendencias del número de meses al año clasificados en cada una de las categorías reflejadas en la Tabla 1 muestra una tendencia similar consistente con una mayor sequedad, aunque en general las estimas no son significativas estadísticamente (Tabla 3). Eso sí, se observa que, por un lado, el número de meses en la categoría "Normal" se reduce en todas las estaciones y para los tres periodos de agregación. Por otro lado, la estación de Oviedo reduciría el número de meses normales, incrementando los extremos, tanto secos ("SM") como húmedos ("Muy H" y "EH"). Por su parte, en la estación de Ranón se reducen los meses normales y húmedos, incrementando los meses en las categorías secas, reflejando un incremento en las condiciones de sequía en la estación.

Tabla 3. Evolución del número de meses al año en cada categoría de la Tabla 1 para las cuatro estaciones de Asturias. Los resultados estadísticamente significativos con un nivel de significación del 95% se muestran en negrita y con un asterisco. Los resultados se han dividido según el período evaluado, siendo SPEI-6, -12 o -18 los acumulados de 6, 12 y 18 meses, respectivamente.

SPEI-6	SE	SS	SM	Normal	MH	Muy H	EH
La Merced	0,005	0,006	-0,003	-0,022	-0,020*	0,001	0,001
Gijón	0,005	-0,004	0,000	-0,036*	-0,009	0,011	0,001
Oviedo	-0,001	-0,009	0,027*	-0,078*	-0,022	0,021*	0,011*
Ranón	0,004	0,013	0,033*	-0,065*	-0,031*	-0,010	-0,007
SPEI-12	SE	SS	SM	Normal	MH	Muy H	EH
La Merced	0,013	0,011	0,015	-0,032	-0,011	-0,002	-0,009
Gijón	0,014	-0,005	0,010	-0,036	0,000	0,009	-0,005
Oviedo	-0,007	-0,015	0,005	-0,022	0,011	-0,015	0,010
Ranón	0,001	0,016	0,033	0,009	-0,053*	-0,037*	-0,024*
SPEI-18	SE	SS	SM	Normal	MH	Muy H	EH
La Merced	0,006	0,007	0,016	-0,006	-0,018	-0,007	-0,004
Gijón	0,000	0,001	0,008	-0,010	-0,004	0,000	0,000
Oviedo	-0,011	-0,005	0,000	-0,026	0,016	0,005	0,010
Ranón	0,006	0,021	0,033*	0,041	-0,062*	-0,057*	-0,020*

