

Producto E4.4.3. Informe técnico sobre la obtención de los umbrales de Lluvia en las zonas de estudio

Due date of deliverable: 31/07/2021
Actual submission date: 31/07/2021

Lead contractor for this deliverable: IGME

Autores

Juan Antonio Luque Espinar, Roberto Sarro, Eduardo Peña, Cristina Reyes, Rosa María Mateos, Agustín Millares, Marina Cantalejo, Miriam Silva



Table of Content

1	INTRODUCCIÓN	3
2	ANTECEDENTES	4
2.1.	La costa mediterránea de Andalucía	4
2.2.	Costa mediterránea de las Islas Baleares.....	4
3	DATOS EMPLEADOS	4
3.1.	Costa de Granada	5
3.2.	Mallorca	7
4	METODOLOGÍA	9
5	RESULTADOS	10
5.1.	Costa de Granada	10
5.2.	Mallorca	1
6	PRECIPITACIONES EN MALLORCA	19
7	SIMULACIONES	21
8	ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS CICLOS CLIMÁTICOS EN MALLORCA	29

CONCLUSIONES

Agradecimientos

BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

La presentación de este producto se enmarca en el contexto del GT 4: Herramientas de apoyo a los sistemas de alerta temprana para diferentes tipos de riesgo y modelos de costa.

El objetivo de este GT es adaptar herramientas existentes o desarrollar nuevas en caso de necesidad basadas en datos de teledetección (satelital/drones/o terrestre) para apoyar a los sistemas de alerta temprana frente a diferentes tipos de riesgo y modelos de costa. Mediante esta aproximación, se pretende proporcionar una solución integrada capaz de absorber datos provenientes de diferentes sensores y generar mapas que puedan ser utilizados como soporte a la prevención y alerta frente a riesgos geológicos. Los resultados de este GT serán útiles en el GT2 permitiendo la mejora de los mapas de susceptibilidad y peligrosidad a los diferentes riesgos tratados y mejorando las capacidades de prevención de las autoridades competentes.

En este producto se muestran los resultados de los análisis espectrales junto con las simulaciones de un conjunto de series temporales que se han considerado representativas de la zona donde se encuentran o que sus registros se han podido simular. Cabe destacar que las simulaciones mencionadas no buscan reproducir la lluvia, puesto que no es una herramienta pensada para este fin, trata de reproducir únicamente los ciclos climáticos estimados en el análisis espectral por lo que algunos picos de lluvia pueden no coincidir con dichos ciclos. Cuando ha sido posible, la estimación de los ciclos en las series y su significación estadística se ha empleado para determinar su incidencia en la zona estudiada. En caso contrario, sólo se utilizará el tratamiento individual de las series para analizar la incidencia local de las precipitaciones y su potencial relación con riesgos ligados a las mismas. Los resultados obtenidos se relacionarán con registros históricos de inundaciones, deslizamientos, caídas de bloques, etc.

Este análisis se ha centrado en dos de los test-sites de RISKCOAST: la costa de Granada y en las Islas Baleares, concretamente en la isla de Mallorca. Ambas zonas presentan información suficiente para alcanzar los objetivos del análisis planteado en RISKCOAST.

En el sur de Europa, los ciclos climáticos reconocidos por diferentes autores en diferentes medios son esencialmente los siguientes:

- Quasi-Biennial Oscillation (QBO). Ciclos entre 2 and 2.9 años.
- El Niño Southern Oscillation (ENSO). Ciclos entre 3 y 6 años. No obstante, la fase cálida de ENSO puede variar entre 2 y 7 años.

- North Atlantic Oscillation (NAO). Varía entre 6 y 10 años.
- Manchas solares. Ciclos entre 10.5 y 12 años.
- Ciclos lunares, entre 16 y 19 años.
- Ciclo Hale, entre 20 y 25 años.
- Actividad solar. Ciclos entre 26.8 y 47.6 años.
- Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). Ciclos entre 61 y 70 años.

2. ANTECEDENTES

Este producto se ha desarrollado con la información procedente de las dos zonas de trabajo: costa mediterránea de Andalucía, concretamente la costa de Granada y las Islas Baleares, principalmente en la isla de Mallorca.

2.1 La costa de Andalucía

La costa de Granada es abrupta, donde desembocan ríos que dan lugar a llanuras aluviales y deltas de diferente extensión y régimen de escorrentía. El clima es templado-cálido y las precipitaciones suelen ser escasas y de carácter torrencial.

Los ríos son cortos, con un acusado régimen estacional. Los cauces estacionales se denominan ramblas y tienen una enorme capacidad de transporte de sedimentos durante las avenidas. Algunos registros históricos de avenidas ligadas a estas ramblas estuvieron ligadas a precipitaciones de hasta 420 mm en una hora (octubre de 1973, en la costa de Granada y Almería). El río Almanzora (Almería) llegó a tener un caudal medio de 3500 m³/s y puntas superiores a los 5000 m³/s.

2.2. La costa de las Islas Baleares

El clima de las Baleares es del tipo Mediterráneo marítimo, con temperaturas invernales suaves y veranos muy calurosos. Las lluvias suelen ser de tipo torrencial, especialmente después de los meses estivales, cuando se produce el fenómeno conocido como “gota fría”. Entonces tienen lugar episodios de lluvias intensas con precipitaciones de hasta 300 mm/24 h. Los temporales más intensos tienen lugar en el invierno, cuando sopla el viento frío de Tramuntana.

3. DATOS EMPLEADOS

En general, la información experimental empleada, ha consistido en series históricas de precipitaciones, registros piezométricos, caudales de manantiales y caudales registrados en cauces superficiales. Una vez revisada toda esta información, se han seleccionado aquellos registros que tengan un mínimo de 20 años continuos de medias y que no presenten lagunas en los mismos.

En total, se han tenido en cuenta cerca de 3000 series de datos entre ambas zonas de trabajo.

3.1 Costa de Granada

La figura 1 muestra la localización de las estaciones pluviométricas que, a priori, presentan las características adecuadas para realizar el análisis espectral.

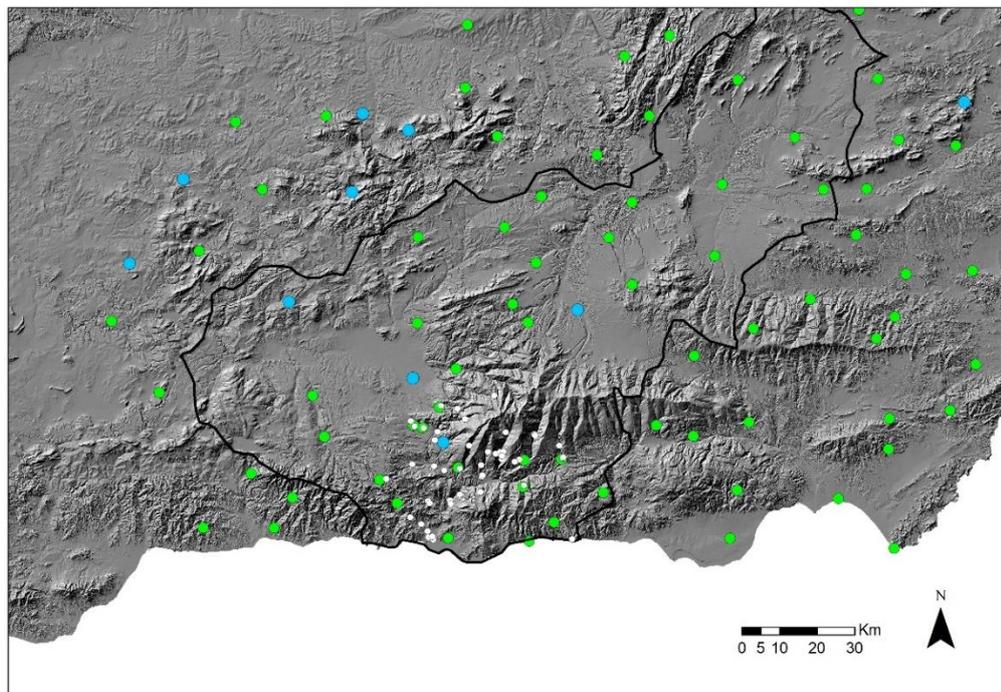


Figura 1. Estaciones pluviométricas. Azul: estaciones que tienen en torno a 100 años de registros. Verde: estaciones que tienen al menos 20 años de registros. Blanco: estaciones con datos diarios.

La figura 2 muestra las estaciones de aforos seleccionadas para estimar los valores espectrales de los registros de caudales que presentan.

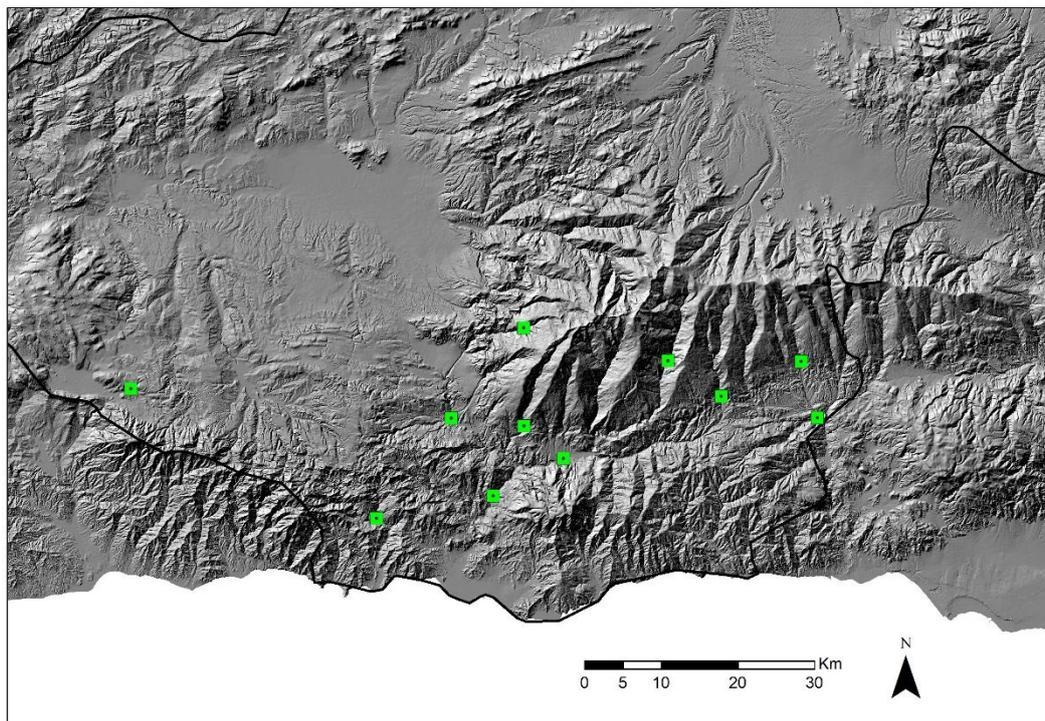


Figura 2. Estaciones de aforos.

La figura 3 muestra los piezómetros seleccionados para estimar los valores espectrales de los registros disponibles.

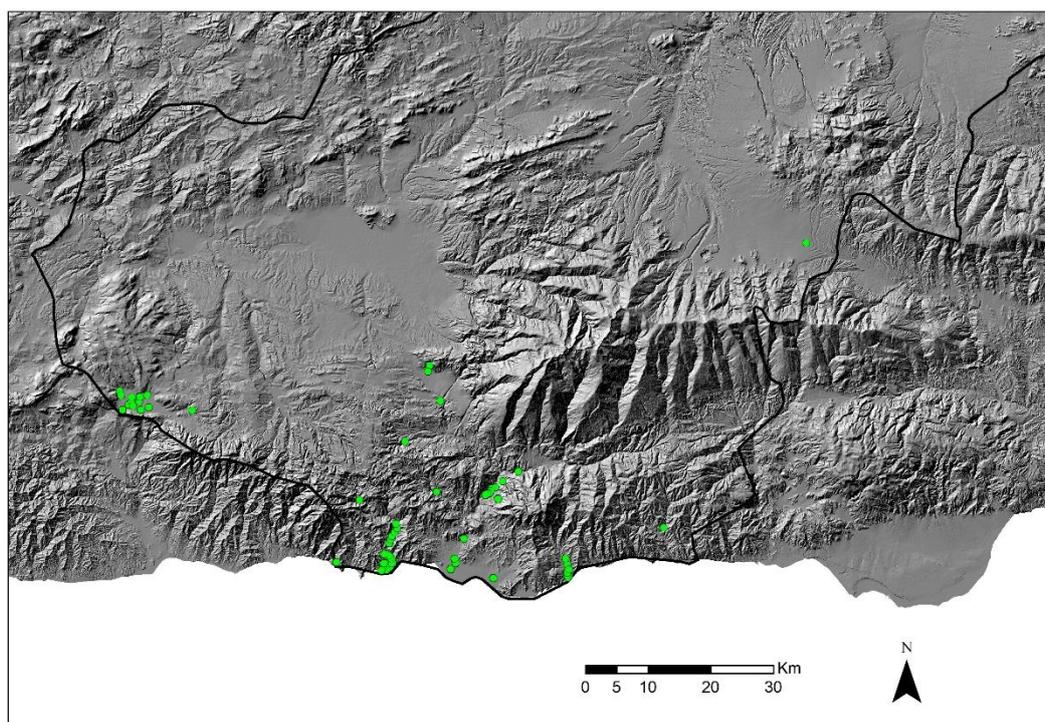


Figura 3. Piezómetros en la Cuenca Mediterránea andaluza.

3.2 Mallorca

La figura 4 muestra las estaciones pluviométricas seleccionadas para estimar los valores espectrales de los registros de precipitaciones.

La figura 5 muestra la distribución de estaciones piezométricas existentes en Mallorca.

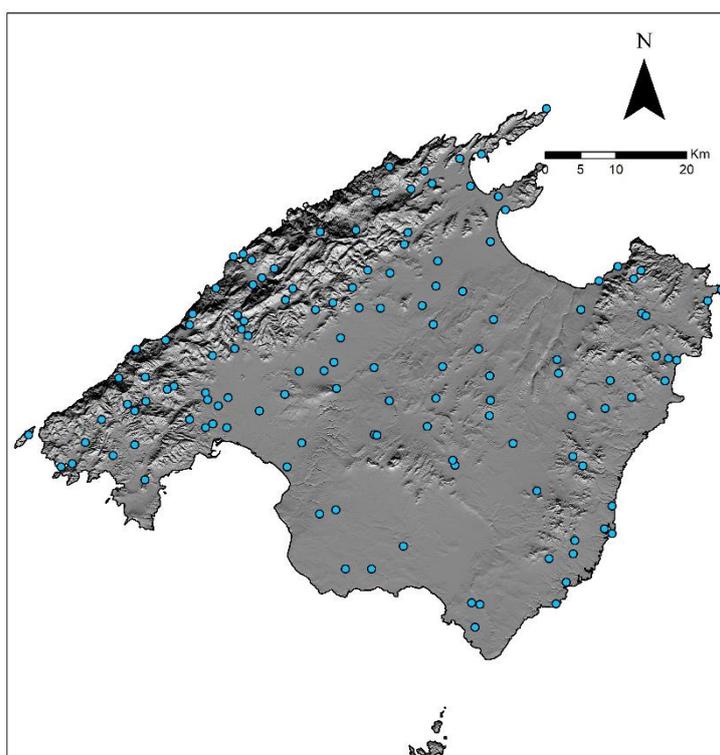


Figura 4. Estaciones pluviométricas en la isla de Mallorca.

