

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA



GRADO EN
GEOGRAFIA Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

TRABAJO FIN DE GRADO

CURSO 2023-24

Recurrencia de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Impacto en las inundaciones en la Comunidad de Madrid

Recurrence of COLs in the Iberian Peninsula (1924-2023). Impact on floods in the Community of Madrid

Daniel Gonzalo Alonso

CONVOCATORIA: JUNIO

TUTORA: Dra. M^a Eugenia Pérez González

Departamento de Geografía.

“Nada en la vida debe ser temido, solamente comprendido.
Ahora es el momento de comprender más para temer menos”.

Marie Curie

Agradecimientos

A mi tutora, por su amabilidad, disponibilidad y por los valiosos conocimientos aportados acerca de Climatología, tema que siempre ha suscitado mi interés y que ahora conozco mucho mejor.

A los docentes del grado de Geografía y Ordenación del Territorio, por haber satisfecho mis expectativas respecto a la carrera que escogí por vocación.

A mi familia, por su apoyo incondicional y consejos durante la realización de este trabajo y siempre.

A mis compañeros y amigos de la carrera, por haber hecho de estos cuatro años un periodo inolvidable en el mejor sentido.

A las personas que están ahora cerca, han estado y estarán. Siempre, gracias.

Resumen

Se presenta un estudio de recurrencia de Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAs) sobre la península ibérica entre los años 1924 y 2023, abarcando el periodo más amplio estudiado hasta el momento con el objetivo de identificar y destacar posibles tendencias, indagar en las características de estos fenómenos y profundizar en las hipótesis relacionadas con cambios de patrones en los mismos debido al cambio climático. Asimismo, se enlaza dicho estudio con el impacto de las DANAs en las inundaciones acontecidas en la Comunidad de Madrid durante el mismo espacio de tiempo, algo inédito hasta la fecha, buscando reconocer cuál es la influencia de las mismas en este tipo de eventos, tendencias, factores condicionantes y la identificación de aquellos términos municipales más susceptibles de sufrir inundaciones provocadas por estas situaciones sinópticas. El análisis secular de las DANAs realizado muestra que no existe una tendencia significativa y que su duración parece haber disminuido ligeramente. Además, la mayoría de los eventos se han localizado en el suroeste de la península ibérica. Por otro lado, se indica que, aunque la probabilidad de que una DANA genere inundaciones en la Comunidad de Madrid es baja, estas son las causantes de un 35% de los eventos de inundación en el último siglo en esta comunidad autónoma.

Abstract

A study of the recurrence of cut off-lows (COLs) over the Iberian Peninsula between 1924 and 2023 is presented, covering the longest period studied so far with the aim of identifying and highlighting possible trends, investigating the characteristics of these phenomena and deepening the hypotheses related to changes in their patterns due to climate change. This study is also linked to the impact of the COLs on the floods that occurred in the Community of Madrid in the same period, something unprecedented to date, seeking to recognize their influence on this type of events, trends, conditioning factors and the identification of those municipalities most susceptible to flooding caused by these synoptic situations. The secular analysis of the COLs shows that there is no significant trend and that their duration seems to have slightly decreased. Furthermore, most of the events have been located in the southwest of the Iberian Peninsula. On the other hand, it is indicated that, although the probability of a COL generating floods in the Community of Madrid is low, they are responsible for 35% of the flood events in the last century in this region.

Índice

| | |
|--|----|
| Agradecimientos | 4 |
| Resumen | 5 |
| 1. Introducción | 11 |
| 2. Metodología | 20 |
| 2.1. Selección de eventos de DANAs entre 1924-2023 y caracterización de variables | 20 |
| 2.2. Búsqueda de información | 23 |
| 2.3. Análisis estadístico y de tendencias | 25 |
| 3. Resultados | 26 |
| 3.1. Recurrencia de DANAs sobre la península ibérica | 26 |
| • DANAS entre 1924-2023: tendencias | 27 |
| • Localización de las DANAs en la península ibérica | 40 |
| • Recurrencia estacional de las DANAs entre 1924-2023 | 41 |
| • Duración de las DANAs: análisis de tendencia y relación con su localización | 43 |
| • Masa de aire de origen de las DANAs entre 1924-2023 | 48 |
| • Altura geopotencial a 500 hPa en las DANAs entre 1924-2023 | 49 |
| • Presión en superficie en las DANAs entre 1924-2023 | 50 |
| • Tablas comparativas por periodos CLINO y cuartos de siglo | 52 |
| 3.2. Impacto en inundaciones en la Comunidad de Madrid. Ejemplos de casos y consecuencias | 55 |
| 4. Conclusiones | 69 |
| Fuentes y bibliografía | 71 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Circulación zonal de la corriente en chorro polar | 14 |
| Fig. 2. Ondulación de la corriente en chorro | 14 |
| Fig. 3. Estrangulamiento de la corriente en chorro y formación de una DANA | 15 |
| Fig. 4. Borrasca fría polar | 16 |
| Fig. 5. Borrasca fría aislada, considerada como DANA | 16 |
| Fig. 6. Marco geográfico de estudio | 20 |
| Fig. 7. Zonificación del área de estudio | 21 |
| Fig. 8. Masas de aire | 22 |
| Fig. 9. Evolución anual de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023) | 27 |
| Fig. 10. Tendencia polinómica sobre la evolución anual de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 28 |
| Fig. 11. Valores atípicos en la evolución de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023) | 29 |
| Fig. 12. Histograma de frecuencias de la evolución de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 29 |
| Fig. 13. Evolución anual de DANAs (Tipo 1) sobre la península ibérica (1924-2023) | 31 |
| Fig. 14. Tendencia polinómica sobre la evolución anual de DANAs (Tipo 1) en la península ibérica (1924-2023) | 32 |
| Fig. 15. Valores atípicos en la evolución de DANAs (Tipo 1) sobre la península ibérica (1924-2023) | 32 |
| Fig. 16. Histograma de frecuencias de la evolución de DANAs (Tipo 1) en la península ibérica (1924-2023) | 33 |
| Fig. 17. Evolución anual de DANAs (Tipo 2) sobre la península ibérica (1924-2023) | 34 |
| Fig. 18. Tendencia polinómica sobre la evolución de DANAs (Tipo 2) en la península ibérica (1924-2023) | 35 |
| Fig. 19. Valores atípicos en la evolución de DANAs (Tipo 2) sobre la península ibérica (1924-2023) | 35 |

| | |
|---|----|
| Fig. 20. Histograma de frecuencias de la evolución de DANAs (Tipo 2) en la península ibérica (1924-2023) | 36 |
| Fig. 21. Evolución anual de DANAs (Tipo 3) sobre la península ibérica (1924-2023) | 37 |
| Fig. 22. Tendencia polinómica sobre la evolución de DANAs (Tipo 3) en la península ibérica (1924-2023) | 38 |
| Fig. 23. Valores atípicos en la evolución de DANAs (Tipo 3) sobre la península ibérica (1924-2023) | 38 |
| Fig. 24. Histograma de frecuencias de la evolución de DANAs (Tipo 3) en la península ibérica (1924-2023) | 39 |
| Fig. 25. Distribución de Tipologías de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 40 |
| Fig. 26. Posición de las DANAs registradas entre 1924 y 2023 sobre el área de estudio | 40 |
| Fig. 27. Distribución de DANAs por estación del año en la península ibérica (1924-2023) | 41 |
| Fig. 28. Distribución estacional y posicional de los eventos de DANA en la península ibérica (1924-2023) | 42 |
| Fig. 29. Evolución del promedio anual de duración de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 43 |
| Fig. 30. Tendencia polinómica sobre la duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 44 |
| Fig. 31. Valores atípicos sobre la duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 45 |
| Fig. 32. Histograma de frecuencias de la duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 45 |
| Fig. 33. Duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023) por zona | 46 |
| Fig. 34. Duración promedio de las DANAs en la península ibérica (1924-2023) por estación del año meteorológica | 47 |
| Fig. 35. Duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023) en relación con la posición y estación del año meteorológica | 48 |
| Fig. 36. Masa de aire de origen de las DANAs registradas en la península ibérica (1924-2023) | 48 |

| | |
|--|----|
| Fig. 37. Evolución de la altura geopotencial a 500 hPa en relación a la recurrencia de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023) | 49 |
| Fig. 38. Evolución mensual del promedio de altura geopotencial a 500 hPa en las DANAs registradas en la península ibérica (1924-2023) | 50 |
| Fig. 39. Evolución del promedio anual de presión en superficie en relación a la recurrencia de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023) | 51 |
| Fig. 40. Evolución mensual del promedio de presión en superficie en las DANAs registradas en la península ibérica (1924-2023) | 52 |
| Fig. 41. Porcentaje de inundaciones provocadas por DANAs en la Comunidad de Madrid (1924-2023) | 56 |
| Fig. 42. Términos municipales de la Comunidad de Madrid afectados por inundaciones provocadas por DANAs (1924-2023) | 58 |
| Fig. 43. Evolución de las inundaciones ocasionadas por DANAs en la Comunidad de Madrid (1924-2023) | 59 |
| Fig. 44. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 1/12/1989 | 62 |
| Fig. 45. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 6/12/1989 | 63 |
| Fig. 46. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 8/12/1989 | 63 |
| Fig. 47. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 27/12/1989 | 64 |
| Fig. 48. Situación sinóptica sobre la península ibérica en la mañana del día 2/9/2023 | 65 |
| Fig. 49. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 2/9/2023 por la tarde | 66 |
| Fig. 50. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 6/9/2023 | 67 |
| Fig. 51. Precipitación acumulada sobre la península ibérica entre los días 2 y 4 de septiembre de 2023 | 68 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Estaciones meteorológicas del año en el hemisferio norte | 23 |
| Tabla 2. Resumen estadístico de la evolución de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 30 |
| Tabla 3. Resumen estadístico de la evolución de DANAs (Tipo 1) en la península ibérica (1924-2023) | 33 |
| Tabla 4. Resumen estadístico de la evolución de DANAs (Tipo 2) en la península ibérica (1924-2023) | 36 |
| Tabla 5. Resumen estadístico de la evolución de DANAs (Tipo 3) en la península ibérica (1924-2023) | 39 |
| Tabla 6. Distribución mensual sobre el número total de DANAs registradas en la península ibérica (1924-2023) | 42 |
| Tabla 7. Resumen estadístico de la duración de DANAs en la península ibérica (1924-2023) | 46 |
| Tabla 8. Comparativa de datos según periodos CLINO | 53 |
| Tabla 9. Comparativa de datos para el periodo analizado (1924-2023) | 54 |
| Tabla 10. Registro de inundaciones provocadas por DANAs en la Comunidad de Madrid (1924-2023) | 57 |
| Tabla 11. Características de las DANAs que han provocado inundaciones en la Comunidad de Madrid (1924-2023) | 60 |

1. Introducción

El fenómeno de la gota fría, denominado actualmente como Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA, de aquí en adelante), ha sido y es uno de los conceptos relacionados con la meteorología más empleado y conocido popularmente en España. Basta comprobar su presencia habitual en los medios de comunicación o en conversaciones cotidianas (Martín León, 2003). Por lo general, el interés hacia este fenómeno se debe a su relación con episodios de lluvias intensas y graves inundaciones.

El concepto original de gota fría fue introducido por la escuela alemana en 1886, a partir del término *kaltlufttropfen*, que, traducido, hace referencia exacta a una gota de aire frío. En concreto, fue Richard Scherhag quien estableció sus características principales y acuñó dicha noción, refiriéndose a “una marcada depresión inexistente en el suelo y solo apreciable en altura, en cuya parte central se encuentra el aire más frío” (Llasat Botija, 1991).