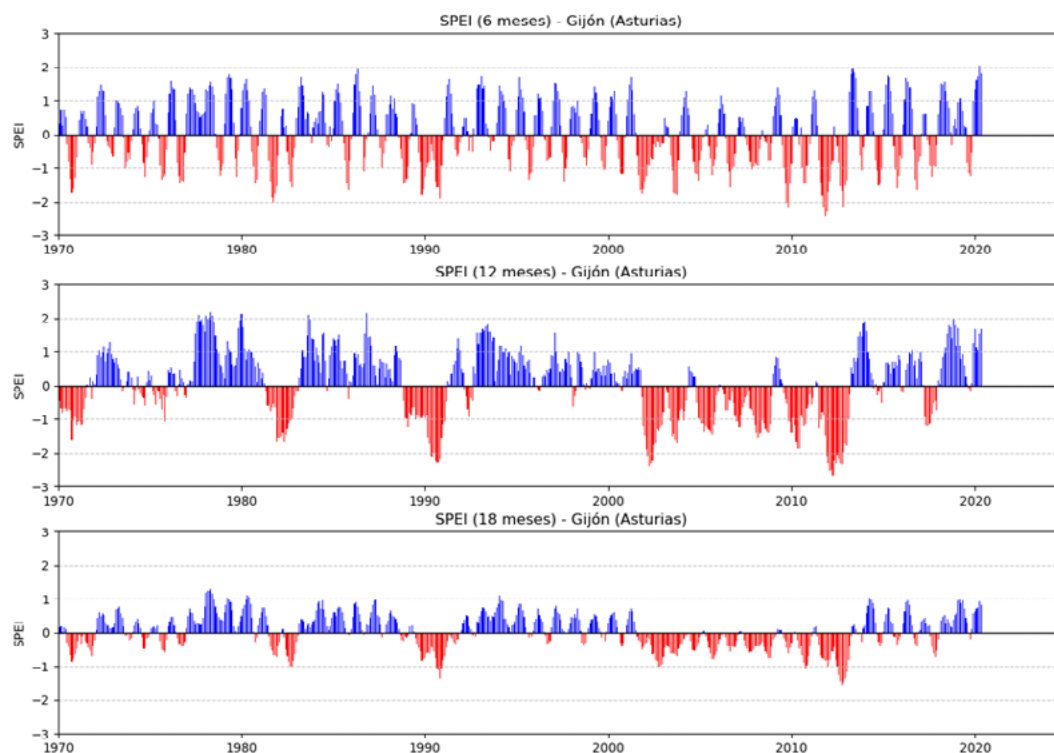


Figura 3. SPEI de la estación meteorológica de Gijón para periodos de 6, 12 y 18 meses.
Figure 3. SPEI of the meteorological station of Gijón for time periods of 6, 12 and 18 months.

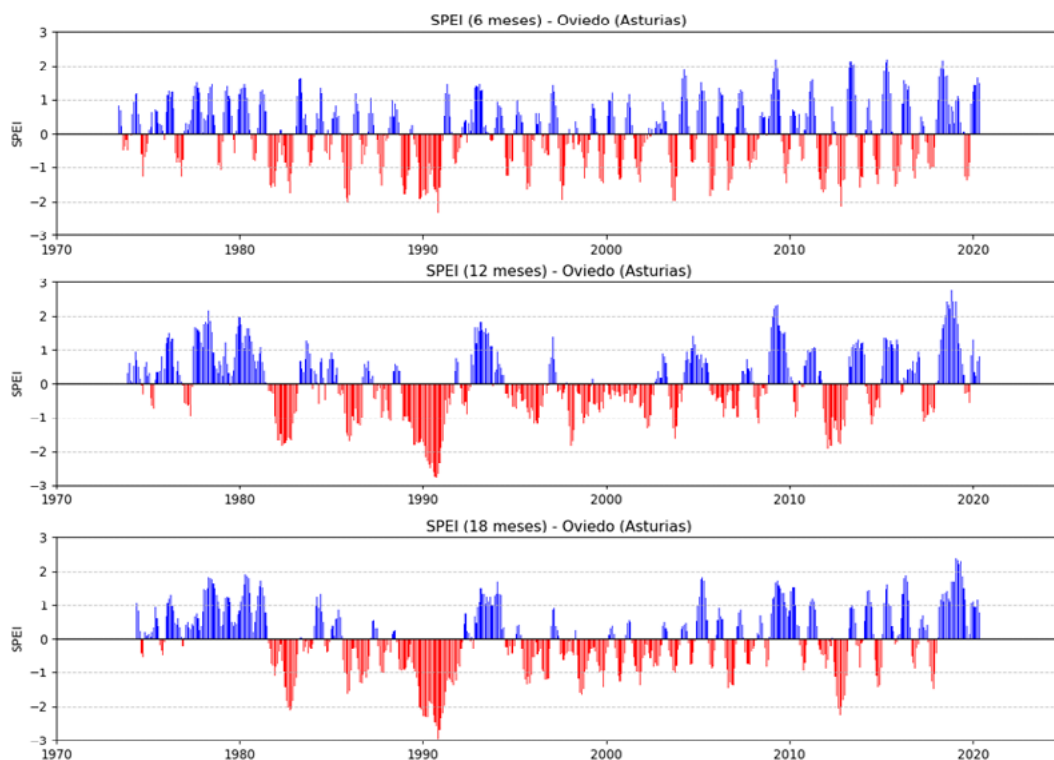


Figura 4. Índice SPEI para la estación meteorológica de Gijón - La Merced para periodos de 6, 12 y 18 meses.
Figure 4. SPEI of the meteorological station of Gijón – La Merced for time periods of 6, 12 and 18 months.

