

## Estudiando la sequía: una experiencia para el aula de informática

### *Studying drought in the computer room*

**PEDRO MARTÍNEZ SANTOS, SILVIA DÍAZ ALCAIDE Y CRISTINA PRIETO GARCÍA**

*Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid. pemartin@geo.ucm.es*

**Resumen:** El agua es un recurso tan escaso como necesario. En regiones donde imperan los climas semiáridos, como es el caso de la mayor parte de la Península Ibérica, la disponibilidad de agua puede estar condicionada por la sequía. El estudio de este riesgo natural está íntimamente relacionado con diversas disciplinas de las Ciencias de la Tierra, como la meteorología o la hidrología. Este artículo describe paso a paso la aplicación de una de las muchas técnicas existentes para el estudio de la sequía: la curva de desviaciones acumuladas. El alumno descarga de internet los datos de precipitación de la ciudad donde reside y los analiza con ayuda de una hoja de cálculo, caracterizando las principales sequías con perspectiva histórica. Por último se proponen diversos ejercicios de interpretación. Con las oportunas modificaciones, este ejercicio es adecuado para un amplio rango de titulaciones.

**Palabras clave:** Sequía, recursos hídricos, precipitación, ejercicios prácticos.

**Abstract:** *Water is as scarce as it is necessary. Water availability in semiarid regions is often constrained by droughts. The study of droughts pertains to several scientific disciplines, including meteorology and hydrology. This paper presents a step-by-step description of the cumulative rainfall curve, a common technique for drought analysis. Students download historical rainfall data for the town where they live. Thereafter, they carry out a spreadsheet-based analysis to characterize drought from a historical perspective. Finally, a series of additional interpretation exercises are proposed. This exercise is appropriate for a wide range of age groups and courses.*

**Keywords:** *Drought, water resources, rainfall, classroom exercises*

### INTRODUCCIÓN

La sequía es una característica recurrente de los climas áridos y semiáridos, y por tanto, un riesgo natural con el que estamos acostumbrados a convivir en la Península Ibérica (Martín Vide y Olcina, 2001). Las sequías ocasionan situaciones generalizadas de estrés hídrico, afectando a los cultivos, al suministro de agua a la población y al riego de parques y jardines. Es por ello normal que los medios de comunicación se hagan eco de sus efectos. Así, cuando nos abandonan los períodos de bonanza hidrológica –como el que hemos tenido en los últimos tiempos– no tardamos en encontrarnos titulares de periódico, televisión o radio refiriendo que el último mes, estación o año ha sido el más seco del último lustro, década o incluso, del último siglo.

El estudio de la sequía puede abordarse desde distintas perspectivas, y atañe a ambientólogos, ecólogos, hidrólogos, meteorólogos, ingenieros y

geólogos. Quizá por ello es prácticamente imposible encontrar una definición universal del término “sequía”. Lo que sí podemos afirmar con seguridad es que se trata de un fenómeno con múltiples facetas en cuyo estudio intervienen variables hidrometeorológicas y socioeconómicas (Mishra y Singh, 2010; Prieto García, 2011; Díaz Alcaide, 2011). Así, la sequía suele clasificarse en base a sus efectos, siendo lo más habitual distinguir entre sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas (OMM, 2006).

- La sequía meteorológica es la más sencilla desde el punto de vista conceptual, y su magnitud e intensidad se establece en base a datos climáticos. Podría definirse como una reducción sostenida en el tiempo de los valores medios de precipitación para un entorno geográfico determinado.
- La sequía hidrológica hace referencia a una reducción importante en el caudal o volumen de

agua almacenado en un sistema hidrográfico, habitualmente una cuenca hidrográfica o sistema de explotación. En último término suele estar relacionada con la sequía meteorológica, si bien es posible que exista un desfase temporal entre una y otra: la gran cantidad de agua almacenada en lagos, embalses y acuíferos puede permitir que el sistema considerado no note la escasez de precipitaciones hasta varios meses (o incluso años) después de comenzar el descenso de las mismas. Por tanto, si la sequía meteorológica es breve sus efectos pueden no manifestarse desde el punto de vista hidrológico.

- La sequía agrícola se entiende como una insuficiencia de humedad en el suelo, que no permite el correcto desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases. La caracterización de esta sequía es compleja, puesto que depende del tipo de cultivo. Esto dificulta la tarea de establecer umbrales de escasez hídrica incluso dentro de una misma zona geográfica. La sequía agrícola es la que habitualmente encuentra más repercusión mediática, puesto que afecta fuertemente a la producción de alimentos, y todavía hoy da lugar a fuertes hambrunas en diversos lugares del mundo.

Como es lógico, todos estos tipos de sequía guardan relación. Los límites entre una y otra no son netos, por lo que en ocasiones es difícil separar, por ejemplo, la sequía meteorológica de la hidrológica. Además, y como ya se ha visto, en ocasiones tendremos la una sin la otra. Todo esto nos da idea de la complejidad que comporta el estudio de este fenómeno.

Aunque los efectos de la sequía son por lo general negativos, esto no necesariamente es así en todos los casos. Dado que la escasez de precipitaciones suele ir asociada al buen tiempo, puede tener efectos incluso beneficiosos tanto para la industria turística de determinados ámbitos geográficos como para la práctica de actividades recreativas al aire libre.

Por su mayor sencillez conceptual, la sequía meteorológica es la más agradecida desde el punto de vista didáctico. Este artículo presenta una experiencia práctica para el estudio de la sequía meteorológica en el aula. La actividad se centra en la aplicación de la técnica conocida como la “curva de desviaciones acumuladas”. Se trata de un método basado en cálculos aritméticos sencillos, y por tanto es abordable tanto para los alumnos que cursan el bachillerato como para los que están en los últimos cursos de carrera. A lo largo de las páginas siguientes se desarrolla paso a paso el ejercicio, tomando como base a los datos de precipitación de la estación meteorológica de Madrid.

Evidentemente, el momento más adecuado para la realización de esta actividad es cuando la sequía

se pone de actualidad en los medios, puesto que permite al alumno dar sentido práctico a su trabajo y analizar críticamente lo que observa a su alrededor en base a los resultados de su propio trabajo. Con anterioridad a la práctica, es conveniente que el alumno haya estudiado, en clase o por su cuenta, el concepto de sequía y sus principales implicaciones.

## ASPECTOS DIDÁCTICOS

Este ejercicio tiene por objetivo introducir al alumno al concepto de sequía, así como a su carácter recurrente y sus efectos. Es adecuado para un amplio rango de titulaciones universitarias, incluyendo Geología, Ciencias Ambientales, Geografía o diversas ingenierías (Caminos, Montes, Agrónomos). Como ya se ha dicho antes, debido a su relativa sencillez conceptual, puede realizarse también con alumnos de bachillerato.

Sirve para fomentar el desarrollo de una serie de destrezas como el tratamiento de series de datos o la elaboración e interpretación de distintos tipos de gráficas. También ayuda a desarrollar el espíritu crítico, puesto que permite contrastar la información que a menudo recibimos de los medios de comunicación con los resultados del trabajo propio. Por último, permite introducir al alumno a la descarga y utilización de los datos hidrológicos que pueden obtenerse en las páginas web de muchos organismos oficiales: aprende con ello el valor de las redes de observación en las Ciencias de la Tierra.