Sin embargo, a posteriori, algunos autores fueron añadiendo matices sobre dicho concepto, lo que ha generado cierta confusión. Es el caso de Fontaine, que en 1951 la definió como “el aspecto que adquiere una invasión de aire polar o ártico cuando, hallándose en latitudes más o menos meridionales, deja de estar unido a su fuente, presentando entonces sus isotermas una forma circular coincidente a menudo con una depresión”, (Llasat Botija, 1991, p. 68) dejando la puerta abierta a la duda de si, este fenómeno, se detecta solo en altura o también en superficie. Otros autores, como Zimmerschied en 1954, indicaron que, en determinadas ocasiones, la gota puede distinguirse también en el campo bórico en superficie, aunque se diferenciaría de una depresión o borrasca ordinaria al no tener frentes.

En España, el término comienza a ser utilizado a mediados del siglo pasado de la mano de García Carrasco y Medina. Este último incidía en su definición del concepto de gota fría en la independencia propia y el carácter desgajado y aislado respecto a la corriente en chorro de la misma (Medina Isabel, 1976). El uso de este término se popularizó a raíz de las inundaciones acaecidas en Valencia en octubre de 1982, en las que se registraron unos valores de precipitación próximos a los 580 mm en algo más de 24 horas, dando lugar a la rotura de la presa del embalse de Tous, hecho que provocó una cifra considerable de víctimas mortales. Desde entonces, la gota fría quedó relacionada con episodios de lluvias intensas de efectos desastrosos (Llasat et al., 2007).

Tomando en consideración todo ello, su definición original, tal y como apunta Llasat, hace referencia a

“... una depresión cerrada en la troposfera media y alta coincidente con un mínimo de temperatura [en la que] el campo bórico en superficie bajo la misma es en general poco definido si bien puede darse una situación anticiclónica. Asimismo, con el tiempo, la gota puede reflejarse en superficie mediante una pequeña depresión (en cuyo caso dejaría de ser, a partir de ese momento, estrictamente una gota de aire

frío. [A ello hay que añadirle que] en la topografía relativa 500/1000 hPa debe existir al menos una equiescalar cerrada” (Llasat Botija, 1991, p. 69).

Sin embargo, dicha definición, como se mostrará a continuación, ha ido quedando en desuso hasta ser sustituida por el concepto actual de DANA, más amplio, genético y dinámico, dejando atrás el enfoque predominantemente térmico como ocurre con la denominación original de gota fría (Llasat et al., 2007). En dicho cambio de terminología también influyó el repetido uso incorrecto del concepto para referirse a cualquier episodio de lluvias intensas, especialmente en el Levante español (Martín Vide, 2022), hasta convertirse en una especie de comodín meteorológico (Martín León, 2003).

El proceso que dio lugar al cambio de denominación se inició a finales del siglo XX, con la progresiva mejora de las metodologías de observación meteorológica, constatándose que algunas gotas frías llevaban relacionado un cierto reflejo en el campo de presión superficial sin llegar a llevar asociados sistemas frontales. De hecho, “las nuevas teorías modernas en Meteorología dinámica señalan que las depresiones de altura siempre tienen un reflejo en niveles bajos y superficie, que se manifiesta en forma de algún tipo de anomalía (presión, temperatura, estabilidad, viento, etc.)” (Martín León, 2003, p. 4). Por ello, con el paso de los años, desde la terminología anglosajona se fijó otro término más exacto que el de gota fría: *cut-off low*, del que partirá el origen de la nueva denominación de DANA en España.

El término DANA fue introducido en nuestro país a mediados de los años 80, cuando comenzó a ser utilizado progresivamente dentro del Área de Predicción y Vigilancia del Instituto Nacional de Meteorología, actual Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, de aquí en adelante). Es interesante destacar, que, tomando como referencia el término *cut-off low*, en el que solo se habla de baja o depresión aislada sin indicar el nivel, la terminología española optó por reforzar explícitamente el concepto de niveles altos, hablando por tanto de Depresión Aislada en Niveles Altos. Todo ello con el fin de diferenciarlas de otro tipo de depresiones aisladas existentes, como pueden ser las bajas térmicas, que tienen lugar en la península durante los meses cálidos en capas bajas. (Martín León, 2003). El cambio a la nueva denominación fue objeto de ciertas reticencias en un principio en el ambiente científico español, aunque, finalmente, acabó imponiéndose, descartando la propia AEMET el término de gota fría para denominar dicho tipo de eventos.

Es, por tanto, en las últimas décadas cuando el término DANA comienza, finalmente, a tomar claro protagonismo en el vocabulario técnico y meteorológico español, trascendiendo, de manera paulatina, al lenguaje popular a través de los medios de comunicación. Sin embargo, en el imaginario colectivo continúa relacionado, de manera evidente, con episodios de lluvias fuertes y dañinas, situaciones en las que el término cobra importancia y se enfatiza desde los medios de comunicación. Pero esto no es en absoluto algo verídico. De hecho, para descartar la idea de que toda DANA o la mayoría están relacionadas con episodios de inundaciones, es suficiente consultar el análisis realizado al respecto por Llasat, en el que demuestra que tan solo un 29,4% o 5 de 17 de todas las inundaciones en Cataluña y Levante acontecidas entre 1953 y 1988 tuvieron

relación con este tipo de depresiones (Llasat Botija, 1991). Otros autores también señalan la importancia de incidir más sobre el riesgo potencial de focos tormentosos frente a las DANAs de cara al público y a las autoridades civiles (Martín León, 2003).

Para comprender mejor hasta qué punto puede una DANA desencadenar eventos de inundación o no, hay que entender en primer lugar su proceso de formación. Para ello, se debe comenzar hablando de la existencia de unas potentes corrientes de aire que rodean la Tierra. La primera referencia a las mismas se remonta al año 1933, cuando Jacob Bjerknes, gracias al cálculo del viento de altura o geostrófico a diferentes niveles, llegó a la conclusión de que en la troposfera superior deberían existir vientos fuertes de componente oeste (Gil Olcina & Olcina Cantos, 1997), dicha teoría fue corroborada años más tarde, en los años 40, durante la II Guerra Mundial, cuando los pilotos norteamericanos detectaron ciertas dificultades al encontrar unos vientos de más de 250 nudos cuando cruzaban el Pacífico hacia Japón.

Más adelante, y con la aparición de los primeros radiosondeos, se comprobó definitivamente la existencia de unos valores máximos de viento en forma de una estrecha banda rodeando el hemisferio norte, correspondiendo a Rossby y de la Universidad de Chicago la identificación de tres corrientes en chorro o máximos de viento en niveles superiores, por encima de los 300 hPa (9.000-10.000 metros de altura).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, de aquí en adelante) define corriente en chorro o *jet stream* como “una corriente fuerte y estrecha, concentrada a lo largo de un eje cuasi-horizontal en la alta troposfera o en la estratosfera, caracterizada por fuertes gradientes verticales y laterales en la velocidad del viento y uno o más máximos de velocidad”. En dicha definición no se especifica su dirección, ya que, dependiendo de la latitud de la corriente, su trayectoria será diferente, desplazándose hacia el este en las situadas en latitudes subtropicales, medias y altas y hacia el oeste sobre el ecuador.

En concreto, la corriente en chorro polar del hemisferio norte, la que afecta primordialmente a la península ibérica, parece tener su origen en el fuerte gradiente térmico existente en la zona de contacto entre el aire polar y tropical, representando este modesto contraste un importante reservorio de energía térmica, que puede convertirse en cinética (Gil Olcina & Olcina Cantos, 1997), tal y como se observa en la siguiente figura (Fig. 1):

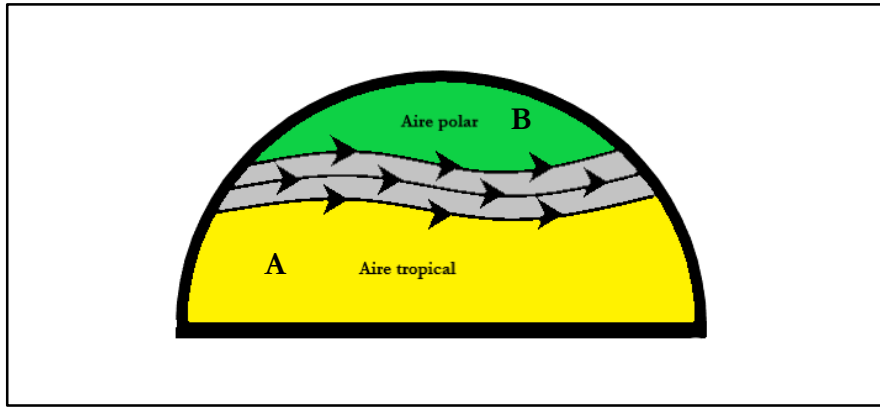


Fig. 1. Circulación zonal de la corriente en chorro polar. Elaboración propia.

De esta manera, en el hemisferio norte, el aire que queda en el lado izquierdo del chorro polar es primordialmente frío, mientras que en su lado derecho permanece un aire con mayor temperatura (Martín León, 2003). Además, separa, en cierta medida, el cinturón de bajas presiones polar de las altas presiones subtropicales (Cuadrat & Pita López, 2006).

Otra de sus características fundamentales es su velocidad, que suele superar, con frecuencia, los 300 km/h, siendo la variación de la misma uno de los principales motores del cambio de tiempo en superficie; de hecho, algunos autores afirman que, las corrientes en chorro son como una especie de espina dorsal de la circulación general atmosférica (Martín Vide, 2022). Cuando su velocidad es alta, se habla de circulación zonal o índice de circulación alto (ver Fig. 1); sin embargo, cuando esta se sitúa por debajo de los 150 km/h, el flujo tiende a formar meandros al perder fuerza, dando lugar a crestas y valles planetarios. A esta circulación se le denomina meridiana (Fig. 2).

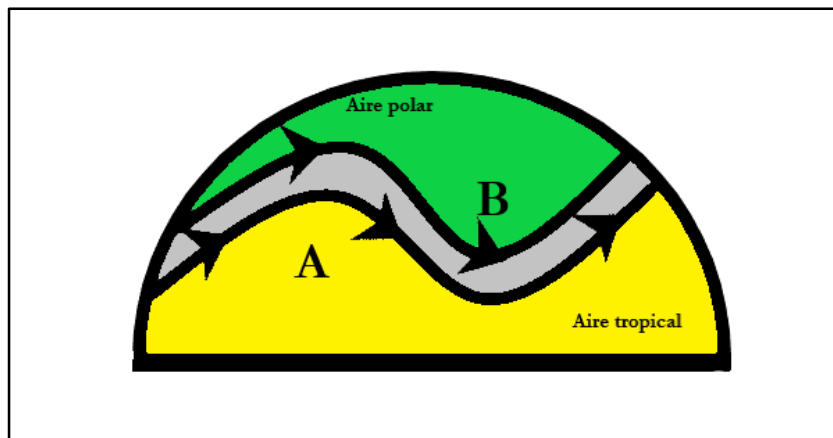


Fig. 2. Ondulación de la corriente en chorro. Elaboración propia.

Si la velocidad pasa a ser inferior a los 70 km/h, las ondulaciones se acentúan considerablemente, pudiéndose cerrar sobre sí mismas dando lugar a una DANA (Fig. 3).