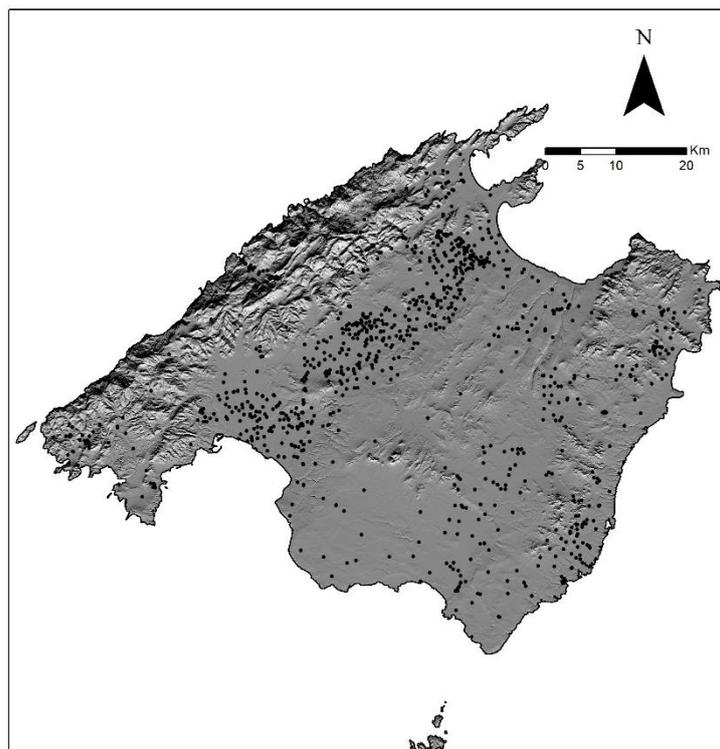


Figura 5. Localización de los piezómetros en la isla de Mallorca.

La figura 6 muestra las estaciones de aforos que se controlan en Mallorca.

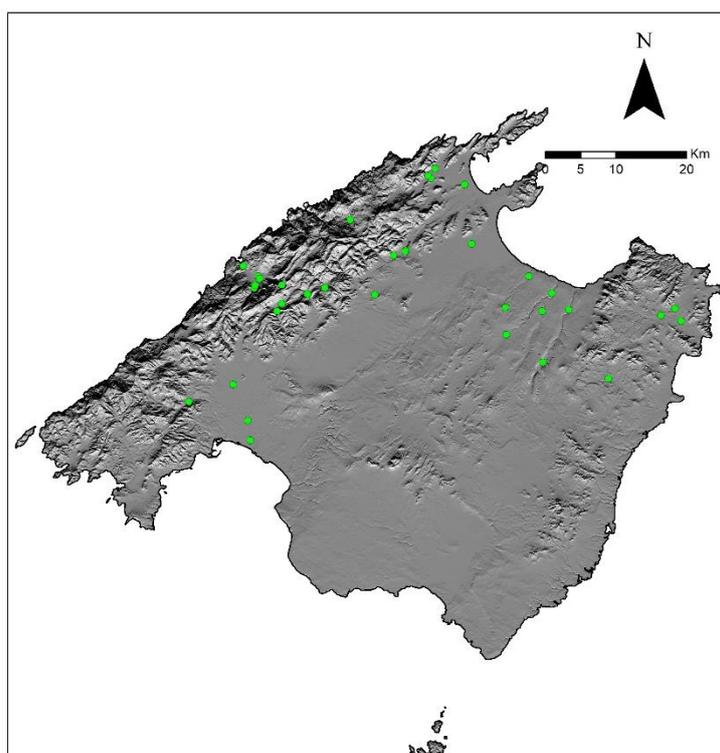


Figura 6. Estaciones de aforos en la isla de Mallorca.

4. METODOLOGÍA

El análisis espectral es una metodología ampliamente utilizada para el estudio de series temporales. En síntesis, el objetivo de este método es la identificación de patrones que rigen las oscilaciones (ciclos) presentes en una serie temporal. Para ello, establece un modelo que considera a la serie como una combinación lineal de funciones sinusoidales de periodo conocido, pero de amplitud y fase desconocidas. El análisis espectral pretende la estimación de estos parámetros, amplitud y fase, de cada función sinusoidal de la serie analizada. En particular, la amplitud está relacionada con la varianza de los datos de la serie, de modo que ésta puede descomponerse en componentes que equivalen a la parte de la varianza explicada por cada función sinusoidal. La función que relaciona la varianza explicada con respecto a la frecuencia de los armónicos se conoce como “densidad espectral”. Para este trabajo se ha utilizado el método de Blackman-Tukey que permite calcular la densidad espectral a partir de la función covarianza de la serie.

La técnica estadística usada para encontrar componentes cíclicos en series temporales se conoce como análisis espectral (Jenkins y Watts, 1968). El objetivo de éste es la identificación de los patrones que rigen las oscilaciones presentes en una serie temporal. Para ello se utiliza un modelo estructural que consiste en considerar a la serie temporal como una combinación lineal de funciones sinusoidales de periodo conocido, pero de amplitud y fase desconocidas. Este modelo es conocido como representación armónica. El análisis espectral consiste en estimar la amplitud y la fase de cada onda sinusoidal en la serie temporal analizada. En particular, la amplitud está relacionada con la varianza de la serie temporal, de modo que la varianza total se descompone en la varianza explicada por cada una de las ondas sinusoidales existentes. Cuando dicha varianza se representa frente a la frecuencia de los armónicos, se obtiene una representación gráfica conocida como densidad espectral.

Existen diferentes técnicas matemáticas para el análisis espectral de una serie temporal. La metodología empleada en este trabajo ha sido la de Blackman-Tukey (Blackman and Tukey, 1958), por ser más robusta, donde la densidad espectral se ha calculado a partir de la función de covarianza del proceso.

El estimador de la densidad espectral es:

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \left(\lambda(0)C(0) + \sum_{k=1}^M \lambda(k)C(k) \cos(\omega k) \right)$$

donde:

$S(w)$: es la densidad espectral estimada para la frecuencia w .

$C(k)$: es la función de covarianza para el paso k -ésimo.

$l(k)$: función de ponderación conocida como “lag window” y que sirve para ponderar con un menor peso los valores de covarianza para pasos k mayores y que son estadísticamente menos significativos.

El “lag window” utilizado en este trabajo ha sido el de Tukey:

$$\lambda(k) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{\pi k}{k=1} \right) \right) \quad 0 \leq k \leq M$$

donde M : es el número de pasos de la función covarianza utilizados en la estimación de la densidad espectral. M , como máximo, puede valer $N-1$, donde N es el número de valores de la serie temporal. Cuando el valor de M es alto muchos de los picos que aparecen en la densidad espectral pueden no ser significativos. Por el contrario, si se utiliza un valor de M pequeño, es posible que los picos principales no estén bien representados en la densidad espectral. En este trabajo se han utilizado dos valores de M ; el primero, para discriminar los picos presentes en la densidad espectral ($N/2$), y el segundo, para confirmar los picos más significativos ($N/4$).

Además, para determinar el grado de validez de los resultados del análisis espectral, se calcula la significación estadística que se incluye en el gráfico. La significación estadística varía desde menor del 90% (línea inferior) hasta mayor del 99% (línea superior).

5. RESULTADOS

Este producto se ha desarrollado con la información procedente de dos zonas de trabajo mencionadas.

Los resultados han presentado diferentes grados de fiabilidad, pero en conjunto, los ciclos climáticos que influyen ambas zonas han sido determinados de forma fiable. Los registros piezométricos son los que han presentado peores resultados debido a la falta de continuidad de la información experimental y a la muy probable influencia de los bombeos. Tampoco se deben descartar errores en la toma de datos.

5.1 Costa de Granada

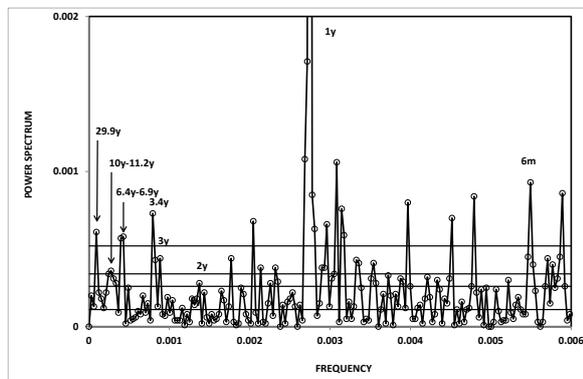
Estaciones pluviométricas

De acuerdo con el análisis realizado, finalmente, las estaciones que ofrecen resultados que permitan su uso para los objetivos de RISKCOAST se muestran en la tabla 1. En esta tabla se agrupan de acuerdo con su relación con ciclos mencionados más arriba y por presentar valores cercanos dentro de los ciclos.

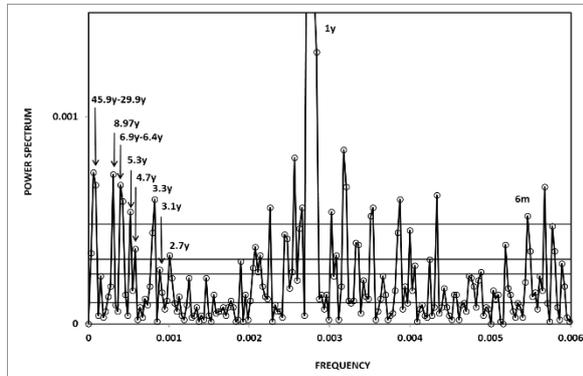
NOMBRE-Munic	2y	2.3y	2.5y	2.7y	3y	3.3y	3.4y	3.5y	4.2y	4.5y	4.7y	5y	5.3y	5.6y	5.8y	6.4y	6.9y	7.5y	8.1y	8.9y	10y	11.2y	12.8y	17.9y	29.9y	44.9y	89.9y
ALBUÑUELAS	90				95		99									99	99				95	95			99		
CÁDIAR	95						99			99						99	99		90		95		90				
SALOBREÑA				95	90	99						99				99	99				99				99	99	
ITRABO																											
ÓRGIVA	99		95	95			99			95						99	99		99					95	95	<90	
POZUELO (EI)																											
BERCHULES	90						99			95						99	99		95		95		95				
LANJARON	95			95				95																		90	90
SOPORTUJAR	99		95				99									99			95		90						
PAMPANEIRA	95							99		90						95					95						
VELEZ BENAUDALLA	99	99			95																99						

Tabla 1. Ciclos estimados y significación estadística.

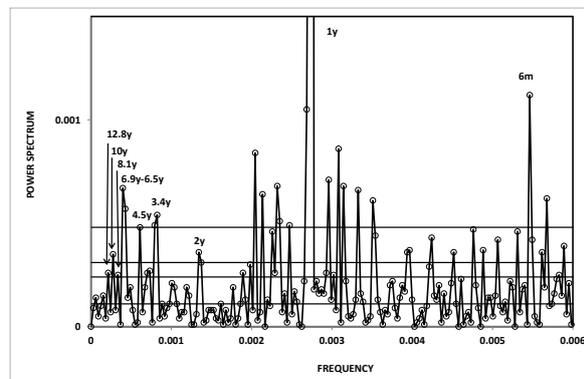
La figura 7 muestra los resultados del análisis espectral de un conjunto de series con frecuencia diaria situadas en la cuenca del río Guadalfeo.



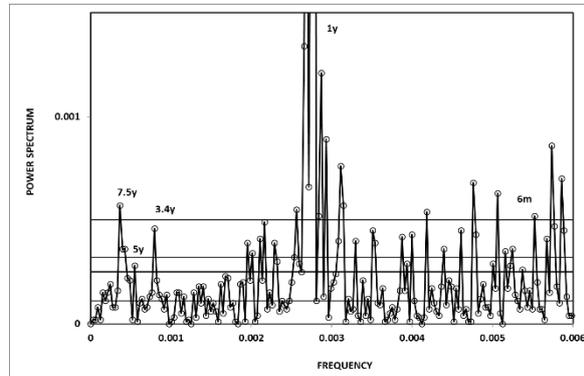
Albuñuelas



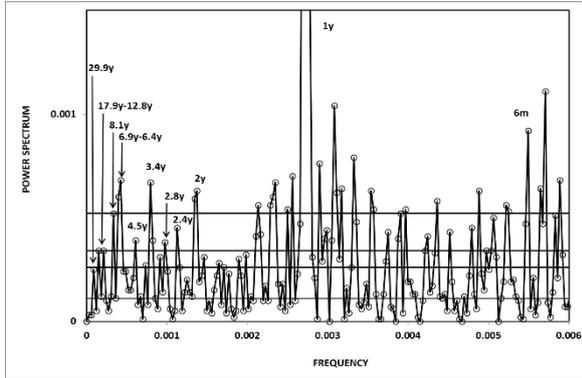
Salobreña



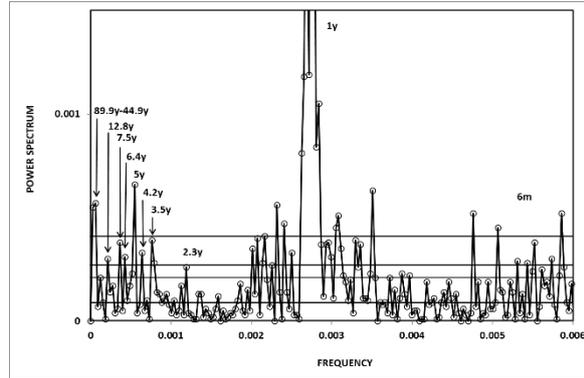
Cádiar



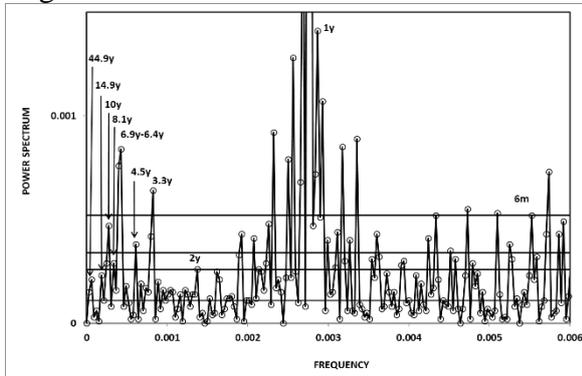
Ítrabo



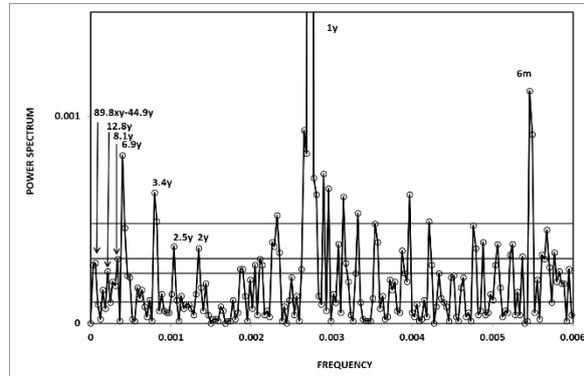
Órgiva



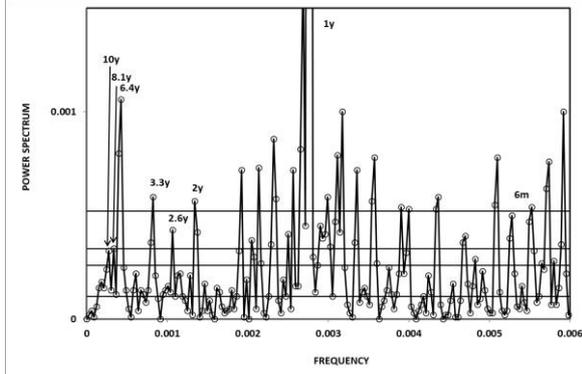
El Pozuelo



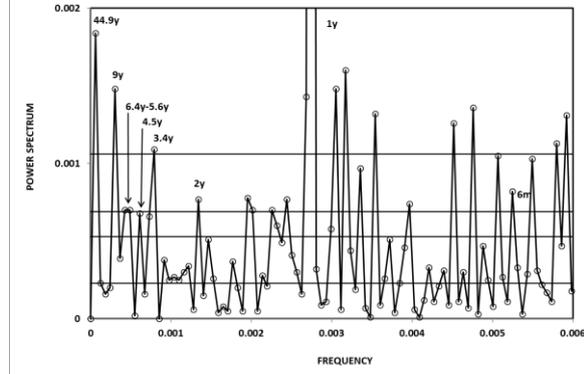
Bérchules



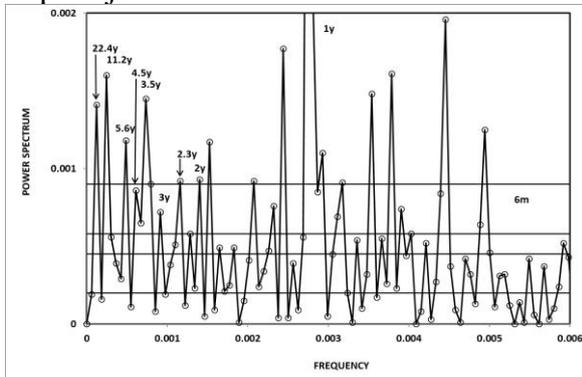
Lanjarón



Soportújar



Pampaneira



Vélez Benaudalla

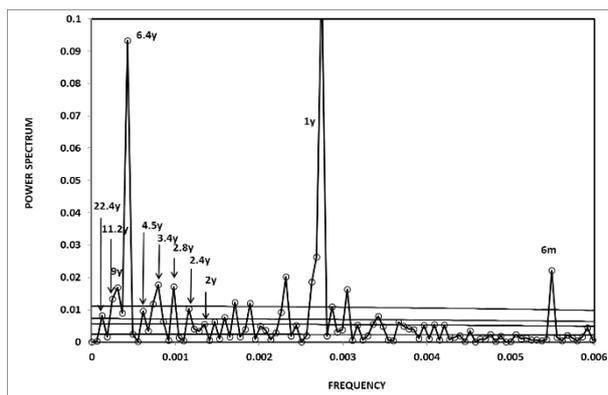
Figura 7. Resultados del análisis espectral de las estaciones situadas en la cuenca del río Gaudalfeo.