El ejercicio toma como punto de partida los datos de precipitación de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) que, como se explica a continuación, se obtienen gratuitamente de internet. Las distintas tareas pueden realizarse a mano, pero el proceso en ese caso es extremadamente repetitivo y tedioso. Es por ello deseable contar con un aula de informática. Además, se recomienda tener unas nociones básicas sobre el manejo de Microsoft Excel (las explicaciones se detallan en base a la versión 2007).

## DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

La práctica ha sido estructurada en cuatro módulos, que se corresponden con los cuatro primeros epígrafes de esta sección. Primero se explica cómo descargar gratuitamente los datos históricos de precipitación de la web de la AEMET. Después se realiza un breve análisis de los datos de partida en base a un histograma clásico, cuyas ventajas y desventajas pondremos de manifiesto antes de pasar a describir la elaboración de la curva de desviaciones acumuladas y a abordar con ella una serie de cuestiones prácticas. El quinto y último epígrafe hace referencia a qué debemos hacer si la serie de datos original se

encuentra incompleta.

Repetidas experiencias con grupos de 20 a 30 alumnos demuestran que la práctica completa puede realizarse en dos horas. La estructura secuencial de los módulos permite que sea el profesor quien decida a partir de dónde empezar –es decir, qué partes del trabajo pueden darse ya hechas al alumno–, por tanto, en qué aspectos poner el énfasis.

### Descarga y tratamiento de los datos de precipitación

Los datos necesarios para la elaboración de este ejercicio pueden descargarse de forma gratuita de la página web de la AEMET ([www.aemet.es](http://www.aemet.es)). Para ello entraremos en la página principal de dicho organismo y pulsaremos, por este orden, las pestañas “servidor de datos”, “acceso a datos”, “listado de contenidos del servidor de datos”, “series climatológicas” y “enlace al servidor de datos” (nótese que esta ruta puede variar en el futuro si se modifica el diseño de la página).

Llegados a este punto, conviene que nos bajemos el archivo “maestro.csv”. Se trata de un listado que incluye el código numérico (llamado “indicativo”) de cada estación meteorológica. De acuerdo con este archivo, el código de la estación de “Madrid” es el 3195 (si por ejemplo quisiéramos hacer el ejercicio con la estación de Jaén, deberíamos anotar el código 5270B y proceder de manera análoga).

Para descargar la serie de datos de la estación entraremos, por este orden, en las carpetas “valores mensuales” y “estación”. Por último pincharemos sobre el 3195, que bajaremos a nuestro disco duro en formato comprimido. Cuando lo abramos tendremos ante nosotros una hoja Excel que contiene toda una serie histórica de registros de datos a escala mensual para la estación meteorológica de Madrid (temperaturas mínimas, medias y máximas, precipitación, velocidad del viento, días de nieve, etc.). La serie abarca desde 1920 hasta la actualidad, siendo una de las más largas y completas de cuantas se pueden consultar en la base de datos de la AEMET.

A efectos de los ejercicios que se proponen sólo son importantes cuatro columnas, a saber: “indicativo”, “año”, “mes” y “prec.total” (precipitación total del mes). Podemos por tanto borrar el resto y quedarnos sólo con ellas.

Los valores de precipitación vienen expresados en litros por metro cuadrado (o milímetros)<sup>1</sup>. Llamamos la atención las siglas “lp” que observamos en algunos registros. Este código significa “inapreciable”,

<sup>1</sup> *Un milímetro de lluvia es equivalente a un litro por metro cuadrado. El significado físico es la altura que alcanza un litro de agua al ser vertido en una urna de base igual a un metro cuadrado. Así, dos litros darían una altura de la lámina de agua de 2mm y 1000 litros darían una altura de 1 metro (para un volumen total almacenado de un metro cúbico).*

y quiere decir que la precipitación total durante el mes en cuestión fue inferior a la décima de milímetro, que es la precisión máxima de los aparatos de medida. A efectos prácticos, lo mejor es cambiar estos registros por ceros para que no introduzcan distorsión en los resultados. Para ello, dentro de la pestaña “inicio” de Excel, pulsaremos sobre “buscar y seleccionar” y utilizaremos la opción “reemplazar”. Acto seguido escribiremos “lp” (sin comillas) en la ventana “buscar” y “o” (también sin comillas) en la ventana “reemplazar con”. Por último pulsaremos el botón “reemplazar todos”. De esta manera el ordenador procederá a reemplazar automáticamente todos los lp con ceros. Cuando termine nos dará un mensaje indicando cuántos reemplazos ha realizado.

Una mirada más detallada al registro revela que este se encuentra prácticamente completo. Sólo hay tres huecos en la serie, correspondientes a los meses de marzo y abril de 1939 y marzo de 1965. Hay que tener en cuenta que el registro de marzo de 1939 ni siquiera aparece<sup>2</sup> (la serie salta directamente de febrero a abril), por lo que lo más conveniente es insertar una línea en blanco a la altura correspondiente para que los cálculos automatizados que hagamos a posteriori salgan bien.

Los huecos de la serie corresponden a períodos en los que no se tomó medida, o bien se tomó y por algún motivo se perdió. Como se verá más adelante, es común rellenar estos huecos en base a aquellas estaciones cercanas que presenten una buena correlación con la nuestra. En el caso de Madrid tenemos varias estaciones vecinas que nos podrían servir: Madrid-Aeropuerto, Madrid-Cuatro Vientos y Madrid-Getafe. Por desgracia, sólo nos servirán para rellenar el registro de marzo de 1965, puesto que ninguna de ellas abarca el año 1939.

Ante la falta de datos y alternativas de correlación, para marzo y abril de 1939 simplemente asumiremos un valor nulo, o bien tomaremos la media de todos los meses de marzo y de todos los meses de abril del registro, respectivamente (para simplificar las cosas, se ha optado por la primera opción). Está claro que con ello introducimos una distorsión en los resultados finales, pero también sabemos que esta difícilmente será significativa teniendo en cuenta que se trata de tan sólo dos registros sobre más de mil.

Distinto es el caso del registro de marzo de 1965, donde sí podemos establecer una correlación estadística con las estaciones vecinas. Para ello seguiremos las instrucciones que se detallan más adelante, en el epígrafe “*Qué hacer si la serie de precipitación está incompleta*” (dado que se trata de algo opcio-

<sup>2</sup> *Esto es, por desgracia, habitual en muchas de las series temporales de la AEMET. Para evitar sorpresas desagradables se recomienda dar un breve repaso a nuestra serie antes de empezar a trabajar.*

nal, se ha optado por dejar esta explicación para el final no complicar en exceso la exposición del ejercicio). De momento nos conformaremos con saber que, mediante correlación estadística con la estación de Madrid-Cuatro Vientos, el valor que obtenemos para marzo de 1965 en Madrid es de 75.1mm.