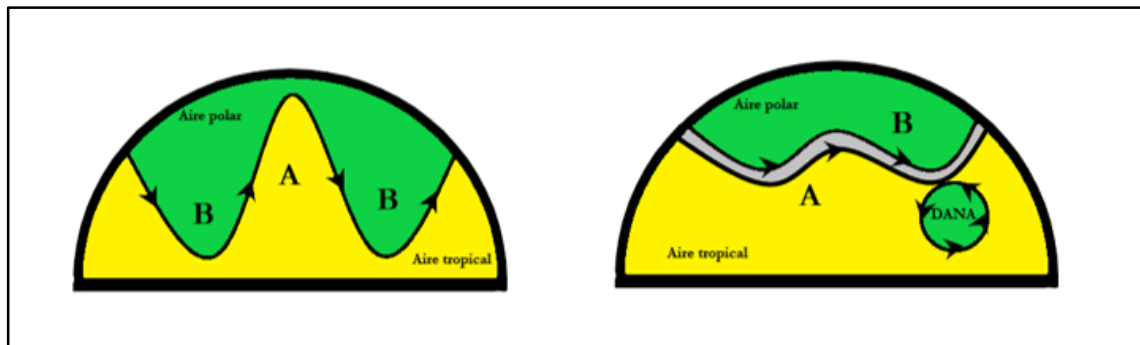


Fig. 3. Estrangulamiento de la corriente en chorro y formación de una DANA. Elaboración propia.

Aunque no es este el único proceso existente de formación, sí es uno de los más comunes. De esta manera, se puede definir finalmente a la DANA como:

“Una depresión cerrada en altura que se ha aislado y separado completamente de la circulación asociada al chorro, y que se mueve independientemente de tal flujo, llegando a veces, a ser estacionaria o, incluso, retrograda (su desplazamiento es, en estos casos, de dirección este-oeste)” (Martín León, 2003, p. 8).

Aunque en su ciclo de vida inicial tienden a aparecer únicamente en los mapas de altura (300 o 500 hPa), tienen la capacidad de propagarse hasta la superficie, dando lugar a una borrasca fría aislada o baja fría. De esta manera, “una DANA será cualquier perturbación que cumpla con la definición anterior, tenga o no reflejo en superficie. Con este concepto en mente se tiene que una borrasca fría aislada es una DANA” (Martín León, 2003, p. 9).

En relación con esto, es importante recalcar que la diferencia fundamental entre una borrasca fría aislada y una borrasca fría polar es básicamente la reclusión de la primera respecto a la corriente en chorro, situándose en la zona subtropical (Fig. 5), mientras que la segunda queda siempre en el lado polar (Fig. 4).

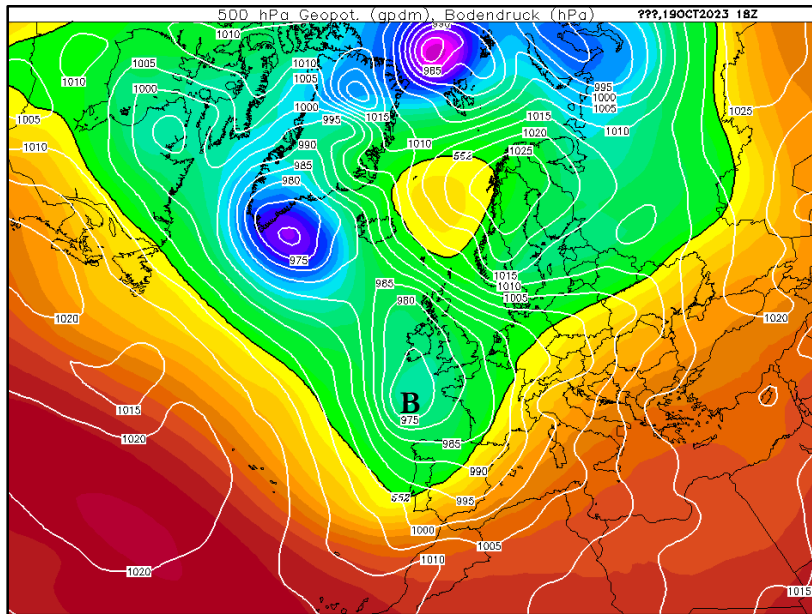


Fig. 4. Borrasca fría polar. Fuente: Wetterzentrale. Edición propia.

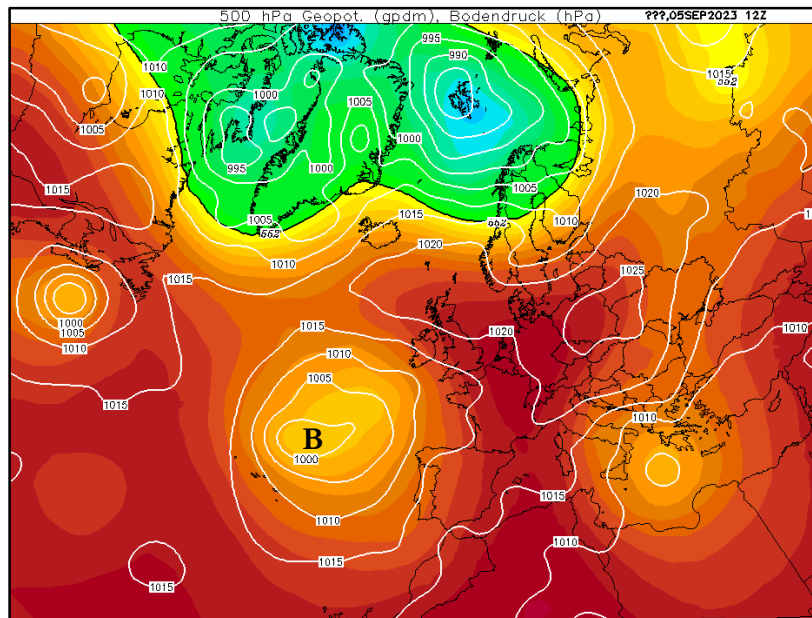


Fig. 5. Borrasca fría aislada, considerada como DANA. Fuente: Wetterzentrale. Edición propia.

Bajo la denominación antigua de gota fría, la situación presentada en la figura precedente (Fig. 5) no hubiera sido tomada en cuenta como tal, hecho que ha cambiado con la actual terminología de DANA, motivo por el cual, el nuevo concepto, refuerza una visión mucho más genética y dinámica frente a los aspectos térmicos que caracterizaban la definición de gota fría.

Ahora bien, una vez conocido su proceso de formación, ¿por qué una DANA puede tener la capacidad de generar precipitaciones? Para ello hay que incidir brevemente en el concepto de estabilidad e inestabilidad atmosférica.

Todo gas tiene energía interna que depende la presión, orientando esta su estado térmico. De esta manera, si se expande, disminuye su temperatura, ocurriendo lo contrario si se

comprime. Estos cambios de temperatura motivados exclusivamente por una diferenciación de presión ejercido sobre el gas y que no dan lugar a intercambios de calor con el aire que le rodea se denominan adiabáticos. Así, toda columna de aire sometida a un movimiento de ascenso, al soportar cada vez una presión menor, aumenta su volumen y disminuye su temperatura. La proporción con la que esta última varía es conocida como gradiente adiabático de temperatura, pudiéndose distinguir dos tipos en función del grado de humedad de la masa de aire:

- Gradiente adiabático del aire seco: la masa de aire se enfría o calienta a un ritmo de $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.
- Gradiente adiabático del aire húmedo: el ritmo de cambio de temperatura se sitúa por lo general en $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

De este modo, el equilibrio de un sistema o masa de aire puede ser de tres tipos: estable, neutro o inestable (Cuadrat & Pita López, 2006). Se conoce como estable a la masa de aire que, por sus condiciones térmicas y de humedad, dificulta la aparición de movimientos verticales, mientras que una masa inestable hace referencia a la situación en la que tanto las condiciones de temperatura como de humedad facilitan los movimientos verticales en una “columna” de aire. Aun así, debe existir un “motor” exterior que impulse el movimiento de dicha masa de aire. Dicho empuje puede ser ocasionado por alguno de estos cuatro mecanismos:

1. Ascenso orográfico: producido generalmente por la presencia de una cadena montañosa que hace que la masa de aire se eleve.
2. Ascensión frontal: como resultado del choque entre dos masas de aire de características distintas.
3. Convergencia horizontal: tiene lugar hacia los centros de baja presión. La contestación a la convergencia genera un movimiento de ascenso.
4. Convección: originada por el calentamiento del aire en superficie debido a su contacto con un suelo a alta temperatura.

Es por todo ello que, en caso de existir un gran diferencial térmico entre la masa de aire de la DANA y la correspondiente a la superficie circundante, se favorecerá la aparición de movimientos verticales, generando inestabilidad y condensación, y pudiendo, por tanto, producir chubascos y tormentas. Es así, por ejemplo, como ocurre en el área mediterránea en época otoñal (Martín Vide, 2022). Cabe añadir que, en el caso de que se produzcan precipitaciones importantes, estas suelen tener lugar en el borde delantero o de ataque de la DANA (Llasat Botija, 1991).

Esta capacidad de causar importantes precipitaciones que pueden derivar en inundaciones es una de las principales motivaciones de estudio de este concepto, unido a los riesgos y daños socioeconómicos que este tipo de eventos pueden entrañar. Por otro lado, uno de los efectos patentes del cambio climático en las últimas décadas es el acusado aumento de la temperatura del agua del Mar Mediterráneo (Danovaro, 2020), lo que, sin lugar a dudas, podría incurrir en un aumento del diferencial de temperatura en caso de producirse una DANA, generando situaciones más inestables y con mayor capacidad de desarrollo

vertical. También está relacionado con el cambio climático un posible cambio de patrón en la corriente en chorro, situándose más al norte y favoreciéndose más ondulaciones (Woollings et al., 2023) que lleven al aumento de formaciones de DANA en nuestras latitudes, algo que hasta la fecha no ha sido estudiado en detalle. Además, desde los medios de comunicación se publican en ocasiones titulares alarmistas y no contrastados, que buscan únicamente atraer la atención afirmando que cada vez más DANAs afectan al territorio español. Todo ello demuestra, por tanto, la importancia de investigar acerca de esta situación sinóptica.

La mayor parte de los trabajos científicos de este tipo de eventos en España no abarcan un extenso estudio de recurrencia que pueda dar lugar a la identificación de algún tipo de tendencia para estas situaciones, que cobran especial interés en un país cada vez más poblado y expuesto a los efectos del cambio climático. Cabe excluir, en cierta medida, de la anterior afirmación el estudio sobre gotas frías realizado por Llasat Botija en 1991. En el que, siguiendo los mapas publicados en el Boletín Meteorológico del entonces llamado Instituto Meteorológico Nacional (actual AEMET), identificó la recurrencia de este tipo de eventos sobre la península ibérica entre los años 1974 y 1983, siguiendo, eso sí, la definición antigua. En su estudio no se buscaba el establecimiento de posibles tendencias en cuanto al número de gotas frías, sino más bien dejar patentes sus características fundamentales en cuanto a presión, temperatura, ubicación, duración o tamaño, sentando las bases de estudio de este concepto en nuestro país. Además, buscó demostrar su relación con inundaciones acontecidas desde 1953 hasta 1988 en el litoral mediterráneo (Llasat Botija, 1991).

Existen además otros estudios de recurrencia. Uno publicado en 2001 identifica las DANAs según las variaciones de los registros de ozono troposférico sobre el observatorio atmosférico de Izaña en Tenerife entre 1989 y 1999, en un marco de estudio situado entre los puntos geográficos 60°W/80°N y 30°E/20°N, arrojando como resultado que la mayoría de casos tienen lugar en invierno, primavera y otoño, siendo la zona suroeste de la península uno de los puntos con mayor frecuencia de localización de este tipo de situaciones (Cuevas & Rodríguez, 2001). Otro estudio analiza el número de DANAs en el hemisferio norte y alguna de sus características entre 1908 y 1958, observando una mayor recurrencia sobre Europa, en cambio, en primavera y verano (Bazo Zambrano et al., 2010). Ninguno de ellos abarca un periodo tan extenso como un siglo.

