



**Universitat de les  
Illes Balears**

**Título:** Tendencias de precipitación recientes y monitorización de sequías meteorológicas en Mallorca (1974-2014)

NOMBRE AUTOR: Tomàs Alemany Sastre

DNI AUTOR: 43176283Q

NOMBRE TUTOR: Jorge Lorenzo-Lacruz

**Memoria del Trabajo de Final de Grado**

Estudios de Grado de Geografía

Palabras clave: precipitación, tendencias, sequía, SPI, Mallorca

de la

UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS

Curso Académico 2014-2015

En caso de no autorizar el acceso público al TFG, marque la siguiente casilla:



## Contenido

Acrónimos.....	3
Figuras.....	3
Tablas.....	3
Resumen.....	4
1. Introducción.....	5
2. Objetivos.....	7
3. Área de estudio .....	8
4. Datos y metodología .....	10
4.1. Base de datos.....	10
4.2. Homogeneización de los datos.....	10
4.3. Análisis de tendencias de precipitación.....	10
4.4. Evolución de las sequías climáticas .....	11
5. Resultados.....	13
5.1. Análisis de tendencias .....	13
5.2. Monitorización de sequías .....	15
6. Discusión y conclusiones .....	20
Agradecimientos .....	22
Referencias.....	23

## Acrónimos

**AEMET:** Agencia Estatal de Meteorología

**Cc:** Cambio climático

**ETP:** Evapotranspiración

**MOPREDAS:** Monthly Precipitation Database of Spain / Base de Datos Mensual de Precipitación de España

**NAO:** North Atlantic Oscillation / Oscilación del Atlántico Norte

**PDSI:** Palmer Drought Severity Index / Índice de Severidad de Sequía de Palmer

**PHDI:** Palmer Hydrological Drought Index / Índice de Sequía Hidrológica de Palmer

**SNHT:** Standard Normal Homogeneity Test / Test de Homogeneidad Normal Estándar

**SPI:** Standardized Precipitation Index / Índice de Precipitación Estandarizado

**WMO:** World Meteorological Organization / Organización Meteorológica Mundial

## Figuras

**Figura 1.** Localización del área de estudio y de las estaciones pluviométricas.

**Figura 2.** Promedios mensuales de precipitación durante el periodo 1974-2014 para las estaciones B013 en Lluc y B379 en Ses Salines Sa Vall.

**Figura 3.** Tendencias anuales de precipitación durante el periodo 1974-2014 para el conjunto de la muestra (cartografía).

**Figura 4.** Tendencias mensuales de precipitación durante el periodo 1974-2014 para el conjunto de la muestra (cartografía).

**Figura 5.** Valores de precipitación acumulada por año y de SPI a escala de 6, 12, 24 y 48 meses para la estación B373 en Campos – Salines de Llevant.

**Figura 6.** Evolución de un evento de sequía climática identificada en el año 1983.

**Figura 7.** Evolución de un evento de sequía climática identificada entre los años 1992 y 1993.

## Tablas

**Tabla 1.** Estaciones incluidas en la muestra, altitud y precipitación media anual de la serie 1974-2014. Fuente: AEMET.

**Tabla 2.** Categorías de sequía definidas por los valores de SPI, tomado de McKee et al., 1993. Probabilidad de recurrencia de sequías según los valores de SPI, tomado de WMO, 2012.

## Resumen

La precipitación es el input fundamental de cualquier sistema hidrológico. Sin ella, los reservorios se agotan. Pero cada uno de ellos lo hace diferentes velocidades. El uso de índices multi-escalares, como el SPI, permite ilustrar el comportamiento de las sequías climáticas a diferentes escalas temporales. El presente estudio revela, por ejemplo, la existencia de un evento de sequía duradera durante los años 80 y 90, que explicaría la situación de crisis en materia de disponibilidad de recursos hídricos. Este déficit de precipitación podría ser al mismo tiempo la causa de una tendencia positiva reciente, según revela el análisis de la correlación entre la serie temporal 1974-2014 y las series de precipitación de 44 estaciones pluviométricas de la isla de Mallorca. El primer objetivo de este trabajo ha sido construir una base de datos de calidad, a partir de los registros de estas estaciones: continua, sin datos anómalos ni inhomogeneidades. El tratamiento estadístico que se ha dado a estos datos (en forma de correlaciones temporales y la elaboración de índices SPI) revela tendencias climáticas aparentemente incongruentes en relación a las deducidas por otros estudios realizados en el área Mediterránea. Sin embargo, estos resultados pueden ser fácilmente contextualizados y complementan, pese a todo, a los anteriores.

## 1. Introducción

La precipitación es un factor muy variable estudiado a diferentes escalas, tanto espaciales como temporales (Nicholson, 2000). Analizada en largas series temporales (décadas) presenta un comportamiento de equilibrio relativo, que evoluciona con el tiempo en un sentido positivo o negativo (Lamy et al., 2001). Cuando se da un aumento o una reducción en la tendencia a largo plazo del régimen de precipitación cabe preguntarse con qué factor o factores se relaciona más intensamente dicha variación. Actualmente, el cambio climático (CC) se ha convertido en el sospechoso habitual cuando se detecta un cambio de tendencia en cualquier factor que forma parte o se ve afectado por el clima (Weng et al., 1999). Las variabilidades en materia de precipitación interanual (Janowiak, 1988; Sperber y Palmer, 1996), de episodios de tormenta (Lau 1988; Rogers, 1997; Goodrich et al., 1995; Keim et al., 2004), de caudales (Chiew et al., 1998; Woods y Sivapalan, 1999) o de formación de hielo en glaciares (Hormes et al., 2001; Pälli et al., 2002; Box et al., 2006; Schoof, 2010) son campos de análisis científico en constante progreso. Pero al mismo tiempo se han convertido en tema de gran interés para la opinión pública, que no sólo exige mantenerse informada sobre las políticas de gestión del CC, sino que debate acerca de la validez del paradigma científico que sostiene que el componente antropogénico del proceso de calentamiento global es la principal causa del CC. El CC se caracteriza no sólo por el incremento de las temperaturas medias, sino también por un aumento en la variabilidad del clima a escala global (Karl et al., 1995; Solomon, 2007).

A escala de región, la cuenca Mediterránea se muestra como un área de estudio de gran interés para entender los efectos del CC. Se trata de un territorio sometido a una intensa explotación hídrica, cuya casuística ha ido variando con el tiempo, evolucionando de un modelo de producción basado en la agricultura a uno basado en el turismo. Ambos tipos de actividades demandan cantidades importantes de recursos hídricos (Kent et al., 2002; Essex et al., 2004; Hof y Schmitt, 2011), hecho que contribuye a reducir el nivel de los acuíferos, que son la fuente principal del consumo en espacios dominados por sistemas hidrológicos que favorecen la infiltración de la escorrentía superficial, como sucede en las redes situadas sobre los materiales cavernosos del subsuelo de Mallorca (Estrany et al., 2010). A ello hay que añadir la dificultad de distinguir los efectos que la regulación de caudales (Lorenzo-Lacruz et al., 2010), la degradación del suelo (Wessels et al., 2007) y las extracciones directas de la red de drenaje tienen sobre el comportamiento de los cursos superficiales. Conocer las tendencias de precipitación a largo plazo es fundamental para entender el comportamiento futuro de las redes hidrológicas (Wood et al., 1988; Obled et al., 1994; Singh, 1997; Tucker y Bras, 2000), dado que se trata del componente principal de los caudales y su análisis no depende de factores externos al clima. Las políticas que se llevan a cabo en materia de gestión del agua, medio ambiente y riesgos naturales deben estar informadas con rigor de cualquier tendencia significativa que pueda revelar la incidencia de los factores climáticos (Pahl-Wotsl, 2006). Sólo de este modo pueden tener éxito las iniciativas de coordinación y planificación, que pretenden minimizar los riesgos asociados y lograr una mejor adaptación al CC (Smit et al., 2000; Leiserowitz, 2006).