Una vez rellenados los tres huecos tendremos nuestra serie de precipitación completa a escala mensual. Sin embargo, para la elaboración de la curva de desviaciones acumuladas es preferible trabajar con datos anuales. La forma más cómoda de obtener los valores anuales es sumar los doce registros mensuales de cada año. Siempre es más cómodo trabajar sin las filas en blanco que quedan intercaladas entre los registros, por lo que borraremos todas las que sobran hasta dejar sólo el sumatorio de cada año. Se trata de un proceso algo tedioso, pero necesario.

Para facilitar las cosas, podemos optar por trabajar en años naturales (también llamados años civiles) en vez de en años hidrológicos. Por año natural entendemos aquel que comienza el 1 de enero y el 31 de diciembre, es decir, el que se corresponde con el calendario normal.

También podríamos trabajar en años hidrológicos, lo que resulta más frecuente en el terreno de la planificación hidrológica: igual que en ocasiones se trabaja en años fiscales, que terminan el 30 de junio, o en años académicos, que comienzan con el curso a mediados de septiembre, los hidrólogos a menudo establecen períodos de trabajo que comienzan el primero de octubre y terminan el último día de septiembre del año siguiente. La utilidad del concepto del año hidrológico radica en que comienza y termina en el momento en que los embalses están más vacíos (con el final del estiaje y de la época de riego), por lo que permite observar el ciclo completo de las reservas hídricas.

Nuestra elección de trabajar en años naturales responde a una doble motivación: en primer lugar, en estas páginas nos estamos refiriendo siempre a la sequía meteorológica, y no a la sequía hidrológica, por lo que utilizar años hidrológicos no es estrictamente necesario; y en segundo lugar, trabajar en años naturales simplifica en algo el tratamiento de los datos que realizado anteriormente, lo cual se estima ventajoso desde el punto de vista didáctico. En cualquier caso, los resultados de trabajar en unos u otros no suelen diferir demasiado (Hernández García y Llamas, 1995).

### Análisis preliminar de los datos

Una vez disponemos los datos a escala anual es práctica frecuente representarlos mediante un gráfico de barras, también llamado yetograma. Se trata, en esencia, de un histograma de precipitación que nos permite realizar un primer reconocimiento visual de la serie histórica.

Sobre unos ejes cartesianos, representaremos la precipitación en milímetros en el eje de vertical

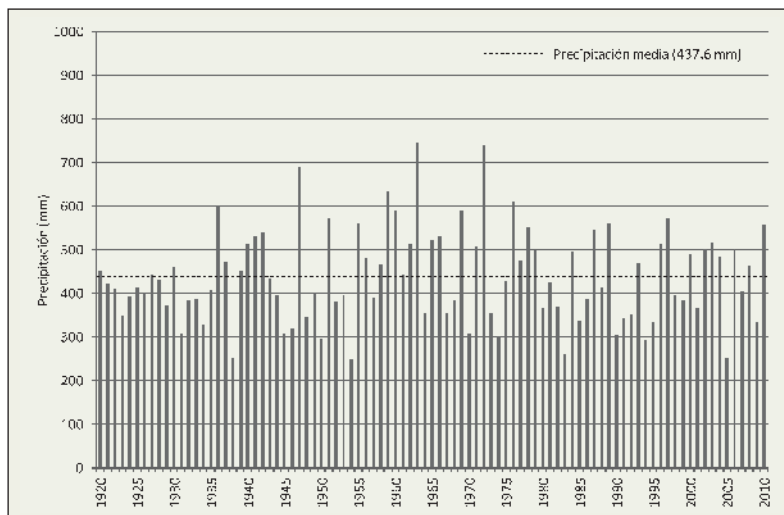


Fig. 1. Yetograma de la estación meteorológica de Madrid (1920-2010)

y el tiempo en años en el horizontal (Fig. 1). En términos generales, el yetograma pone de manifiesto la gran variabilidad de las precipitaciones en la estación considerada. Además, nos permite comparar visualmente la precipitación de unos años y otros, así como determinar años húmedos (precipitación por encima de la media) y años secos (precipitación por debajo de la media). Los años 1963 y 1972 son los más húmedos de la serie, mientras que 1954 y 2005 fueron, por este orden los más secos. De igual manera podemos observar la precipitación media del período 1920-2010, que ascendió a 437.6mm.

Un único año seco no suele considerarse una sequía. Más bien, para poder hablar de una sequía necesitamos tener al menos dos años seguidos con precipitaciones inferiores a la media (o bien una secuencia de varios años húmedos y secos donde los segundos predominen claramente sobre los primeros).

A escala plurianual, es frecuente encontrar una alternancia de secuencias secas y secuencias húmedas. En este respecto, la utilidad del yetograma es más limitada. Por ejemplo, en el yetograma queda bastante claro que la secuencia 1920-1935 es predominantemente seca, puesto que la práctica totalidad de los años son secos y los pocos años húmedos que hay apenas superan la media. Sin embargo, es más difícil discernir lo que ocurre con la secuencia 1954-1963: desde luego, cuesta apreciar a primera vista que se trata del período prolongado más húmedo del siglo XX.

Es precisamente por esto que se han desarrollado otras herramientas gráficas más indicadas para estudiar la precipitación desde una perspectiva secuencial. Entre ellas destacaremos la curva de desviaciones acumuladas, que pasamos a describir a continuación.

### Construyendo la curva de desviaciones acumuladas (CDA)

La curva de desviaciones acumuladas (CDA) es una herramienta de planificación hidrológica que nos permite establecer secuencias húmedas y secas



Tabla 1. Cálculo de las desviaciones acumuladas sobre la media de precipitación

PRECIPITACIÓN ANUAL (MM)	PRECIPITACIÓN MEDIA (MM)	DESVIACIÓN SIMPLE (MM)	DESVIACIÓN ACUMULADA (MM)
450.0	437.6	+12.4	+12.4
422.0	437.6	-15.6	-3.2
409.3	437.6	-28.3	-31.5
349.7	437.6	-87.9	-119.4
392.7	437.6	-44.9	-164.3
414.5	437.6	-23.1	-187.4
(...)	(...)	(...)	(...)

a partir de una serie de precipitación (Martínez Alfaro et al., 2005). Es recomendable que esta tenga al menos unas cuantas décadas de duración para asegurar que el valor medio de la precipitación es representativo de la zona de estudio.

En esencia, la CDA es la gráfica resultante de representar de manera acumulada la diferencia de las precipitaciones de cada año con respecto a la media de toda la serie. Para elaborar la curva de desviaciones acumuladas prepararemos unos ejes cartesianos. En la parte positiva del eje de abscisas pondremos los años que integran la serie pluviométrica. Después calcularemos la precipitación media anual como suma de la precipitación de todos los años de la serie dividida por el número de años considerado (en este caso 437.6 mm).

Los cálculos aritméticos a realizar para repre-

sentar la gráfica son sencillos y se explican mejor en base a la Tabla 1. Dicha tabla consta de cuatro columnas: año, precipitación de dicho año, precipitación media de la serie, desviación simple y desviación acumulada. Todos los valores se expresan en milímetros.