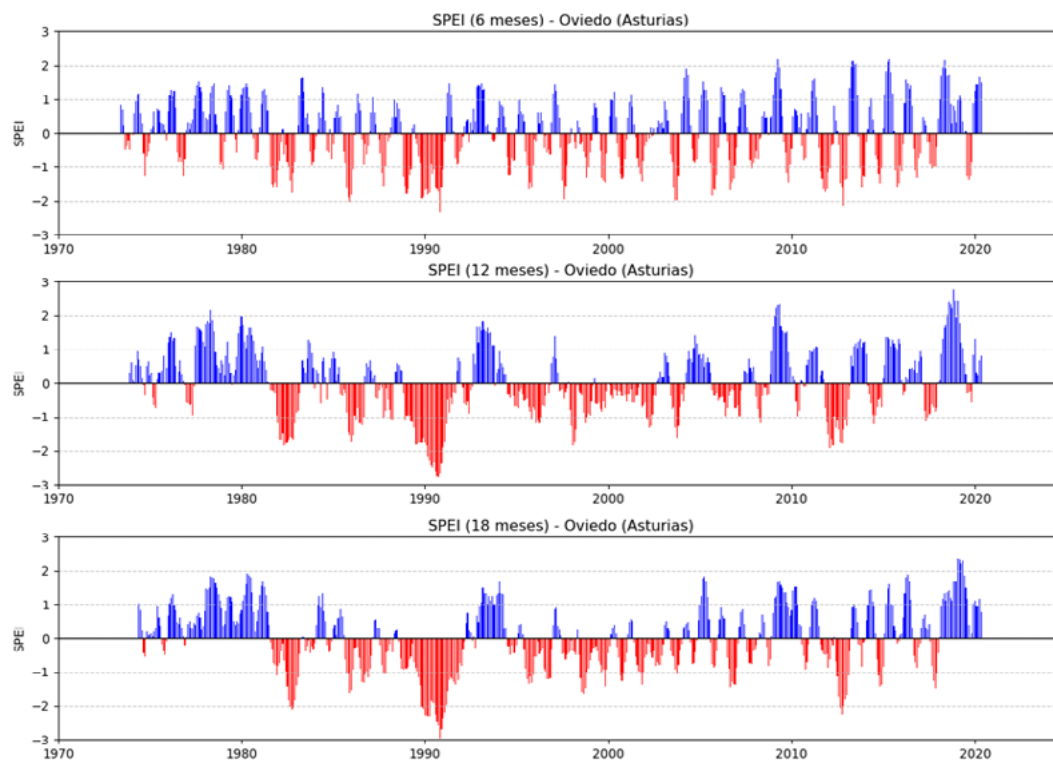


Figura 5. Índice SPEI de la estación meteorológica de Oviedo para periodos de 6, 12 y 18 meses.

Figure 5. SPEI of the meteorological station of Oviedo for time periods of 6, 12 and 18 months.

