

Producto 4.9: Modelo de predicción de eventos lluviosos para las zonas de estudio seleccionadas

Due date of deliverable: 31/12/2020

Actual submission date: 28/12/2020

Lead contractor for this deliverable: IGME

Autores

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



Table of Content

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANTECEDENTES	4
2.1.	La costa mediterránea de Andalucía.....	4
2.2.	Costa mediterránea de las Islas Baleares.....	4
3	EVENTOS CATASTRÓFICOS	5
3.1.	Costa de Andalucía	6
3.2.	Costa levantina-mediterránea española.....	6
4	DATOS EMPLEADOS	8
4.1.	Costa de Granada	8
4.2.	Mallorca.....	10
5	METODOLOGÍA	12
6	RESULTADOS.....	14
6.1.	Costa de Granada	14
6.2.	Mallorca.....	19
7	SIMULACIONES.....	23

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.

El objetivo final de este producto es generar una serie sintética simulada a partir de los ciclos climáticos estimados mediante métodos espectrales. Se seleccionarán para la simulación aquellos ciclos climáticos que presenten una confianza estadística en su estimación superior al 90%. Con esta serie se podrán predecir en qué periodos es más probable que se presenten lluvias que puedan generar peligros por inundaciones o deslizamientos/caídas de bloques.

Para obtener esta serie sintética se analizarán previamente todas aquellas series hidrológicas que reúnan los requisitos necesarios para obtener unos resultados robustos de acuerdo con los objetivos del análisis.

El análisis individual de las series se utilizará para aproximar 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 centrará 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 a priori 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 mediterránea 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. Costa mediterránea 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. EVENTOS CATASTRÓFICOS

Solo en los últimos 10 años, en la costa SUDOE de España se han recopilado 74 eventos significativos.

En la figura 1 se muestra la distribución temporal de los eventos, destacando los años 2018 y 2019 con 9 eventos cada año, y los años 2014 y 2015 con 7 y 6 eventos respectivamente. Para el año 2020 únicamente se han contabilizado los meses de enero y febrero, con 3 eventos en ese primer bimestre. En general, se observa una tendencia creciente en el número de eventos dañinos.



Fig. 1. Distribución temporal de los eventos en la costa española SUDOE durante la última década.

En relación a la distribución de eventos por tramos de costa (Fig. 20), el litoral más afectado es la costa Cantábrica y Galicia (30 eventos), seguido de la costa levantina mediterránea (24 eventos) y la costa Andaluza, Ceuta y Melilla (20 eventos).

No obstante, las provincias más afectadas son Málaga (>15 eventos), Granada, Alicante, Valencia, y Castellón (entre 12-14 eventos), todas ellas en la cuenca Mediterránea.

A continuación, vamos a analizar, para cada uno de los tres tramos costeros definidos, los eventos ocurridos, cómo fueron, qué procesos desencadenaron, los daños principales y su localización, cómo se gestionó la emergencia y las decisiones adoptadas, los actores implicados y sus acciones, así como las medidas acometidas de restauración y defensa.

3.1. Costa de Andalucía

En esta región SUDOE se registraron 19 eventos en la costa de Andalucía y un evento en Ceuta (25 de diciembre de 2013). La distribución temporal de los eventos se muestra en la Fig. 2, con una tendencia ascendente durante los últimos años.

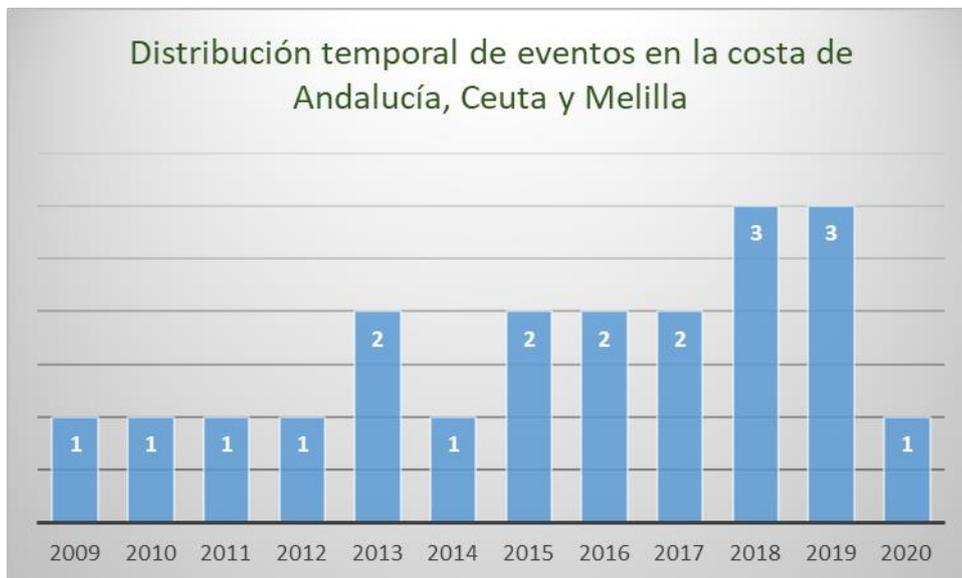


Fig. 2. Distribución temporal de eventos en la costa de Andalucía, Ceuta y Melilla durante la última década. Se observa una tendencia ascendente durante los últimos años

Los eventos mediterráneos se concentran especialmente en la costa de Málaga, Granada y Almería. En general se trata de temporales marítimos, con fuertes vientos y precipitaciones intensas. Destaca el temporal en la costa de Málaga, en diciembre de 2016, con lluvias de hasta 200 mm, o el más reciente de septiembre de 2019 con lluvias de hasta 400 mm en la costa oriental de Almería.

3.2. Costa levantina-mediterránea española

Incluye las siguientes regiones SUDOE: Murcia ES62, Comunidad Valenciana ES52, Cataluña ES51 y Baleares ES53. En total, se han registrado 24 eventos durante la última década, cuya distribución temporal se puede ver en la Fig. 3. Destaca claramente el año 2019 con 7 eventos. En general, se observa también una tendencia ascendente.



Fig. 3. Distribución temporal de los 24 eventos registrados en la costa del Levante y Baleares durante la última década

Gran parte de los eventos en la cuenca levantina española tienen lugar durante el inicio del otoño, después del intenso calor del verano, lo que tradicionalmente se conoce como “gota fría” o DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos). El calor y la humedad acumulados en las capas bajas y en el mar se encuentra con el frío que llega en las capas altas de la atmósfera, produciéndose fuertes tormentas y aguaceros, con precipitaciones muy intensas concentradas en cortos periodos de tiempo. Según la orografía, suelen originarse fuertes riadas e inundaciones. En los eventos registrados, se han cuantificado lluvias de hasta 373 mm/24h en Vallibona (Castellón), en el año 2015.

Los efectos son lluvias muy intensas, intenso oleaje, invasión marina de la costa y fuertes vientos. En Baleares, concretamente en Menorca, se produce también un efecto meteorológico conocido como *Rissaga*, con una dinámica muy parecida a los maremotos. Se trata de oscilaciones bruscas de la presión atmosférica que causan variaciones del nivel del mar de carácter

extraordinario, que pueden alcanzar los dos metros de amplitud en pocos minutos. El caso más conocido y estudiado es el del Puerto de Ciutadella (Menorca). En las *rissagas* más comunes, las oscilaciones del nivel del mar son de 60 a 120 cm, con períodos de 10 minutos, pero se han llegado a alcanzar oscilaciones de hasta 4 metros. Suelen causar graves daños a las embarcaciones. En julio de 2018 hubo también una *rissaga* importante en los puertos de Mallorca, concretamente en el Port de Alcúdia, que inundó las playas.

4. 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.

4.1 Costa de Granada

La figura 4 muestra la localización de las estaciones pluviométricas que, a priori, presentan las características adecuadas para realizar el análisis espectral.