Definimos la desviación simple de un año como la diferencia entre la precipitación en dicho año y la media total del período. En el caso de 1920 será 450 menos 437.6, es decir +12.4; en el caso de 1921 será 422 menos 437.6, o sea, -15.6, etc. Como puede observarse, el signo es positivo o negativo según el año sea húmedo o seco: conservar los signos es crucial para la correcta representación gráfica de las desviaciones acumuladas.

Las desviaciones acumuladas, como su propio nombre indica, son la suma de las desviaciones simples que se han producido desde el principio de la serie hasta un determinado momento. En el caso del primer año de la serie, 1920, la desviación acumulada con respecto a la media coincidirá con la desviación simple. Sin embargo, la desviación acumulada para 1921 será la suma de las desviaciones simples de 1920 y 1921 ( $12.4 - 15.6 = -3.2$ ), para 1922 será la suma de las simples de 1920, 1921 y 1922 ( $12.4 - 15.6 - 28.3 = -31.6$ ), y así sucesivamente (Tabla 1). Por la propia naturaleza del método, la desviación acumulada final de toda la serie ha de ser igual a cero.

En la Tabla 1 podemos observar que la desviación acumulada es positiva al cabo del primer año de la serie, pero también que comienza a acumularse déficit con respecto a la media a partir de 1921 (es decir, hay una secuencia de años donde las precipitaciones son inferiores a la media). Esta secuencia prolongada de desviaciones negativas nos indica un período prolongado de sequía. Ya que los cálculos en forma tabulada son tediosos, es recomendable automatizarlos echando mano de Excel. Para ello seguiremos los siguientes pasos (Fig. 2):

(a) Prepararemos una tabla en la que al menos tengamos las siguientes columnas: año, precipitación anual, precipitación media de la serie, desviación simple y desviación acumulada. Las dos primeras son nuestros datos de partida, mientras que las demás las iremos rellenando a continuación. Expresaremos todos los valores en milímetros. En la celda que hay inmediatamente debajo de "precipitación media" (en este caso la celda D2) teclearemos

Fig. 2. Elaboración de la tabla de desviaciones acumuladas en el ordenador: la forma tabulada es el paso previo a la forma gráfica.

(A) Initial data entry:

Año	Precipitación anual	Precipitación media	Desviación simple	Desviación acumulada
1920	450.0	=PROMEDIO(\$C\$2:\$C\$92)		
1921	422.0			
1922	409.3			
1923	349.7			
1924	392.7			
1925	414.5			
1926	400.5			
1927	442.8			
1928	429.9			
1929	371.4			

(B) Calculating the mean precipitation:

Año	Precipitación anual	Precipitación media	Desviación simple	Desviación acumulada
1920	450.0	437.6	=C2-D2	
1921	422.0	437.6		
1922	409.3	437.6		
1923	349.7	437.6		
1924	392.7	437.6		
1925	414.5	437.6		
1926	400.5	437.6		
1927	442.8	437.6		
1928	429.9	437.6		
1929	371.4	437.6		

(C) Calculating simple deviations:

Año	Precipitación anual	Precipitación media	Desviación simple	Desviación acumulada
1920	450.0	437.6	12.4	=E2
1921	422.0	437.6	-15.6	
1922	409.3	437.6	-28.3	
1923	349.7	437.6	-87.9	
1924	392.7	437.6	-44.9	
1925	414.5	437.6	-23.1	
1926	400.5	437.6	-37.1	
1927	442.8	437.6	5.2	
1928	429.9	437.6	-7.7	
1929	371.4	437.6	-66.2	

(D) Calculating cumulative deviations:

Año	Precipitación anual	Precipitación media	Desviación simple	Desviación acumulada
1920	450.0	437.6	12.4	12.4
1921	422.0	437.6	-15.6	=E3+F2
1922	409.3	437.6	-28.3	
1923	349.7	437.6	-87.9	
1924	392.7	437.6	-44.9	
1925	414.5	437.6	-23.1	
1926	400.5	437.6	-37.1	
1927	442.8	437.6	5.2	
1928	429.9	437.6	-7.7	
1929	371.4	437.6	-66.2	

“=promedio(\$C\$2:\$C\$92)” sin las comillas. Son importantes los símbolos de “\$” porque servirán para “anclar” la referencia cuando la copiemos al resto de celdas de la columna. Acto seguido, y teniendo seleccionada la celda D2, pincharemos dos veces sobre el cuadrado negro que hay en su esquina inferior derecha. Una vez realizada esta operación deberíamos tener el valor 437.6 en todas las celdas de la columna D.

(b) En la celda inmediatamente debajo de “desviación simple” (en este caso E2) teclearemos, sin comillas, el código “=C2-D2”. Esto nos dará la desviación simple de 1920 con respecto a la media (12.4). Para copiar la fórmula al resto de celdas y obtener la desviación simple de los demás años, haremos lo mismo de antes: seleccionaremos la celda E2 y pincharemos dos veces sobre el cuadrado negro.

(c) En la celda inmediatamente debajo de “desviación acumulada” (en este caso F2) teclearemos, sin comillas, el código “=E2”, puesto que la desviación acumulada al cabo del primer año coincide con la desviación simple.

(d) Por último, para obtener el resto de desviaciones acumuladas, teclearemos el código “=E3+F2” en la celda F3, de nuevo sin comillas. Con esto le indicamos al ordenador que la desviación acumulada de 1921 se obtiene sumando la desviación simple de dicho año (-15.6) a la desviación acumulada hasta ese momento (12.4). Como el razonamiento será análogo para el resto de años, marcaremos la celda F3 y pulsaremos dos veces el cuadrado negro. Los primeros valores de nuestra hoja de cálculo deben coincidir con los de la Tabla 1, y la desviación acumulada para el año 2010 debe ser cero.

Aunque es posible sacar conclusiones a partir de la forma tabulada, es visualmente preferible representar los valores gráficamente. Las desviaciones acumuladas al cabo de cada año se representan frente al tiempo en una gráfica como la de la Fig. 3 (en ella se ha incluido también el valor de las desviaciones simples para entender mejor el papel que juegan desde el punto de vista gráfico). Para hacernos con el funcionamiento básico de la curva es deseable realizar los primeros trazos a mano en papel milimetrado. Así, observaremos que al primer año húmedo de la serie (1920) siguen otros cuatro años de carácter seco (tanto las desviaciones simples como las pendientes son negativas).

Una vez hemos comprendido cómo se dibuja la curva manualmente, lo más cómodo es representarla con ayuda del ordenador. Igual que el yetograma, esta gráfica puede realizarse con gran facilidad en Excel. La única diferencia es que en este caso seleccionaremos un gráfico de líneas, en vez de uno de columnas.