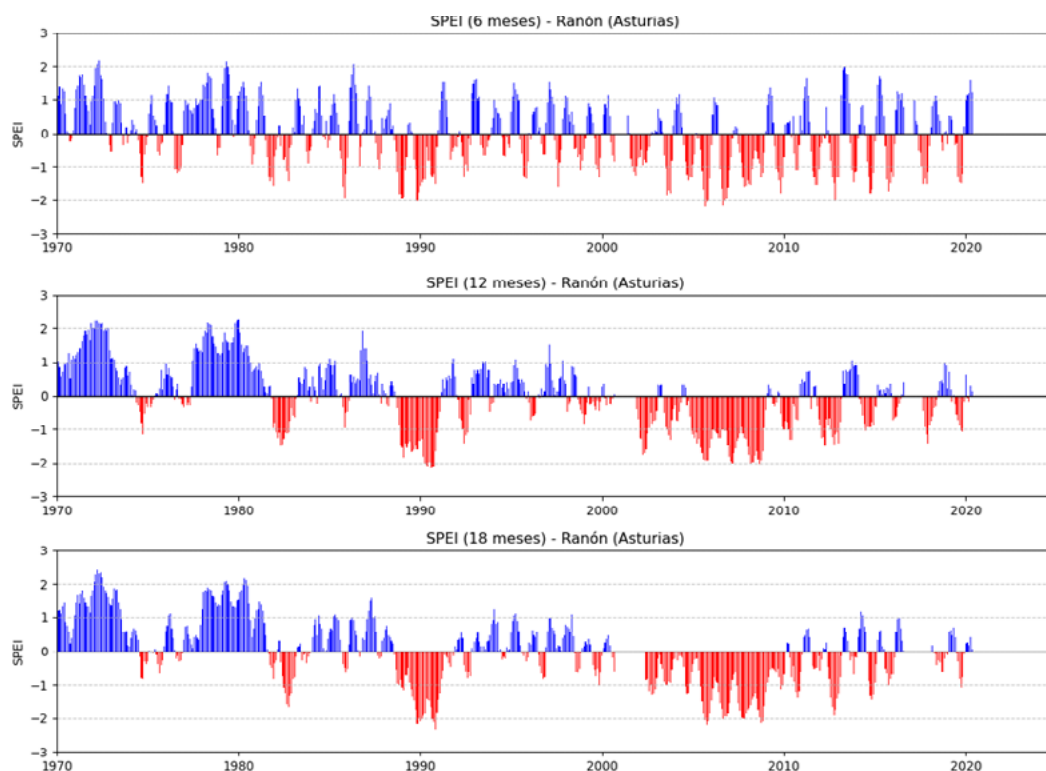


Figura 6. Índice SPEI para la estación meteorológica del aeropuerto de Asturias, Ranon, para periodos de 6, 12 y 18 meses.

Figure 6. SPEI of the meteorological station of the Asturias airport, Ranon, for time periods of 6, 12 and 18 months.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este estudio se ha estimado la magnitud y la tendencia temporal de la evapotranspiración de referencia o potencial para el norte de la península ibérica entre los años 1970 y 2019 a partir de una base de datos de variables meteorológicas registradas en estaciones de referencia. Además, también se ha estudiado la frecuencia e intensidad de los períodos de sequía a través del índice SPEI. Los resultados mostraron una coherencia espacio-temporal tanto en los acumulados promedio de ET_0 , como en los períodos húmedos y secos del índice SPEI.

En Asturias se ha observado un aumento en la magnitud e intensidad de los meses de sequía que, al considerar el aumento paralelo en la ET_0 , sugeriría una transición hacia un período con balance hídrico predominantemente negativo. La precipitación anual no ha disminuido, por lo que la tendencia hacia un balance hídrico negativo respondería al aumento de las temperaturas en la región.

4.1 Evapotranspiración potencial y vegetación

Varios estudios han evaluado las tendencias de la ET_0 para la península ibérica (Vicente-Serrano *et al.*, 2014; Espadafor *et al.*, 2021; Tomás-Burguera *et al.*, 2021), aunque no incluyeron datos de estaciones meteorológicas localizadas en el Principado de Asturias. Este estudio es el primero en utilizar series de bases de datos homogéneas y de alta calidad para la región. Los resultados muestran un aumento en la ET_0 anual acumulada consistente con trabajos previos (Vicente-Serrano *et al.*, 2014; Tomás-Burguera *et al.*, 2021), que se refería principalmente a estaciones de la región mediterránea que, en nuestro caso, se limita a las estaciones de Castilla y León y Ourense, donde estimamos un incremento de 12 mm/año, similar al observado por Tomás-Burguera y colaboradores (2021) de 15 mm/año, pero claramente inferior al estimado por Espadafor y colaboradores (2021), de 23 mm/año.