La tabla 2 muestra los ciclos detectados en las series de caudales analizados y la significación estadística asociada a los mismos.

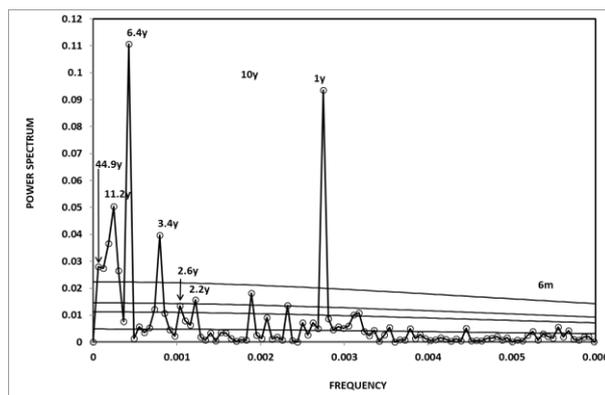
ref	NOMBRE	2y	2.2y	2.3y	2.6y	2.8y	3y	3.2y	3.4y	3.7y	4.1y	4.5y	5y	5.6y	6.4y	6.9y	7.5y	8.9y	11.2y	14.9y	17.9y	22.4y	29.9y	44.9y	89.9y	
0010	NARILA	90		95			99						99						99				95			
0052	CAZULAS		95		90										99					99						99
0096	LA ALCAICERIA	99	99									99			99					99						90
0097	LANJARON							95	95			95	95		99						99					
0098	RESTABAL	95							99									99			99					
0101	PUENTE ORGIVA		95				99								99					99						
0442	CANAL LOS SAUCES	95		95	99					99	99			99	99		99		99	99		99	99	99		99
0443	PRESA MELEGIS	95				95	99						95		99		99									99

Tabla 2. Ciclos climáticos estimados

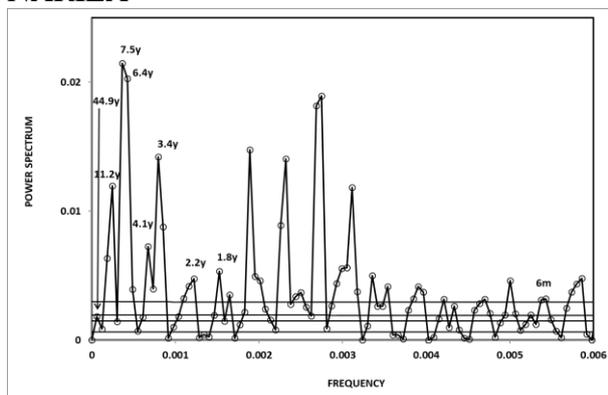
La figura 8 muestra los ciclos estimados en las series de caudales situadas en la cuenca del río Guadalfeo o próximas a la misma. Los resultados obtenidos son robustos desde el punto de vista estadístico por lo que se podrá seleccionar alguna serie significativa para la simulación de los ciclos climáticos determinados.



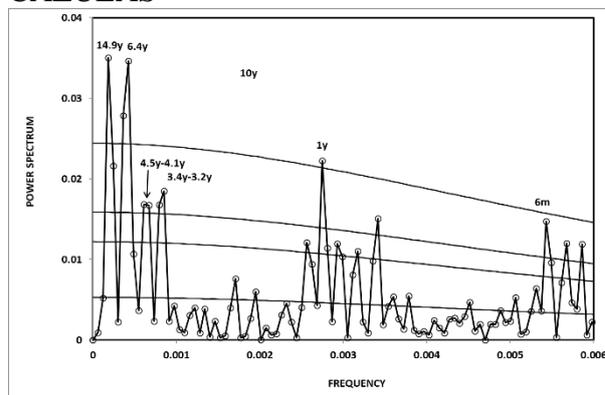
NARILA



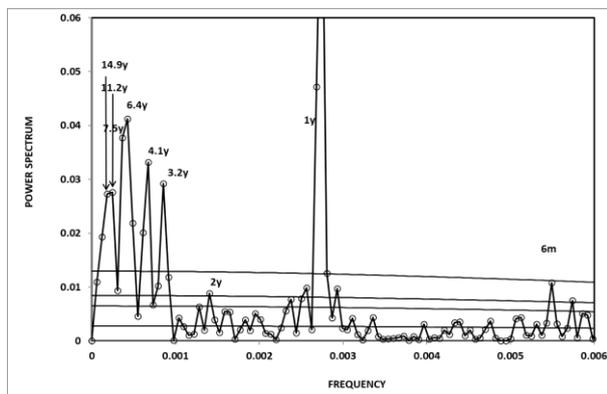
CÁZULAS



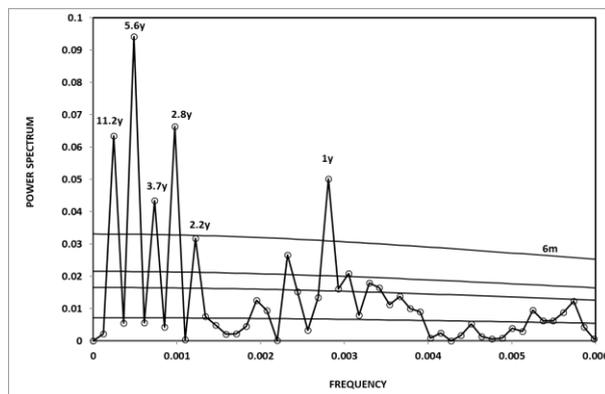
LA ALCAICERÍA



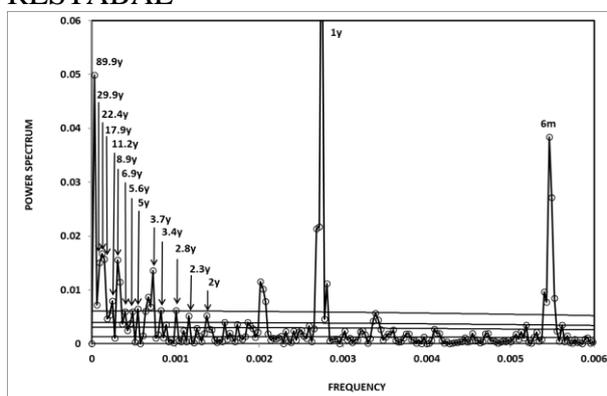
LANJARÓN



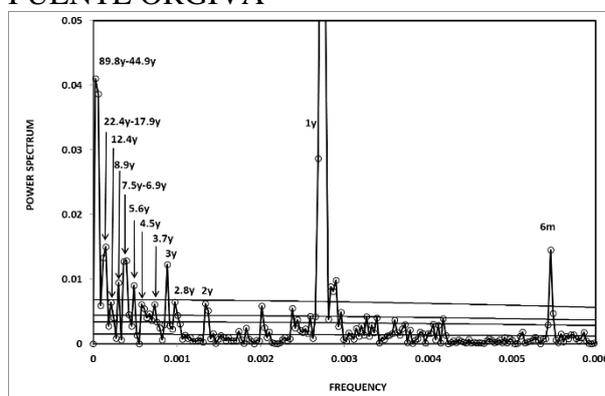
RESTÁBAL



PUENTE ÓRGIVA



CANAL LOS SAUCES



PRESA MELEGÍS

Piezómetros

En general, todos los piezómetros tienen algún grado de afección por bombeos existentes en el acuífero. El grado de afección a los resultados del análisis espectral es, en principio, difícil de evaluar. La significación estadística obtenida ha permitido comprobar que muestran ciclos climáticos similares a los observados en las precipitaciones y caudales registrados. Del total de series seleccionadas para el análisis, únicamente 11 presentan resultados aceptables. La figura 9 muestra un ejemplo de registros piezométricos y la figura 10 la estimación del análisis espectral. No obstante, las simulaciones se han realizado con las estaciones pluviométricas y caudales pues, a priori, presentan menor cantidad de errores.

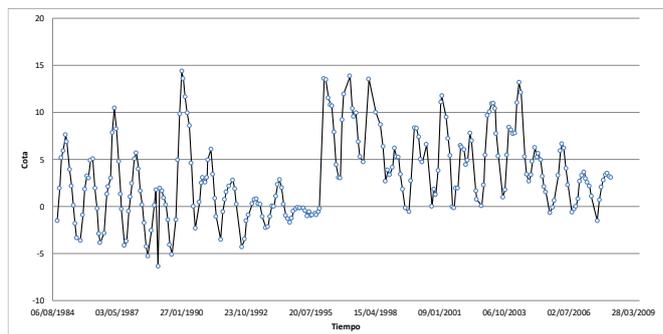


Figura 9. Piezómetro situado en el río Verde con referencia P.06.22.005-S.

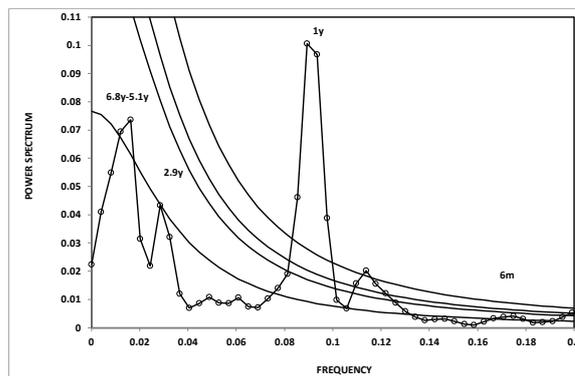
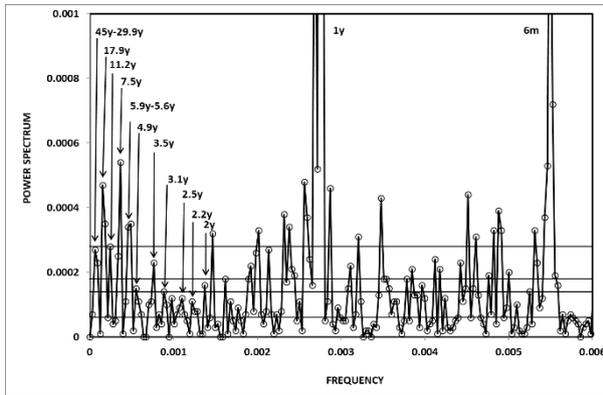


Figura 10. Análisis espectral del piezómetro P.06.22.005-S.

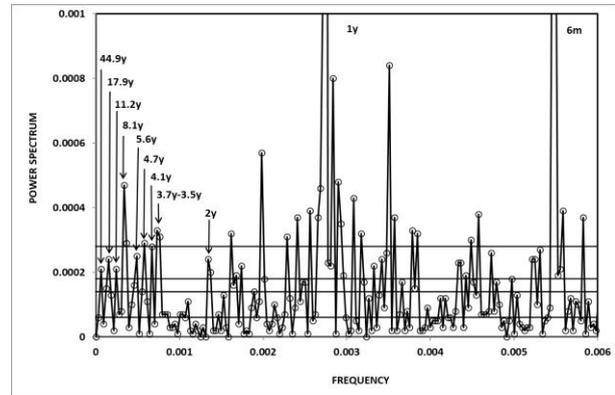
5.2 Mallorca

Estaciones pluviométricas

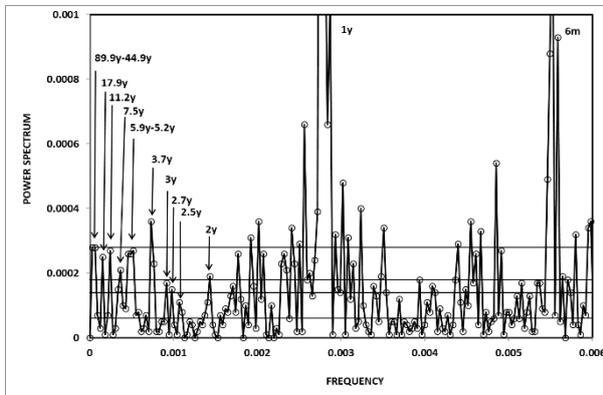
El análisis realizado ha permitido seleccionar 67 estaciones pluviométricas para determinar los ciclos climáticos que influyen en las precipitaciones de la isla y su uso para la realización de cartografías temáticas relacionadas con esta información como se verá en apartados posteriores. La tabla 3 muestra los ciclos y significación estadística de los mismos. En esta tabla están agrupados los resultados de acuerdo con su relación con ciclos mencionados más arriba y por presentar valores cercanos en relación de con los mismos.



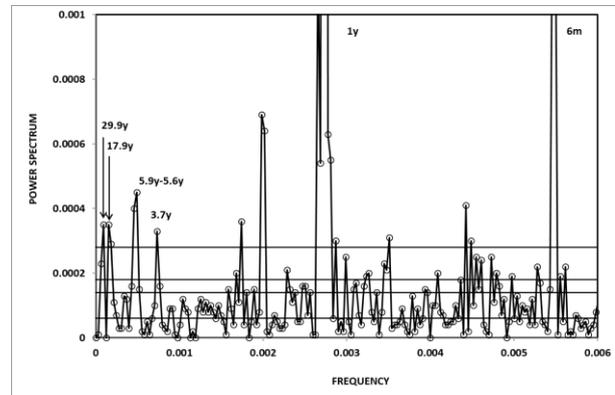
PUIGPUNYENT SON NET



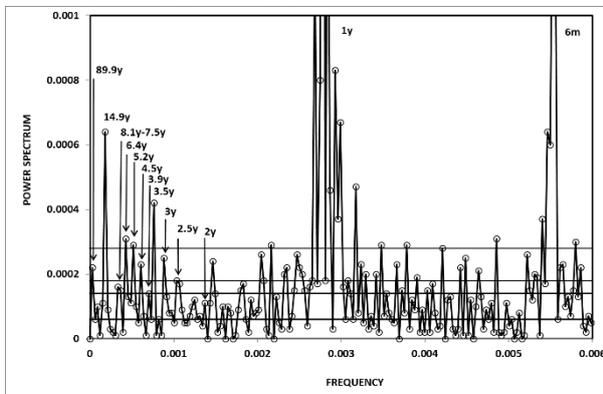
SINEU



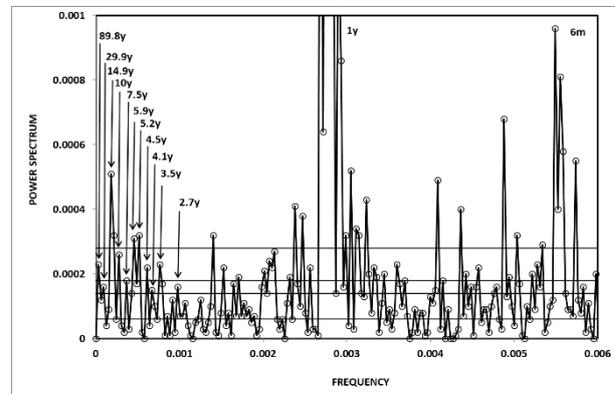
ALARO SON BERGAS



CAMPANET BINIATRO



ALCUDIA



POLLENSA CAN SERRA

Piezómetros

En general, todos los piezómetros tienen algún grado de afección por bombeos existentes en el acuífero o, en algunos casos, incluso parece que muestran errores en las medidas. Ningún piezómetro refleja los principales ciclos o se muestran con escasa significación estadística, aunque en conjunto, los niveles piezométricos de Mallorca están influenciados por todos los ciclos estimados en las series hidrológicas empleadas para este análisis, lo cual es lógico. A modo de ejemplo, la figura 12

muestra un ejemplo de registros piezométricos y la figura 13 la estimación del análisis espectral.