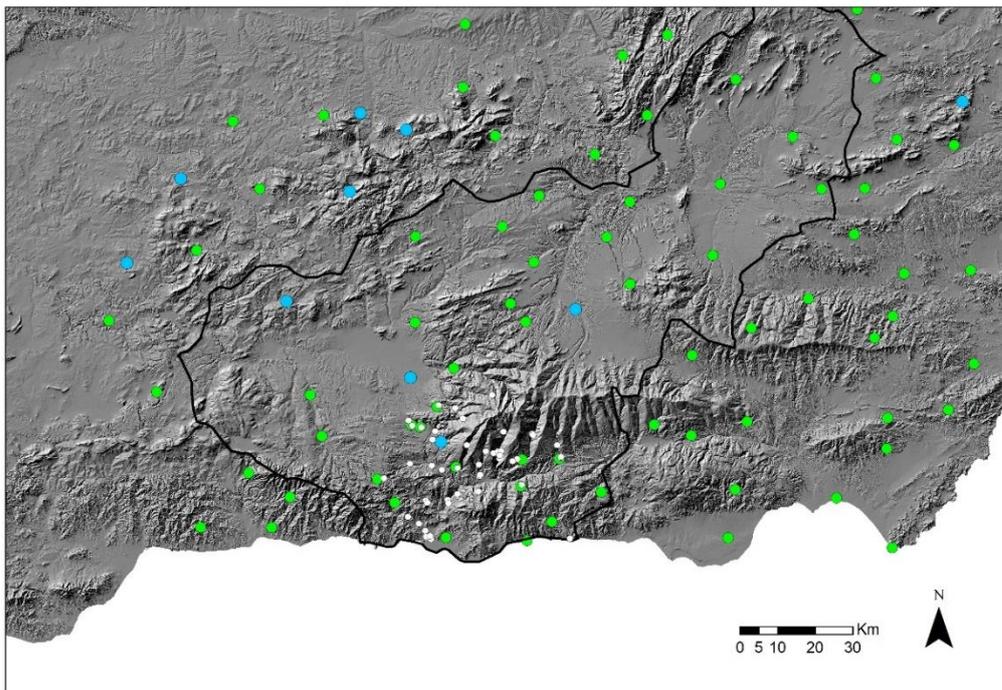


Figura 4. Estaciones pluviométricas. Azul: estaciones que tienen en torno a 100 años de registros. Verde: estaciones que tienen al menos 20 años de registros. Blanco: estaciones con datos diarios.

La figura 5 muestra las estaciones de aforos seleccionadas para estimar los valores espectrales de los registros de caudales que presentan.

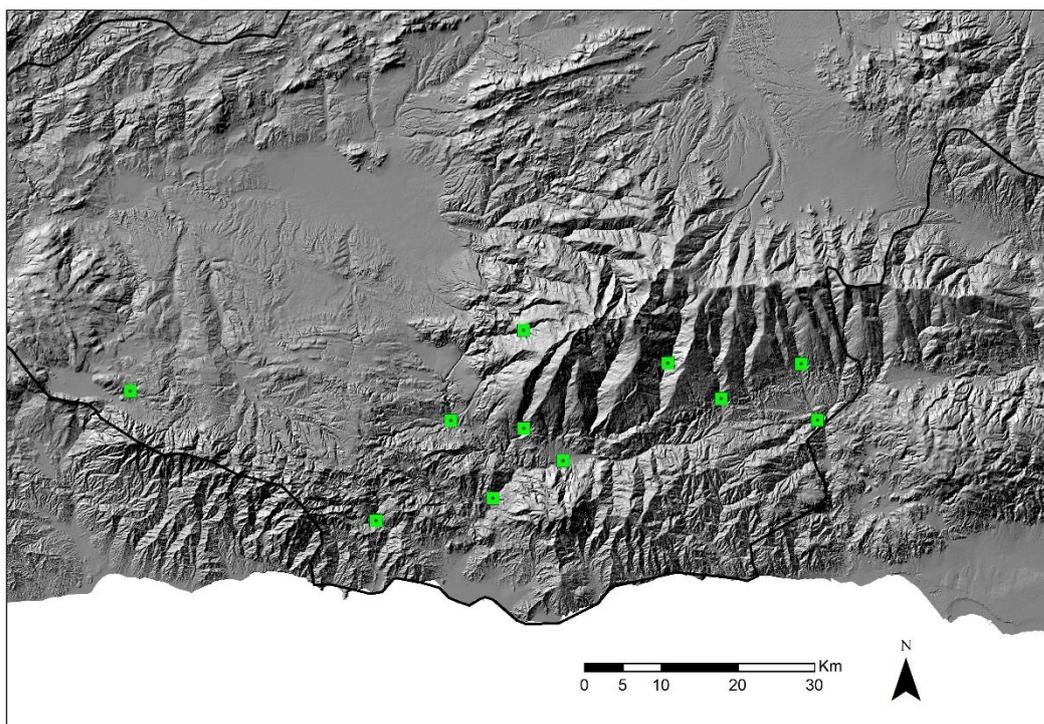


Figura 5. Estaciones de aforos.

La figura 6 muestra los piezómetros seleccionados para estimar los valores espectrales de los registros disponibles.

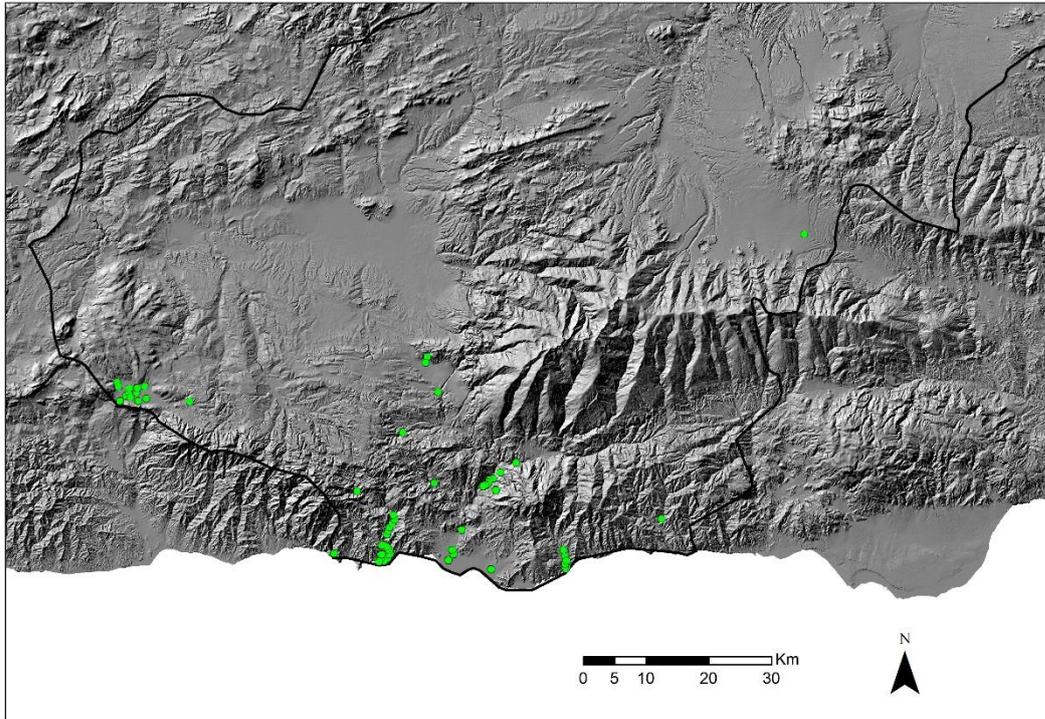


Figura 6. Piezómetros en la Cuenca Mediterránea andaluza.