El aumento de la ET_0 acumulada se debe a la disminución de la humedad relativa y al aumento de las temperaturas máximas desde los años 1960 (Vicente-Serrano *et al.*, 2013), a lo que hay que añadir el descenso de la velocidad de los vientos, variable que, junto a la humedad relativa y la temperatura, completa la componente aerodinámica en la ecuación de PM (Allen, 2000; Vicente-Serrano *et al.*, 2013). Otros estudios argumentan que el aumento de la ET_0 en la península se debe principalmente al incremento del LAI, es decir, al reverdecimiento de la vegetación (Yang *et al.*, 2023). En la península ibérica existe una fuerte asociación entre la ET_0 y el LAI de modo que el aumento en las últimas décadas de la superficie y densidad de la masa forestal (Álvarez-Martínez *et al.*,

2014; Ameztegui *et al.*, 2021) podría estar detrás del incremento de la ET_0 . También se ha observado que la deforestación masiva (que lleva a una disminución del LAI) provoca una bajada de la ET_0 y de las precipitaciones, y lo contrario con la reforestación (Ma *et al.*, 2024). Debido a esta relación, es posible que el reciente aumento de la superficie forestal en Asturias, debido, entre otros factores, al abandono rural (Valbuena-Carabaña *et al.*, 2010), esté detrás de un aumento en las precipitaciones locales que contrarresten esta disminución generalizada en el resto del territorio peninsular español.

4.2 Períodos de sequía

Los resultados del índice SPEI mostraron un preocupante descenso de la frecuencia de los períodos considerados normales en Asturias, aumentando las condiciones de los extremos húmedos y secos. En Ranón, la única de todas las series temporales de Asturias con datos continuos y sin lagunas desde 1970 hasta 2019, el número y la magnitud de los períodos secos aumentó significativamente, lo que podría prever el inicio de una sequía en la región. En esta estación, junto con las dos de Gijón, se observa un aumento de la duración y frecuencia de los períodos considerados secos.

Es importante destacar que es normal observar una alta variabilidad espacial en la ocurrencia de las sequías en España (CLIVAR-España, 2024), que podría explicar las diferencias entre las series temporales de las estaciones costeras y la de Oviedo, aunque este tipo de gradientes, evidente en la región, se manifiestan también al examinar las tendencias en precipitación o temperatura (Taboada *et al.* 2024). En la serie para Oviedo, destaca especialmente el período seco entre 1989 y 1992. En conjunto, el aumento desde 1970 de los períodos de sequía en el noroeste de la península es consistente con los resultados del estudio de Lorenzo *et al.* (2022), quienes observaron un aumento similar entre 1960 y 2020. Es posible que, teniendo en cuenta que las precipitaciones no han variado mucho en nuestra región (Taboada *et al.*, 2024), el incremento de los períodos secos se deba al aumento observado en la ET_0 .

Debido al incremento de los episodios de sequía, la ET_0 no favorece un aumento de la ET_a , sino un incremento de la aridez, ya que la disponibilidad de agua en el suelo no puede suplir el incremento en la demanda evaporativa de la atmósfera (Vicente-Serrano *et al.*, 2014). En este sentido, hay que tener en cuenta que una atmósfera más demandante de humedad puede provocar alteraciones en el ciclo del agua, variación en ríos atmosféricos (Xiang *et al.*, 2020) y una mayor inestabilidad del clima, como hemos observado en los resultados del SPEI, a pesar de que no sean observables a través de la precipitación acumulada.