El análisis de tendencias de precipitación en la región Mediterránea ha revelado un patrón general descendente en los totales anuales y en el número de días con precipitación durante las últimas décadas (Xoplaki et al., 2004; Longobardi i Villani, 2009; Philandras et al., 2011; Kelley et al., 2012). Esta tendencia parece haberse confirmado en el caso de las Islas Baleares (Homar et al., 2010; Ramis et al., 2013). Pero conocer las tendencias anuales no es suficiente para entender el escenario futuro en una región tan afectada por la estacionalidad del clima. El estrés hídrico al que se ve sometida la región durante la estación árida se explica tanto por el incremento de la insolación y de las temperaturas como por la escasez de precipitaciones estivales típica del clima mediterráneo (Sumner et

al., 2001). Un verano más seco en el futuro contribuiría de manera crítica a agravar la problemática derivada de la situación de estrés hídrico, al reducir la disponibilidad de recursos. Esta problemática es especialmente grave en el caso de las islas del Mediterráneo, como Mallorca, donde las autoridades se encuentran limitadas en su abanico de posibilidades de gestión del agua, no pudiendo recurrir al trasvase entre cuencas como último recurso en situaciones extremas y sin poder plantear medidas de control sobre los flujos turísticos para elevar la sostenibilidad de los recursos (García y Servera, 2003). La mayor parte de estudios efectuados a escala global revelan una ligera tendencia positiva de la precipitación, pero al mismo tiempo una acusada tendencia negativa a escala de región en áreas subtropicales, como la cuenca Mediterránea (Solomon, 2007). Esta presenta un régimen de precipitación muy particular, afectada al mismo tiempo por su especial orografía y por la sensibilidad que muestra a los cambios en los patrones de circulación general atmosférica (Xoplaki et al., 2004). Para el Mediterráneo occidental, Hurrell y Loon (1997) asociaron la tendencia negativa invernal en la ocurrencia de eventos ciclónicos a cambios en el índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Un mayor grado de aridez invernal y una mayor frecuencia de eventos intensos de precipitación se presentan como las consecuencias apreciables y atribuibles a dichos cambios. Revelar las tendencias del régimen de precipitación durante las últimas décadas a escala sub-regional se muestra necesario no sólo para mejorar la calidad de los modelos de predicción de CC, sino para mejorar la información de las autoridades locales y, consecuentemente, aumentar la calidad de la respuesta frente a las consecuencias del incremento de la variabilidad climática (Homar et al., 2010): sequías, riesgos geológicos, inundaciones.

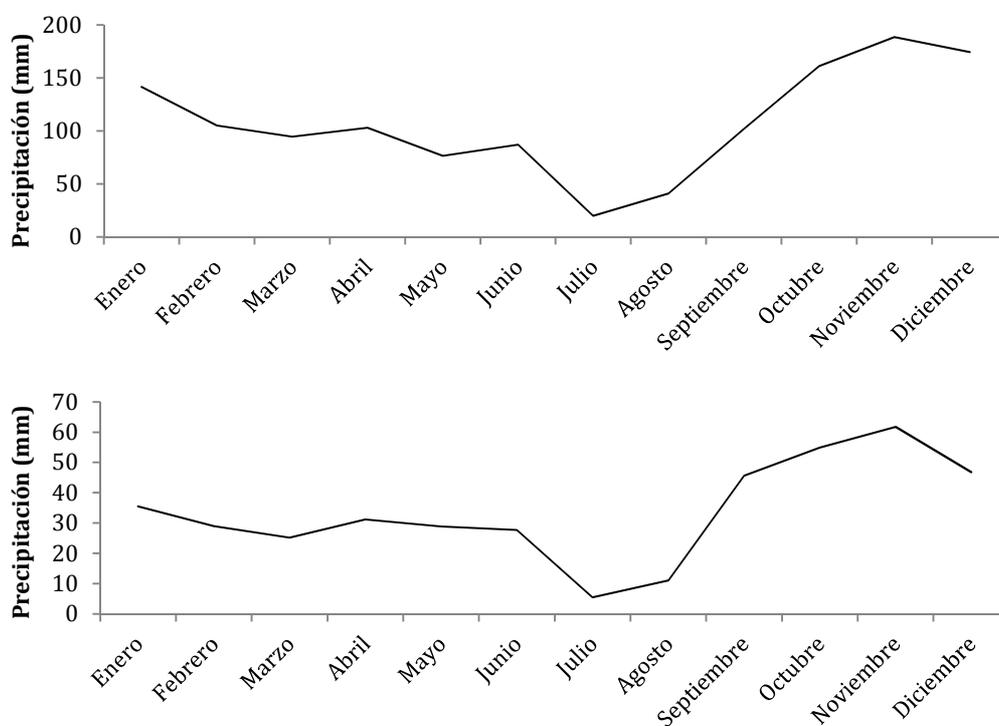
La sequía se ha revelado también como un fenómeno multi-escalar (McKee et al., 1995), tanto espacial como temporalmente. Resulta fundamental tener en cuenta este hecho para evaluar las posibles consecuencias de las sequías climáticas (i. e. las provocadas por la escasez de precipitación) sobre las sequías hidrológicas y sobre la distribución de las sequías en los diferentes sistemas naturales (cursos superficiales, acuíferos, humedales, etc.) Tanto más importante resulta en el caso de un área de estudio que presenta una elevada variabilidad climática y un retardo importante en la respuesta hidrológica a la precipitación, debido tanto a su particular litología como al grado elevado de regulación de los caudales (Lorenzo-Lacruz, 2012).

Este trabajo se compone de dos fases principales. En la primera se persigue eliminar del registro climático a analizar la influencia de factores no representativos de la variabilidad temporal climática, con el objetivo de obtener un conjunto de datos homogéneo y de calidad. Como indica Peterson (1998), la mayor parte de series temporales de datos climáticos se encuentran afectadas por inhomogeneidades, que en caso de no ser tenidas en cuenta pueden invalidar los resultados del estudio. Una vez ajustados los datos, se les aplica un test no paramétrico (Spearman) para confirmar la dependencia temporal, la tendencia y su significatividad a escala anual (variabilidad inter-anual) y estacional (variabilidad intra-anual). El coeficiente de correlación de Spearman se ha mostrado como una herramienta útil en el cálculo de tendencias de datos climáticos y se ha empleado abundantemente en estudios de escala sub-regional en el Mediterráneo (Lorenzo-Lacruz et al., 2012). Los datos finales de tendencia se presentan por unidad de análisis (es decir, para cada estación pluviométrica) y sirven finalmente para estudiar los eventos de sequía climática registrados el conjunto de las 44 estaciones pluviométricas analizadas en la isla de Mallorca (fig. 1), en una serie temporal que abarca el periodo 1974-2014. Este trabajo aporta una metodología de análisis de tendencias de precipitación al estudio del clima de Mallorca, donde las sequías climáticas han sido escasamente analizadas.



### 3. Área de estudio

La isla de Mallorca (fig. 1) ocupa una superficie de 3.640,11 km<sup>2</sup>, siendo la mayor de las Islas Baleares. Se sitúa aproximadamente en el centro de la cuenca occidental del Mar Mediterráneo, al E de la Península Ibérica, al S del continente europeo y al N de África. Esta localización es en gran medida causa de la variabilidad del clima local. El archipiélago está sometido a los efectos de la circulación atmosférica general y se ve muy afectado por la proximidad de los centros de acción del Atlántico, el N de África y el E de Europa. Las borrascas de origen atlántico se extinguen generalmente antes de alcanzar el Mediterráneo, pero pueden ser reactivadas al alcanzarlo, sobre todo al final del verano y durante el otoño, cuando el calor latente de la superficie del mar contribuye a crear inestabilidad en las capas bajas de la atmósfera. Estas borrascas tienden a descargar cuando alcanzan el W de Mallorca, debido a la compresión orográfica provocada por el promontorio de la Sierra de Tramuntana (1.445 m). Los fenómenos de mesoescala son también un factor importante. Afectan al archipiélago incidiendo especialmente desde el N, bien sea por efecto de ciclogénesis de origen regional (v.g. las que se generan en el Mar de Liguria) y/o como consecuencia de la convergencia de los vientos de tramuntana procedentes del continente europeo. En conjunto, se puede decir que la precipitación sigue un doble patrón topográfico y latitudinal, con un gradiente de precipitación descendente N-S y otro de mayor a menor altitud – siendo especialmente destacable en el caso de la ya mencionada Sierra de Tramuntana. La variabilidad espacial de la precipitación es importante, con máximas anuales por encima de los 1.200 mm en las zonas más elevadas de la Sierra e inferiores a los 400 mm al S de Mallorca. Estacionalmente, la variabilidad es también destacable, con máximas otoñales y un segundo pico de precipitación al final de la primavera (fig. 2). La aridez estival es especialmente acusada, como sucede típicamente en los climas mediterráneos.



**Figura 2.** Promedios mensuales de precipitación durante el periodo 1974-2014 para las estaciones B013 en Lluc (arriba) y B379 en Ses Salines Sa Vall (debajo). Se observa una notable diferencia en los volúmenes registrados, pero los picos de precipitación acontecen en los mismos meses del año.