4.2 Mallorca

La figura 7 muestra las estaciones pluviométricas seleccionadas para estimar los valores espectrales de los registros de precipitaciones.

La figura 8 muestra la distribución de estaciones piezométricas existentes en Mallorca.

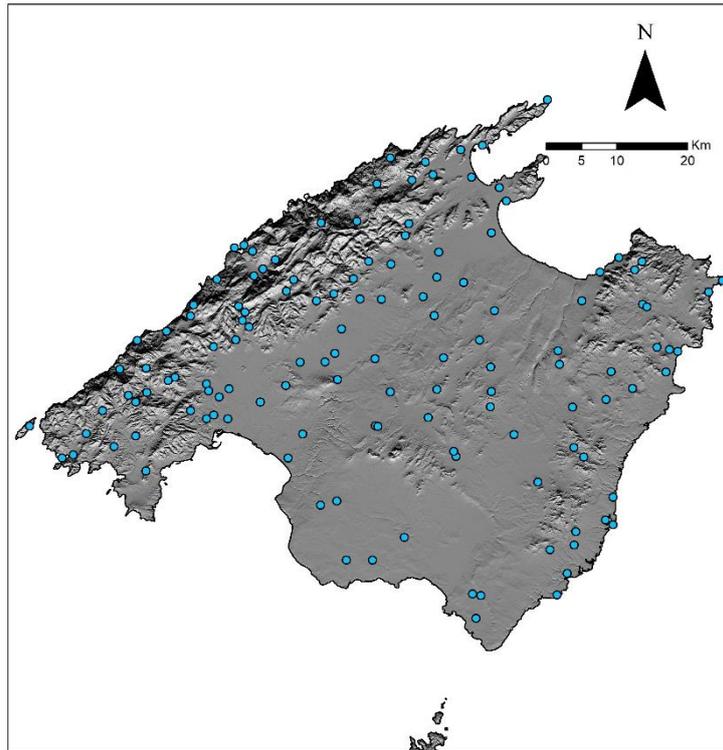


Figura 7. Estaciones pluviométricas en la isla de Mallorca.

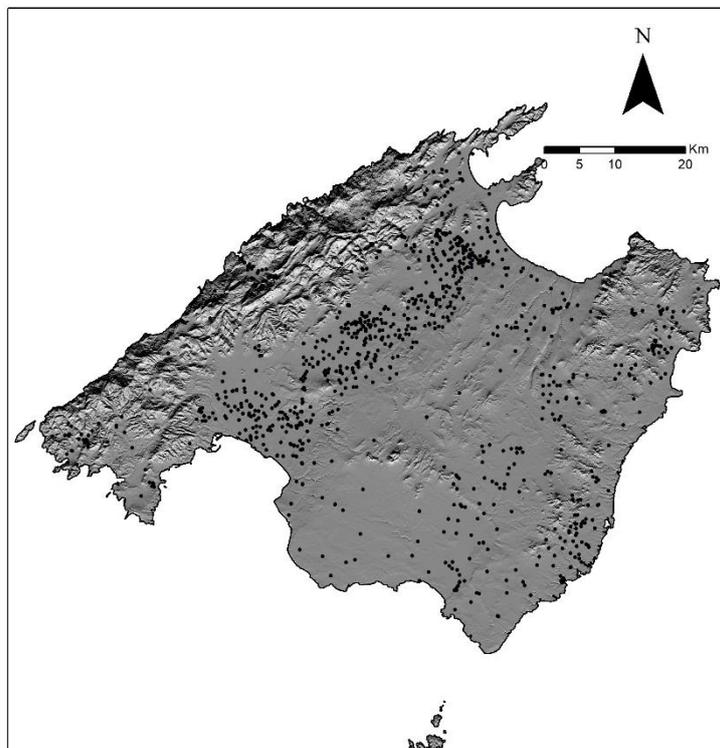


Figura 8. Localización de los piezómetros en la isla de Mallorca.

La figura 9 muestra las estaciones de aforos que se controlan en Mallorca.

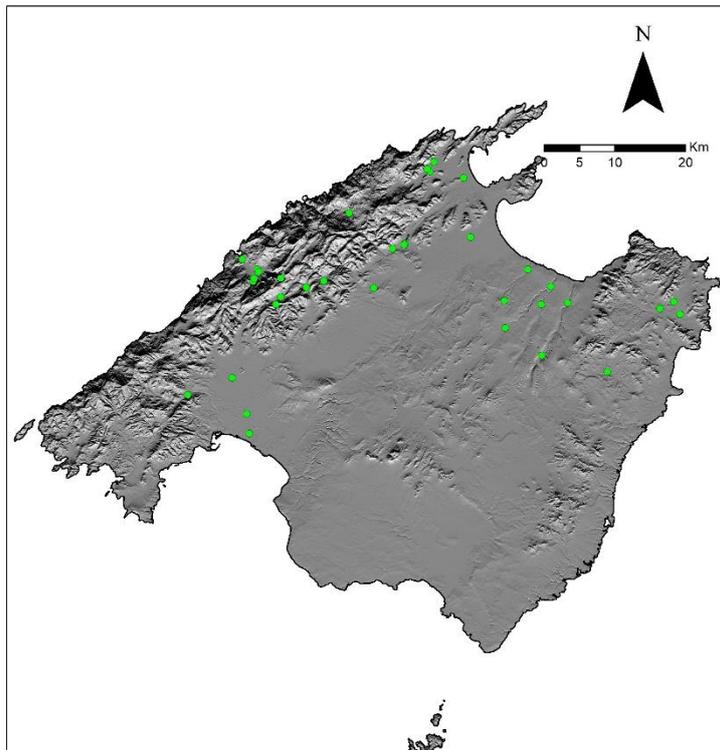


Figura 9. Estaciones de aforos en la isla de Mallorca.

5. 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:

$S(\omega)$: es la densidad espectral estimada para la frecuencia ω .

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

$\lambda(k)$: 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).

6. RESULTADOS

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

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.

6.1 Costa de Granada

Estaciones pluviométricas

La figura 10 muestra la evolución de una estación con registros diarios y la figura 11 los resultados del análisis espectral.

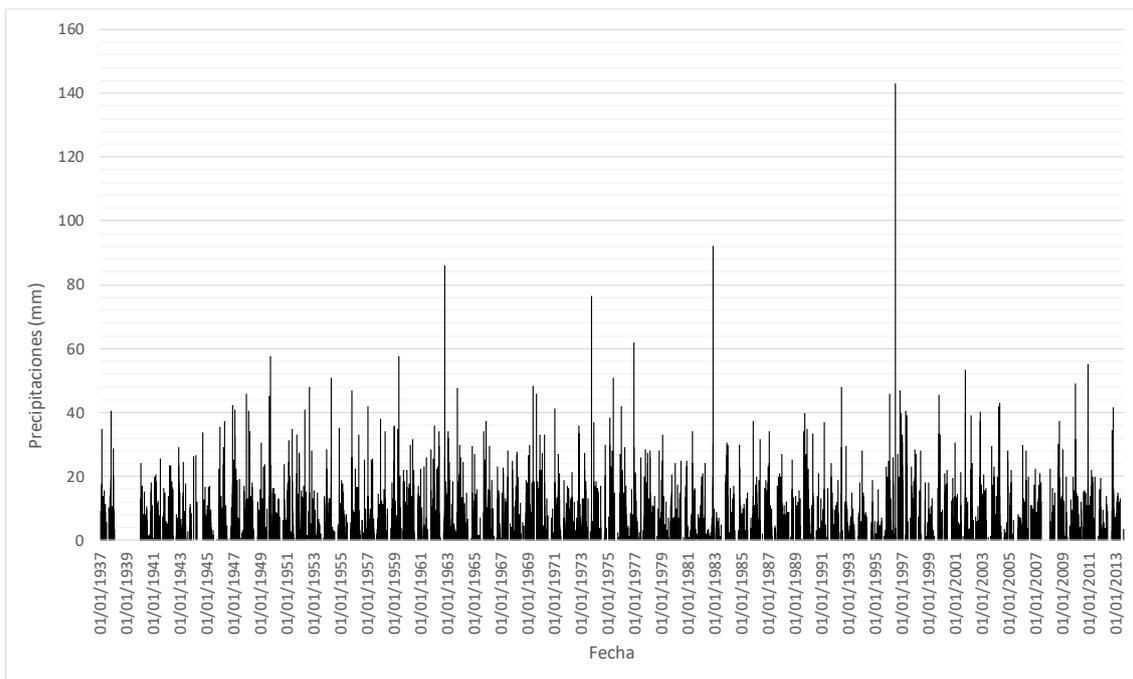


Figura 10. Registro de precipitaciones de una estación situada en el Norte de la costa de Granada (Padul, 0143).