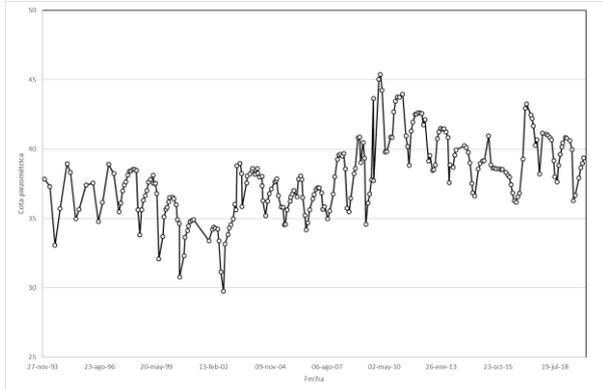


Figura 12. Evolución del piezómetro MA0054, situado al noroeste, próximo a la costa.

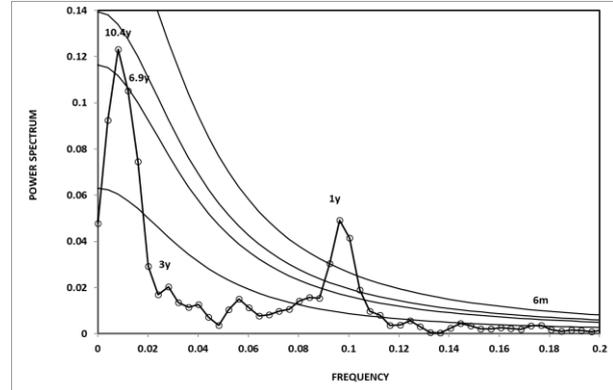


Figura 13. Análisis espectral del piezómetro MA0054, situado al noroeste, próximo a la costa.

Caudales

Los caudales estudiados en Mallorca corresponden en todos los casos, salvo la estación B007, a cauces de régimen esencialmente torrencial. Por tanto, hay meses, muchos en algunos casos, que el valor medido es cero. La figura 14 muestra los caudales del manantial de la estación de aforos B007 (Coa Negra), situada al noroeste de la Isla y la figura 15 los ciclos detectados en el análisis espectral.

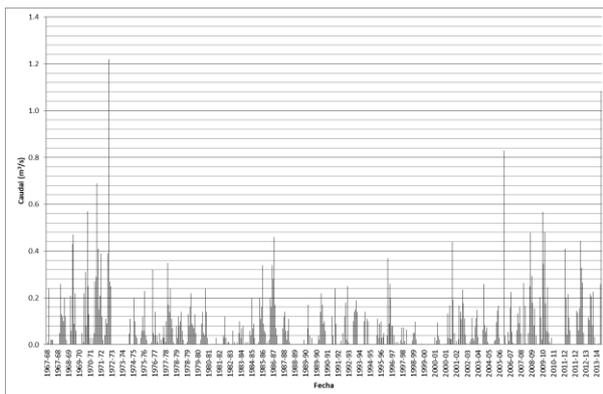


Figura 14. Evolución de los caudales en la estación B007.

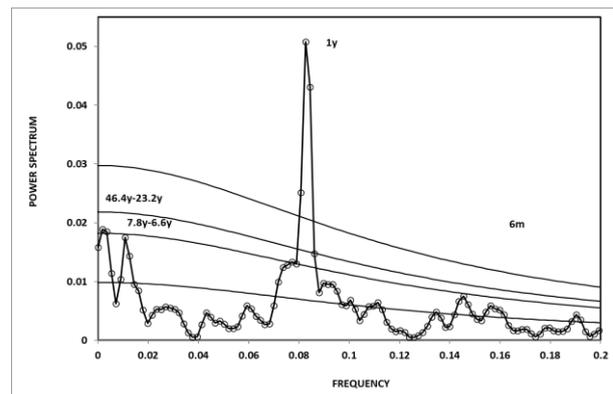


Figura 15. Análisis espectral de la estación de aforos B007.

6. PRECIPITACIONES EN MALLORCA

La información pluviométrica espacial existente en Mallorca ha permitido realizar un análisis espacio-temporal del comportamiento de las lluvias. No así en la costa de Granada debido a que no hay información experimental suficiente. La información empleada procede de los datos aportados por las estaciones que aparecen en la tabla 3.

El primer análisis realizado ha sido la estimación espacial de los años tipo medio, húmedo, seco y una serie de años que presentan una importante cantidad de datos bajos, medios o altos de precipitaciones. Para llevar a cabo la estimación espacial se han utilizado técnicas geoestadísticas, en concreto, se ha aplicado estimación mediante Krigeaje Ordinario (KO). La estimación ha tomado como base una malla de 1km de lado. A continuación, se muestran los resultados de esta estimación. Las figuras 16, 17 y 18 corresponden a la estimación de los años tipo seco, medio y húmedo respectivamente.

Las figuras 19 y 20 representan las estimaciones de dos años 1983 (figura 19) y 1999 (figura 20) que tienen una cantidad importante de valores bajos, son por tanto años muy secos.

Las figuras 21 y 22 muestran la estimación de los años 1985 y 2003 que presentan bastantes valores que coinciden con la media de las series pluviométricas.

Los años 1972 y 2008 son muy húmedos. La estimación de sus precipitaciones se muestra en las figuras 23 y 24.

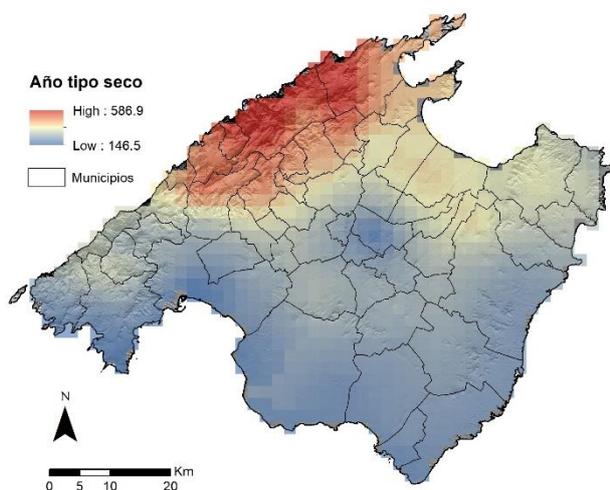


Figura 16. Estimación del año tipo seco.

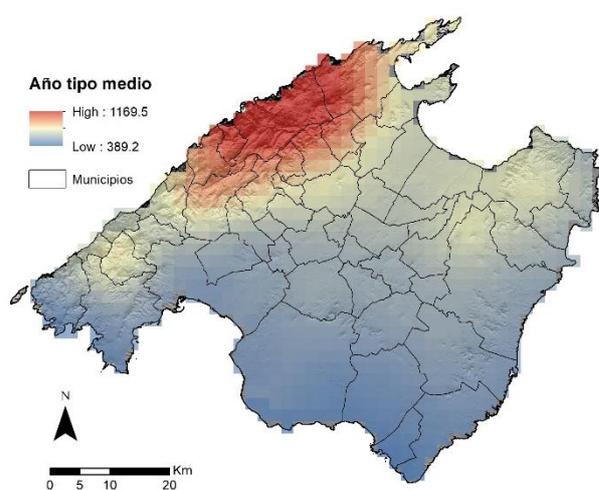


Figura 17. Estimación del año tipo medio.

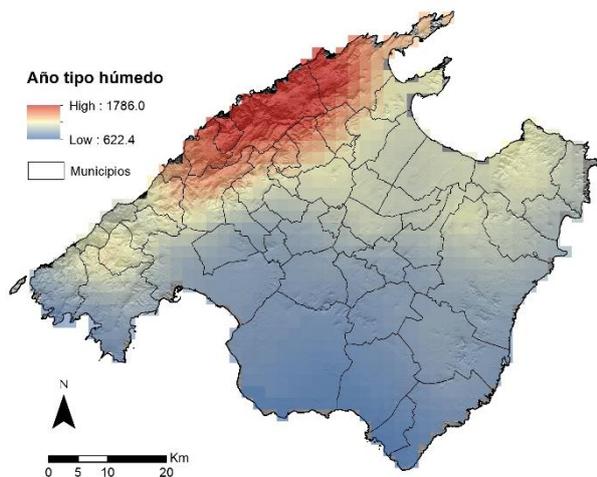


Figura 18. Estimación del año tipo húmedo.

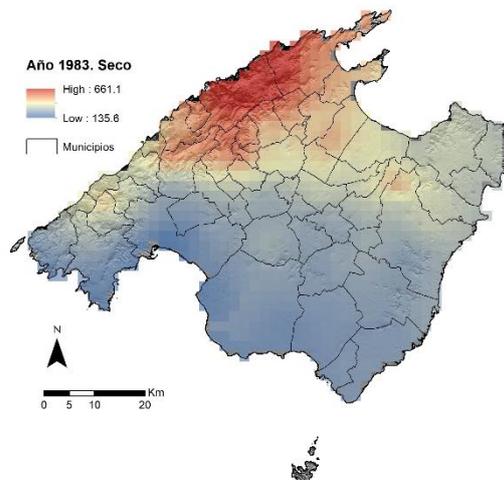


Figura 19. Estimación precipitaciones del año 1983 seco.

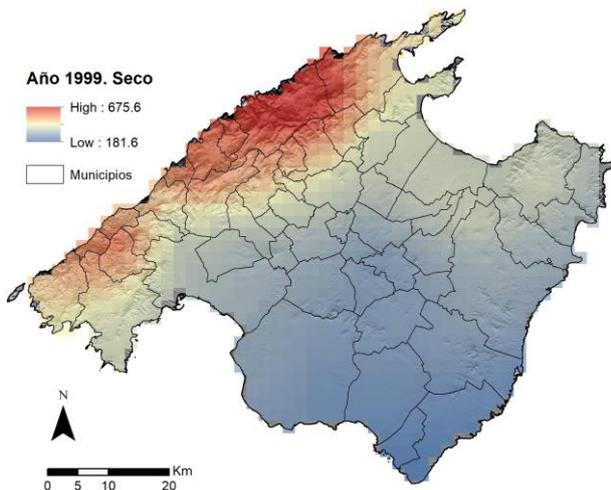


Figura 20. Estimación precipitaciones del año 1999 seco.

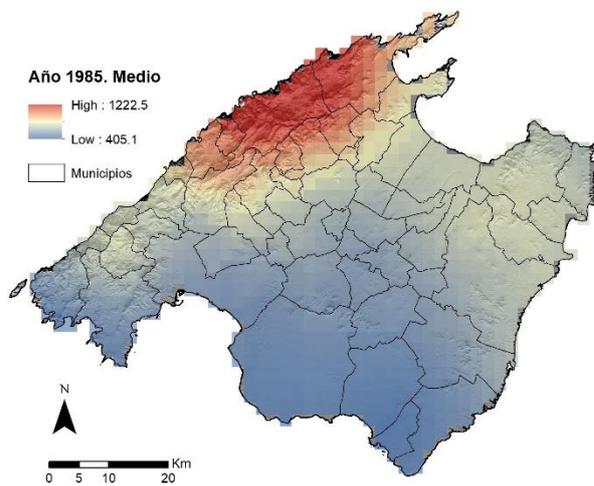


Figura 21. Estimación precipitaciones del año 1985 medio.

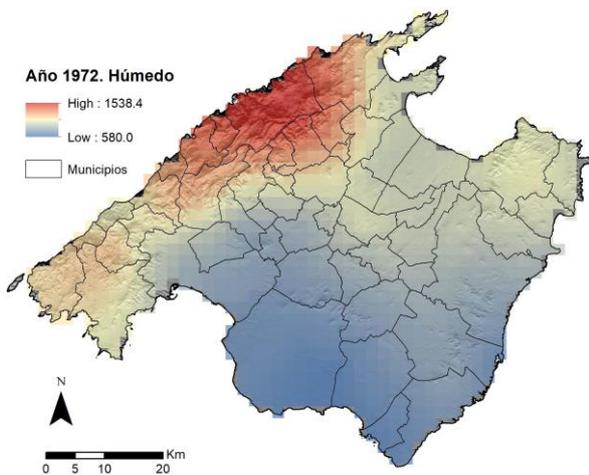


Figura 22. Estimación precipitaciones del año 1972 húmedo.

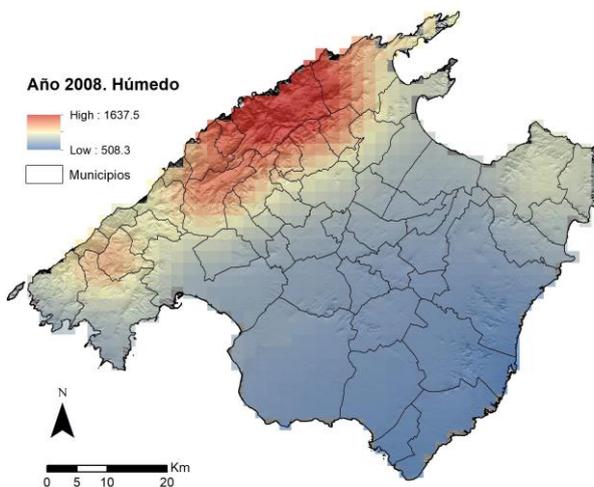


Figura 23. Estimación precipitaciones del año 2008 húmedo.

Como se puede comprobar las estimaciones realizadas mantienen en todos los casos un comportamiento espacial muy similar donde la sierra de la Tramuntana, en su sector norte, presenta en todas las estimaciones los valores más elevados. El gradiente pluviométrico en este sector está muy pronunciado.

Desde el punto de vista de análisis espacial que ofrecen los modelos de variograma ajustados cabe destacar los siguiente (figura 24):

- a) El modelo ajustado ha sido el esférico para todos los años.
- b) El alcance (distancia) es prácticamente igual en todos los casos. En este sentido, junto con el modelo ajustado, esto indica que el comportamiento de la lluvia y la variabilidad de la misma no cambian, independientemente de las lluvias.
- c) Se observa efecto pepita en los casos. Esto confirma que existe una componente no estructurada de fondo. A priori, esto quiere decir que faltan estaciones pluviométricas. No obstante, esto requeriría de un estudio más en profundidad.
- d) Los variogramas ajustados muestran un claro efecto proporcional. Esto significa que los variogramas tienen igual alcance, pero distinta meseta (semivarianza).