<b>Código</b>	<b>Topónimo</b>	<b>Altitud</b>	<b>Precipitación media anual (mm)</b>
B007	Mortitx	371	1043
B013	Lluc	490	1272
B019	Mossa	530	1089
B061	Sóller	40	811
B075	Far Punta Grossa	130	503
B077	Son Bujosa	131	699
B084	Son Mas	375	754
B087	Banyalbufar	91	528
B108	Port d'Andratx	10	427
B118	Andratx s'Alqueria	245	639
B178	Calvià	145	537
B217	La Campaneta	535	817
B220	Son Net	220	680
B228A	Palma Urania	36	564
B240	Esporles	180	691
B244	Son Pacs	190	613
B249	Biniforani Nou	360	865
B260	Bunyola Raixa	155	683
B273	Sa Cabaneta	152	497
B276	Pont d'Inca	35	599
B346	Porreres	120	509
B373	Campos Salines de Llevant	3	445
B379	Ses Salines Sa Vall	10	392
B424	S'Alqueria Blanca	120	464
B434	Far de Portocolom	17	541
B520	Artà	115	695
B560	Cala Ratjada	10	597
B569	Far de Capdepera	66	457
B602	Ermita Betlem	275	637
B606	Felanitx	115	508
B644	Sineu	141	577
B645	Santa Margalida	85	683
B652	Alaró Son Bergues	240	749
B656	Santa Maria	130	534
B664	Sencelles	105	545
B666	Montuïri	164	526
B670	Algaida I	194	541
B674	Costitx	120	500
B682	Muro	50	648
B696	Campanet Biniatró	120	925
B703	Alc·dia	8	612
B745	Pollença Can Serra	96	989
B760	Pollença	50	827
B780	Port de Pollença A.M.	2	729

**Tabla 1.** Estaciones incluidas en la muestra, altitud y precipitación media anual de la serie 1974-2014.  
Fuente: AEMET.

## 4. Datos y metodología

### 4.1. Base de datos

La validez de los estudios sobre el clima depende en gran medida del control de calidad de las series de datos utilizadas (Begert et al., 2005), especialmente cuando se trata de un trabajo empírico – i. e. basado en observaciones y no en modelos. En el caso de las series de precipitación, los problemas principales de estandarización proceden de la autocorrelación que puede existir entre estaciones vecinas y la presencia de registros anómalos (v. g. *falsos ceros*) que pueden afectar de manera relevante a la homogeneidad de la base de datos (Peterson et al., 1998; González-Rouco et al., 2001). En el caso de las estaciones mediterráneas, la correlación entre estaciones vecinas tiende a ser baja (Rodríguez et al., 1999). Es decir, que existe un grado elevado de variabilidad espacial. Esto implica que (1) la muestra debe ser representativa de dicha variabilidad espacial; (2) la cuestión de la autocorrelación pierde importancia. Los datos seleccionados pertenecen a un conjunto de 44 estaciones totalizadoras de la red de AEMET, distribuidas de manera bastante dispersa y homogénea por todo el territorio del área de estudio (fig. 1). Otra cuestión a tener en cuenta es la amplitud de la serie temporal. La WMO recomienda que las series de datos utilizadas en estudios climáticos abarquen un mínimo de 30 años. En este caso, la base de datos – que se presenta en intervalos mensuales – cubre un período de 40 años (1974-2014), suficiente para que los resultados del análisis se consideren significativos.

### 4.2. Homogeneización de los datos

Con el objetivo de eliminar de la base de datos las inhomogeneidades y los datos anómalos que puedan existir se ha seguido un procedimiento de homogeneización, siguiendo el mismo método que el utilizado para la base de datos de precipitación MOPREDAS (González-Hidalgo et al., 2011). Este procedimiento se basa en el cálculo de una mejor serie de referencia para cada estación, en función de su correlación con las estaciones vecinas, que se utiliza para detectar la presencia de datos anómalos en cada serie de precipitación:

(1) En primer lugar, se genera una matriz de correlación de datos entre cada estación de referencia y sus vecinas, seleccionando las más cercanas (<25 km de distancia) y con mayor correlación (promedio de  $r > 0,5$ ; excluyendo los meses de julio y agosto por presentar gran cantidad de días sin precipitación). Se considera un periodo de solape mínimo de 10 años.

(2) Se calcula una serie promedio ponderada para cada una de ellas (Ramos-Calzado et al., 2008).

(3) Se compara cada serie original con su serie de referencia, aplicando métodos inter-cuartílicos de manera iterativa hasta despejar la serie de cualquier dato sospechoso (González-Hidalgo et al., 2009).

(4) Se crea una nueva matriz de correlaciones para detectar inhomogeneidades, aplicando el método del SNHT (Alexandersson, 1986).

### 4.3. Análisis de tendencias de precipitación

Para estudiar la correlación entre la serie temporal y las series de precipitación de cada estación se ha utilizado el coeficiente de correlación de Spearman (1904), que mide la relación ordinal entre rangos:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde  $n$  indica el número de valores,  $i$  el rango,  $d_i$  la diferencia entre rangos y donde el error estándar es:

$$\sigma = \frac{0,6325}{\sqrt{n - 1}}$$

Resultando una tendencia significativa cuando  $\rho < 0,05$ . La razón de escoger este método de correlación – frente a los de Kendall y Pearson – es que los datos no se encuentran estandarizados (no se ha eliminado la autocorrelación entre las series), lo que invita a utilizar un método no paramétrico (Chok, 2010). La  $\rho$  de Spearman ha sido utilizada para revelar tendencias en relación a sequías climáticas (Lorenzo-Lacruz, 2012) ya que refleja un mayor número de concordancias y discordancias que otros métodos no paramétricos (v. g. Kendall) y permite revelar con mayor precisión la relación entre variables.

#### 4.4. Evolución de las sequías climáticas

El SPI (McKee et al., 1993) es un índice de precipitación normalizado que ha sido abundantemente utilizado para calcular los impactos de las sequías climáticas (Lorenzo-Lacruz, 2012). Representa la probabilidad de ocurrencia de precipitación en relación a la observada en los registros climáticos para un lugar concreto y un periodo largo de registro. Sus ventajas (McKee et al., 1993), frente a otros índices que utilizan variables climáticas, como el PDSI, el PHDI o el Índice Z (Palmer, 1965) son que requiere el uso de un número menor de variables (únicamente la precipitación), que resulta fácilmente computable, que es multi-escalar, que permite monitorizar periodos de sequía y también de humedad. Es por ello que la WMO recomienda su uso para analizar y monitorizar las sequías. El SPI utiliza la distribución gamma para estandarizar los datos de precipitación (McKee et al., 1993), es decir para ajustar la probabilidad a una distribución de frecuencias de precipitación para cada estación:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

Donde  $x$  representa la precipitación,  $\beta$  es un parámetro de escala,  $\alpha$  un parámetro de forma y  $\Gamma(\alpha)$  es la función gamma. Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son estimados para cada estación, para cada mes del año y para escala de análisis temporal:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

Donde,

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

Y donde  $n$  representa el número de observaciones. Los parámetros resultantes se utilizan para calcular la probabilidad acumulativa de ocurrencia de precipitación, para un mes, escala temporal y estación, según:

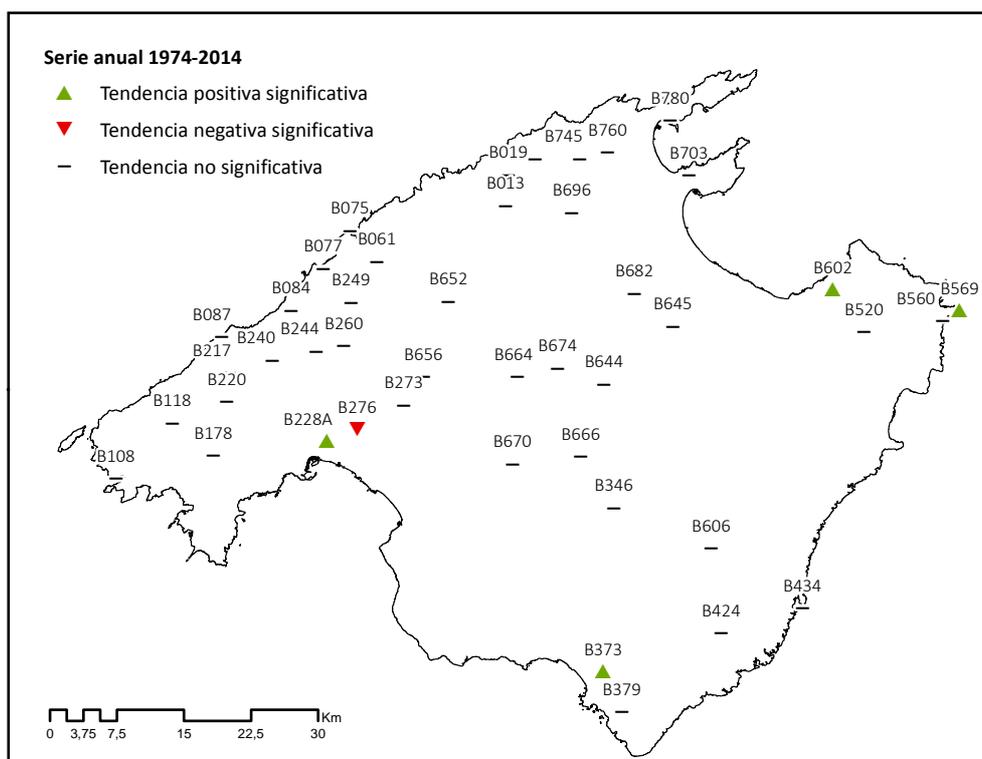
$$G(x) = \int_0^x q(x)dx = \frac{1}{\hat{\beta} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx$$