Más allá de estos dos trabajos referidos, la gran mayoría de publicaciones ciñen, hasta el momento, el estudio de las DANAs en la península ibérica a su impacto sobre inundaciones en el litoral levantino. Algunos artículos tratan a las DANAs bajo la perspectiva de ser una de las situaciones sinópticas causantes de dichas inundaciones en el sureste español (Martín-Vide et al., 2021). Otras profundizan sobre el concepto y su evolución estableciendo además una relación del mismo con algún evento concreto de lluvias extremas en el pasado en la costa mediterránea (Llasat et al., 2007). Desde fuera de España, también se difunde conocimiento relacionado con las DANAs en la península, abordando, incluso, previsiones de cara al futuro basadas en un estudio de recurrencia

entre 1998 y 2018, pero centrando de nuevo el punto de mira en las inundaciones en Levante (Ferreira, 2021).

Por los hechos citados anteriormente, este trabajo se centra de manera pionera en la realización de un estudio de recurrencia de DANAs sobre la península ibérica en el último siglo (1924-2023); con el objetivo fundamental de identificar posibles tendencias (aumento, decrecimiento o estabilidad) de este tipo de fenómenos en el presente contexto de cambio climático y profundizar en la hipótesis remarcada por algunos estudios que indican probables cambios en los patrones de posicionamiento y velocidad de la corriente en chorro polar, motor de este tipo de fenómenos (Woollings et al., 2023). Además, se busca aportar como hecho innovador diferencial una breve relación de las DANAs con las inundaciones acontecidas en la Comunidad de Madrid en el mismo abanico temporal. Este último propósito resulta de gran importancia y de actualidad al haberse producido inundaciones en fechas recientes a consecuencia de este fenómeno, como el desbordamiento del río Alberche en septiembre de 2023 dejando varias víctimas mortales y graves consecuencias socioeconómicas en la zona afectada.

Al margen de estas dos aportaciones y objetivos primordiales, también se pretende indagar a fondo en otras características de estas situaciones sinópticas, como su localización sobre la península, su duración, patrones estacionales, presión en superficie, altura geopotencial a 500 hPa o masa de aire de las que proceden y establecer posibles relaciones entre todas ellas.

En definitiva, se pretende ahondar en un concepto de gran relevancia actual, ampliando el conocimiento existente sobre el mismo hasta el momento actual a través de dos hechos diferenciales: un estudio de recurrencia a largo plazo y un análisis inédito en relación con su impacto en inundaciones en la Comunidad de Madrid.

Una vez profundizado sobre el concepto fundamental del trabajo, conviene señalar con detalle la metodología empleada para la elaboración del mismo. Posteriormente, se presentarán, describirán y discutirán los resultados obtenidos en el estudio de recurrencia, ejemplificando e incidiendo sobre la influencia de este fenómeno en cuanto a inundaciones en la Comunidad de Madrid, para llegar, finalmente, al establecimiento de unas conclusiones.

2. Metodología

2.1. Selección de eventos de DANAs entre 1924-2023 y caracterización de variables

Para la elaboración del estudio de recurrencia de DANAs, (siguiendo su significado y características actuales) sobre la península ibérica entre 1924 y 2023 se ha fijado, en primer lugar, el marco geográfico de estudio tomando el mismo criterio escogido en la monografía citada ya con anterioridad de Llasat Botija. De esta manera, con el objetivo de ceñir la localización de estos fenómenos sobre la Península y Baleares, solo se han tenido en consideración aquellos posicionados en el rectángulo definido por las coordenadas 5°E – 12°W y 35°N – 45°N tal y como ilustra la siguiente figura (Fig. 6):



Fig. 6. Marco geográfico de estudio. Elaboración propia.

En segundo lugar, se han fijado las variables a analizar en el estudio de recurrencia. Para ello, se ha seguido, en cierta medida, el acertado criterio establecido por Llasat Botija en su tratado acerca de este tema de estudio, añadiéndose otros aspectos de interés influidos por el nuevo concepto de DANA y sus implicaciones, y también en relación con las inundaciones en la Comunidad de Madrid. De esta manera, se identificaron las siguientes características fundamentales a estudiar:

- Número y duración de DANAs.

- Posición de la DANA.
- Masa de aire.
- Presión en superficie.
- Altura geopotencial a 500 hPa
- Estación del año.
- Grado de reflejo en superficie.
- Impacto en inundaciones en la Comunidad de Madrid.

En lo relativo a la duración en días se han tenido en cuenta únicamente aquellos episodios de DANA con una duración superior a 24 horas, calculándose esta variable a partir de la diferencia entre la fecha de finalización del evento sobre el área de estudio y la fecha en la que el fenómeno se posiciona dentro del rectángulo ya referido.

Por otro lado, se consideró de gran relevancia caracterizar la posición de las DANA sobre el espacio de estudio, dividiéndose su área en nueve partes tal y como se muestra a continuación (Fig. 7):

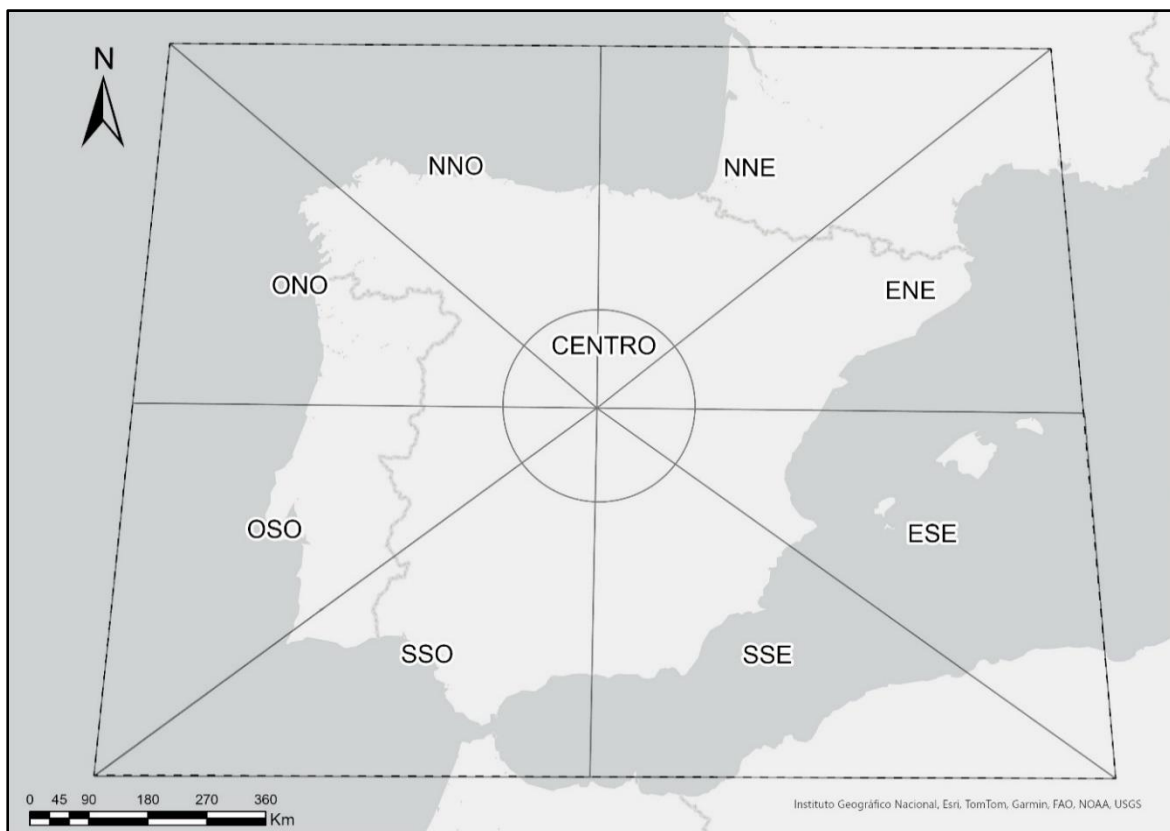


Fig. 7. Zonificación del área de estudio. Elaboración propia.

Todos los sectores son de igual perímetro excepto uno, el denominado “Centro”, que emerge como una especie de añadido al resto, lo que se explica por el interés de conocer con mayor profundidad la relación existente entre las DANAs y el centro peninsular, fundamentalmente en la Comunidad de Madrid.

También suscitó interés conocer la masa de aire de la que procedía cada DANA. Para ello, se ha tomado como referencia la clasificación realizada por el meteorólogo noruego Bergeron en 1928, la más generalizada. En ella, se emplean dos características básicas de los cuerpos de aire para su distinción: la situación de la fuente (polar, ártica o tropical) y su recorrido (marítimo o continental) (Gil Olcina & Olcina Cantos, 1997). A dicha clasificación se le ha añadido la figura de masa de aire mediterránea, cuya existencia fue asentada en 1959 por Jansá Guardiola, apoyándose en la capacidad transformadora del mar Mediterráneo a través de la carga de humedad y de temperatura a aquellas masas de aire que quedan estancadas en dicha cuenca (Jansá Guardiola, 1959). Estas figuras quedan definidas y ubicadas a continuación (Fig. 8):

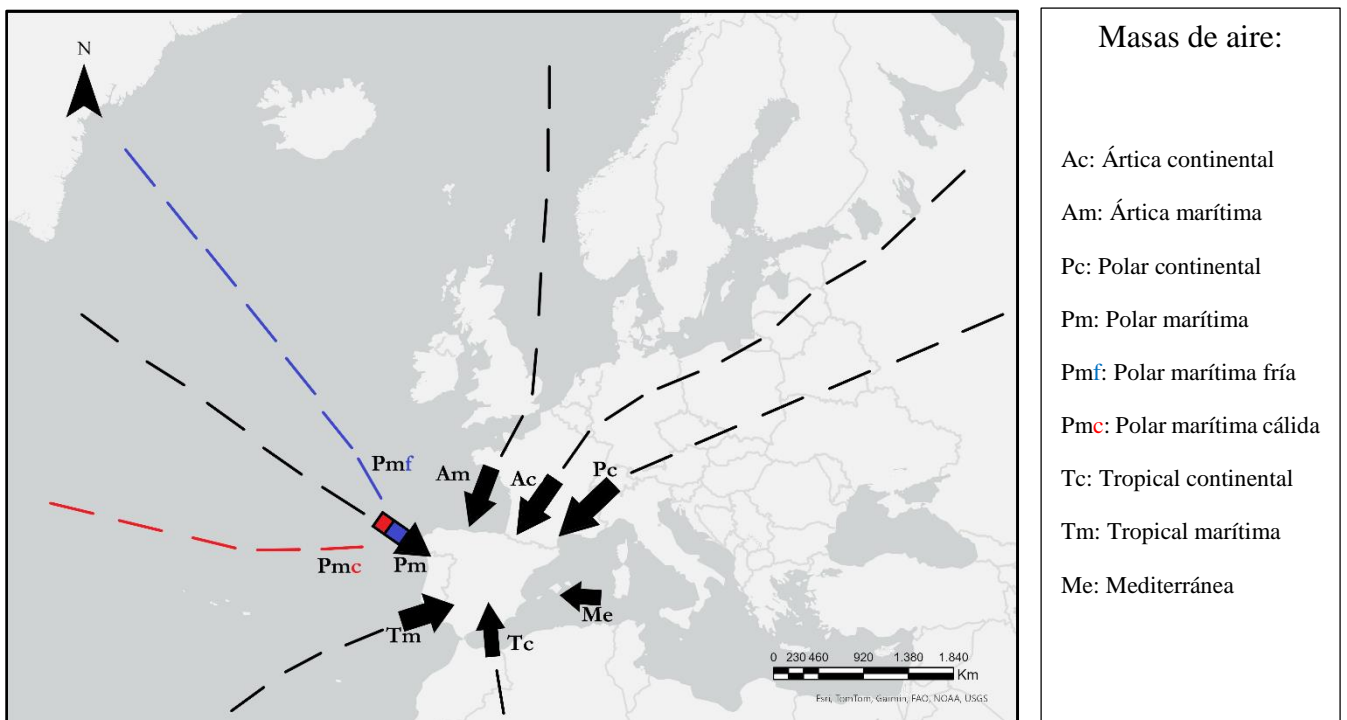


Fig. 8. Masas de aire. Elaboración propia

Asimismo, se estimó procedente tomar el valor tanto de la presión en superficie en hPa del centro de la DANA como el de su altura geopotencial en metros en el mapa de altura (500hPa), consiguiendo una visión más completa de este tipo de fenómenos. Es procedente reseñar que la altura geopotencial corresponde a la altura en metros a la que se alcanza la presión señalada (500hPa en este caso) (Martín Vide, 2022). Para esta variable se ha tomado el valor correspondiente a la isohipsa central de la DANA.