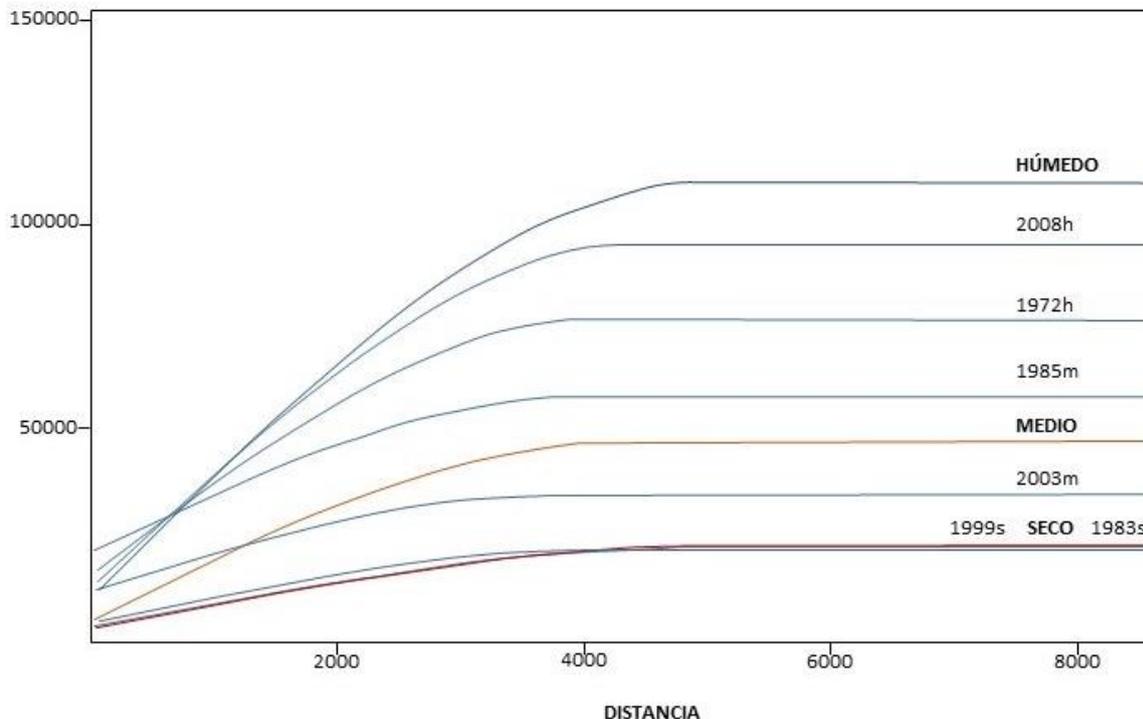


Figura 24. Modelos de variogramas teóricos ajustados a los años.

El análisis de este comportamiento en años sucesivos podría ser un índice de cambio climático.

7. SIMULACIONES

El objetivo principal en la determinación de los ciclos climáticos es simularlos para realizar pronósticos a corto-medio plazo partiendo de los valores de amplitud y frecuencia estimadas. Para ajustar las simulaciones se tienen en cuenta los datos experimentales y eventos relacionados con inundaciones, deslizamientos o caídas importantes de bloques.

MALLORCA

En primer lugar, se muestran un conjunto de estaciones pluviométricas que se consideran representativas de la isla. Las figuras 25, 26, 27, 28, 29 y 30 muestran la simulación de dichas estaciones.

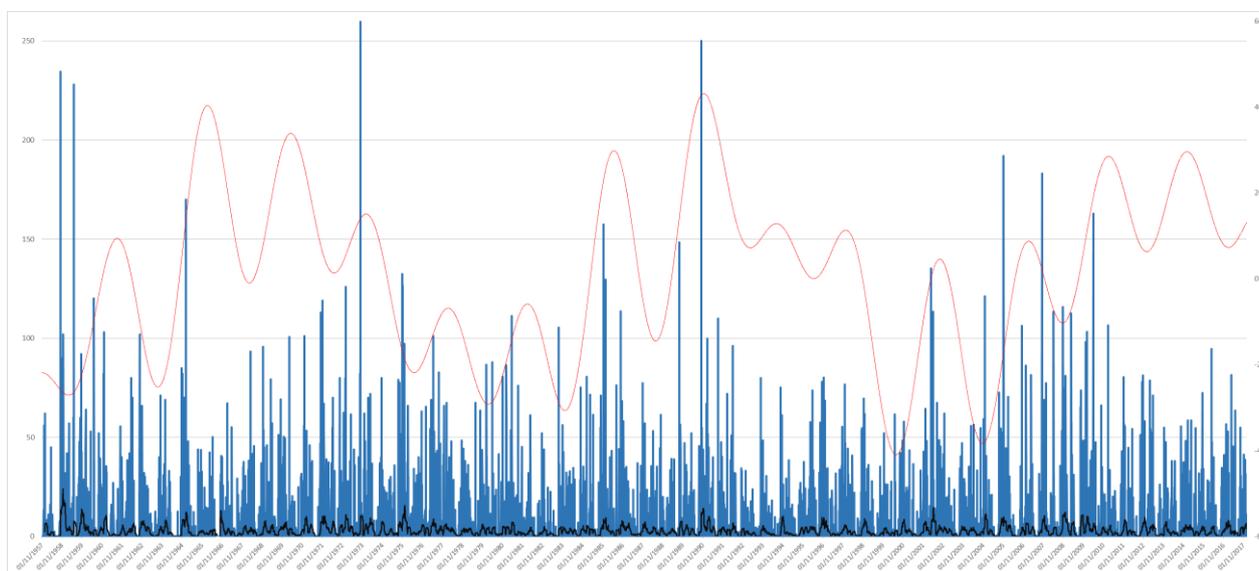


Figura 25. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 007 Mortix y simulación de los ciclos estimados. Se estima que los ciclos que más influyen son 4.1a, 6.9a, 17.9a y 22.4a.

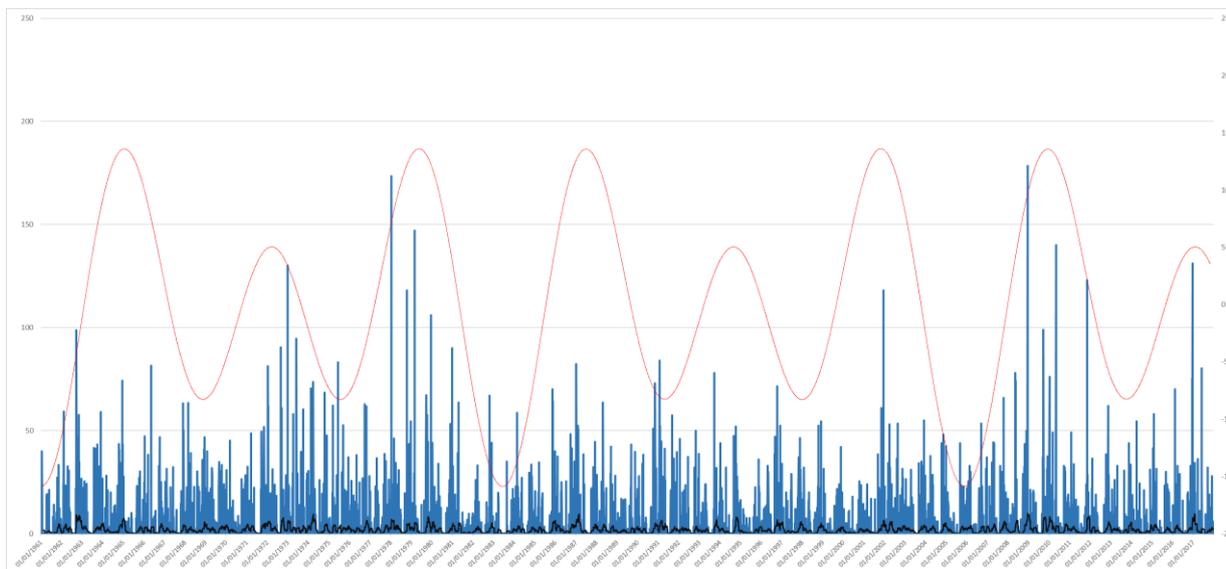


Figura 26. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 220 Puigpunyent Son Net y simulación de los ciclos estimados. Se estima que los ciclos que más influyen son 3.6a, 5.9a, 7.5a, 11.2a y 17.9a, especialmente 7.5a y 11.2a.

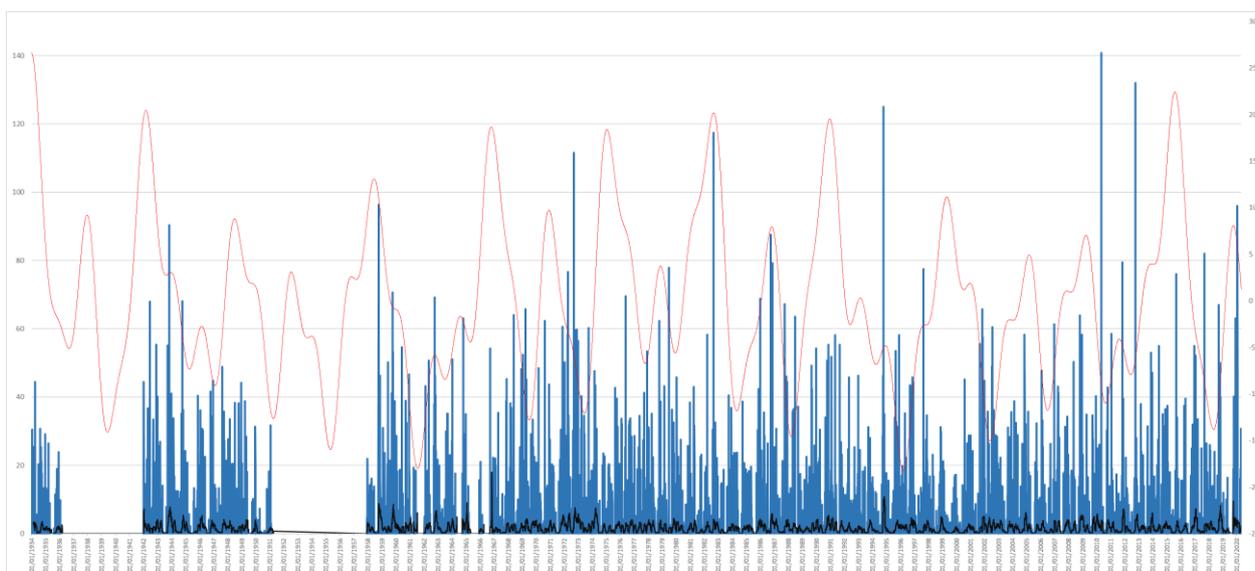


Figura 27. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 644 Sineu y simulación de los ciclos estimados. Se estima que los ciclos que más influyen son 3.6a, 4a, 4.7a, 5.7a y 8.1a; también influye 2a y 11.2a aunque en menor grado.

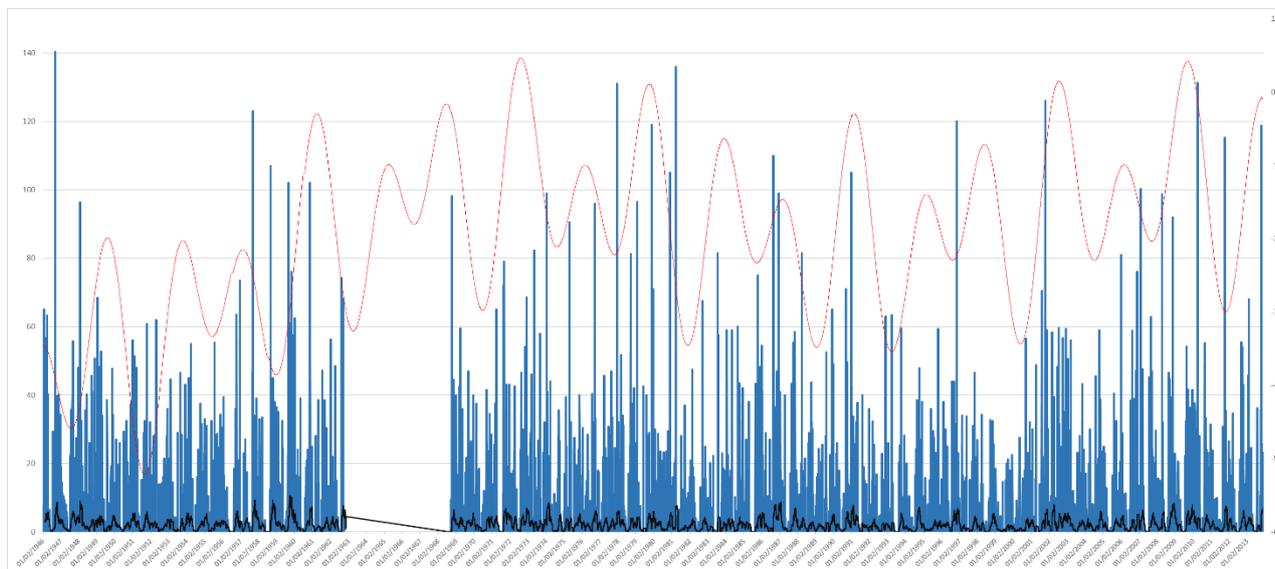


Figura 28. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 652 Alaro Son Bergas y simulación de los ciclos estimados. Se estima que los ciclos que más influyen son 3.6a y 7.5a. En menor grado 6a, y 11.2a.

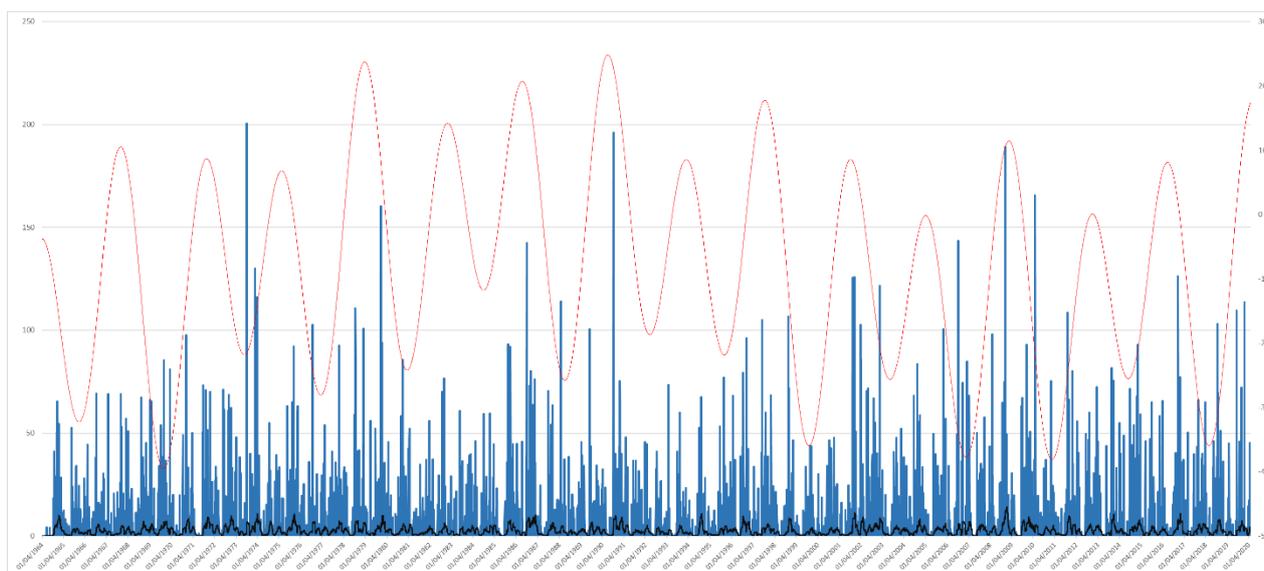


Figura 29. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 696 Campanet Biniaturo y simulación de los ciclos estimados. Los ciclos que más influyen son 3.6a, 5.6a, 17.9a y 29.9a.