Cuyos resultados se normalizan para obtener una variable  $Z$ , que es el valor del SPI. En este caso los datos se han ajustado a la distribución III de Pearson (Guttman, 1999; Quiring, 2009), siguiendo el método descrito por López-Moreno y Vicente-Serrano (2008) y se han calculado a escalas de 6 a 48 meses. Los valores negativos de SPI indican un déficit de precipitación (extremo cuando el  $SPI \leq -2$ ) y los positivos una abundancia de lluvia y condiciones de alta humedad. La problemática de la escala de análisis de las sequías queda bien cubierta por el SPI, al tratarse de un índice multi-escalar. Analizada en escalas cortas, la sequía afecta sobre todo a las condiciones de humedad del suelo – reduciendo la productividad agrícola, aumentando el riesgo de incendios, etc. –, mientras que en escalas más largas puede afectar a la recarga de acuíferos y de otros reservorios de recursos hídricos – como lagos o embalses. El SPI se ha utilizado en este caso para revelar algunos de los episodios de sequía climática más destacables dentro de la serie temporal 1974-1995, así como para trazar su evolución a escala mensual.

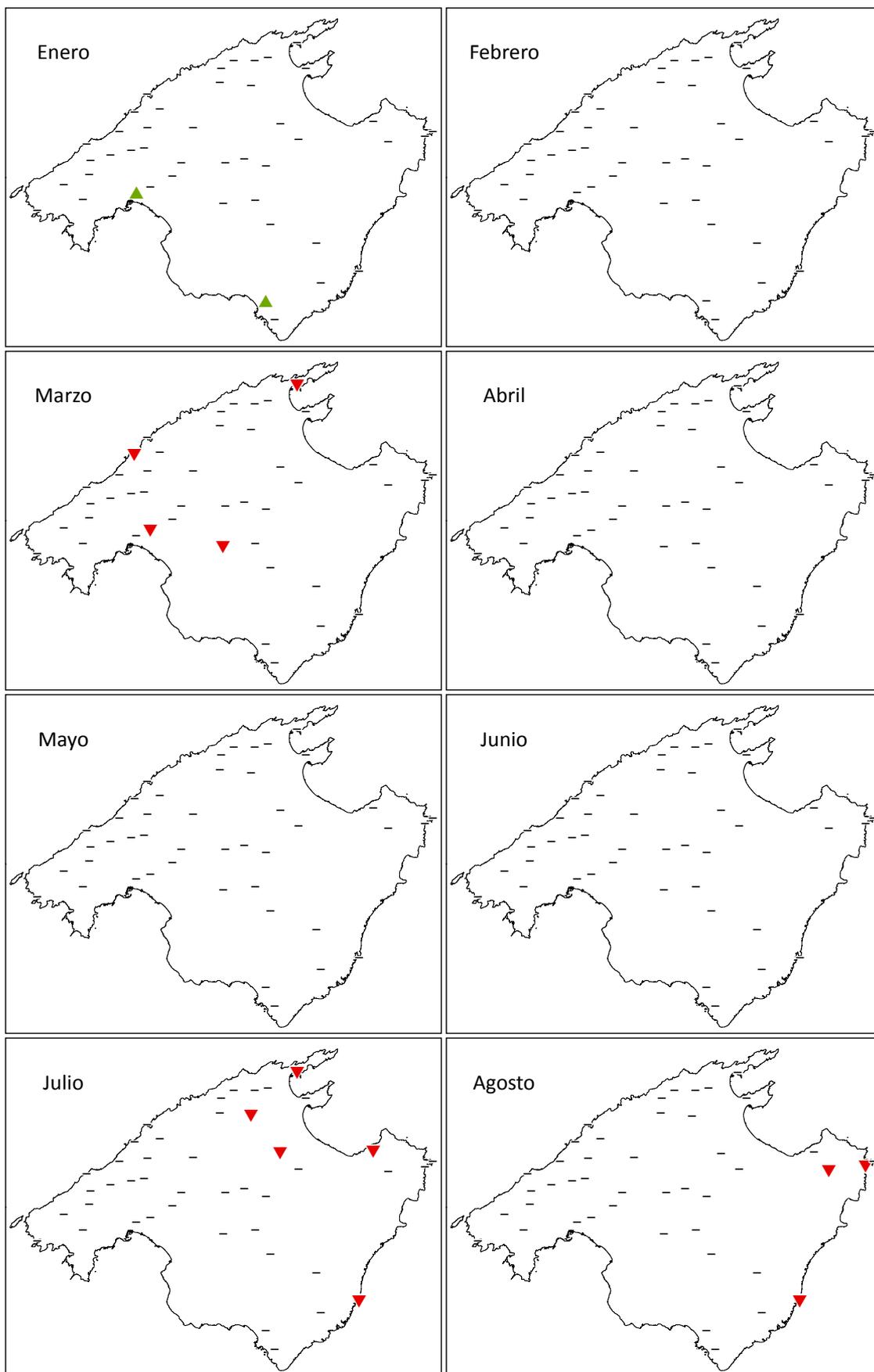
## 5. Resultados

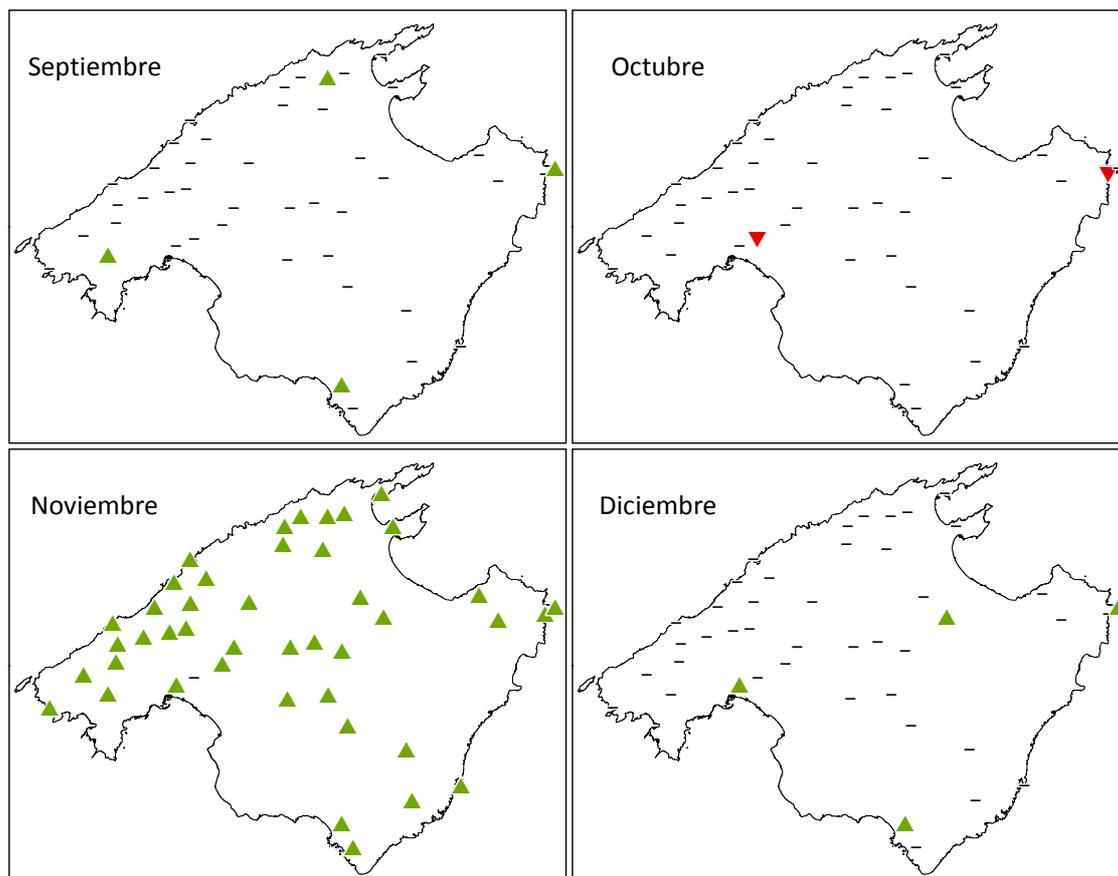
### 5.1. Análisis de tendencias

Las tendencias de precipitación anual y mensual se presentan en las figuras 3 y 4. Dos son los aspectos especialmente destacables: (1) que a escala anual existen solo 5 series (11,4%) con tendencia significativa, mayoritariamente positiva; (2) que durante el mes de noviembre son 41 las series con tendencia significativa (93,2%) y en todos los casos esta es positiva. Se han cartografiado únicamente las tendencias significativas a partir del nivel  $\rho < 0,05$ , pero la muestra incluye, además, una serie de