Ahondar en la relación entre las DANAs con las estaciones del año se ha considerado asimismo de importancia, sobre todo de cara a identificar en qué momentos hay mayor recurrencia de este tipo de situaciones sinópticas sobre la península ibérica, buscando corroborar y comprobar los resultados obtenidos en los dos estudios de recurrencia ya mencionados al respecto. De esta manera se dividió cada año siguiendo las cuatro estaciones meteorológicas del hemisferio norte (Tabla 1):

| | |
|-----------|--|
| Invierno | Del 1 de diciembre al 28 o 29 de febrero |
| Primavera | Del 1 de marzo al 31 de mayo |
| Verano | Del 1 de junio al 31 de agosto |
| Otoño | Del 1 de septiembre al 30 de noviembre |

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del año en el hemisferio norte. Elaboración propia.

Por otro lado, tomando como base la evolución del concepto de estudio desde su denominación como gota fría a DANA en la actualidad —dado que dicho cambio de nomenclatura ha comportado que situaciones anteriormente no recogidas dentro de este tipo de fenómenos (como las borrascas frías aisladas) hayan pasado a sí ser consideradas hoy en día—, se fijó la decisión de atender al grado de reflejo en superficie de cada una de ellas. Así, se establecieron tres categorías en función de dicho criterio:

- Tipo 1: no existe reflejo en el mapa de superficie, es decir, no aparecen isobaras cerradas en torno a la DANA. Sería la coincidente con la definición de gota fría, en la que se descartaba cualquier tipo de reflejo en superficie.
- Tipo 2: aparece en algún momento cierto reflejo en superficie en forma de una isobara cerrada rodeando la DANA.
- Tipo 3: existe más de una isobara cerrada en torno a la DANA en forma de borrasca fría aislada.

Cabe recalcar que todas ellas son DANAs, tan solo se consideró útil recoger dicha diferencia de reflejo en superficie

Finalmente, para analizar el impacto de dichos eventos sobre inundaciones en la Comunidad de Madrid, se decidió establecer a su vez tres categorías al respecto:

- Sin impacto: en caso de que no haya relación entre la DANA e inundaciones en dicha región.
- Impacto medio: se constata que la DANA produjo daños económicos o heridos.
- Impacto alto: existe constatación documental de que el fenómeno causó fallecidos en la Comunidad de Madrid, además de los daños económicos o heridos.

Todas estas variables citadas fueron dispuestas, de cara a realizar el estudio, como columnas en una hoja de cálculo de Excel. Las filas de dicha tabla se correspondieron, por tanto, con cada una de las DANAs detectadas en esos cien años, conformando la variable número de DANAs.

2.2. Búsqueda de información

La fuente de información fundamental empleada para identificar y caracterizar cada episodio en base a las variables anteriormente descritas ha sido la cartografía del archivo de la página web Wetterzentrale. En esta colección existen mapas cada 6 horas (desde las 0:00 horas) para cada día (con la misma secuencia) disponibles desde 1836, de los que se

han analizado un total de 146.096 mapas para abarcar el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1924 y el 31 de diciembre de 2023. En concreto, se han consultado los mapas de altura de 500 hPa, dado que en ellos se incluye también información referente a la superficie mediante isobaras, que permiten una exploración bastante completa, sencilla y rápida. Esta cartografía es generada a través de datos de reanálisis de diversas fuentes, de las cuales se han tenido que emplear las tres existentes debido al gran abanico temporal estudiado:

- NOAA: correspondiente a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica estadounidense. Muestra datos desde 1836 hasta 2015, empleándose en este trabajo en el periodo 1924-2015, aunque con un vacío existente, en el momento de consulta, para el año 1926.
- ERA: empleada para cubrir dicho vacío de datos del NOAA entre el 1 de enero y el 3 de mayo de 1926. Su información corresponde al ECMWF, Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (por sus siglas en castellano).
- CFSR: tomada como referencia desde 2016 a 2023 e igualmente perteneciente a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica estadounidense.

Desde esta última fuente (CFSR) también se detectaron vacíos que tuvieron que ser cubiertos a partir de los datos de archivo de otra página web: Meteologix, en la que se ha empleado la serie correspondiente al ERA5 (del ECMWF). El proceso de consulta desde esta fuente fue mucho más costoso al no mostrarse en el mismo mapa información del geopotencial en altura y de la presión en superficie, lo que ha obligado a que, en caso de identificar una DANA desde la cartografía de altura, se haya tenido que comparar intercaladamente con los mapas de presión en superficie a nivel del mar para analizar la variable de grado de reflejo de la depresión.

Esta información obtenida para el estudio de recurrencia fue a su vez contrastada —sobre todo al principio de la serie histórica y con el objetivo de comprender hasta qué punto se producían precipitaciones como consecuencia de cada DANA—, a través del Boletín Meteorológico, publicado, desde 1893 a 2007, por el Instituto Nacional de Meteorología (actual AEMET).

Para el estudio de impacto en inundaciones en la Comunidad de Madrid, una vez reunidos todos los registros de DANAs y caracterizados en la hoja de Excel, se empleó, fundamentalmente, el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH, de aquí en adelante) elaborado por la Dirección General de Protección Civil y Emergencias. En él se muestran eventos de inundación desde el año 1900 hasta 1999 ordenados por fecha de inicio y fin, pudiéndose filtrar la información de manera sencilla en función de la cuenca hidrográfica, comunidad autónoma, provincia o municipio a analizar. En cada uno de los registros mostrados, se hace referencia al área afectada y al tipo de daños producidos entre otras variables, usando generalmente estas dos mencionadas. De esta manera, se compararon las fechas de los resultados del CNIH para la Comunidad de Madrid entre 1924 y 1999 con los obtenidos en el estudio de recurrencia, completando la columna correspondiente a la variable de impacto.

Dado que la información del CNIH a veces no proporcionaba fechas exactas, en este proceso se contó también, como fuente de apoyo, con prensa histórica consultada en la Hemeroteca Digital de la Biblioteca Nacional de España. Esta fue empleada para ahondar en el impacto de las inundaciones sobre la región estudiada y también para comprobar si esas fechas no concretadas por parte del CNIH, tuvieron relación o no con alguna DANA.

Por otro lado, para completar el periodo no cubierto por el CNIH entre los años 1999 y 2023, se tomaron como referencia varios artículos recientes que tratan dicha temática en la Comunidad de Madrid. Uno de ellos incluye un estudio completo de inundaciones para las ciudades de Aranjuez y Alcalá de Henares desde 1836 a 2020 (Pérez González & Jiménez Blasco, 2022), mientras que el otro, recaba todos los registros conocidos de inundaciones en la región desde el siglo XVI hasta la actualidad, contando con información relativa a la situación sinóptica desde finales del siglo XIX (Jiménez Blasco et al., 2024).

Además, se amplió la búsqueda mediante la información recogida desde la AEMET a partir del Sistema de Notificación de Observaciones Atmosféricas Singulares (SINOBAS, de aquí en adelante) y el apartado de efemérides. De esta manera se pudo completar el análisis de la variable de influencia en inundaciones en la Comunidad de Madrid, atendiendo tanto al tipo de impacto provocado como a la identificación de los términos municipales afectados por cada evento.

2.3. Análisis estadístico y de tendencias

Para la obtención de los resultados finales, toda la información recogida en la hoja de cálculo de Excel fue analizada a través de la herramienta de tabla dinámica en base a los objetivos mencionados en la introducción, generándose a partir de este programa gran parte de los gráficos mostrados. También se empleó el *software* Statgraphics de cara la adquisición de otro tipo de gráficos representativos, como los de caja y bigotes o los histogramas. Desde este programa, se ahondó también en un análisis estadístico (media, rango, mediana...) de algunas variables, así como en la obtención de la significación de las tendencias lineales de los gráficos de evolución de número de DANAs, duración y los de presión en superficie y altura geopotencial a 500 hPa. Para ello se recurrió a la técnica estadística de regresión lineal, la cual informa de manera sencilla de la magnitud de la correlación, el valor de una de las variables en caso de que la otra sea igual a cero y si la relación puede considerarse significativa o no (Montero Granados, 2016). Aunque existen muchas técnicas de regresión, se ha optado por el modelo de regresión lineal simple, emparejando las variables “x” (años) e “y” (característica a estudiar escogida). La significación de la tendencia lineal se muestra mediante el “valor de P”, que hace referencia a la probabilidad de que las diferencias observadas en las variables estudiadas se deban al azar (Campillo Artero, 1996). De esta manera, y por convenio, se establece que, en caso de ser dicho valor inferior a 0,05, resulta altamente improbable que la diferencia sea debida al azar (Molina Arias, 2017), es decir, la tendencia lineal mostrada será significativa al 95% de confianza, no siéndolo cuando el “valor de P” sea superior a

0,05, lo que indicaría que no existe la confianza óptima para negar con rotundidad que la diferencia observada sea obra del azar en el mismo valor de confianza.

En cuanto a la cartografía presentada como resultado se ha empleado el programa de análisis espacial e información geográfica ArcGIS Pro para su elaboración.

Junto a todo ello, se debe cabe reseñar, por supuesto, la recopilación, lectura y análisis del aparato bibliográfico, tanto a nivel de monografías especializadas en el concepto, como otras básicas en cuanto a climatología o meteorología; además del apoyo continuado en artículos científicos publicados tanto en inglés como en castellano.

3. Resultados

3.1. Recurrencia de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del estudio de recurrencia organizados en función de las variables analizadas. Estas se han ordenado conforme a su naturaleza. En primer lugar, se muestra la variable de tipo cuantitativo correspondiente al número de DANAs registradas; posteriormente, se tratan los resultados relacionados con el ámbito espacial (posición en la península), para pasar a analizar las variables temporales (estación del año y duración). Después, se muestran los resultados con un carácter más físico (masa de aire, presión y geopotencial), cerrando el capítulo con tablas comparativas que permiten una visión global.