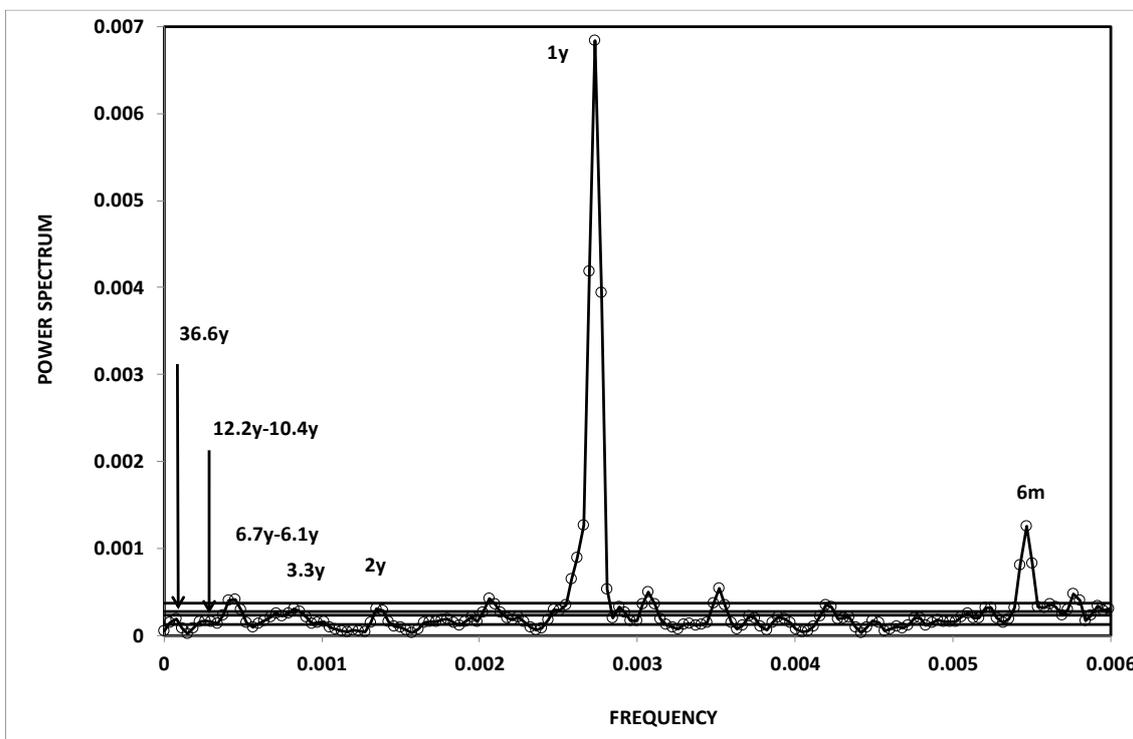


Figura 11. Espectro de la estación 0143.

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. No obstante, la significación estadística permite, a pesar de la afección, decidir si los resultados son aceptables o no. Del total de series seleccionadas para el análisis, únicamente 11 presentan resultados aceptables. La figura 12 muestra un ejemplo de registros piezométricos y la figura 13 la estimación del análisis espectral.

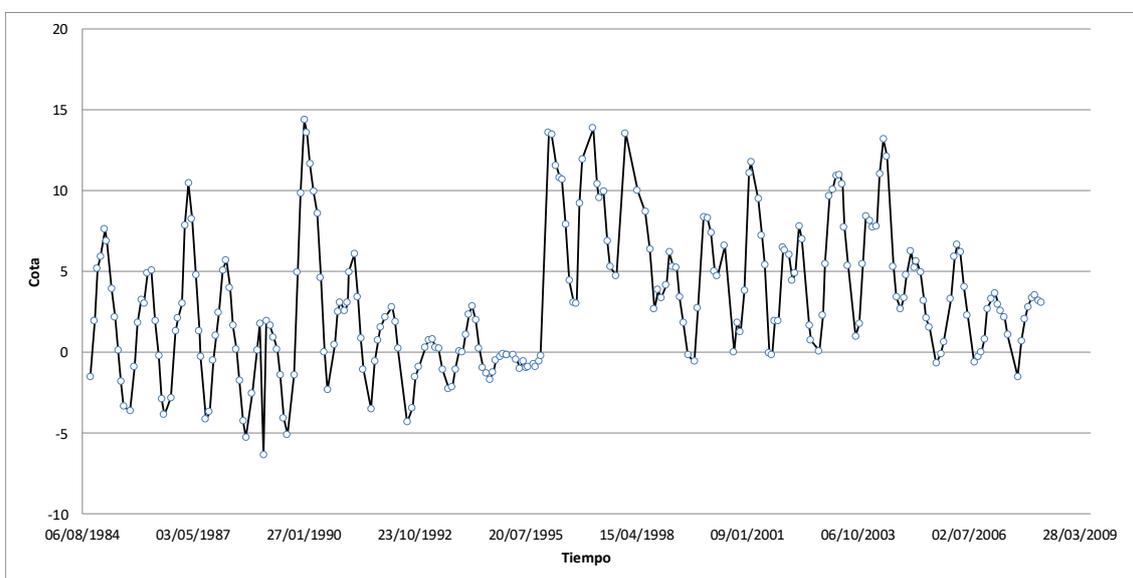


Figura 11. Piezómetro situado en el río Verde con referencia P.06.22.005-S.