La Fig. 4 muestra la versión final de la CDA. Su principal utilidad radica en que nos proporciona una representación visualmente intuitiva de las secuencias de precipitación: los tramos en los que la

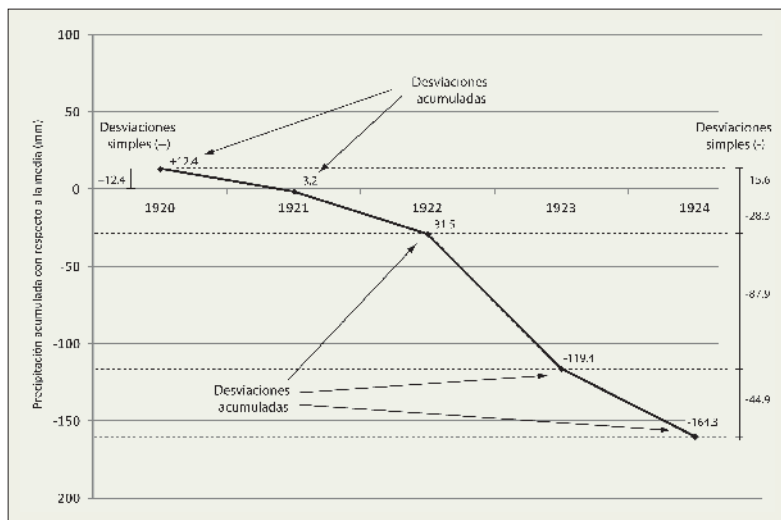


Fig. 3. Construyendo la curva de desviaciones acumuladas manualmente: primeros trazos.

pendiente es positiva corresponden a secuencias húmedas de la serie pluviométrica, siendo el grado de humedad mayor cuanto mayor sea la pendiente. Análogamente, los tramos con pendiente negativa se corresponden con secuencias secas, y la sequía será más intensa cuanto más empinada sea la aquella. Los tramos de pendiente nula o casi nula señalan secuencias con valores de precipitación en torno a la media.

Por tanto, la CDA nos permite evaluar la duración de cada sequía (en base al número de años que dura la secuencia), su intensidad (en base a la pendiente) y magnitud (en base al déficit total acumulado en el eje de abscisas). Sobre estos tres particulares abundaremos un poco más adelante.

A la hora de interpretar la CDA hay que tener en cuenta dos precisiones importantes. La primera es que la distinción entre períodos húmedos y períodos secos casi nunca es neta: en otras palabras, podemos encontrar algún año seco en una secuencia predominantemente húmeda y viceversa. Además, no existen reglas explícitas para identificar secuencias húmedas y secas a partir de la CDA, por lo que la interpretación estará algo condicionada por el criterio

Fig. 4. Curva de desviaciones acumuladas elaborada para los datos de precipitación de la estación meteorológica de Madrid (1920-2010). Datos AEMET.

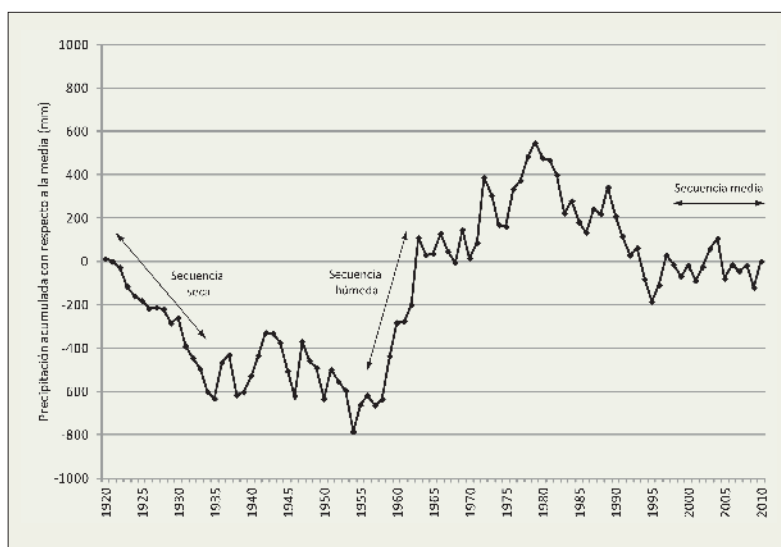


Tabla 2. Umbrales para la caracterización de años húmedos y secos

DESVIACIÓN SIMPLE (MM)	DESCRIPCIÓN	DESVIACIÓN SIMPLE (MM)	DESCRIPCIÓN
Entre 0 y -50	Moderadamente seco	Entre 0 y 50	Moderadamente húmedo
Entre -50 y -100	Seco	Entre 50 y 100	Húmedo
Entre -100 y -150	Muy seco	Entre 100 y 150	Muy húmedo
Menor que -150	Extremadamente seco	Mayor que 150	Extremadamente húmedo

del observador, así como por los objetivos de sus pesquisas. De esta manera, la interpretación de una misma curva puede diferir ligeramente en función de quién la realice.

Para facilitar la interpretación de la curva, podríamos establecer una serie de umbrales arbitrarios como los que se muestran en la Tabla 2, y que son parecidos a los que definen McKee et al., (1993) para su conocido “índice estandarizado de precipitación”.

La Fig. 4 nos permite establecer, a grandes rasgos, siete secuencias principales de precipitación dentro de los últimos noventa años. Estas son, por orden cronológico:

- Secuencia seca (1920-1935): Se trata de una larga sequía caracterizada por una sucesión casi ininterrumpida de años con valores de precipitación inferior a la media. La excepción a esta regla son los años 1920, 1927 y 1930, moderadamente húmedos todos ellos. Por el contrario, pueden identificarse dos años muy secos (1931 y 1934).
- Secuencia media-seca (1935-1954): En este caso hablamos de una secuencia media-seca porque observamos una alternancia entre años húmedos y secos que termina con una fuerte sequía. Se trata de una secuencia típica de climas semiáridos, intercalando secuencias secas y húmedas. Predominan en número los años secos, pero los de carácter húmedo tienden a ser más intensos en comparación.
- Secuencia húmeda (1954-1963): Aquí observamos un período de abundantes lluvias sólo interrumpido por un año moderadamente seco. Se trata de la secuencia húmeda prolongada más intensa de los últimos noventa años.
- Secuencia media (1963-1970): Secuencia de transición que alterna años húmedos y secos, más intensos hacia el final.
- Secuencia húmeda (1970-1979): Apreciamos una secuencia predominantemente húmeda interrumpida por una sequía de tres años (uno moderadamente seco, otro seco y otro muy seco).
- Secuencia seca (1979-1995): A las secuencias predominantemente húmedas de las décadas de los sesenta y setenta sigue un largo período de precipitaciones reducidas. Aunque hay alguna secuencia húmeda intercalada, se produce un déficit apreciable de desviación acumulada con respecto a la media. Es destacable el período 1990-1995, en el que se suceden una serie de

años entre secos y muy secos solo interrumpidos por un año moderadamente húmedo.

- Secuencia media (1995-2010): Tras la fuerte sequía 1990-1995 la tónica general de las precipitaciones ha consistido en mantenerse bastante próximas a la media. Esto no quita para que se haya producido algún año extremadamente seco (2005) o para que también hayamos podido disfrutar de alguno muy húmedo (2010).

Si quisiésemos realizar un análisis más grueso, podríamos hablar de tan sólo tres secuencias: una seca de 1920 a 1954, otra húmeda de 1954 a 1979 y por último, otra secuencia seca desde 1980 a 2010. Evidentemente perderíamos detalle, pero la descripción podría ser adecuada según las circunstancias. Igualmente podríamos desglosar las siete secuencias en muchas otras si quisiésemos trabajar a escala más reducida. Todo dependerá del enfoque de nuestro trabajo y de nuestros objetivos. Es por ello necesario definirlos claramente antes de plantear la actividad en el aula.