Conviene también asentar algunas de las características de las figuras que se presentan en esta sección:

1. Gráficos de evolución con líneas de tendencia: dado que resulta fundamental comprender el comportamiento de los datos analizados, se realiza una búsqueda de tendencias. Los métodos de mayor interés empleados en su cálculo son, por un lado, el de las medias móviles, que permite disminuir los dientes de sierra existentes suavizando la curva original (Raso Nadal et al., 1987), y, por otro lado, el ajuste por regresión, asimilando la tendencia evolutiva de cada serie temporal a una función conocida (Gutiérrez Puebla, 1995), que en este caso será lineal o polinómica de orden 4.
2. Gráficos de caja y bigotes: permiten comprender dentro de la serie histórica cuáles son los valores normales y atípicos; estos, son mostrados como puntos alejados más allá de los bigotes, siendo aquellos que se encuentran a más de 1,5 veces el rango intercuartílico por arriba o por debajo de la caja. Aparecerán puntos muy alejados (con un signo dentro de ellos) en caso de ser 3 veces el rango intercuartílico. La caja del gráfico se extiende entre el cuartil inferior y superior determinando la parte central de la muestra, mientras que los bigotes comprenden

desde el valor mínimo al máximo, exceptuando los puntos alejados o muy alejados ya mencionados.

3. Histogramas de frecuencia: contruidos mediante un eje vertical que representa la frecuencia y otro horizontal, empleado para las clases (Gutiérrez Puebla, 1995), estableciendo 20 intervalos. Son de utilidad para profundizar en la distribución de los datos en las series temporales.

- **DANAs entre 1924 y 2023: tendencias**

Debido a la complejidad y evolución del concepto estudiado, con los cambios que ello ha conllevado de cara a su identificación y consideración, se ha optado por dividir este apartado en función de la variable de grado de reflejo en superficie, atendiendo a las tipologías previamente mencionadas en la metodología. De esta manera, se espera que estos gráficos muestren una visión lo más amplia posible, teniendo en consideración primordial la actual definición de DANA, pero buscando también la respuesta a cuál sería el resultado si se hubiera mantenido el concepto original de gota fría. Esta diferenciación en tipos, permite, por tanto, ahondar en las características de este fenómeno, desechar hipótesis y enlazar con otros estudios publicados anteriormente.

En la siguiente figura (Fig. 9) se muestra la evolución del número de episodios anuales registrados desde 1924 a 2023 siguiendo el concepto actual de DANA, que engloba a todas las tipologías, sin hacer distinción por su grado de reflejo en superficie (Fig. 9).

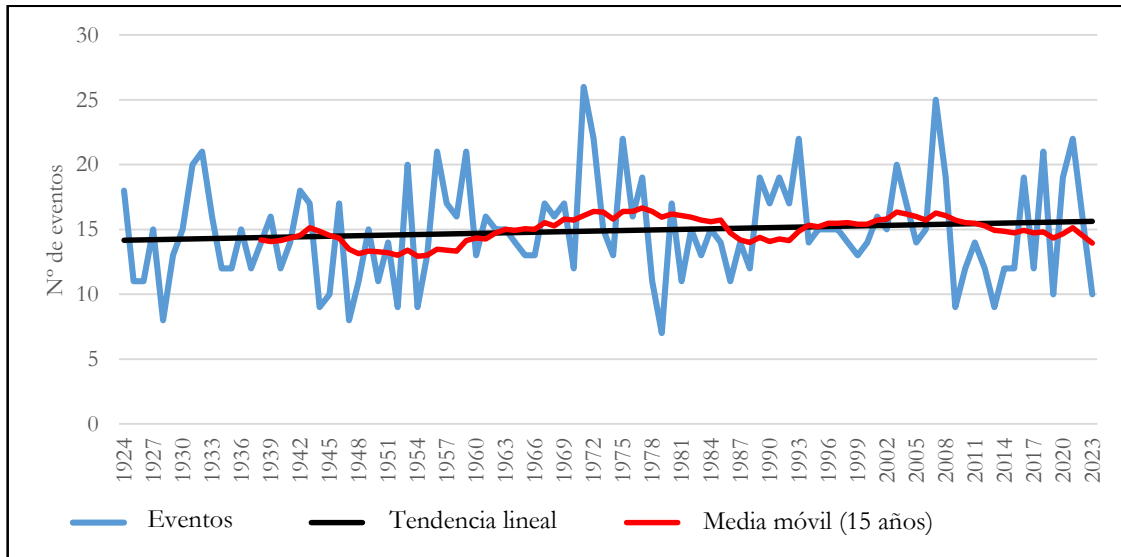


Fig. 9. Evolución anual de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

En ella se observan grandes fluctuaciones a lo largo de la serie con máximos y mínimos pronunciados. Los primeros, corresponden a los años 1971 y 2007, en los que se alcanzaron hasta 25 DANAs, mientras que de los segundos cabría destacar los años 1928, 1947 y 1979, con menos de 9 eventos de este tipo.

Llaman también la atención periodos como las décadas de los 40 y 80, en las que el número de este tipo de fenómenos se mantuvo por debajo de la media, o en contraste, el final de la década de los 50 y comienzo de los 90, cuando se detecta una estabilidad con una cifra de DANAs superior a la media. En el siglo XXI, los últimos siete años muestran una gran variabilidad, siendo esta especialmente amplia y continuada, claramente la más llamativa del periodo analizado, precedida por un periodo de estabilidad con pocas DANAs entre 2009 y 2015.

Para comprender la significancia de la tendencia lineal representada en el gráfico se acude a la obtención del valor P.

| | |
|------------------|-----------|
| Pendiente | 0,0145875 |
| Valor P | 0,27568 |

La pendiente indicaría una ligera tendencia al aumento con un valor aproximado de 0,015 DANAs al año, (0,15/década o 1,5/100 años). Sin embargo, el valor P, al ser superior a 0,05, señala que dicha **tendencia lineal no es significativa**, por lo que no se podría hablar de una tendencia al aumento en el número de DANAs en el último siglo, ya que no existe la constatación estadística de que la diferencia no sea obra del azar.

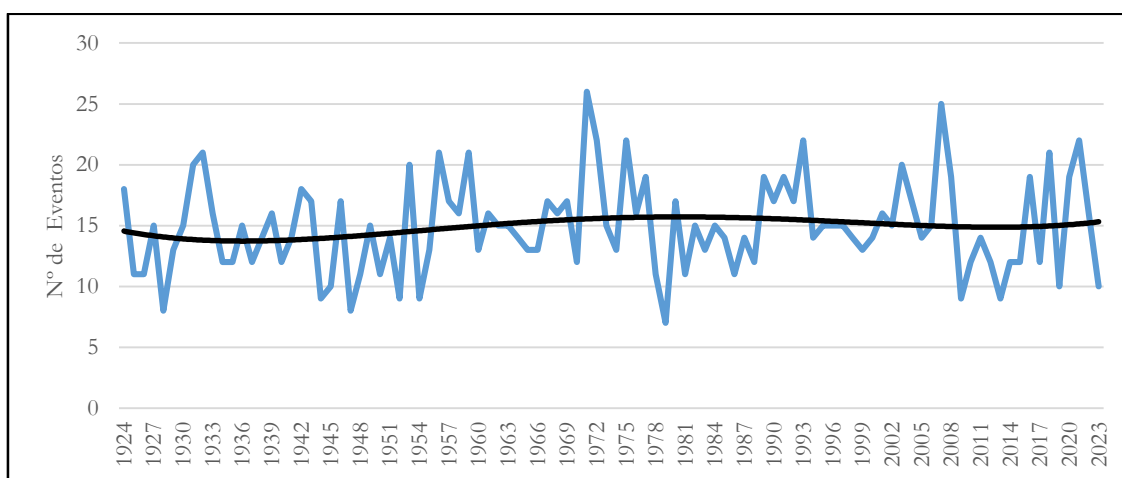


Fig. 10. Tendencia polinómica sobre la evolución anual de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Tomando como referencia una línea de tendencia polinómica (Fig. 10), se pueden diferenciar claramente fases de mayor recurrencia de DANAs, como en los años 70, y también otros momentos con menor número de estas situaciones, como en la década de los 40 o entre 2009 y 2015, que dan lugar a valles en la curva.

De la serie analizada aparecen señalados como atípicos los valores 25 y 26 (Fig. 11), correspondientes respectivamente con los años 1971 y 2007, en los que el número de DANAs, fue, por tanto, excepcionalmente mayor. La caja indica, en este caso, que en la

mayor parte de años el número de este tipo de fenómeno osciló entre los 12 y 17, situándose en 15 la mediana de la serie de datos (línea azul que divide la caja).

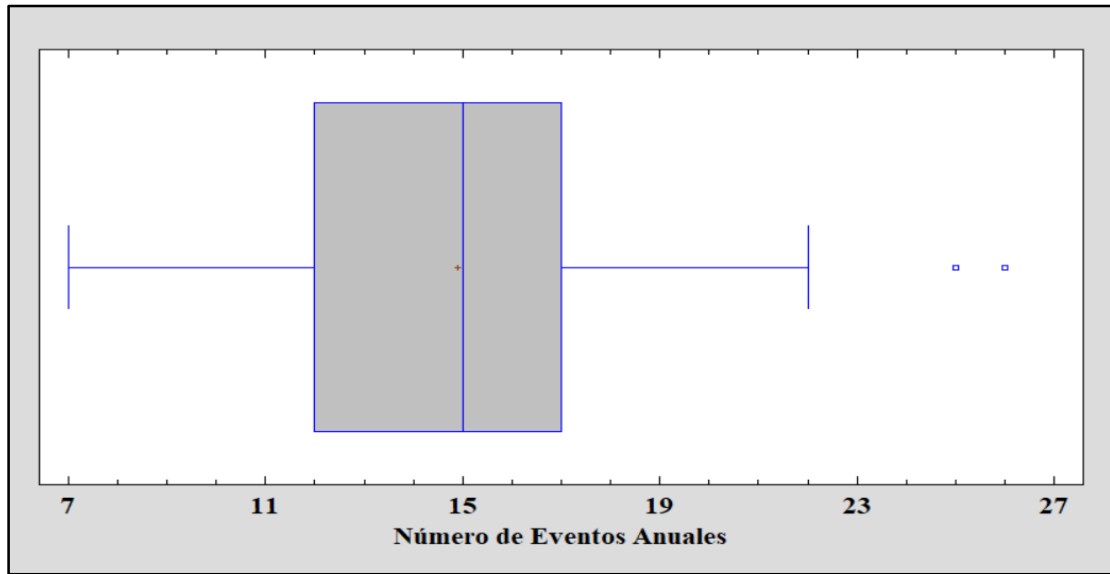


Fig. 11. Valores atípicos en la evolución de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Si se profundiza en la distribución de los datos (Fig. 12), en este caso, se observa cómo la frecuencia es mayor en el intervalo (13,5-15 DANAs al año) recogiendo la mayor parte de observaciones junto al intervalo entre 10,5 y 12. Muy excepcionales son, por tanto, aquellos años en los que el número de DANAs se ha situado por encima de 22. En cuanto a valores mínimos, llama la atención la existencia de un pico de frecuencia en el intervalo entre 7,5 y 9, existiendo más de 5 años que cumplen con ese bajo número de DANAs.