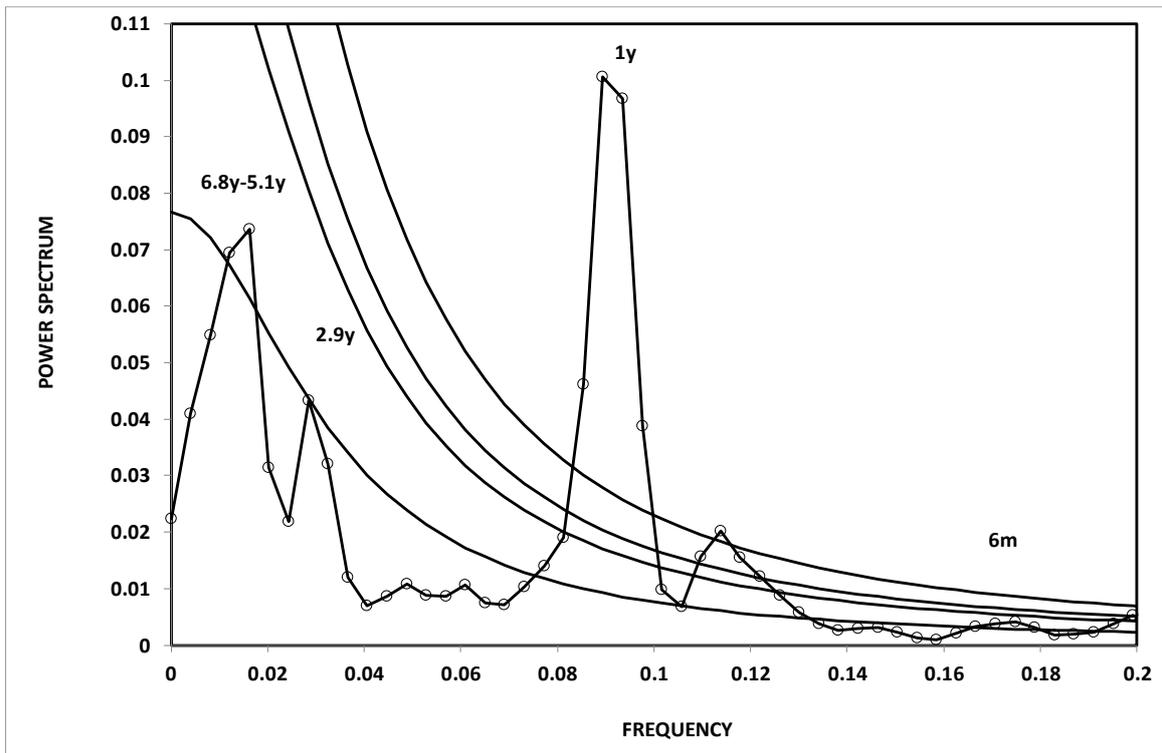


Figura 12. Análisis espectral del piezómetro P.06.22.005-S.

Caudales

La figura 13 muestra los caudales del manantial de Cázulas, en la cabecera del río Verde, y la figura 14 los ciclos detectados en el análisis espectral. El comportamiento mostrado por este manantial sintetiza bastante bien el comportamiento climático de la costa de Granada. Si bien, también se ha observado ciclos de menor frecuencia en series con mayor número de registros.

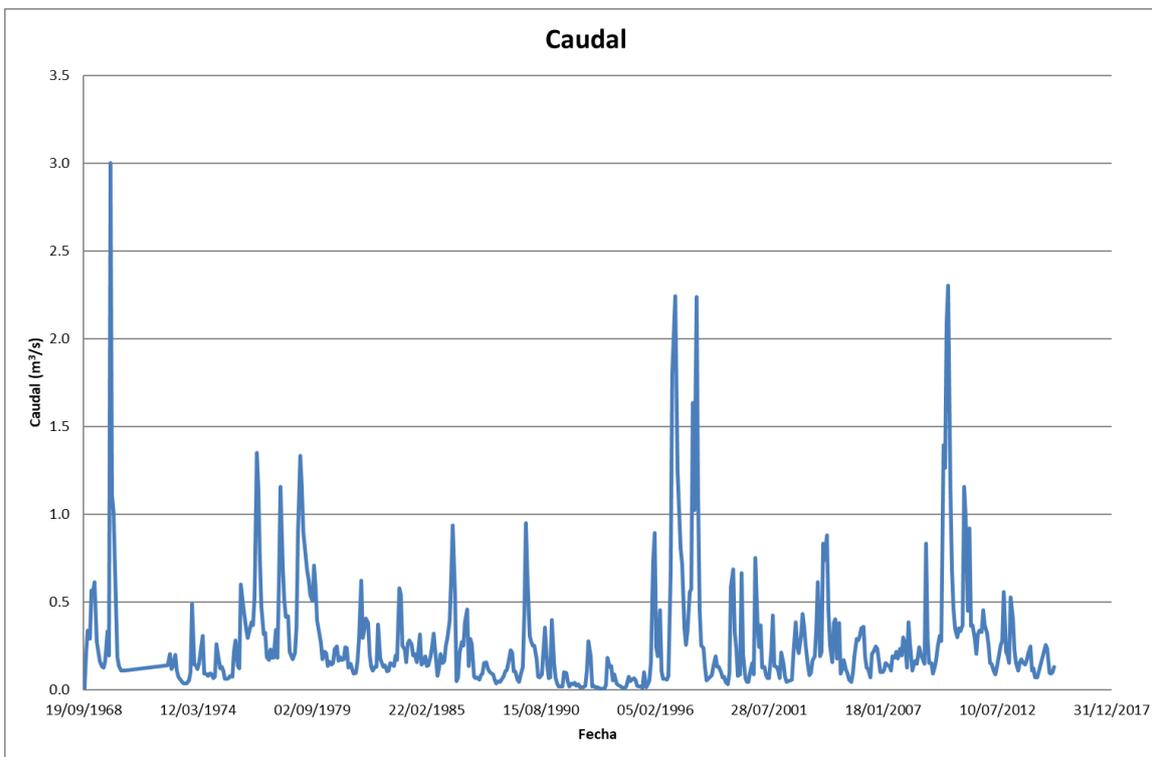


Figura 13. Evolución de los caudales del manantial de Cázulas (Granada).

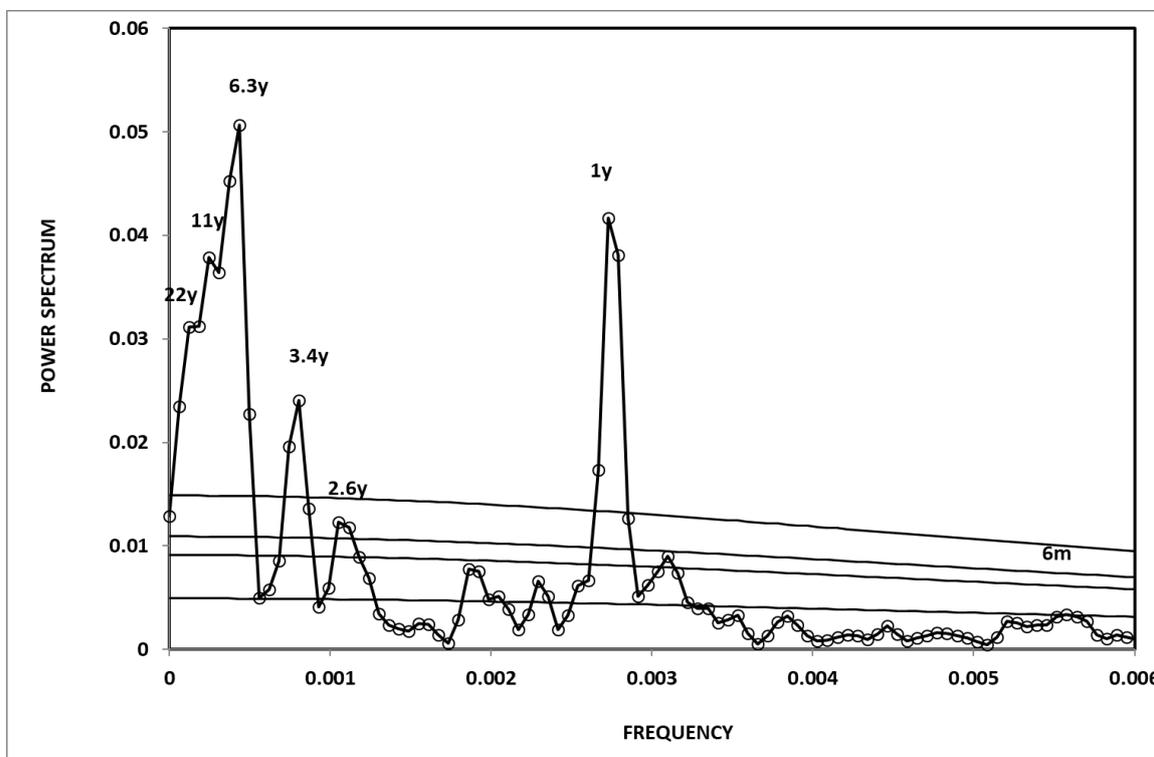


Figura 14. Ciclos estimados en el análisis espectral del manantial de Cázulas (Granada).