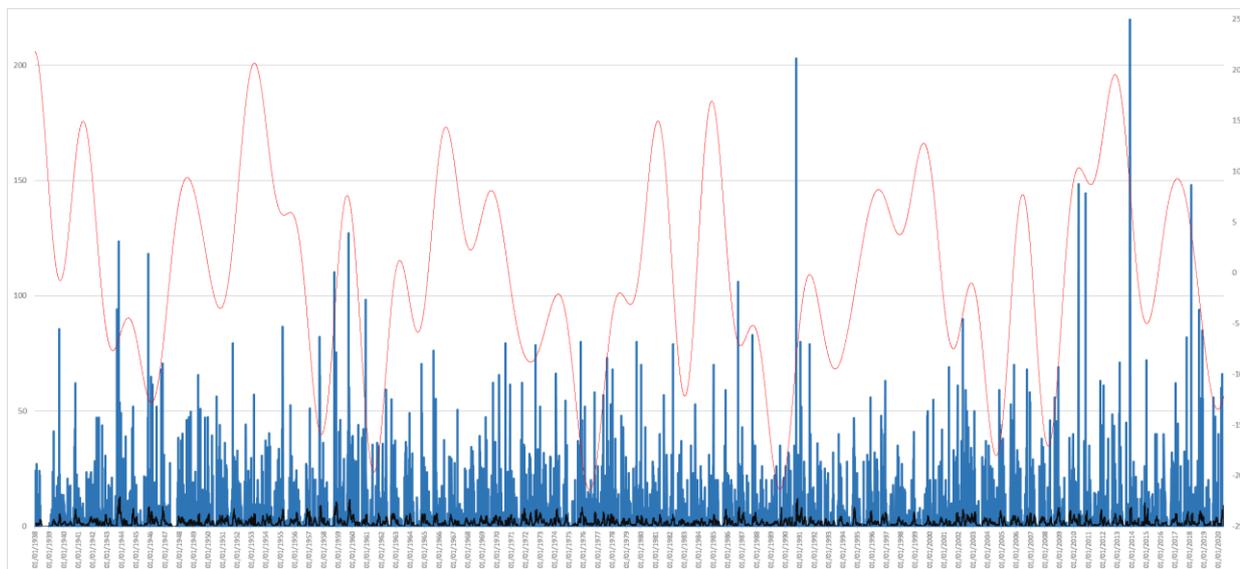


Figura 30. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 703 Alcudia y simulación de los ciclos estimados. Los ciclos que más influyen son 3.6a, 5.3a, 14.9a y, en menor grado, 3a.

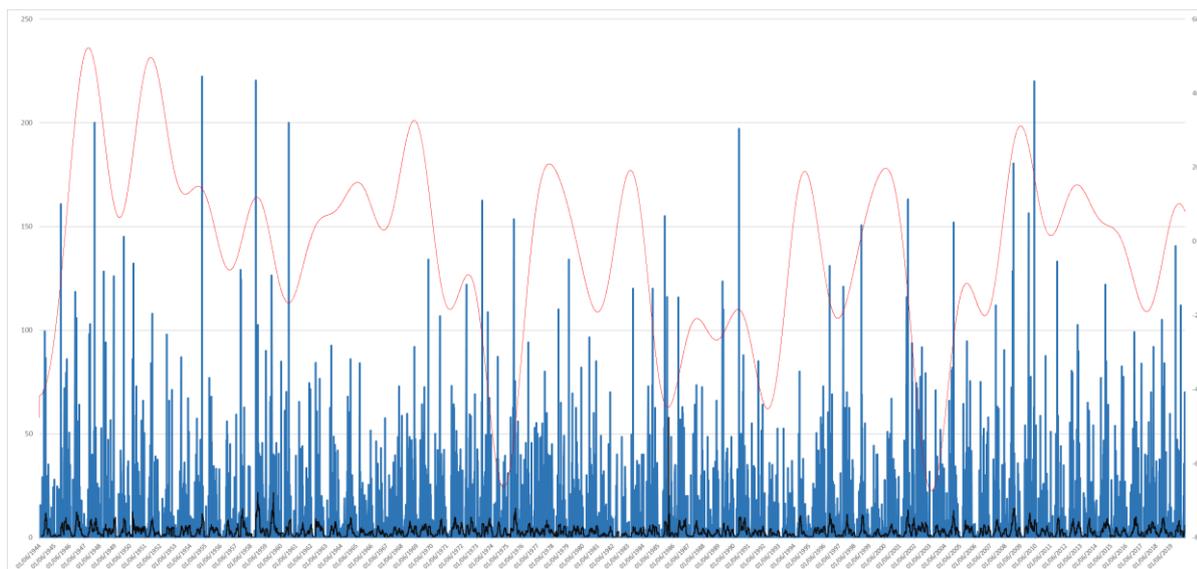


Figura 31. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 745 Pollensa Can Serra y simulación de los ciclos estimados. Los ciclos que más influyen son 5.3a, 5.9a y 14.9a y, en menor grado, 3.5a, 4.5a, 7.5a, 10a y 29.9a.

Caudales

Debido a la dificultad, ya mencionada, de estimar ciclos climáticos a partir de los datos de caudales, las simulaciones no han podido realizarse en la mayoría de los casos. No obstante, la estación de aforos 003 Gross, situada al noroeste de la isla de

Mallorca, al sur de la Tramuntana, debido a la mayor continuidad de los registros de caudal, se ha podido realizar una buena simulación (figura 32).

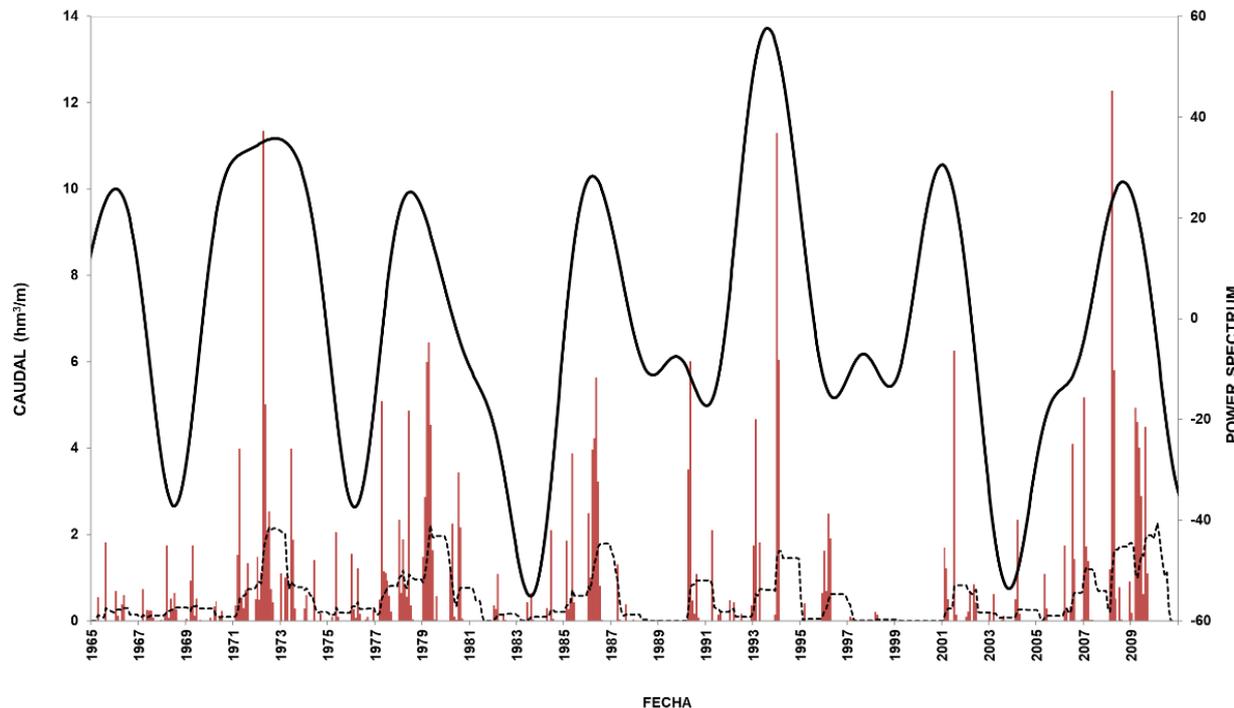


Figura 32. Valores experimentales de caudales superficiales de la estación de aforos 003 Gross y simulación de los ciclos estimados. Los ciclos que más influyen son 3.6a, 7.5a y 21.2a.

COSTA DE GRANADA

Aunque el número de estaciones pluviométricas es menor que el Mallorca, la estimación de ciclos ha permitido realizar simulaciones de los mismos. Al igual que en Mallorca, los niveles piezométricos no ha sido posible la simulación de los mismos. A continuación, se muestran las simulaciones de tres estaciones situadas en diferentes cotas topográficas de la cuenca del río Guadalfeo (figuras 33, 34 y 35), representativas del comportamiento de las precipitaciones en esta zona de estudio.

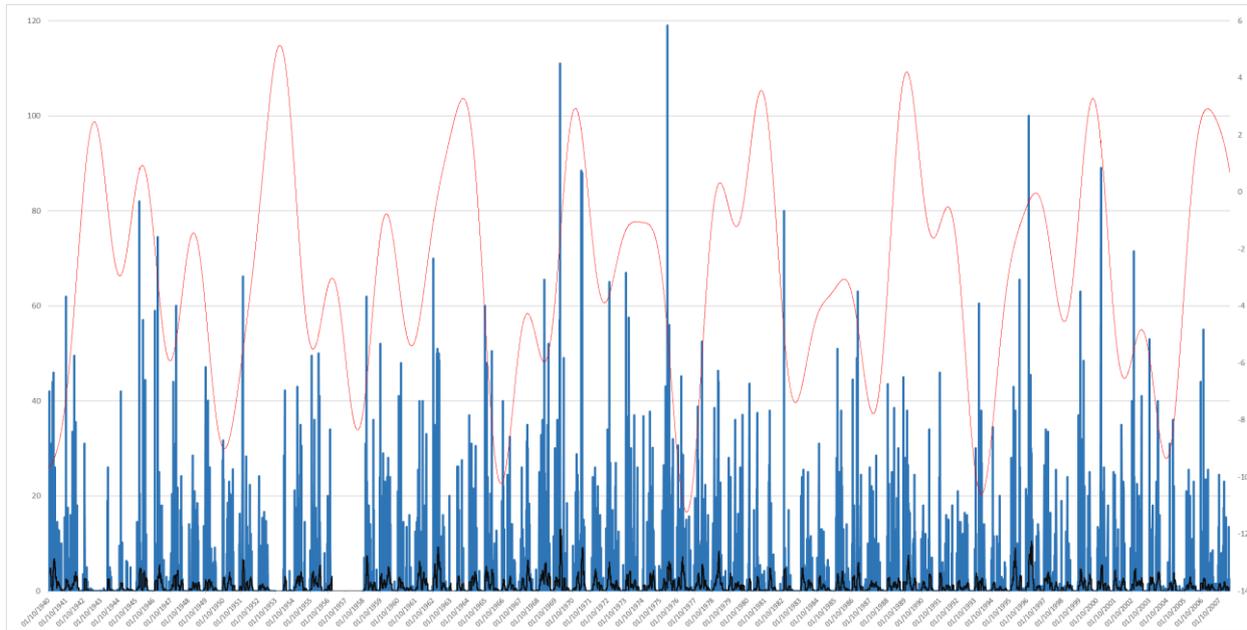


Figura 33. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 098 Salobreña y simulación de los ciclos estimados. Los ciclos que más influyen son 2.7a, 3.6a, 5.3a, 6.4a y 8.9a.

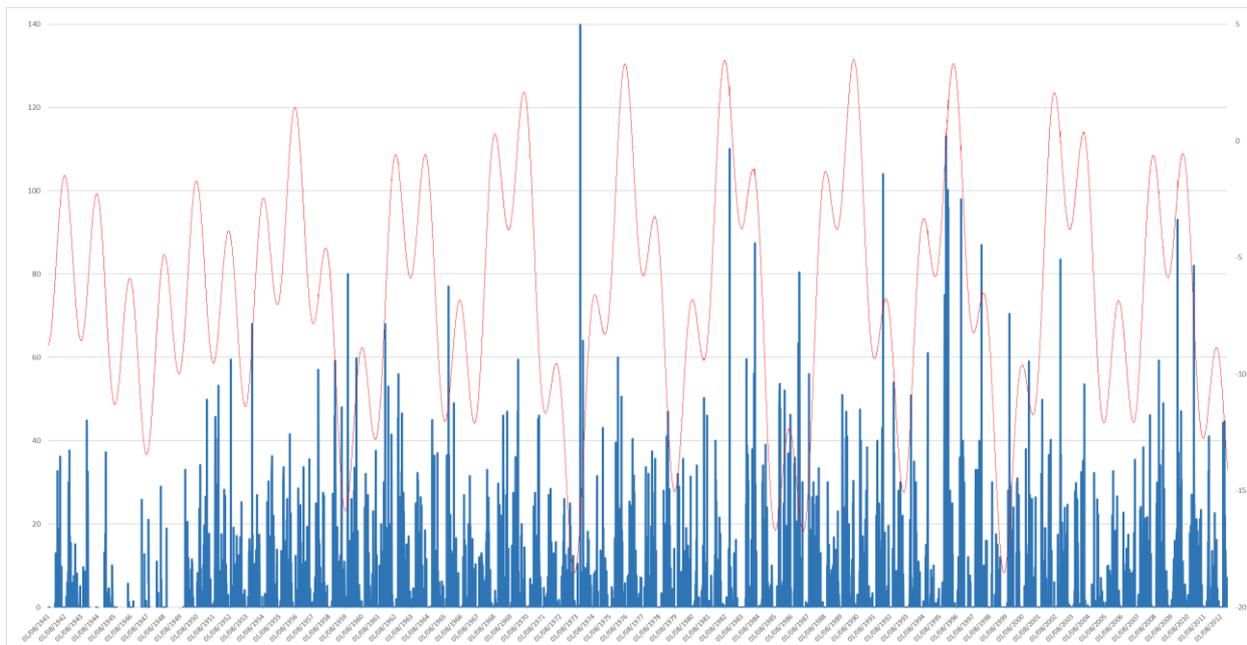


Figura 34. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 141 Órgiva y simulación de los ciclos estimados. Los ciclos que más influyen son 2a, 3.4a, 6.4a, 6.9a, 8.1a y 12.8a.

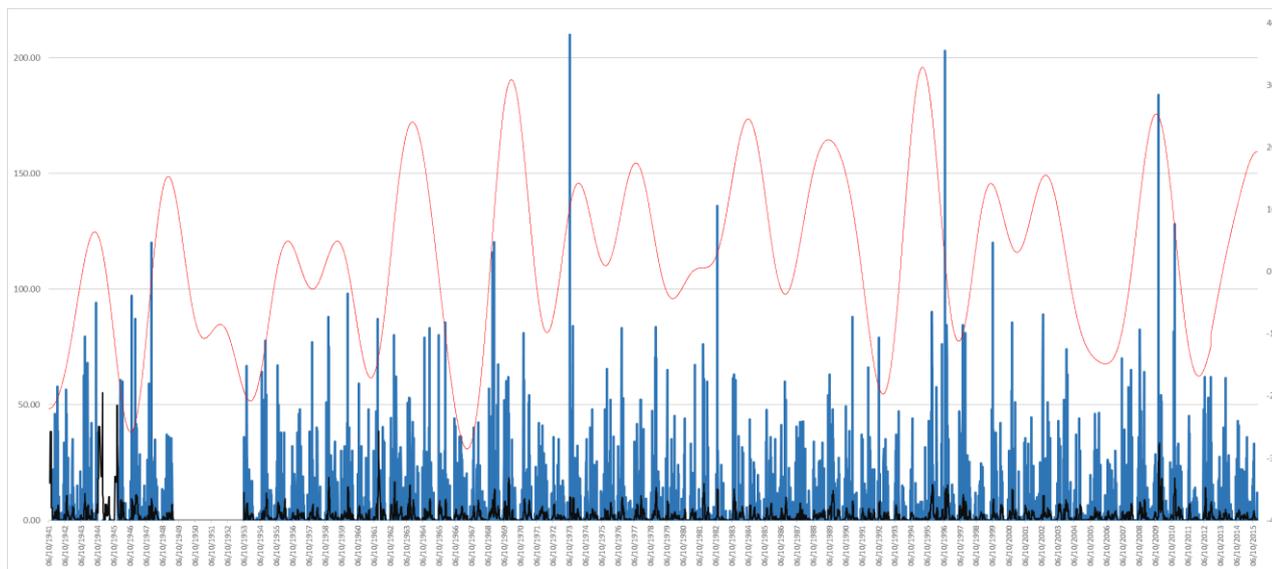


Figura 35. Valores experimentales de lluvia de la estación pluviométrica 213 Bérchules y simulación de los ciclos estimados. Los ciclos que más influyen son 3.5a, 4.2a, 5a, 6.4a, 6.9a, 7.5a y 12.8a.