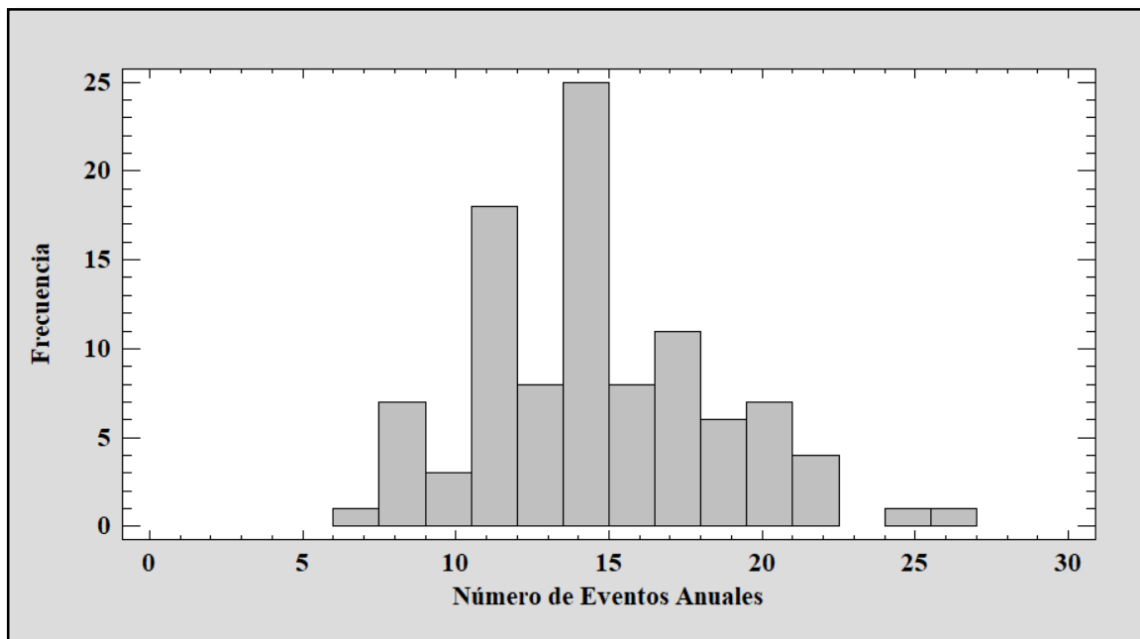


Fig. 12. Histograma de frecuencias de la evolución de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

En la siguiente tabla (Tabla 2) se muestra un breve resumen estadístico de la serie. Tomando como valor los cien años, el promedio de DANAs es de 14,89 al año. A su vez, los datos varían un 3,85 respecto a la media del conjunto, existiendo una variación entre la desviación típica y la media igual al 25,82%, lo que indica una dispersión moderada. También se reseñan el mínimo y el máximo de la serie junto al rango entre ambos, que es igual a 19. Se considera, además, que la muestra proviene de una distribución normal, ya que los valores del sesgo estandarizado y la curtosis, se encuentran entre -2 y 2, siendo válido por tanto el valor del coeficiente de variación.

| | |
|----------------------------------|--------|
| Recuento | 100 |
| Promedio | 14,89 |
| Desviación Estándar | 3,85 |
| Coefficiente de Variación | 25,82% |
| Mínimo | 7,0 |
| Máximo | 26,0 |
| Rango | 19,0 |
| Sesgo Estandarizado | 1,83 |
| Curtosis Estandarizada | 0,12 |

Tabla 2. Resumen estadístico de la evolución de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Si se tiene en cuenta la definición original de gota fría, en la que cualquier reflejo en superficie descartaba su clasificación dentro de este tipo de eventos, la evolución a lo largo de la serie histórica es claramente diferente. La distribución a lo largo de la misma es a simple vista muy variable (Fig. 13), con mínimos anuales que corresponden a tan solo 2 eventos (1945 y 2019) y máximos que alcanzan los 16 (2007). Destaca una fuerte variabilidad en las décadas de los 40 y los 70, predominando en la primera los valores mínimos y en la segunda los máximos.

En el siglo XXI, se podría hablar de una tendencia estable o ligeramente descendente exceptuando el año 2007.

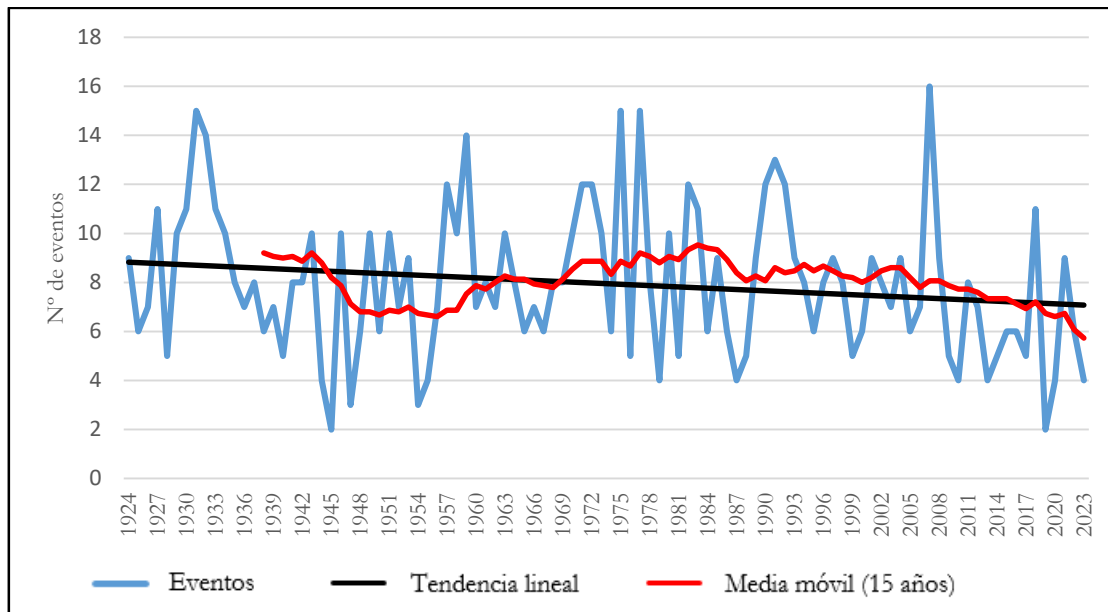


Fig. 13. Evolución anual de DANAs (Tipo 1) sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

| | |
|------------------|------------|
| Pendiente | -0,0175878 |
| Valor P | 0,0932112 |

En este caso, la pendiente de la tendencia lineal indica una ligera propensión a la disminución con un valor aproximado de -0,018 DANAs Tipo 1/año, (-0,18/década o -1,8/100 años). Sin embargo, el valor P, al ser superior a 0,05, señala que **dicha tendencia no es significativa**. Por tanto, no se puede afirmar que, en caso de no haber cambiado el concepto original, la tendencia sería negativa.

Por otro lado, al emplear una línea de tendencia polinómica (Fig. 14), se identifican fases de mayor recurrencia que conforman crestas, como los años 70, y valles que corresponden con fases de menor recurrencia, como los 40, o los últimos años analizados del siglo XXI.

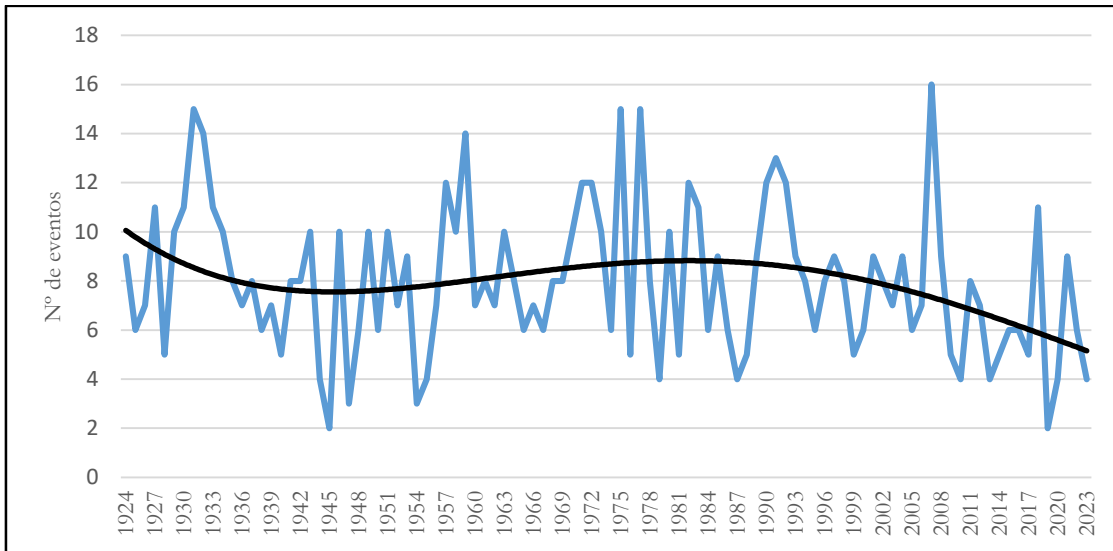


Fig. 14. Tendencia polinómica sobre la evolución anual de DANAs (Tipo 1) en la península ibérica (1924-2023).
Elaboración propia.

En este caso, tal y como ilustra la siguiente figura (Fig. 15), no se registran valores atípicos. Además, la mediana se sitúa en 8 gotas frías (DANAs tipo 1) al año, comprendiendo una distribución entre 2 y 16 como mínimo y máximo y la parte central de la muestra se sitúa entre las 6 y los 10 eventos anuales.

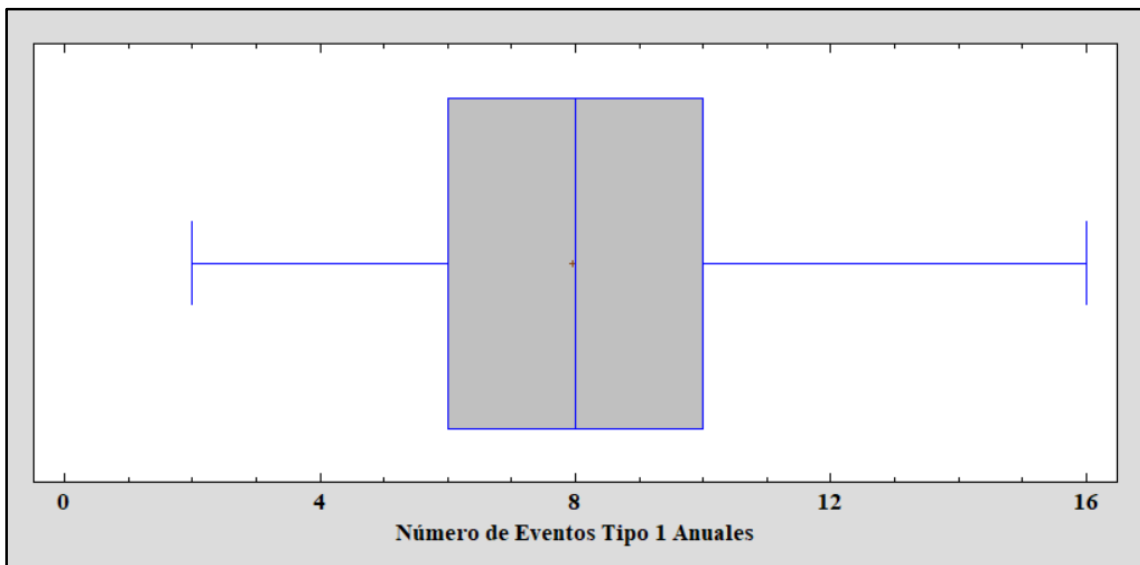


Fig. 15. Valores atípicos en la evolución de DANAs (Tipo 1) sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

En cuanto a la distribución de los datos de las DANAs tipo 1, el intervalo que más observaciones recoge es el comprendido entre 5,5 y 6,5 al año, seguido del de 8,25 a 9,25. Son, por tanto, extraños aquellos años en los que el número de este tipo de fenómenos se ha situado por debajo de 4 o por encima de 12 (Fig. 16).