6.2 Mallorca

Estaciones pluviométricas

La figura 15 muestra la evolución de las precipitaciones en la estación 569 situada en la zona Este de la Isla y la figura 16 Los resultados del análisis espectral. Aunque no muestra todos los ciclos detectados en las series climáticas, es representativa del comportamiento de este tipo de datos.

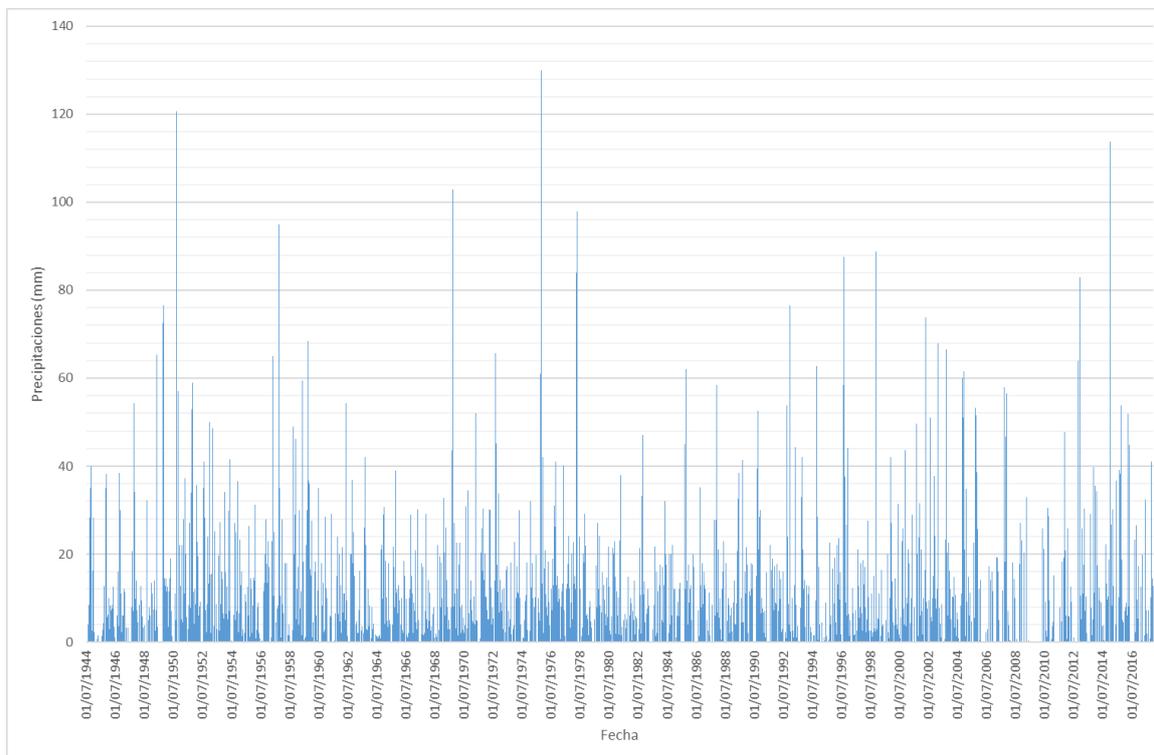


Figura 15. Registros de obtenidos en la estación 569 al este de la isla de Mallorca.

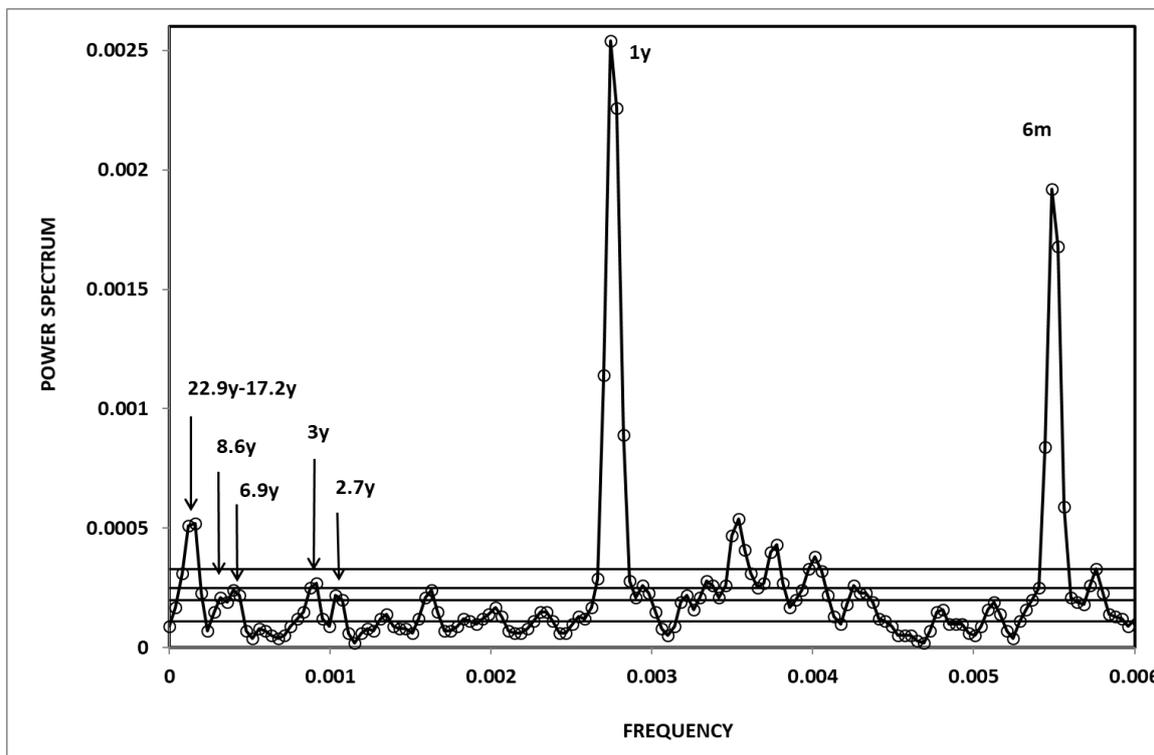


Figura 16. Ciclos estimados en la estación 569 situada al este de la isla de Mallorca.

Piezómetros

En general, todos los piezómetros tienen algún grado de afección por bombeos existentes en el acuífero o, en algunos casos, parece que muestran errores en las medidas. Ningún piezómetro refleja los principales ciclos o se muestran con escasa relevancia, aunque en conjunto, los niveles piezométricos de Mallorca sí están influenciados por todos los ciclos estimados en las series hidrológicas empleadas para este análisis. La figura 17 muestra un ejemplo de registros piezométricos y la figura 18 la estimación del análisis espectral.