4.3 Conclusión

El análisis de series temporales de evapotranspiración y del índice de sequía SPEI calculadas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas ECA&D sugiere un aumento de la evaporación y de la sequía en el noroeste de la península ibérica. Asturias podría estar entrando en un período de inestabilidad climática que se manifestaría en sequías más frecuentes y extremas, junto con episodios muy húmedos que, en conjunto, no provocan la caída en la precipitación observada en otras zonas de la península. Las consecuencias a nivel económico, social y ecológico podrían llegar a ser muy costosas. Por ello, es necesario aumentar y dirigir los esfuerzos hacia la elaboración de estudios que permitan el seguimiento de la incidencia de la sequía en el Principado de Asturias. Además, los futuros planes de gestión forestal deberán considerar la influencia de la cobertura arbórea en la ET y consecuente precipitación. Ambas recomendaciones son críticas para asegurar un balance hídrico estable y mantener la disponibilidad de agua en la región.

5. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al proyecto ECA&D la disponibilidad de la base de datos utilizada en este estudio: “We acknowledge the data providers in the ECA&D project. Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. of Climatol.*, 22, 1441-1453. Data and metadata available at <https://www.ecad.eu>”.

La elaboración de este artículo ha contado con el apoyo de la Cátedra de Cambio Climático (CuCC) de la Universidad de Oviedo, financiada por el Principado de Asturias.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ASCE Environmental and Water Resources Institute. 2025. Evapotranspiration Terminology and Definitions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 151 (5): 06025003. <https://doi.org/10.1061/JIEDDH.IRENG-10491>
- Allen, R. G., Pereira, L. S. y Raes, D., 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper* 56.
- Allen, R. G. (Ed.). 2000. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (repr). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. 2006. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56: 333 pp. <http://www.climasouth.eu/sites/default/files/FAO%2056.pdf>
- Beguiría S., Vicente-Serrano S.M. y Angulo M. 2010. A Multiscalar Global Drought Dataset: The SPEIbase: A New Gridded Product for the Analysis of Drought Variability and Impacts. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 91 (10): 1351–1356.
- Beguiría S., Vicente-Serrano S.M., Reig F. y Latorre B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.* 34 (10): 3001-3023.
- CLIVAR - España. Informe Clivar-Spain sobre el clima en España. 2024. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO)*.
- Cornes, R. C., Van Der Schrier, G., Van Den Besselaar, E. J. M., y Jones, P. D. 2018. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123 (17), 9391-9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Dai, A. 2011. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. *J. Geophys. Res.* 116 (D12), D12115. <https://doi.org/10.1029/2010JD015541>
- Ellison, D., N. Futter, M., y Bishop, K. 2012. On the forest cover–water yield debate: From demand- to supply-side thinking. *Glob. Change Biol.* 18 (3), 806-820. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x>
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta, T., y Beguería, S. 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Sci. Rev.* 105 (3-4), 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>
- Gimeno-Sotelo, L., Sorí, R., Nieto, R., Vicente-Serrano, S. M., y Gimeno, L. 2024. Unravelling the origin of the atmospheric moisture deficit that leads to droughts. *Nat. Water*, 2 (3), 242-253. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00192-4>
- Gonzalez-Hidalgo, J. C., Trullenque-Blanco, V., Beguería, S., y Peña-Angulo, D. 2024. Seasonal precipitation changes in the western Mediterranean Basin: The case of the Spanish mainland, 1916–2015. *Int. J. Climatol.* 44 (5), 1800–1815. <https://doi.org/10.1002/joc.8412>
- GitLab Inc. 2023. GitLab (versión 16.0) [Plataforma de desarrollo colaborativo]. <https://about.gitlab.com>
- Informe Clivar-Spain sobre el clima en España. 2024. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022. Mediterranean Region. En: *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press; 2023:2233-2272.
- IPCC. 2023. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H. Lee y J. Romero, Eds.). IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