Caudales

La serie de caudales que ofrece mejores resultados procede de la estación de aforos del manantial de Cázulas, situado en la cabecera del río Verde.

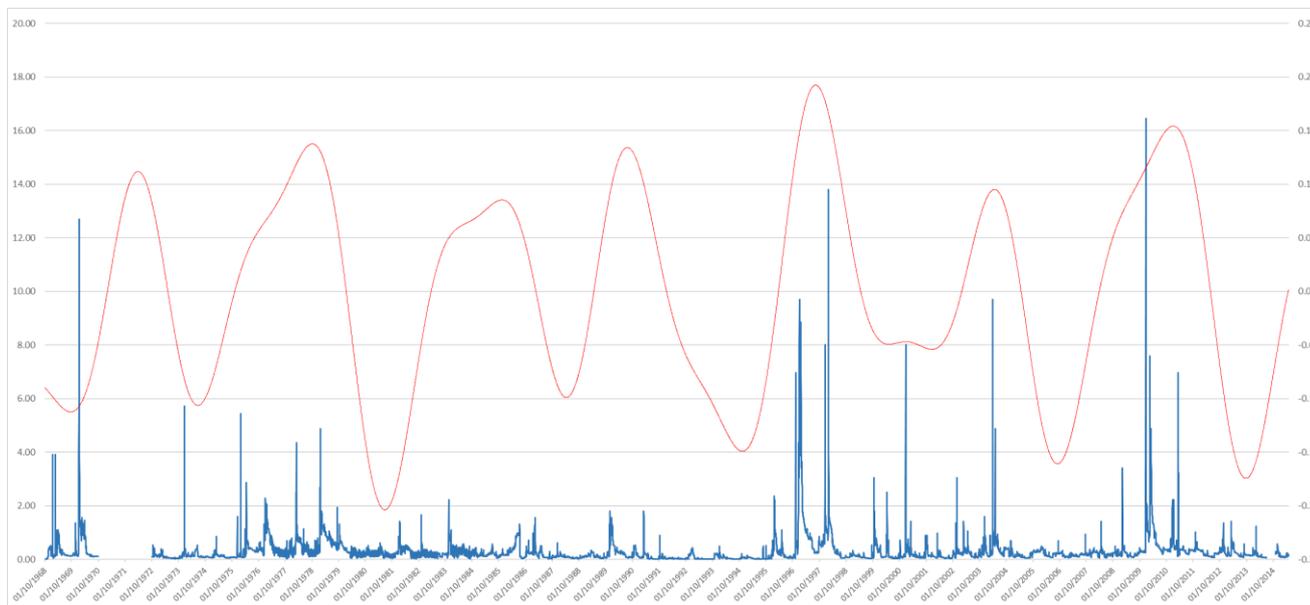


Figura 36. Valores experimentales de lluvia de la estación foronómica del manantial de Cázulas y simulación de los ciclos estimados. Los ciclos que más influyen son 3.5a, 6.4a, y 11.2a.

8. ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS CICLOS CLIMÁTICOS EN MALLORCA

En este apartado se analizará el comportamiento espacial de los ciclos climáticos en la isla de Mallorca tomando como referencia el valor de la significación estadística. Para ello, se utilizarán técnicas geoestadísticas, en concreto la estimación se realizará mediante krigeaje ordinario (KO) de los valores de significación estadística de los ciclos climáticos pero reclasificados, es decir, no detectado = 0; <90% = 1; >90% = 2; >95 = 3; >99% = 4. En algunos casos, la estimación ha sido realizada mediante krigeaje de indicatrices (KI) debido a la importante cantidad de estaciones pluviométricas donde no se ha detectado el ciclo correspondiente. El criterio adoptado para aplicar KI ha sido presencia/ausencia, es decir, 1/0. Este análisis no ha sido posible en la Costa de Granada debido a menor cantidad de estaciones pluviométricas.

Las figuras 37 a 47 muestran las estimaciones espaciales de los ciclos climáticos mencionados.

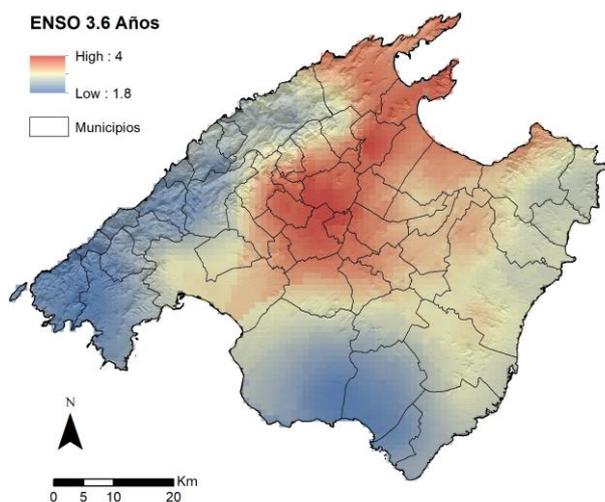


Figura 37. KO ciclo 3.6 años.

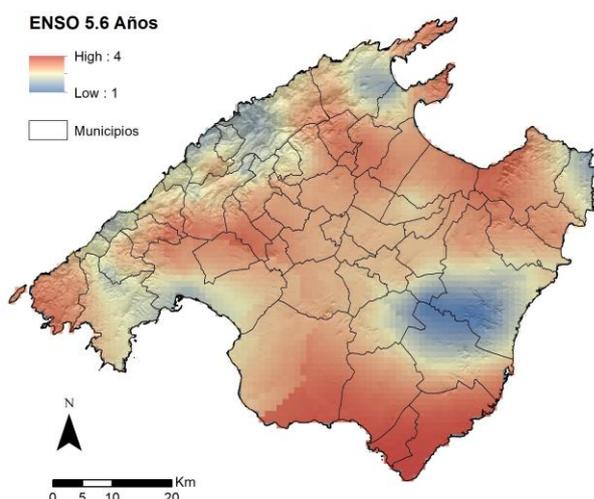


Figura 38. KO ciclo 5.6 años.

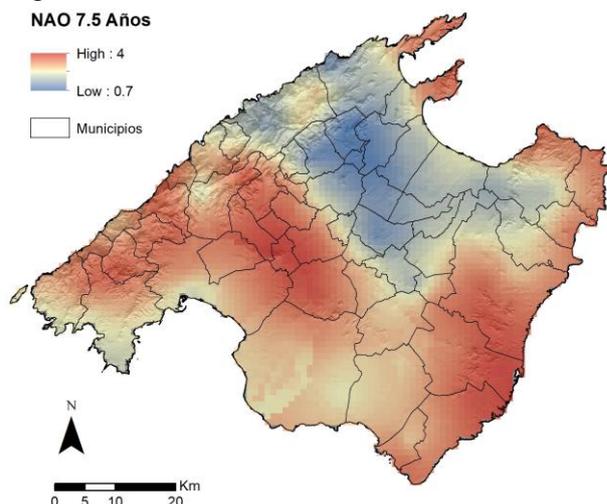
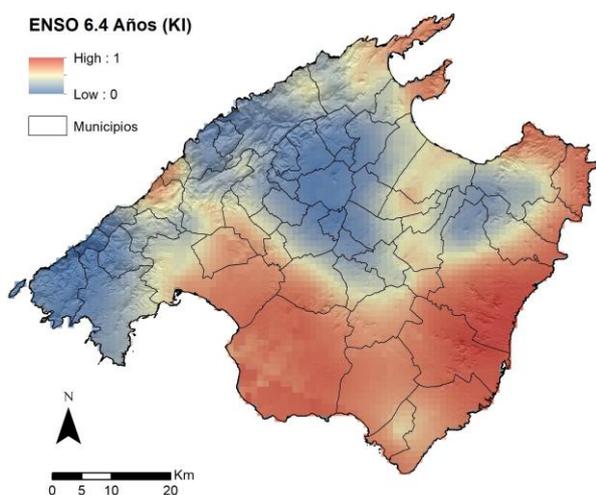


Figura 39. KI ciclo 6.4 años.

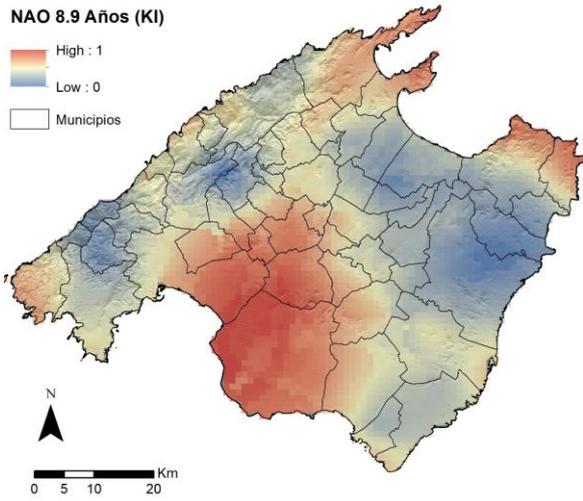


Figura 40. KO ciclo 7.5 años.

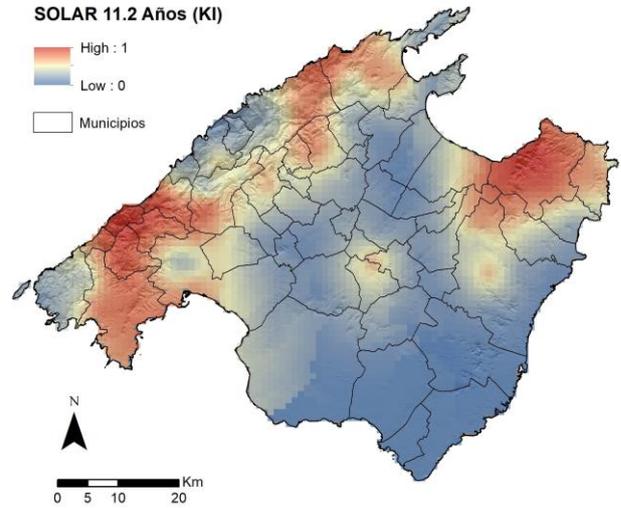


Figura 41. KI ciclo 8.9 años.

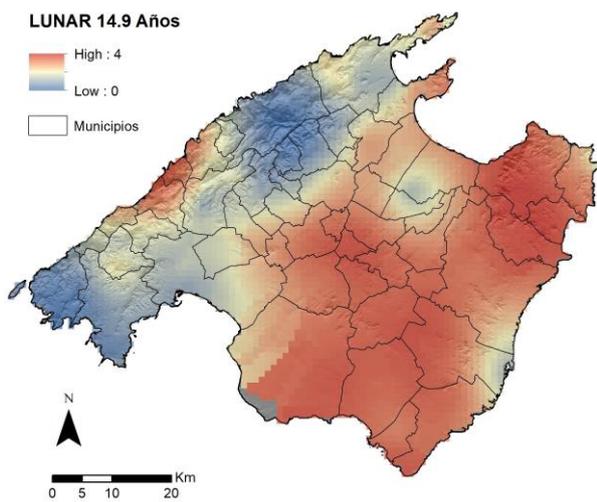


Figura 42. KI ciclo 11.2 años.

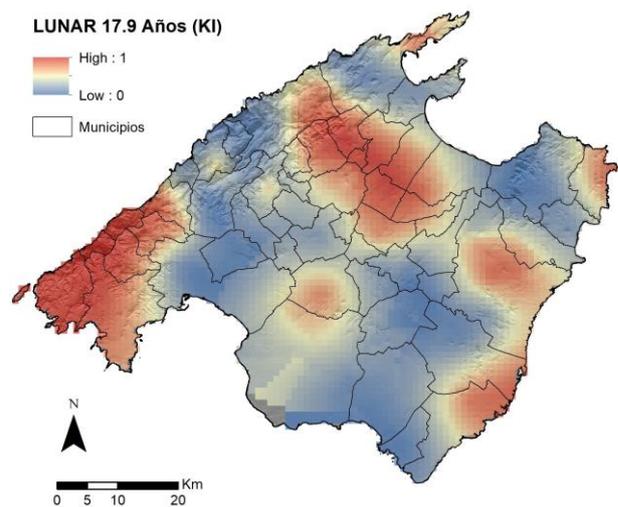


Figura 43. KO ciclo 14.9 años.

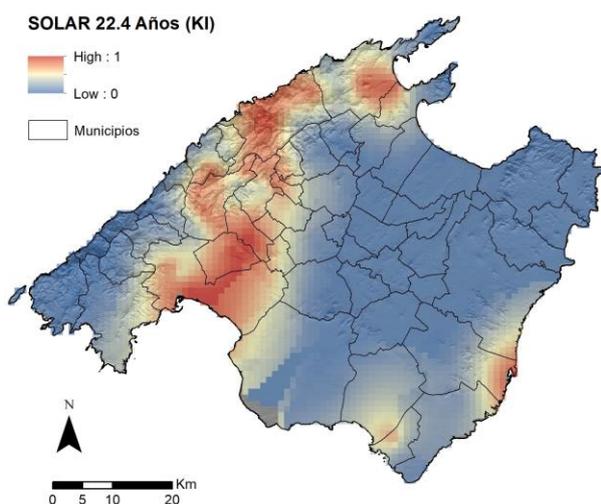


Figura 44. KI ciclo 17.9 años.

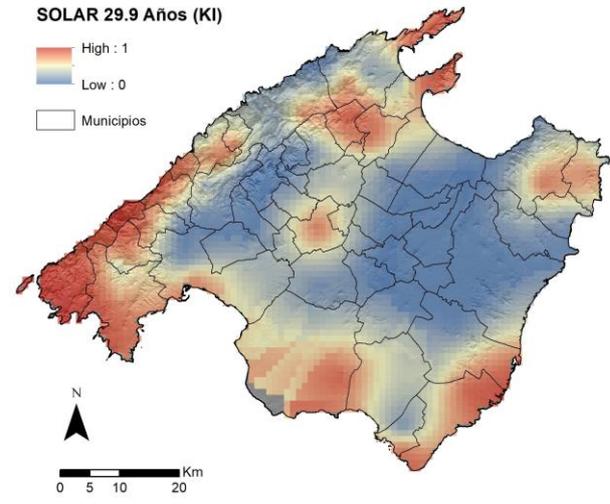


Figura 45. KI ciclo 22.4 años.

Figura 46. KI ciclo 29.9 años.

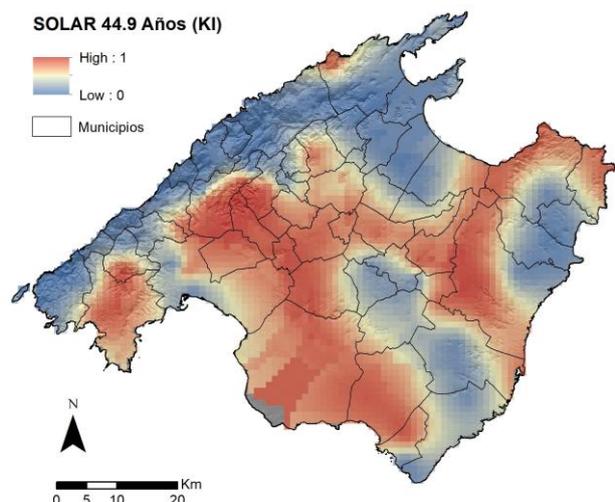


Figura 47. KI ciclo 44.9 años.