tendencias con mayor significatividad (en el nivel  $\rho < 0,01$ ), especialmente en el mes de noviembre (19 estaciones) y en la serie anual (3 estaciones). De estas tres (B228A, B276 y B373) que presentan una mayor correlación entre la serie temporal y la serie de precipitación, dos (B228A y B276) se encuentra muy próximas entre sí, pero muy alejadas de la estación B373. Las otras dos estaciones (B569 y B602) que muestran una tendencia significativa a escala anual se encuentran bastante próximas entre sí pero alejadas de las tres con tendencias más significativas. En términos generales, no parece que exista una elevada correlación entre la variabilidad espacial y las tendencias de precipitación. Durante el mes de noviembre, prácticamente todas las estaciones muestran tendencias positivas significativas y durante el resto del año no se refleja ningún patrón espacial destacable. Tan sólo en los meses de verano parece existir una mayor tendencia negativa en las estaciones orientales de la isla, así como una tendencia negativa general (y positiva, en cambio, durante los meses de invierno).



**Figura 3.** Tendencias anuales de precipitación durante el periodo 1974-2014 para el conjunto de la muestra. Se observan 4 tendencias positivas significativas: en las estaciones B228A (Palma Urania), B373 (Campos – Salines de Llevant), B569 (Far de Capdepera) y B602 (Ermita de Betlem). Se observa también 1 tendencia negativa significativa: en la estación B276 (Pont d’Inca).

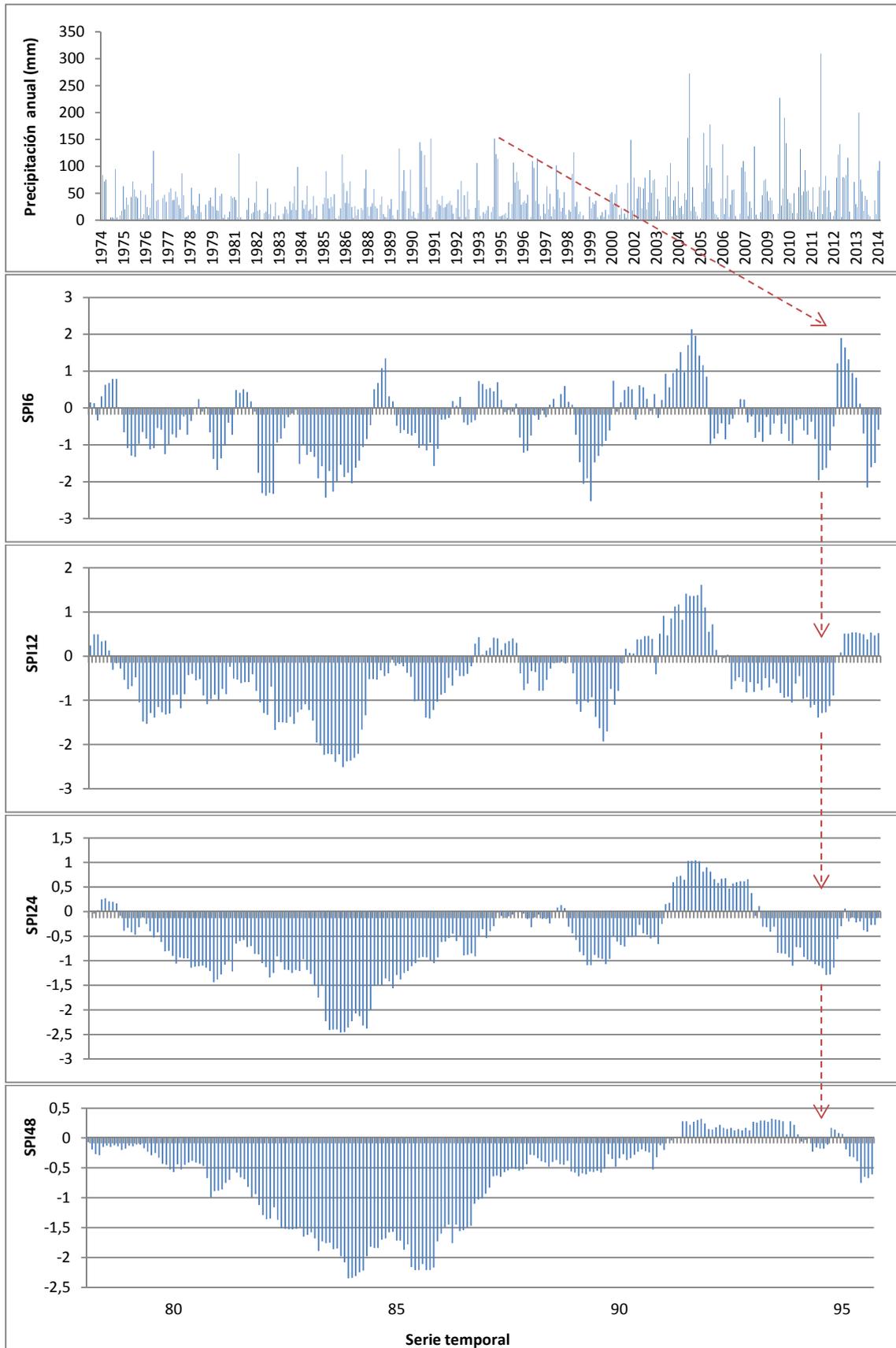




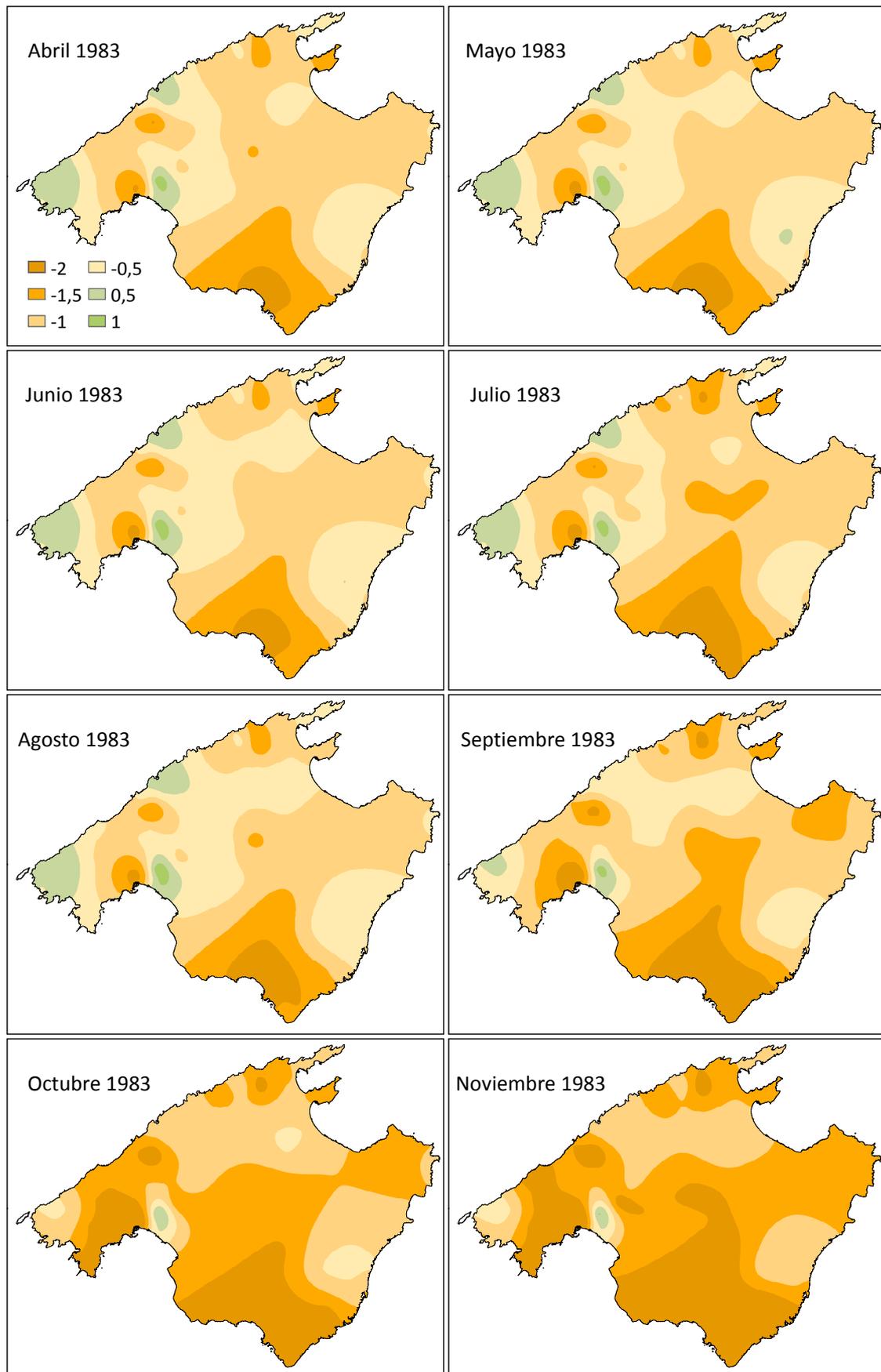
**Figura 4.** Tendencias mensuales de precipitación durante el periodo 1974-2014 para el conjunto de la muestra. Se observan tendencias positivas significativas en casi toda la muestra durante el mes de noviembre.