#### Interpretando la curva de desviaciones acumuladas: algunos ejercicios prácticos

Entre las cuestiones más básicas que puede abordar el alumno a partir de la CDA podemos citar las que se derivan de la observación inmediata de las gráficas y de las tablas que ha elaborado en la hoja del cálculo. Por ejemplo:

- Identificar el año más seco y el más húmedo de los últimos noventa años (1954 con 246.9mm y 1963 con 746.4mm, respectivamente)
- Identificar la sequía ininterrumpida más larga de los últimos noventa años (6 años, 1921 a 1926)
- Identificar el período húmedo ininterrumpido más largo de los últimos noventa años (6 años, 1958 a 1963).
- Identificar el déficit total de precipitación con respecto a la media de la sequía más larga (236.9mm durante el período 1921-1926).

También pueden plantearse cuestiones algo más complejas, que requieren cierta capacidad de elaboración por parte del alumno. Así, cabe introducir los conceptos de duración, magnitud e intensidad. Por ejemplo, formulémonos la pregunta “¿qué sequía es más fuerte, la de 1921-1926 o la de 1990-1992?”. La respuesta, evidentemente, es “depende”. Está claro que la primera (6 años) es más larga que la segunda



# Cinco semanas consecutivas sin lluvia en casi veinte observatorios de España

Ni una gota en Badajoz, Huelva y Madrid entre el 11 de diciembre y el 14 de enero

## Cuarto descenso consecutivo de las reservas de agua

La reserva de agua descendió por cuarta semana consecutiva y se encuentra al 54,8% de su capacidad total, con 28.735 hectómetros cúbicos embalsados. El volumen de agua de los embalses ha disminuido en 91 hectómetros cúbicos, 0,02%, respecto a los niveles de la semana anterior, según datos del Ministerio de Medio Ambiente.

La semana pasada, en la que las precipitaciones fueron prácticamente nulas en toda España, la cuenca del Tago aumentó 31 hectómetros cúbicos, mientras que la cuenca del Duero perdió 85 hectómetros cúbicos. La reserva total embalsada es superior a la del año pasado, que era de 25.129 hectómetros cúbicos, pero inferior a la media de la última década, establecida en 25.235 hectómetros cúbicos.

Sobre la falta de lluvias, la ministra de Medio Ambiente, Cristina Narbona, afirmó ayer que la sequía «es la más grave que ha afectado nunca a España, y más particularmente en las cuencas del Júcar, del Segura, en la cabecera del Tago y en el Ebro». Eso sí, la ministra de Medio Ambiente aseguró que «no ha fallado agua en ninguna ciudad».

### OBSERVATORIOS SIN LLUVIA DESDE EL 11 DE DICIEMBRE

En litros por metro cuadrado.



J.F.C.

MADRID. Desde el 11 de diciembre, la lluvia casi ha desaparecido en España. «Solo llueve en zonas muy concretas del norte de España, en el resto, prácticamente nada», explican fuentes del Instituto Nacional de Meteorología (INM). Un anticiclón al sur impidió la entrada de aire del norte, y es que «en enero, cuando se mete un anticiclón, persisten». Veinte de las principales estaciones meteorológicas situadas en su inmensa mayoría en capitales de provincia) no han llegado a registrar un litro por metro cuadrado acumulado entre el 11 de diciembre y el 7 de enero, y sólo Llerda ha registrado forma liviana en los últimos siete días. Y es que «diciembre se salvó por los primeros diez días», explica Antonio Mestre, jefe del servicio de Aplicaciones Meteorológicas del INM.

En esos primeros diez días de diciembre, y sobre todo en la mitad norte de España, llovió muy por encima de la media de esas fechas. La Cuenca (383,9 por ciento), Logro (340,8%) y Molina de Aragón (303,2%) fueron las principales estaciones en lo que se refiere a incremento relativo entre el 4 y el 10 de diciembre, aunque la mayor cantidad de litros por metro cuadrado se vivió en Vigo (147 l/m<sup>2</sup>), junto a Santiago de Compostela (144) y San Sebastián (108). Después, la nada, o casi nada. De un día para otro, las vertientes atlánticas y mediterráneas venían descendiendo sus porcentajes hasta caer por debajo del 30 por ciento.

#### «En sequía invernal»

Así, con ciertos movimientos menores, se ha seguido hasta hoy. Mestre considera que «nos hemos metido en una sequía invernal». O quizá nos aventuramos hacia un tercer año seco, pese a que prácticamente todo el otoño desde el punto de vista de la lluvia ha tenido un buen comportamiento para la sequía España. El propio Mestre es consciente, como ha dicho en otras ocasiones, de que «la sequía es un fenómeno que normalmente dura dos o tres años seguidos». Y es que la situación actual, en definitiva, es de calma, pero la realidad que nos aportan las cifras es otra, porque después de que en septiembre, octubre y noviembre se registrasen lluvias por encima de la media, el mes de diciembre fue el quinto más se-

El Instituto Nacional de Meteorología advierte que «el primer trimestre tendremos temperaturas medias entre un grado y un grado y medio por encima de lo normal».

«En los últimos veinte años, y enero lleva el mismo camino, según las previsiones, que no contemplan cambios hasta la semana que viene. «Es tiempo anticiclónico, y para los próximos días, igual. Puede que a principios de la próxima semana se produzcan cambios», afirma Ángel Rivera, portavoz del Instituto Nacional de Meteorología. Rivera espera «que llegue el primer temporal del in-

vierno, no solamente porque yo creo que se necesita en todos los aspectos, sino porque supondrá también la aparición de nieve en buena parte de la mitad norte de la Península, y eso sí que podría ser una buena noticia, no ya en lo que respecta a que se cumpla el ciclo típico del invierno, que bastante alterado está, sino de que podamos tener nieve en las cordilleras, muy importante luego para la primavera y el verano».

No encontramos, además, con un principio de año «abastante cálido, con temperaturas de casi veinte grados en la zona mediterránea». Rivera explica que «esas temperaturas muy altas se deben al predominio de masas subtropicales y anticiclónicas». En los próximos días se esperan lluvias débiles, pero sólo en Galicia, Asturias, Cantabria y parte de Castilla y León. Este enero cálido, por otra parte, tiene tendencia a mantenerse en el tiempo los meses que le siguen, porque «el primer trimestre del año tendremos unas temperaturas medias entre un grado y un grado y medio por encima de lo normal». Y un dato más que también tienen en cuenta los exper-

tos a medio plazo, y que ya ha mencionado Rivera: «Es preocupante, ante la primavera, que las cordilleras estén sin nieve».

#### En Madrid, sin precipitaciones

De los veinte observatorios que no habían acumulado prácticamente un litro de agua por metro cuadrado en las últimas cinco semanas, ayer varió la situación en dos de ellos: Badajoz y Madrid. Por fin la ciudad ecuménica vio como salía del 0,0 litros por metro cuadrado que acumulaba desde la segunda decena de diciembre, con una décima de litro por metro cuadrado registrada. Y en Madrid, algo de agua, pero oficialmente lo que cayó fue «insignificante», según Meteorología.