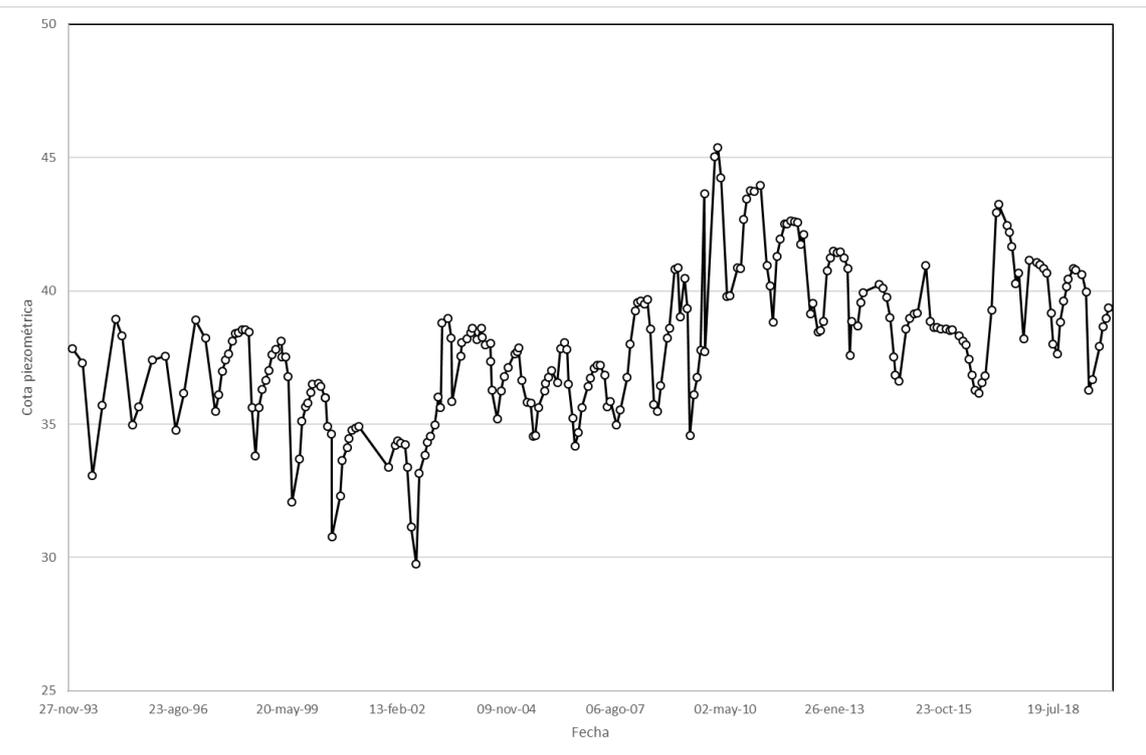


Figura 17. Evolución del piezómetro MA0054, situado al noroeste, próximo a la costa.

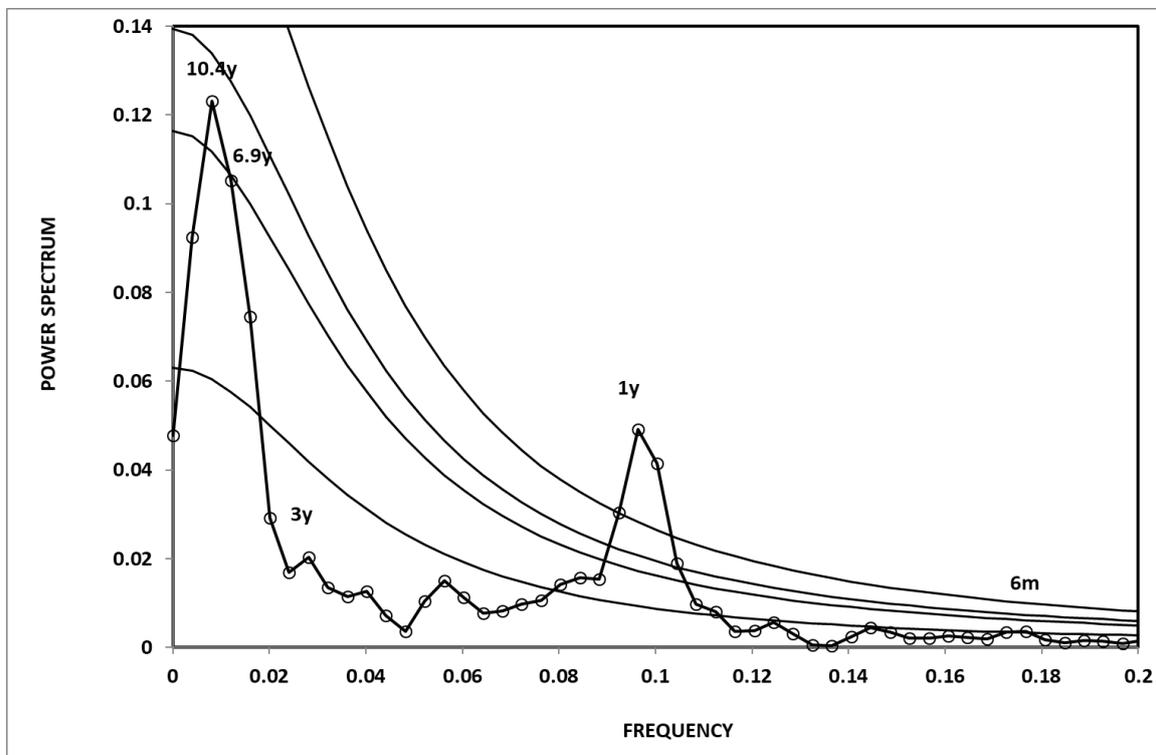


Figura 18. Análisis espectral del piezómetro MA0054, situado al noroeste, próximo a la costa.

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 19 muestra los caudales del manantial de la estación de aforos B007 (Coa Negra), situada al noroeste de la Isla y la figura 20 los ciclos detectados en el análisis espectral.

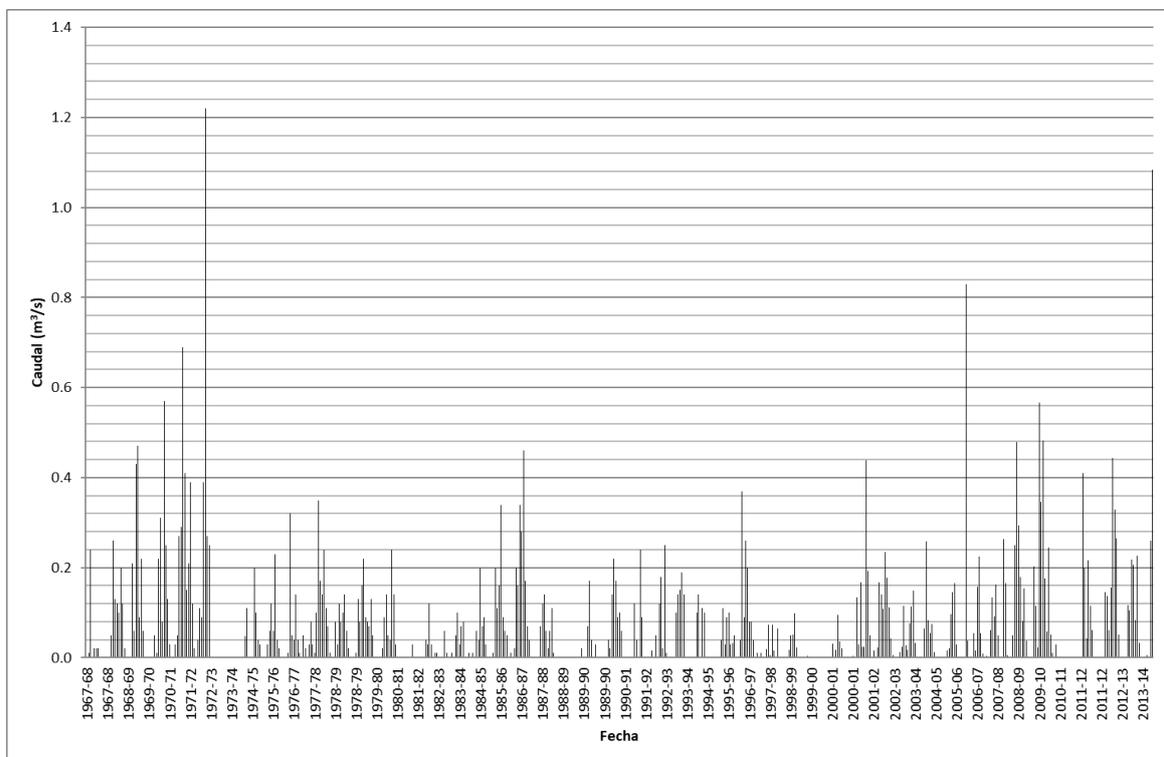


Figura 19. Evolución de los caudales en la estación B007.