## 5.2. Monitorización de sequías

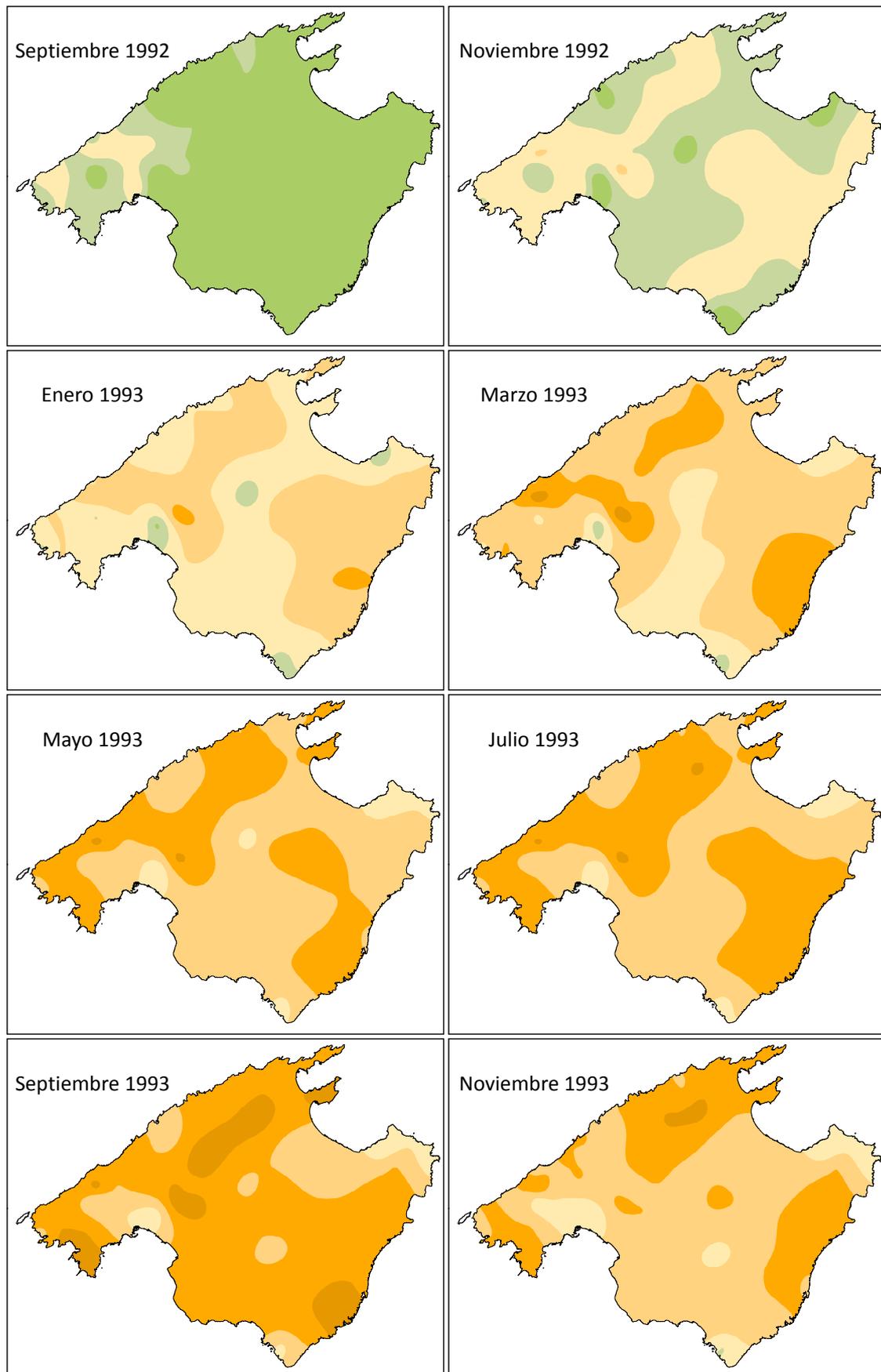
La figura 5 muestra la evolución de los valores Z de SPI en la estación B373 a escalas de 6, 12, 24 y 48 meses, en intervalos mensuales, desde 1974 hasta 1995 – en el caso de SPI6 – y hasta 1999 – en el caso de SPI48. A medida que la escala temporal aumenta, los periodos de sequía y humedad se muestran más persistentes y reducen su frecuencia de aparición (i. e. su ritmo de alternancia). Se observa que desde finales de los años 70 hasta finales de los años 90 – y especialmente hasta finales de los 80 – existieron unas condiciones de larga sequía climática. Podría parecer que la ocurrencia de períodos cortos de humedad a escala de 6 meses, con valores Z relativamente elevados, compensa la existencia de periodos más o menos cortos (6 a 12 meses) de sequía climática. Sin embargo, en escalas de análisis más largas queda patente que la intensidad de estas sequías no admite réplica por parte de los cortos periodos de humedad. Se puede decir, por tanto, que durante los años 80 se vivió en el entorno de esta estación un largo periodo de sequía. Como se observa en la figura 6, dicha sequía se extiende, de hecho, a toda la isla. En este caso, se ha cartografiado el momento de mayor intensidad de sequía, cuando los valores Z se encuentran por debajo de los 2 puntos negativos en el entorno de la estación B373 (Campos – Salines de Llevant). En abril de 1983, esta estación presenta un valor de SPI de -1,73 a escala de 48 meses. La situación de sequía severa se circunscribe a su ámbito (S de la isla) y se mantiene estable hasta septiembre del mismo año, cuando empieza a extenderse por el resto de la isla. En octubre, la estación B373 supera los 2 puntos negativos, mientras que la B569 (Far de Capdepera) se encuentra en valores muy extremos (-2,92). En noviembre son ya siete las estaciones con valores que superan los 2 puntos negativos (indicador de sequía extrema).



**Figura 5.** Valores de precipitación acumulada por año (arriba) y de SPI a escala de 6, 12, 24 y 48 meses para la estación B373 en Campos – Salines de Llevant. Se observa como a medida que la escala de análisis se hace más larga, los episodios secos son mayoritarios, revelando una situación de sequía persistente durante los años 80.



**Figura 6.** Evolución de un evento de sequía climática identificada en el año 1983. Se muestran los datos interpolados de SPI a escala de 48 meses.



**Figura 7.** Evolución de un evento de sequía climática identificada entre los años 1992 y 1993. Se muestran los datos interpolados de SPI a escala de 24 meses.

<b>SPI</b>	<b>Probabilidad cumulativa</b>	<b>Interpretación</b>	<b>Recurrencia (por 100 años)</b>
-3	0,0014		2,5 (cada 40 años)
-2,5	0,0062	Extremadamente seco	
-2	0,0228		
-1,5	0,0668	Severamente seco	5 (cada 20 años)
-1	0,1587	Moderadamente seco	10 (cada 10 años)
-0,5	0,3085		33 (cada 3 años)
0	0,5000	Casi normal	
0,5	0,6915		
1	0,8413	Moderadamente húmedo	
1,5	0,9332	Muy húmedo	
2	0,9772		
2,5	0,9938	Extremadamente húmedo	
3	0,9986		

**Tabla 2.** Categorías de sequía definidas por los valores de SPI, tomado de McKee et al., 1993. Probabilidad de recurrencia de sequías según los valores de SPI, tomado de WMO, 2012.