- Iturbide, M., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., Pirani, A., Huard, D., Al Khourdajie, A., Baño-Medina, J., Bedia, J., Casanueva, A., Cimadevilla, E., Cofiño, A. S., De Felice, M., Díez-Sierra, J., García-Díez, M., Goldie, J., Herrera, D. A., Herrera, S., Manzanar, R., Milovac, J., ... y Yelekçi, Ö. 2022. Implementation of FAIR principles in the IPCC: The WGI AR6 Atlas repository. *Sci. Data* 9 (1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01739-y>
- JetBrains. 2023. PyCharm (versión 2023.1) [Entorno de desarrollo integrado]. <https://www.jetbrains.com/pycharm/>
- Klein Tank, A. M. G., Wijngaard, J. B., Können, G. P., Böhm, R., Demarée, G., Gocheva, A., Mileta, M., Pashiardis, S., Hejkrlik, L., Kern-Hansen, C., Heino, R., Bessemoulin, P., Müller-Westermeier, G., Tzanakou, M., Szalai, S., Pálsdóttir, T., Fitzgerald, D., Rubin, S., Capaldo, M., ... y Petrovic, P. 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.* 22 (12), 1441-1453. <https://doi.org/10.1002/joc.773>
- Lionello, P., y Scarascia, L. 2018. The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Reg. Environ. Change* 18 (5), 1481-1493. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>
- Ma, S., Zhou, S., Yu, B., y Song, J. 2024. Deforestation-induced runoff changes dominated by forest-climate feedbacks. *Sci. Adv.* 10 (33), eadp3964. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp3964>
- Matsoukas, C., Benas, N., Hatzianastassiou, N., Pavlakis, K. G., Kanakidou, M., y Vardavas, I. 2011. Potential evaporation trends over land between 1983–2008: Driven by radiative fluxes or vapour-pressure deficit? *Atmos. Chem. Phys.* 11 (15): 7601-7616. <https://doi.org/10.5194/acp-11-7601-2011>
- Python Software Foundation. 2023. Python (versión 3.11) [Lenguaje de programación]. <https://www.python.org>
- Software Freedom Conservancy. 2023. Git (versión 2.44) [Software de control de versiones]. <https://git-scm.com>
- Taboada, F. G., García, S. H., Álvarez, R. A., García, M. Á. Á., Vuelta, A. C., Millán, E. G. S., Iglesias, J. C. F., y Fernández, C. G. 2024. Elaboración de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias. *CuCC*.
- Vicente-Serrano, S.M. 2013. Spatial and temporal evolution of precipitation droughts in Spain in the last century. En *Adverse weather in Spain*: 283–296. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6590-7_16
- Vicente-Serrano, S. M., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., López-Moreno, J. I., González-Hidalgo, J. C., Moran-Tejeda, E., y Espejo, F. 2014. Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961–2011. *Glob. Planet. Change* 121: 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.06.005>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *J. Clim.* 23 (7): 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Trambay, Y., Reig, F., González-Hidalgo, J. C., Beguería, S., Brunetti, M., Kalin, K. C., Patalen, L., Kržič, A., Lionello, P., Lima, M. M., Trigo, R. M., El-Kenawy, A. M., Eddenjal, A., Türkes, M., Koutroulis, A., Manara, V., Maugeri, M., Badi, W., ... y Potopová, V. 2025. High temporal variability not trend dominates Mediterranean precipitation. *Nature*, 639 (8055): 658–666. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08576-6>
- Vonk, M. A. 2024. SPEI: A simple Python package to calculate and visualize drought indices [Software]. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10816741>
- Vremec, M., Collenteur, R. A., y Birk, S. 2024. PyEt v1.3.1: A Python package for the estimation of potential evapotranspiration. *Geosci. Model Dev.* 17 (18): 7083–7103. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-7083-2024>
- Xiang, K., Li, Y., Horton, R., y Feng, H. 2020. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. *Agricu. Water Manag.* 232: 106043 pp. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>
- Yang, Y., Roderick, M. L., Guo, H., Miralles, D. G., Zhang, L., Fatichi, S., Luo, X., Zhang, Y., McVicar, T. R., Tu, Z., Keenan, T. F., Fisher, J. B., Gan, R., Zhang, X., Piao, S., Zhang, B., y Yang, D. 2023. Evapotranspiration on a greening Earth. *Nat. Rev. Earth Environ.* 4 (9): 626–641. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00464-3>