De los otros observatorios, sólo Llerda ha vivido cierto cambio —mínimo—, con 0,9 litros por metro cuadrado durante la última semana, lo que la convierte en la primera ciudad de las veinte últimas que sobrepasa registros de un litro.

Gráficos sobre el estado de los embalses [http://especiales.abe.es/2007/estado\\_embalses/enero/](http://especiales.abe.es/2007/estado_embalses/enero/)

**Aena** Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea

**COMUNICACIÓN DE APERTURA DE PROPOSICIONES ECONÓMICAS**

SERVICIO DE COMUNICACIÓN Y COORDINACIÓN DE RR.PP. EN LOS AEROPUERTOS DE PALMA DE MAYORCA, MENORCA, IBIZA Y ALICANTE. (SGO 7498)

A las 9:30 horas del día 18/01/07 en el edificio Rivera Aed, C/ Rivera, 2, Planta 1ª Sala Polivalente, 28042 Madrid, Teléfono 91-321 27 10.

Publicidad El importe de este anuncio será por cuenta del adjudicatario o adjudicatarias.

[www.aena.es](http://www.aena.es)

(3 años). Si por “fuerte” entendemos *más larga*, tendremos que inclinarnos por la primera. Sin embargo, observando la curva de desviaciones acumuladas comprobaremos que la segunda nos da mayor una pérdida acumulada de precipitación con respecto a la media (315,6mm frente a 236,9mm). Es decir, se trata de una sequía más corta, pero de mayor *magnitud*.

A partir de aquí es posible introducir también el concepto de indicador. Los indicadores nos permiten comparar proporcionalmente variables en las que intervienen dos o más factores. Como se desprende de lo anterior, un indicador adecuado para comparar unas sequías con otras sería aquél que nos diese una relación entre magnitud y duración.

Este parámetro, al que llamaremos *intensidad*, se obtiene de dividir la primera entre la segunda (es decir, de calcular la pendiente en ese tramo de la curva de desviaciones acumuladas), y nos da una idea de qué sequía fue proporcionalmente más fuerte. De esta manera, al dividir 236,9mm entre 6 años obtendremos un factor de intensidad (una pérdida media con respecto al valor medio de precipitación) de 39,5mm/año para la sequía 1921-1926. Análogamente obtendremos un valor de 105,2 mm/año para el período 1990-1992. En otras palabras, esta última sequía fue mucho más intensa que la primera.

En base a esto, podemos plantear al alumno que identifique las dos sequías más largas, las dos más intensas y las dos de mayor magnitud global que han acontecido en Madrid en los últimos noventa años. Como es lógico, a efectos de este ejercicio es conveniente especificar de antemano lo que entenderemos por sequía. Una definición válida para nuestros propósitos puede ser “un período de al menos dos años seguidos cuyas precipitaciones estén por debajo de la media histórica”.

Otra actividad interesante consiste en comparar las ventajas y desventajas del yetograma con respecto a la CDA. Retomando el ejemplo del principio, esta última nos permite apreciar con bastante más claridad el carácter húmedo de la secuencia 1954-1963. En otras palabras, la CDA es mejor a la hora de identificar *secuencias*. Además, nos permite estudiar su duración, magnitud e intensidad con un simple vistazo. Por el contrario, el yetogramas es más sencillo de elaborar y nos permite identificar más rápidamente la media de precipitación y los valores extremos de la serie.

Un último ejercicio que puede resultar atractivo consiste en evaluar la información de algún recorte de periódico a la luz de nuestros resultados. Lo más recomendable es trabajar con noticias actuales, si bien es fácil encontrar ejemplos útiles en cualquiera de las hemerotecas online. En muchas ocasiones encontraremos que las informaciones coinciden con nuestros resultados, mientras que en otros nos sorprenderemos.

Sirva como ejemplo una página del diario ABC del 17 de enero de 2007 (Fig. 5). En ella podemos

observar dos noticias. La de la izquierda habla de los registros de precipitación de las semanas inmediatamente anteriores a fecha de publicación, y nos informa de que no se ha recogido ni una gota de lluvia en muchas estaciones peninsulares. Por su parte, la noticia de la derecha recoge unas declaraciones de una importante responsable política afirmando que la sequía en aquél momento era “la más grave que ha afectado nunca a España”.

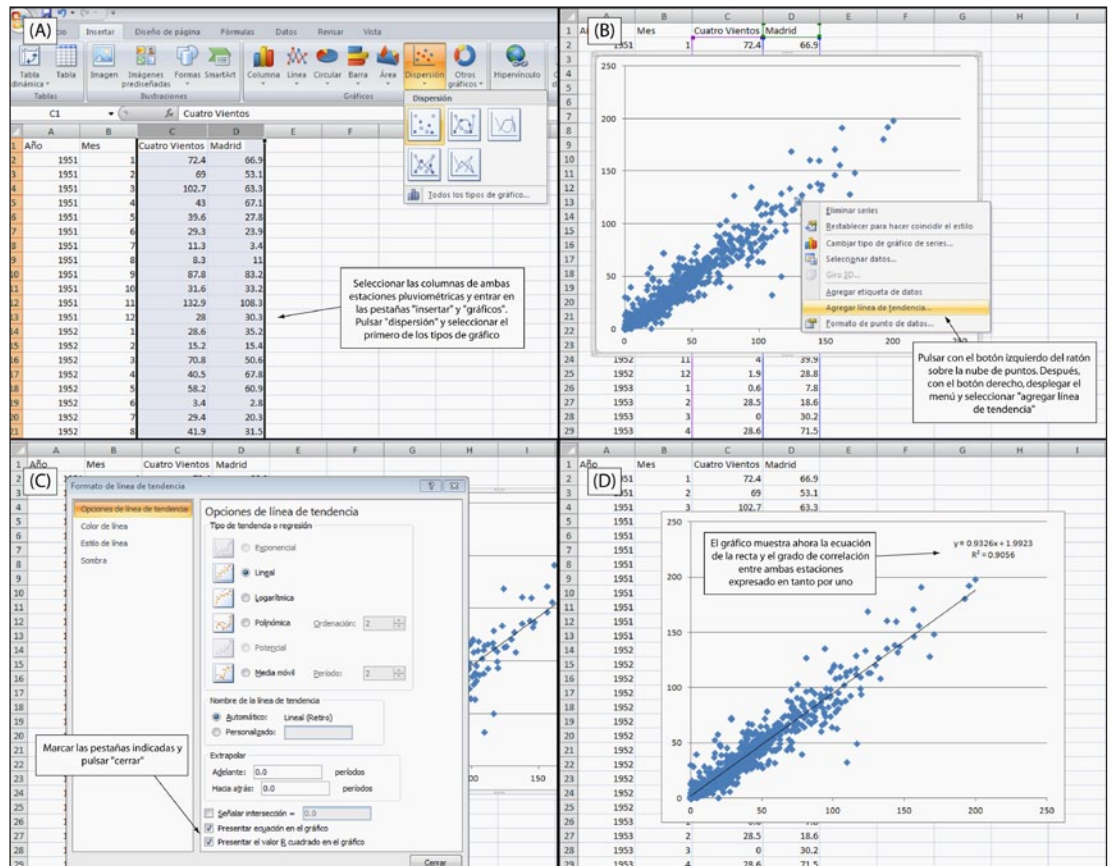
Para cotejar nuestra información con lo que dice este periódico tiene interés bajarse los datos diarios del servidor de la AEMET, puesto que la información de la noticia habla de cinco semanas a caballo entre dos meses distintos (diciembre 2006 y enero de 2007). Estos datos revelan que la información es fidedigna en lo que respecta a Madrid (no en vano, el Instituto Nacional de Meteorología que menciona es hoy la AEMET). También comprobaremos que, en efecto, los citados meses presentan un valor de precipitación distinto de cero en nuestro registro mensual porque llovió en los primeros diez días de diciembre y en la última semana de enero.