Como se observa en la imagen, prácticamente toda la isla se encuentra ya en una situación clara de sequía, que se extenderá a esta escala al menos hasta finales de los 80 (fig. 5). Sin embargo, a principios de los 90 la situación de déficit hídrico vuelve a agravarse. En la figura 7 se muestra un segundo evento de sequía climática dentro de la serie temporal, muy próximo al punto culminante del evento ya se ha analizado. En este caso, abarca el periodo 1992-1993, cuando las condiciones de humedad pasan de unos valores Z elevados (i. e. condiciones de humedad normales a elevadas en casi toda la isla) a unos valores muy negativos en casi todo el territorio. En septiembre de 1992 casi toda la isla se encuentra en unas condiciones de humedad normales y generalmente positivas (SPI a escala de 24 meses). Tan sólo cuatro de las 44 estaciones de la muestra presentan valores negativos. En noviembre, sin embargo, son ya seis. Y los valores de SPI se reducen de manera generalizada. Esta tendencia se mantiene hasta mayo del 93, cuando toda la isla se encuentra ya en situación de sequía. En septiembre del 93 cinco estaciones superan ya los 1,5 puntos negativos.

## 6. Discusión y conclusiones

El estudio de la correlación entre la serie temporal 1974-2014 y las series de precipitación disponibles en el área de estudio ha revelado la existencia de tendencias significativas en los registros de cinco estaciones pluviométricas. Cuatro de estas tendencias son positivas, lo que contradice los resultados de otros estudios realizados en el área Mediterránea (Xoplaki et al., 2004; López-Moreno y Vicente-Serrano, 2008; Longobardi i Villani, 2009; Lorenzo-Lacruz et al., 2010; Philandras et al., 2011, Kelley et al., 2012) o en Mallorca (Homar et al., 2010). Del conjunto de 44 estaciones de la muestra, sólo 18 presentan tendencias negativas y sólo una de ellas resulta significativa (B276). Ahora bien, la comparación de las tendencias temporales con los valores calculados para el SPI aporta una posible explicación a esta incoherencia. En primer lugar, cabe tener en cuenta que la mayoría de estudios regionales de tendencias tienen en consideración series temporales más largas (de  $\approx 50$  años). Este factor puede resultar fundamental, dado que la presencia de un fenómeno de sequía larga y severa al principio de la serie temporal – como el que han revelado los resultados de SPI24 y SPI48 (figs. 5 y 6) – puede condicionar la tendencia a largo plazo de precipitación en un sentido positivo. Si desde finales de los 70 hasta principios de los 2000 aprox. se dieron unas condiciones de sequía generalizada en toda la isla – o en su mayor parte – resulta evidente que la recuperación de unos patrones normales de alternancia entre periodos secos y húmedos en la actualidad dará lugar a una tendencia temporal positiva. Cabe suponer, asimismo, que la tendencia será tanto más significativa en aquellas estaciones que durante el periodo de sequía climática padecieron unas condiciones de sequedad más severa. Este es el caso de la estación B373, que no en vano es la que presenta una mayor correlación en toda la muestra.

De este modo, queda claro que la utilidad de uno y otro método de análisis – (1) correlación entre serie temporal y series de precipitación; (2) SPI – se potencian de manera sinérgica cuando se emplean conjuntamente para explicar sus resultados. Homar et al. (2010) revelaron una tendencia general negativa de precipitación en Mallorca durante el periodo 1951-2006 – que es incoherente con los resultados de este trabajo –, al tiempo que confirmaban un descenso acusado de la precipitación durante los años 80 – coincidente con los resultados de este trabajo. Dos son los factores que explicarían dicha incoherencia: (1) en primer lugar, su estudio incluía únicamente series de precipitación de 18 estaciones pluviométricas (frente a las 44 utilizadas en este estudio); (2) su rango temporal es más amplio. El periodo 1951-1973, que queda excluido de la franja temporal analizada en este trabajo podría presentar – y probablemente presenta – unos valores de precipitación elevados (o incluso inusualmente elevados) en comparación con los registrados a partir de los años 80. De este modo, la tendencia a largo plazo resultaría negativa, cuando el presente estudio parece presentar una tendencia general positiva, motivada por tratarse de series más recientes y por el incremento de la precipitación otoñal. Los resultados de este trabajo han revelado un cambio reciente en la distribución estacional de la precipitación, con un aumento considerable de la precipitación en el mes de noviembre, que afecta a la totalidad de la isla.

El SPI refleja adecuadamente el impacto de las sequías climáticas sobre la disponibilidad de recursos hídricos (WMO, 2012), a pesar de no tener en cuenta otros factores aparte de la precipitación – como la temperatura o la ETP. En este trabajo se ha revelado como una herramienta muy útil como complemento del estudio de las tendencias de precipitación (permite interpretarlas en relación a la presencia de sequías climáticas o de condiciones inusuales de elevada humedad). Conjuntamente, constituyen un método de trabajo con gran potencial para evaluar las condiciones y tendencias climáticas a diferentes escalas espaciales y temporales. La calidad y validez de los resultados depende, en última instancia, como ha quedado claro, de la disponibilidad de una buena base de datos, en

términos de amplitud (mejor cuanto más amplia), continuidad (sin huecos en las series), variabilidad espacial (sin inhomogeneidades) y precisión (sin datos anómalos en los registros). En este trabajo se ha intentado cumplir con estas cuatro condiciones, obteniendo de este modo una base de datos de precipitación de calidad para el conjunto de Mallorca y el periodo analizado. Los resultados obtenidos a partir de su análisis son valiosos y complementan, incluso cuando los contradicen, los de otros estudios implementados en la región. El objetivo último de los estudios climáticos en el área Mediterránea debe ser caracterizar sus particularidades para entender mejor su funcionamiento en relación al cambio climático global. Por ello, revelar patrones de variabilidad espacial o temporal (como es el caso) resulta de gran utilidad. Como conclusión general a este estudio, se puede decir que la tendencia de precipitación durante el periodo analizado (1974-2014) es positiva, debido a la ocurrencia de un periodo largo de sequía climática en la primera parte de la serie temporal y al incremento de la precipitación otoñal. Este hecho debe ser tenido en cuenta en posteriores estudios, tanto de carácter estrictamente climático como en aquellos que traten de relacionar clima y respuesta hidrológica.

## **Agradecimientos**

Este trabajo hubiera sido inabarcable sin la participación y consejo del Dr. Jorge Lorenzo-Lacruz, que lo ha tutelado y ha aportado su bagaje en materia de estudios climáticos y de tratamiento estadístico.