El comportamiento espacial de los ciclos climáticos también se puede plantear como suma de los mismos puesto que en el tiempo coincidirán o no y eso conlleva el incremento de las lluvias o periodos más secos. No obstante, no se ha podido establecer una relación directa entre significación estadística e intensidad de las lluvias. Para completar este análisis habría que valorar otros factores, tales como la orografía, la orientación y otros.

La figura 48 muestra los resultados de sumar los ciclos estimados mediante análisis espectral. Los valores inferiores (azules) indican menor significación estadística y los más elevados (rojos) mayor significación estadística, por tanto, mayor probabilidad de lluvias ligadas a dichos ciclos.

La figura 49 muestra la suma de los ciclos de 3.6 años, 5.6 años y 7.5 años que, en principio, están ligado a algunos eventos lluviosos importantes.

La figura 50 muestra la suma de los ciclos de 11.2 años, 17.9 años y 22.4 años.

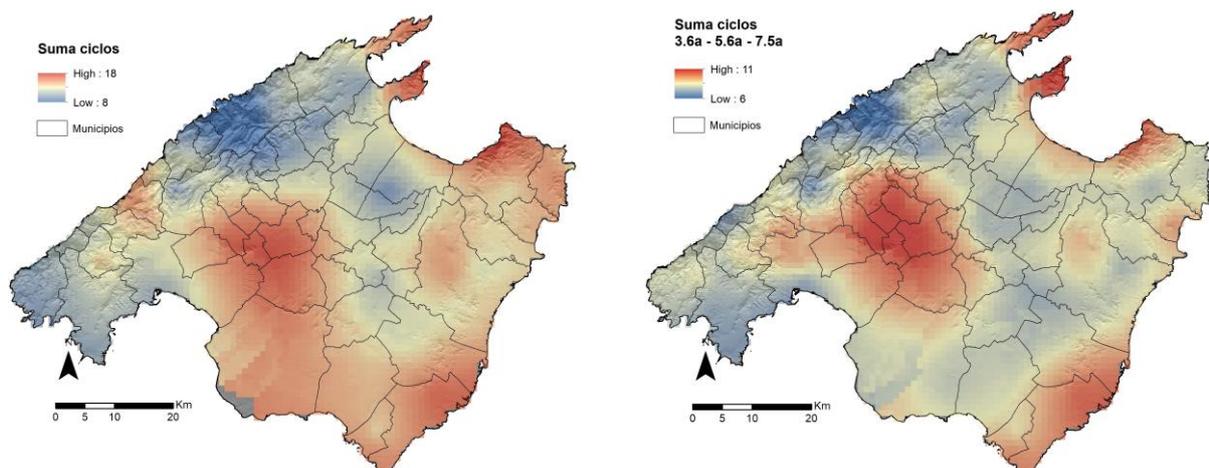


Figura 48. Suma de todos los ciclos

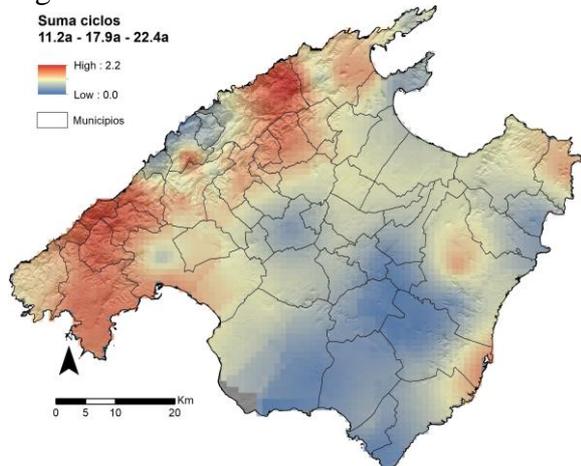


Figura 49. Suma de ciclos 3.6a, 5.6a y 7.5a.

Figura 50. Suma de ciclos 11.2a, 17.9a y 22.4a.

CONCLUSIONES

La información hidrológica ha permitido determinar los ciclos climáticos que influyen en ambas zonas de estudio.

Los resultados del análisis espectral se han usado para simular algunas series temporales, principalmente precipitaciones. Tienen especial interés los datos que aportan las series de caudales relacionados con manantiales pues la información experimental presenta menos ruido y la relación entre los ciclos climáticos y los caudales es más clara.

Los resultados del análisis espectral se han podido cartografiar en Mallorca mediante la reclasificación de los mismos, lo que ha permitido ver la influencia de los ciclos climáticos en toda la zona de trabajo.

Agradecimientos

Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía, Delegación Territorial de Málaga.

Dirección General de Recursos Hídricos de la Comunidad Autónoma de las Illes Balears.

Oficinas de AEMET en Málaga y en las Islas Baleares.

Real Observatorio de la Armada.

Organismo Público Puertos del Estado, dependiente del Ministerio de Fomento.

BIBLIOGRAFÍA

Blackman RB, Tukey JW (1958) The measurement of power spectra from the point of view of communication engineering. *Bell Syst Tech J* 37:185–282.

Bras RL, Rodríguez-Iturbe I (1985) *Random functions and hydrology*. Addison-Wesley, Reading, p 559.

Burg JP (1972) The relation between maximum entropy spectra and maximum likelihood spectra. *Geophysics* 37:375–376.

Capparelli G, Versace P (2011) FLAIR and SUSHI: two mathematical models for early warning of landslides induced by rainfall. *Landslides* 8:67.

Coe JA, Godt JW (2012) Review of approaches for assessing the impact of climate change on landslide hazards. In: Eberhardt E, Froese C, Turner AK, Leroueil S (eds) *Landslides and engineered slopes, protecting society through improved understanding: proceedings 11th international and 2nd North American symposium on landslides and engineered slopes, Banff, Canada 1*. Taylor & Francis, London, pp 371–377.

Corominas J (2006) El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. *Cuaternario y Geomorfología* 20:89–113.

Crozier MJ (2010) Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. *Geomorphology* 124:260–267.

Currie RG, Wyatt T, O'Brien DP (1993) Deterministic signals in European fish catches, wine harvest and sea level, and further experiments. *Int J Climatol* 13:665–687.

Dikau R, Schrott L (1999) The temporal stability and activity of landslide in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. *Geomorphology* 30:1–12.

Flageollet JC, Maquaire O, Martin B, Weber D (1999) Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology* 30:65–78.

Fleming SW, Quilty E (2006) Aquifer responses to El Niño-Southern Oscillation, Southwest British Columbia. *Ground Water* 44:595–599.

Gariano SL, Guzzetti F (2016) Landslides in a changing climate. *Earth Sci Rev* 162:227–252.

- Gelabert B (2002) Las Fonts Ufanes (Mallorca): funcionamiento hidráulico de una surgencia kárstica. *Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst* 3:46–55.
- Goodess CM, Jones PD (2002) Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall. *Int J Clim* 22:1593–1615.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Colin PS (2008) The rainfall intensity- duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslide* 5:3–17.
- Hoyt DV, Schatten KH (1997) *The role of the Sun in climate change*. Oxford University Press, Oxford, p 279.
- Huang J, Ju NP, Liao YJ, Liu DD (2015) Determination of rainfall thresholds for shallow landslides by a probabilistic and empirical method. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 15:2715–2723.
- Hurrell JW (1995) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation, regional temperatures and precipitation. *Nature* 269:676–679.
- Jenkins GM, Watts DG (1968) *Spectral analysis and its applications*. Holden-Day, San Francisco, p 525.
- Karagiannidis AF, Bloutsos AA, Maheras SachsamanooglouC (2007) Some statistical characteristics of precipitation in Europe. *Theor Appl Climatol* 91:193–204.
- Knippertz P (2003) Tropical-extratropical interactions causing precipitation in Northwest Africa: statistical analysis and seasonal variations. *Mon Weather Rev* 131:3069–3076.
- Labitzke K, van Loon H (1990) Associations between the 11-year solar cycle, the Quasi-Biennial Oscillation and the atmosphere: a summary of recent work. *Philos Trans R Soc Lond* 330:577–589.
- Lamb HH (1977) *Climate: past, present and future climatic history and the future*, vol 2. Methuen, London.
- Luque-Espinar JA, Chica-Olmo M, Pardo-Igúzquiza E, García-Soldado MJ (2008) Influence of climatological cycles on hydraulic heads across a Spanish aquifer. *J Hydrol* 354:33–52.
- Luque-Espinar JA, Chica-Olmo M, Pardo-Igúzquiza E, Rodríguez Galiano V (2013) Simulación de niveles piezométricos basada en los ciclos climáticos. In: Uría AF (ed) *Proceedings X Simposio Nacional de Hidrogeología*, Granada, vol 1, pp 815–820.

Luque JA, Mateos RM, García I, Pardo-Igúzquiza E, Herrera G (2017) Aplicación del análisis espectral para la determinación de ciclos climáticos desencadenantes de deslizamientos. Aplicación en Mallorca. IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Santander, Junio 2017. In: Alonso E, Corominas J., Hürlimann M (Eds.). 1142 – 1153.

Luque-Espinar JA, Mateos RM, García-Moreno I, Pardo-Igúzquiza E, Herrera G. 2017. Spectral analysis of climate cycles to predict rainfall induced landslides in the western Mediterranean (Majorca, Spain). *Natural Hazards*, 89(3): 985 – 1007. DOI: 10.1007/s11069-017-3003-3.

Mateos RM (2002) Slope movements in the Majorca Island (Spain). In: McInnes RG, Jakeways J (eds). *Hazard analysis. Instability, planning and management. Seeking sustainable solutions to ground movements problems*. Thomas Telford, London, pp 339–346.

Mateos RM (2006) Los movimientos de ladera en la Serra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y análisis de peligrosidad. PhD. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid. Madrid, p 299.

Mateos RM, González C (2009) Los Caminos del Agua en las Islas Baleares. Acuíferos y Manantiales. Published by: Instituto Geológico y Minero de España & Conselleria de Medi Ambient del Govern de les Illes Balears, p 315.

Mateos RM, Azañón JM, Morales R, López-Chicano JM (2007) Regional prediction of landslides in the Tramuntana Range (Majorca) using probability analysis of intense rainfall. *Zeitschrift für Geomorphology*, N° 51, 3:287–306.

Mateos RM, Bermejo M, Hijazo T, Rodríguez-Franco JA, Ferrer M, González de Vallejo LI, Garcia I (2008) Los deslizamientos de la ladera de la margen izquierda del torrente de Fornalutx (Mallorca). *Boletín Geológico y Minero* 119:443–458.

Mateos RM, García-Moreno I, Azañón JM, Tsige M (2010) La avalancha de rocas de Son Cocó (Alaró, Mallorca). Descripción y análisis del movimiento. *Boletín Geológico y Minero* 121(2):153–168.

Mateos RM, García-Moreno I, Azañón JM (2012) Freeze-thaw cycles and rainfall as triggering factors of mass movements in a warm Mediterranean region: the case of the Tramuntana Range (Majorca, Spain). *Landslides* 9:417–432.

Mateos RM, García-Moreno I, Herrera G, Mulas J (2013) Recent mass movements in the Tramuntana Range (Mallorca, Spain). In: Margottini C, Canuti P, Sassa K (eds) *Landslide science and practice, volume 4*. Global Environmental Change, pp 27–37.

Mateos RM, Garcia-Moreno I, Reichenbach P, Herrera G, Sarro R, Rius J, Aguiló R (2015) Calibration and validation of rockfall modelling at regional scale: application along a roadway in Mallorca (Spain) and organization of its management. *Landslides*. doi:10.1007/s10346-015-0602-5.

Mathew J, Babu DG, Kundu S, Vinod Kumar K, Pant CC (2014) Integrating intensity-duration-based rainfall threshold and antecedent rainfall-based probability estimate towards generating early warning for rainfall-induced landslides in parts of the Garhwal Himalaya, India. *Landslides* 11(4):575–588.

Muñoz-Díaz D, Rodrigo FS (2005) Influence of El Niño-Southern Oscillation on the probability of dry and wet seasons in Spain. *Clim Res* 30:1–12.

NCARS, National Center for Atmospheric Research Staff (2016) The climate data guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (PC-based). Retrieved from <http://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based>. See more at: <http://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based#sthash>.

Pardo-Igúzquiza E, Rodríguez-Tovar FJ (2004) POWGRAF2: a computer program for graphical spectral analysis. *Comput Geosci* 30(5):533–542.

Pardo-Igúzquiza E, Rodríguez-Tovar FJ (2012) Spectral and cross-spectral analysis of uneven time series with the smoothed Lomb–Scargle periodogram and Monte Carlo evaluation of statistical significance. *Comput Geosci* 49:207–216.

Pardo-Igúzquiza E, Chica-Olmo M, Rodríguez-Tovar FJ (1994) CYSTRATI: a computer program for spectral analysis of stratigraphic successions. *Comput Geosci* 20:511–584.

Piciullo L, Gariano SL, Melillo M, Brunetti MT, Peruccacci S, Guzzetti F, Calvello M (2016) Definition and performance of a threshold-based regional early warning model for rainfall-induced landslides. *Landslides*. doi:10.1007/s10346-016-0750-2.

Pozo-Vázquez D, Esteban-Parra MJ, Rodrigo FS, Castro-Díez Y (2000) An analysis of the variability of the North Atlantic Oscillation in the time and the frequency domains. *Int J Climatol* 20:1675–1692.

Qu B, Gabric AJ, Zhu J, Lin D, Qian F, Zhao M (2012) Correlation between sea surface temperature and wind speed in Greenland Sea and their relationships with NAO variability. *Water Sci Eng* 5(3):304–315.

- Rodó X, Baert E, Comin FA (1997) Variations in seasonal rainfall in Southern Europe during the present century: relationships with the North Atlantic Oscillation and the El Niño-Southern Oscillation. *Clim Dyn* 13:275–284.
- Saaroni H, Toseti A, Trigo IF, Vicente-Serrano SM, Yiou P, Ziv B (2012) Large-scale atmospheric circulation driving extreme climate events in the Mediterranean and its related impacts. In: Lionello P (ed) *The climate of the Mediterranean region*. Elsevier, USA, pp 347–403.
- Stuiver M, Braziunas TF (1989) Atmospheric ^{14}C and century-scale solar oscillations. *Nature* 338:405–408.
- Terlien MTJ (1998) The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering threshold. *Environ Geol* 35:125–130.
- Thomson DJ (1982) Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proc IEEE* 70(9):1055–1096.
- Tramblay Y, El Adlouni S, Servat E (2013) Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13:3235–3248.
- Trigo RM, Pozo- Vázquez D, Osborn TJ, Castro- Díez Y, Gámiz-Fortis S, Esteban-Parra J (2004) North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int J Climatol* 24:925–944.
- Wieczorek GF (1996) Landslide triggering mechanisms. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special report, Washington, DC, pp 76–90.
- Williams GE (1981) Sunspot periods in the late Precambrian glacial climate and solar-planetary relations. *Nature* 291:624–628.
- Xoplaki E, Trigo RM, García-Herrera R, Barriopedro D, D’Andrea F, Fischer EM, Gimeno L, Gouveia C, Hernández E, Kuglitsch FG, Mariotti A, Nieto R, Pinto JG, Pozo-Vázquez D, Saaroni H, Toreti A, Trigo IF, Vicente-Serrano SM, Yiou P, Ziv B (2012) Large-scale atmospheric circulation driving extreme climate events in the Mediterranean and its related impacts. In: Lionello P (ed) *The climate of the Mediterranean region*. Elsevier, USA, pp 347–403.
- Yevjevich V (1972) *Stochastic processes in hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, p 276.