La noticia de la derecha es algo más confusa. Hace referencia a la sequía hidrológica, puesto

Fig. 5. Recorte del diario ABC del 17 de enero de 2007 en el que se hace referencia a la sequía



Fig. 6. Rellenado de los huecos de la serie de precipitaciones de la estación de Madrid mediante la técnica de correlación estadística.



que habla sobre todo del agua en los embalses. Lo que no queda claro es si las palabras de la entonces ministra de Medio Ambiente se referían sólo a la sequía durante las semanas precedentes o si por el contrario tenían un mayor alcance temporal. Por tanto, no podemos juzgarlas desde nuestra curva de desviaciones acumuladas. Lo que sí podemos decir con seguridad es que, con perspectiva *anual*, en aquel momento la ciudad de Madrid no estaba en ningún caso sujeta a la sequía *meteorológica* más grave de su historia. De ahí la importancia de distinguir entre uno y otro tipo de sequía y definir la escala de tiempo cuando interpretamos las informaciones que encontramos en los medios.

En este sentido, también puede ser útil explicar que las reservas de los embalses no sólo dependen de la precipitación. También juegan un papel importante otras variables como la fluctuación en las demandas de agua (que pueden variar significativamente tanto a escala estacional como a escala histórica), la evolución de la capacidad conjunta de los pantanos a lo largo del tiempo o la política de desembalse vigente en cada momento.

### Qué hacer si la serie de precipitación está incompleta

Como ya se ha dicho, lo más adecuado desde el punto de vista didáctico es trabajar con series de precipitación completas. Sin embargo, si revisamos las series de precipitación de la base de datos de

la AEMET encontraremos que las estaciones con registro completo no son la norma, sino más bien la excepción.

Para elaborar una CDA fiable es importante no tener lagunas en nuestra serie. Así, lo más habitual será rellenar los huecos mediante correlación estadística. Esta técnica nos permite estimar los valores faltantes de nuestra estación en base a los de otra estación de características climatológicas similares (normalmente una estación cercana) que sí tenga registro para dichos períodos. Como es lógico, nunca tendremos la certeza de haber rellenado la serie con el valor "correcto" pero sí podremos decir que hemos hecho todo lo posible porque el valor que introducimos sea verosímil.

A modo de ejemplo rellenaremos el hueco que presenta la serie de Madrid para marzo de 1965 en base a los datos de la cercana estación Madrid-Cuatro Vientos. Lo primero que haremos será cerciorarnos de que la citada estación tiene registro de precipitación para ese mes (78.4mm). También comprobaremos que existe una buena correlación entre los datos mensuales de precipitación de ambas estaciones. Esto último se consigue fácilmente utilizando la hoja de cálculo (Fig. 6).

Para estimar el valor de la precipitación en la estación Madrid durante el mes de marzo de 1965 sólo tendremos que aplicar la ecuación de la Fig. 6D ( $y = 0.9326x + 1.9923$ ) sabiendo que la variable dependiente (y) es el valor que pretendemos obtener y que la variable independiente (x) es el valor de

precipitación en dicho mes para la estación de referencia (Madrid-Cuatro Vientos). Sustituyendo este último valor en la ecuación obtendremos una estimación de  $x$  de 75.1mm, que procederemos a incluir en nuestra serie de precipitación *antes* de hacer la suma de las precipitaciones mensuales para obtener las anuales.

Este proceso ha de repetirse tantas veces como sea necesario para rellenar todos los huecos de la estación cuya curva de desviaciones acumuladas queramos representar. Hay que tener en cuenta que el proceso de rellenar huecos añade duración y complejidad al ejercicio. Además, hay que tener alguna noción básica de regresión estadística. Por ello, en ocasiones será recomendable rellenar la serie de antemano y dársela completa al alumno.

## CONCLUSIONES

El estudio de riesgos naturales como la sequía tiene un gran interés desde el punto de vista didáctico. El carácter recurrente de la sequía hace que se convierta en un tema de actualidad cada cierto tiempo, por lo que es fácil despertar la curiosidad del alumno al respecto y relacionar los resultados de su trabajo con lo que observa a su alrededor.

A lo largo de estas páginas se ha presentado una experiencia para el aula centrada en el aprendizaje de técnicas para el estudio de la sequía. Partiendo de los datos oficiales de precipitación que nos proporciona gratuitamente la Agencia Estatal de Meteorología se ha explicado cómo desarrollar, paso a paso, la curva de desviaciones acumuladas. Además, se han propuesto algunos ejercicios para su interpretación. Para la resolución de estos últimos, que incluyen la descarga de los datos de internet y

su tratamiento, es deseable tener un conocimiento básico de la hoja de cálculo Microsoft Excel.

Según cómo se plantee, esta actividad puede ser adecuada para un amplio rango de edades y titulaciones: abarca desde bachillerato a últimos cursos de la carrera y entronca con cualquier unidad didáctica, asignatura o titulación que guarde relación con el mundo de los recursos hídricos o los riesgos naturales.

## BIBLIOGRAFÍA

Díaz Alcaide, S. (2011). Estudio de la sequía en la Comunidad Autónoma de Madrid. Trabajo Fin de Máster. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 50p + anexos.

Hernández García, M.E., Llamas, M.R. (1995). Contribución al conocimiento de las sequías de Madrid. *Ingeniería del Agua* 2(2):18-36.

McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. *Applied Climatology*, American Meteorological Society, 179-186.

Martín Vide, J., Olcina, J. (2001). *Climas y tiempos de España*. Alianza Editorial. Madrid, 258 p.

Martínez Alfaro, P.E., Martínez-Santos, P., Castaño Castaño, S. (2005). *Fundamentos de hidrogeología*. Editorial Mundiprensa. Madrid, 284p.

Mishra, A.K., Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 319(1-2):202-216.

OMM (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros*. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza, 28p.

Prieto García, C. (2011). Estudio de la precipitación en la Península Ibérica española. Trabajo Fin de Máster. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 50p + anexos. ■

*Fecha de recepción del original: 20/10/2011*

*Fecha de aceptación definitiva: 17/07/2012*