## Referencias

- Alexandersson, Hans. "A Homogeneity Test Applied to Precipitation Data." *Journal of Climatology* 6.6 (1986): 661–675.
- Begert, Michael, Thomas Schlegel, y Walter Kirchhofer. "Homogeneous Temperature and Precipitation Series of Switzerland from 1864 to 2000." *International Journal of Climatology*, 25.1 (2005): 65–80.
- Box, Jason E. et al. "Greenland Ice Sheet Surface Mass Balance Variability (1988–2004) From Calibrated Polar MM5 Output\*." *Journal of Climate*, 19.12 (2006): 2783–2800.
- Chiew, F.h.s. et al. "El Nino/Southern Oscillation And Australian Rainfall, Streamflow and Drought: Links and Potential for Forecasting." *Journal of Hydrology* 204.1-4 (1998): 138–149.
- Chok, N.S. "Pearson's versus Spearman's and Kendall's correlations coefficients for continuous data", Tesis de Master, University of Pittsburgh.
- Essex, Stephen, Martin Kent, y Rewi Newnham. "Tourism Development In Mallorca: Is Water Supply a Constraint?" *Journal of Sustainable Tourism* 12.1 (2004): 4–28.
- Estrany, Joan, Celso Garcia, y Ricardo Alberich. "Streamflow Dynamics in a Mediterranean Temporary River." *Hydrological Sciences Journal* 55.5 (2010): 717–736.
- Garcia, Celso, y Jaume Servera. "Impacts Of Tourism Development on Water Demand and Beach Degradation on the Island of Mallorca (Spain)." *Geografiska Annaler, Series A*, 85.3-4 (2003): 287–300.
- González-Hidalgo, José Carlos et al. "Monthly Precipitation Trends on the Mediterranean Fringe of the Iberian Peninsula during the Second-Half of the Twentieth Century (1951-2000)." *International Journal of Climatology* 29.10 (2009): 1415–1429.
- González-Hidalgo, José Carlos, Michele Brunetti, y Martín De Luis. "A New Tool for Monthly Precipitation Analysis in Spain: MOPREDAS Database (Monthly Precipitation Trends December 1945-November 2005)." *International Journal of Climatology* 31.5 (2011): 715–731.
- González-Rouco, J. Fidel et al. "Quality Control And Homogeneity of Precipitation Data in the Southwest of Europe." *Journal of Climate* 14.5 (2001): 964–978.
- Goodrich, David C. et al. "Measurement And Analysis of Small-Scale Convective Storm Rainfall Variability." *Journal of Hydrology* 173.1-4 (1995): 283–308.
- Guttman, Nathaniel B. "Accepting The Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm 1." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 35.2 (1999): 311–322.
- Hof, Angela, y Thomas Schmitt. "Urban And Tourist Land Use Patterns and Water Consumption: Evidence from Mallorca, Balearic Islands." *Land Use Policy* 28.4 (2011): 792–804.
- Homar, V. et al. "Recent Trends in Temperature and Precipitation over the Balearic Islands (Spain)." *Climatic Change* 98.1-2 (2010): 199–211.
- Hormes, A., B. Müller, y C. Schlüchter. "The Alps With Little Ice: Evidence for Eight Holocene Phases of Reduced Glacier Extent in the Central Swiss Alps." *The Holocene* 11.3 (2001): 255–265.
- Hurrell, James W., y Harry Van Loon. "Decadal Variations In Climate Associated with the North Atlantic Oscillation." *Climatic Change at High Elevation Sites* (1997): 69–94.
- Janowiak, John E. "An Investigation Of Interannual Rainfall Variability in Africa." *Journal of Climate*, 1.3 (1988): 240–255.
- Karl, Thomas R., Richard W. Knight, y Neil Plummer. "Trends In High-Frequency Climate Variability in the Twentieth Century." *Nature* 377.6546 (1995): 217–220.
- Keim, Barry D., Robert A. Muller, y Gregory W. Stone. "Spatial And Temporal Variability of Coastal Storms in the North Atlantic Basin." *Marine Geology* 210.1-4 (2004): 7–15. Web.

- Kelley, Colin et al. "Mediterranean Precipitation Climatology, Seasonal Cycle, and Trend as Simulated by CMIP5." *Geophysical Research Letters* 39.21 (2012).
- Lamy, Frank et al. "Holocene Rainfall Variability in Southern Chile: a Marine Record of Latitudinal Shifts of the Southern Westerlies." *Earth and Planetary Science Letters* 185.3-4 (2001): 369-382.
- Lau, Ngar-Cheung. "Variability Of the Observed Midlatitude Storm Tracks in Relation to Low-Frequency Changes in the Circulation Pattern." *Journal of the Atmospheric Sciences* 45.19 (1988): 2718-2743.
- Leiserowitz, Anthony. "Climate Change Risk Perception And Policy Preferences: The Role of Affect, Imagery, and Values." *Climatic Change* 77.1-2 (2006): 45-72.
- Longobardi, Antonia, y Paolo Villani. "Trend Analysis of Annual and Seasonal Rainfall Time Series in the Mediterranean Area." *International Journal of Climatology* (2009).
- López-Moreno, J. Ignacio, y Sergio M. Vicente-Serrano. "Positive And Negative Phases of the Wintertime North Atlantic Oscillation and Drought Occurrence over Europe: A Multitemporal-Scale Approach." *Journal of Climate* 21.6 (2008): 1220-1243.
- Lorenzo-Lacruz, J. et al. "Recent Trends in Iberian Streamflows (1945-2005)." *Journal of Hydrology* 414-415 (2012): 463-475.
- Lorenzo-Lacruz, J. et al. "The Impact of Droughts and Water Management on Various Hydrological Systems in the Headwaters of the Tagus River (Central Spain)." *Journal of Hydrology* 386.1-4 (2010): 13-26.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, y J. Kleist. "Drought monitoring with multiple time scales." *Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society* (1995): 233-236.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, y J. Kleist. "The relationship of drought frequency and duration of time scales". *Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society* (1993): 179-186.
- Nicholson, S. "The Nature of Rainfall Variability over Africa on Time Scales of Decades to Millennia." *Global and Planetary Change* 26.1-3 (2000): 137-158.
- Obled, Ch., J. Wendling, y K. Beven. "The Sensitivity of Hydrological Models to Spatial Rainfall Patterns: an Evaluation Using Observed Data." *Journal of Hydrology* 159.1-4 (1994): 305-333.
- Pahl-Wostl, Claudia. "Transitions Towards Adaptive Management of Water Facing Climate and Global Change." *Water Resour Manage Water Resources Management* 21.1 (2006): 49-62.
- Peterson, Thomas C. et al. "Homogeneity Adjustments Ofin Situ Atmospheric Climate Data: a Review." *International Journal of Climatology Int. J. Climatol.* 18.13 (1998): 1493-1517.
- Philandras, C. M. et al. "Long Term Precipitation Trends and Variability within the Mediterranean Region." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Natural Hazards and Earth System Science* 11.12 (2011): 3235-3250.
- Pälli, Anja et al. "Spatial And Temporal Variability of Snow Accumulation Using Ground-Penetrating Radar and Ice Cores on a Svalbard Glacier." *Journal of Glaciology* 48.162 (2002): 417-424.
- Palmer, W.C. "Meteorologic Drought". US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper 45 (1965): 58.
- Quiring, Steven M. "Developing Objective Operational Definitions For Monitoring Drought." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48.6 (2009): 1217-1229.
- Ramis, C. et al. "Daily Precipitation Records over Mainland Spain and the Balearic Islands." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Natural Hazards and Earth System Science* 13.10 (2013): 2483-2491.
- Rodríguez, Roberto, María-Carmen Llasat, y Dennis Wheeler. "Analysis Of the Barcelona Precipitation Series 1850-1991." *International Journal of Climatology* 19.7 (1999): 787-801.

- Rogers, Jeffrey C. "North Atlantic Storm Track Variability And Its Association to the North Atlantic Oscillation and Climate Variability of Northern Europe." *Journal of Climate J. Climate* 10.7 (1997): 1635–1647.
- Schoof, Christian. "Ice-Sheet Acceleration Driven by Melt Supply Variability." *Nature* 468.7325 (2010): 803–806.
- Singh, V. P. "Effect Of Spatial and Temporal Variability in Rainfall and Watershed Characteristics on Stream Flow Hydrograph." *Hydrol. Process. Hydrological Processes* 11.12 (1997): 1649–1669.
- Smit, Barry et al. *An Anatomy of Adaptation to Climate Change and Variability*. Emmitsburg, MD: National Emergency Training Center, 2000.
- Solomon, Susan. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, 2007.
- Spearman, C. "The Proof And Measurement of Association between Two Things." *The American Journal of Psychology* 15.1 (1904): 72.
- Sperber, K. R., y T. N. Palmer. "Interannual Tropical Rainfall Variability In General Circulation Model Simulations Associated with the Atmospheric Model Intercomparison Project." *Journal of Climate J. Climate* 9.11 (1996): 2727–2750.
- Sumner, G., V. Homar, y C. Ramis. "Precipitation Seasonality in Eastern and Southern Coastal Spain." *International Journal of Climatology Int. J. Climatol.* 21.2 (2001): 219–247.
- Tucker, Gregory E., y Rafael L. Bras. "A Stochastic Approach to Modeling the Role of Rainfall Variability in Drainage Basin Evolution." *Water Resources Research Water Resour. Res.* 36.7 (2000): 1953–1964.
- Wessels, K.j. et al. "Can Human-Induced Land Degradation Be Distinguished from the Effects of Rainfall Variability? A Case Study in South Africa." *Journal of Arid Environments* 68.2 (2007): 271–297.
- WMO. *Standardized Precipitation Index. Use Guide.* WMO-No. 1090 (2012).
- Wood, Eric F. et al. "Effects Of Spatial Variability and Scale with Implications to Hydrologic Modeling." *Journal of Hydrology* 102.1-4 (1988): 29–47.
- Woods, Ross, y Murugesu Sivapalan. "A Synthesis of Space-Time Variability in Storm Response: Rainfall, Runoff Generation, and Routing." *Water Resources Research Water Resour. Res.* 35.8 (1999): 2469–2485.
- Xoplaki, E. et al. "Wet Season Mediterranean Precipitation Variability: Influence of Large-Scale Dynamics and Trends." *Climate Dynamics* 23.1 (2004).