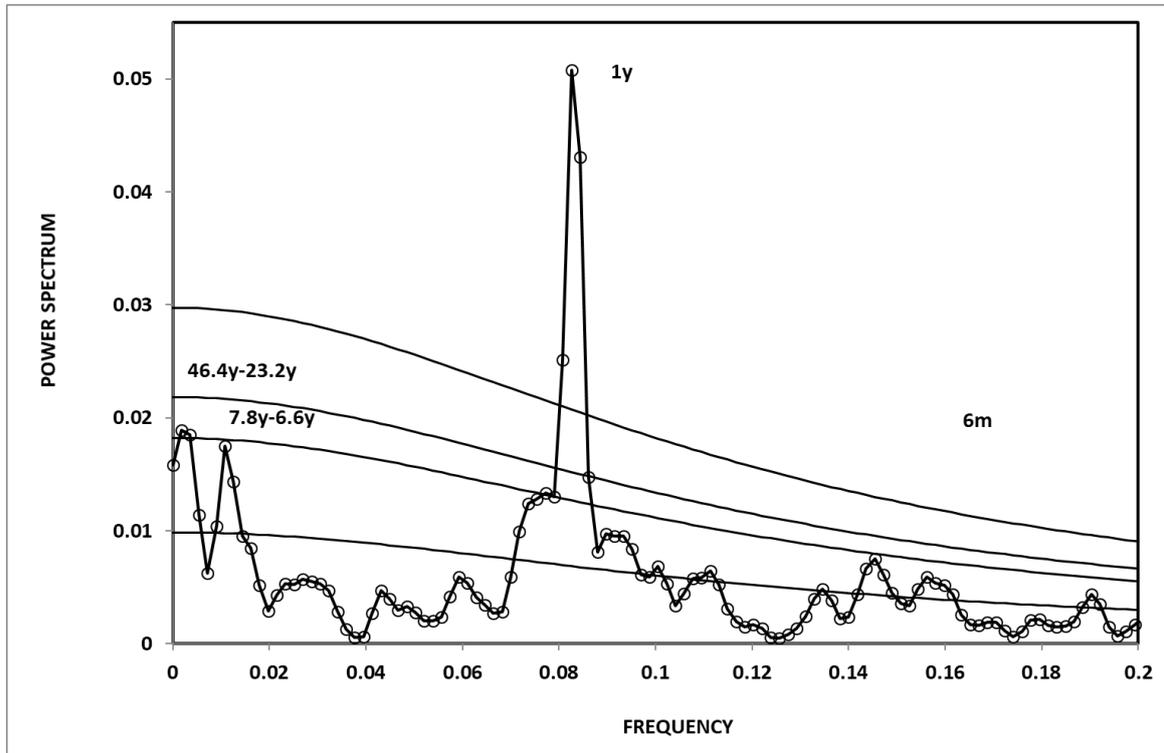


Figura 20. Análisis espectral de la estación de aforos B007.

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.

En la figura 21 se muestra un ejemplo con datos de una estación de aforos de Mallorca, Gross, situada al noroeste de la isla de Mallorca, al sur de la Tramuntana. En la figura 22 se muestra otro ejemplo, en este caso los datos experimentales corresponden a los caudales de un manantial de un acuífero carbonático, Sierra de las Nieves, de la costa mediterránea andaluza, en concreto, Las Millanas o río Grande, que constituye el principal drenaje del acuífero.

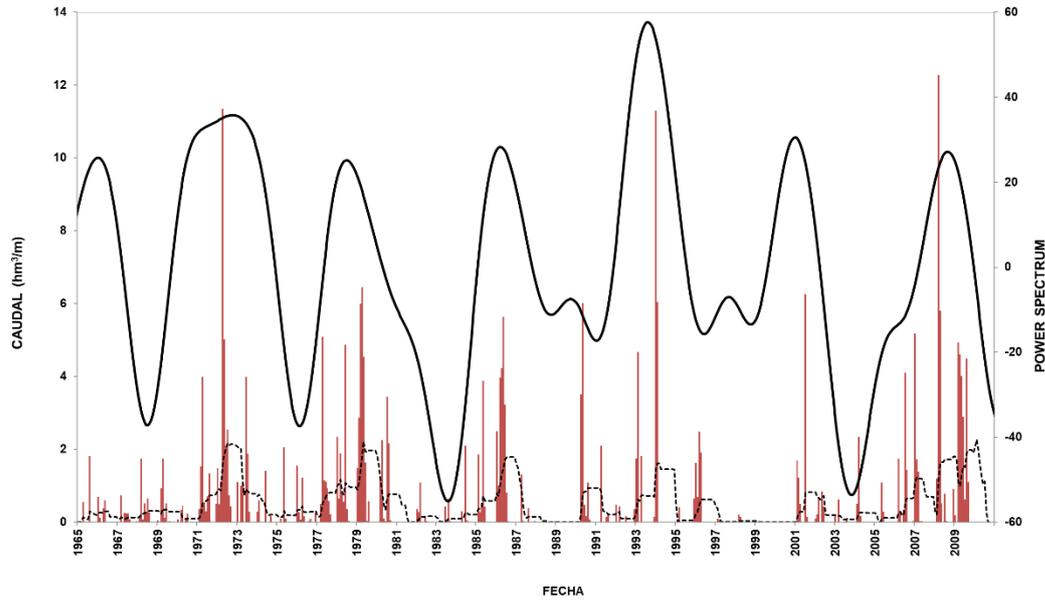


Figura 21. Rojo: caudales aforados. Línea continua gruesa: simulación basada en los principales ciclos detectados. Línea continua fina: media móvil con paso de 12 meses.

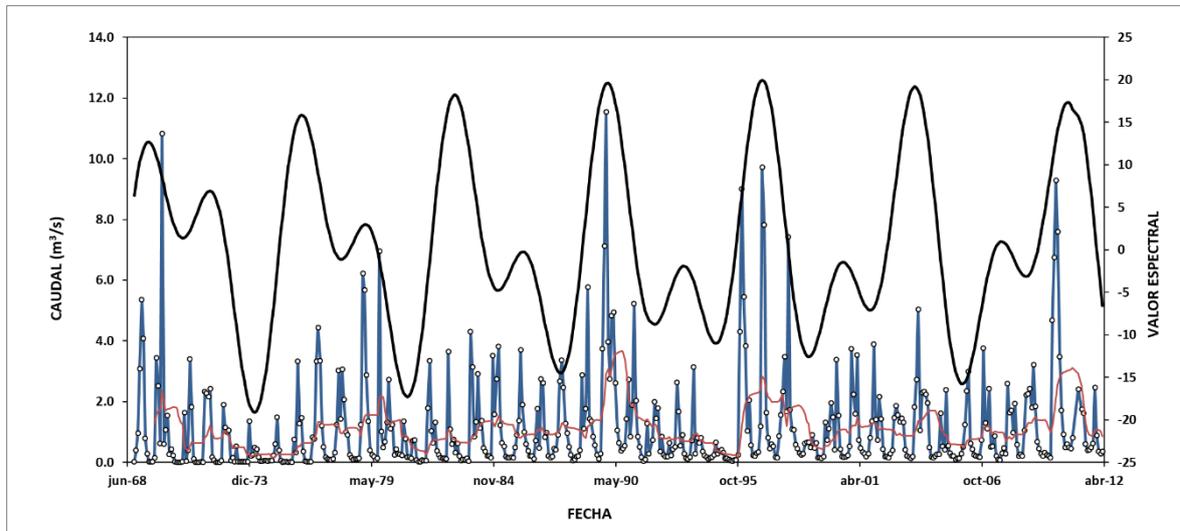


Figura 22. Azul: caudales aforados en el manantial. Línea continua gruesa: simulación basada en los principales ciclos detectados. Línea roja: media móvil con paso de 12 meses.

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 Sachsamanooglou C (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.

Wieczoreck 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.