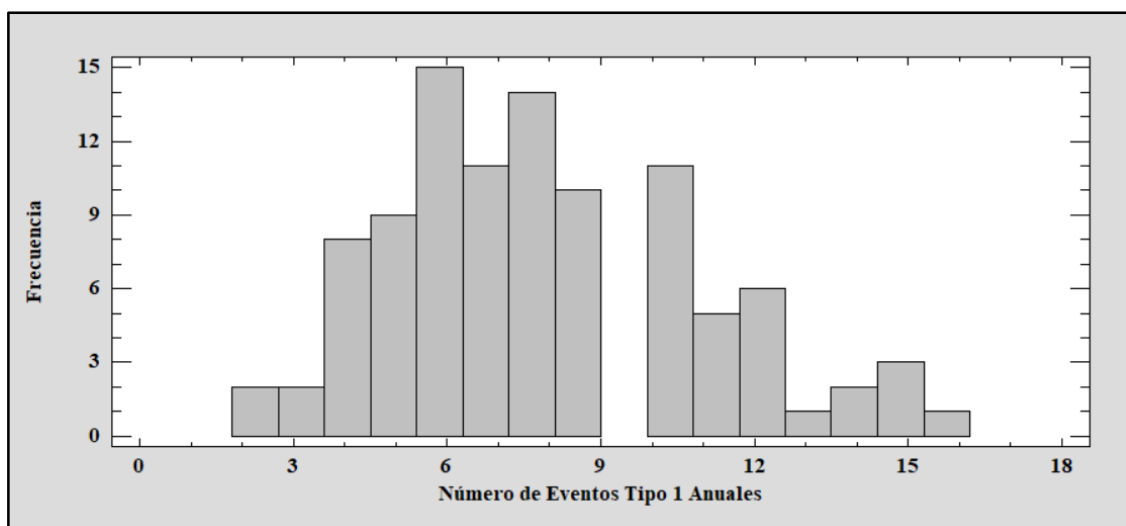


Fig. 16. Histograma de frecuencias de la evolución de DANAs (Tipo 1) en la península ibérica (1924-2023).
Elaboración propia.

Es importante recalcar, que, aunque esta consideración ya no tenga vigencia científica en la actualidad al emplearse el nuevo concepto de DANA, sí es interesante de cara a comparar con los resultados obtenidos por anteriores estudios de recurrencia realizados según la antigua definición de gota fría. Así, el estudio realizado por Llasat Botija entre 1974 y 1983 arrojaba un promedio de 7,7 gotas frías anuales (Llasat Botija, 1991), lo que es un resultado muy similar al 7,95 obtenido al analizar un siglo mediante la diferenciación de DANAs tipo 1.

Por otro lado, se puede concretar, según la desviación estándar, que los datos varían un 3,02 respecto a la media, siendo el coeficiente de variación igual a 38,02, lo que indica una dispersión moderada-alta. Dado que el sesgo y curtosis estandarizados se sitúan entre -2 y 2, el coeficiente de variación obtenido es válido (Tabla 3).

| | |
|----------------------------------|--------|
| Recuento | 100 |
| Promedio | 7,95 |
| Desviación Estándar | 3,02 |
| Coefficiente de Variación | 38,02% |
| Mínimo | 2,0 |
| Máximo | 16,0 |
| Rango | 14,0 |
| Sesgo Estandarizado | 1,95 |
| Curtosis Estandarizada | -0,08 |

Tabla 3. Resumen estadístico de la evolución de DANAs (Tipo 1) en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Si se tienen en cuenta solo las depresiones aisladas localizadas en altura y con un ligero reflejo en superficie, señaladas con una isobara cerrada (DANAs tipo 2), se observa que su evolución a lo largo del siglo analizado es bastante diferente. En primer lugar, destacan varios años como 1928, 1934 y 1952, en los que no se detectó ninguna DANA con estas características; sin embargo, en 2021, 9 de las 22 registradas en total se correspondieron a ellas. Se distingue, además, un periodo largo bastante estable con variaciones de amplitud similar entre mediados de los 80 y el año 2006 (Fig. 17).

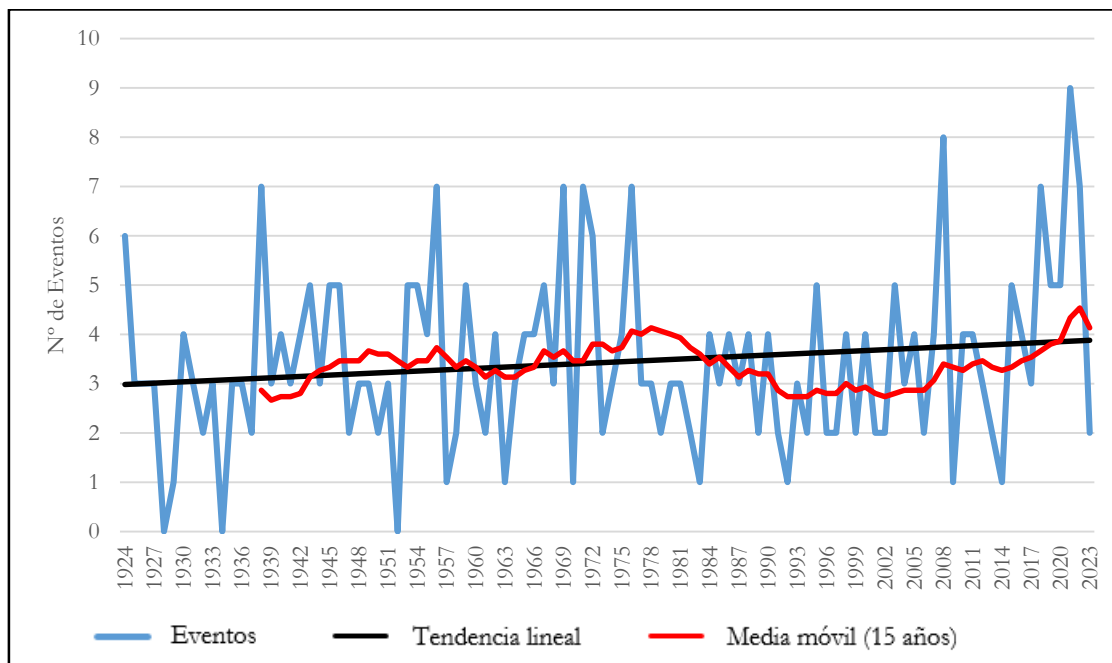


Fig. 17. Evolución anual de DANAs (Tipo 2) sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

| | |
|------------------|----------|
| Pendiente | 0,009067 |
| Valor P | 0,145404 |

La pendiente obtenida muestra una ligera tendencia al aumento con un valor aproximado de 0,09 DANAs Tipo 2/año, (0,1/década o 1/100 años). Sin embargo, el valor P, al ser superior a 0,05, señala que dicha **propensión al aumento de las mismas no es significativa**. Y es que, aunque parece existir un aumento desde el año 2014, constatable en el siguiente gráfico (Fig. 18), no se puede asegurar por el momento que dicha diferencia no sea obra del azar.

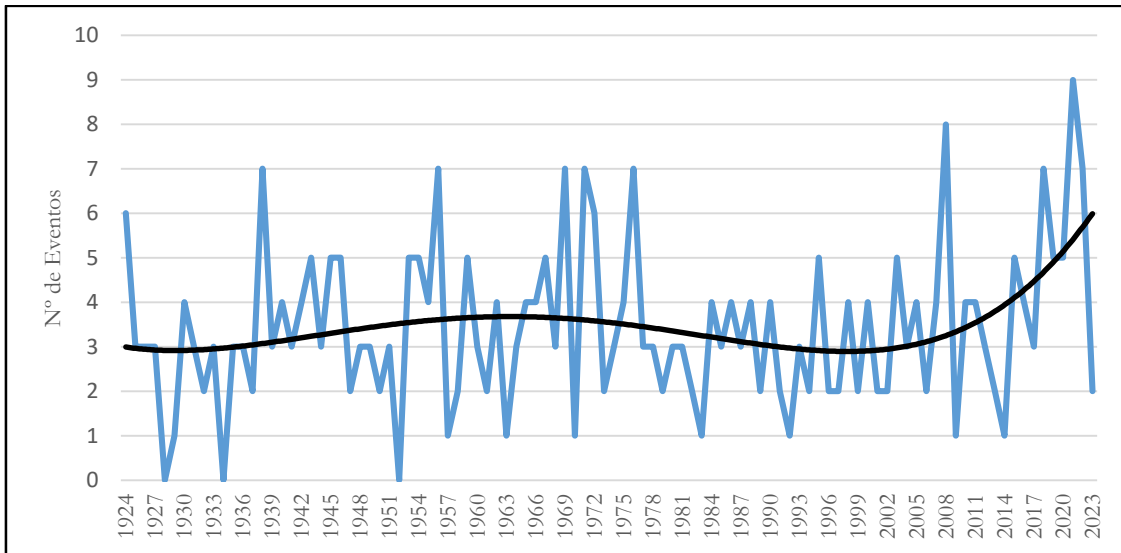


Fig. 18. Tendencia polinómica sobre la evolución de DANAs (Tipo 2) en la península ibérica (1924-2023).
Elaboración propia.

En la serie analizada, tomando en cuenta tan solo las depresiones con un escaso reflejo en superficie, aparecen dos valores atípicos correspondientes a los años 2008 y 2021, cuando se registraron 8 y 9 DANAs de este tipo. La parte central de la muestra oscila entre las 2 y 4 DANAs Tipo 2 anuales (Fig. 19).

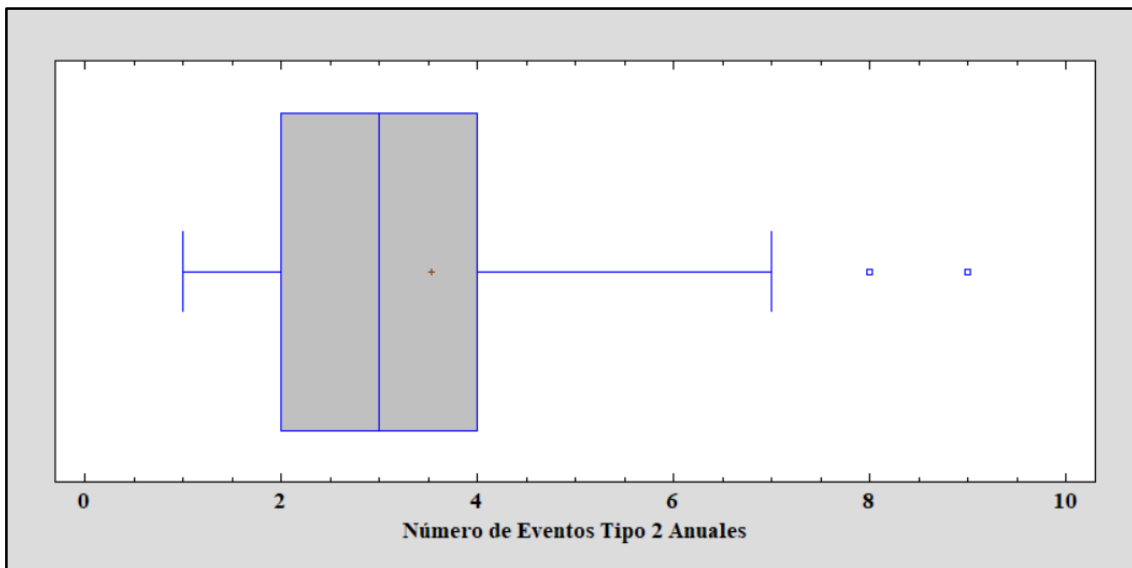


Fig. 19. Valores atípicos en la evolución de DANAs (Tipo 2) sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Por otro lado, el histograma de frecuencias señala una distribución de los datos bastante amplia, localizándose la mayor parte de observaciones en los intervalos comprendidos entre 1,5 y 4, lo que refuerza la excepcionalidad de las 8 y 9 observaciones de esta división de DANAs en los años 2008 y 2021 (Fig. 20).

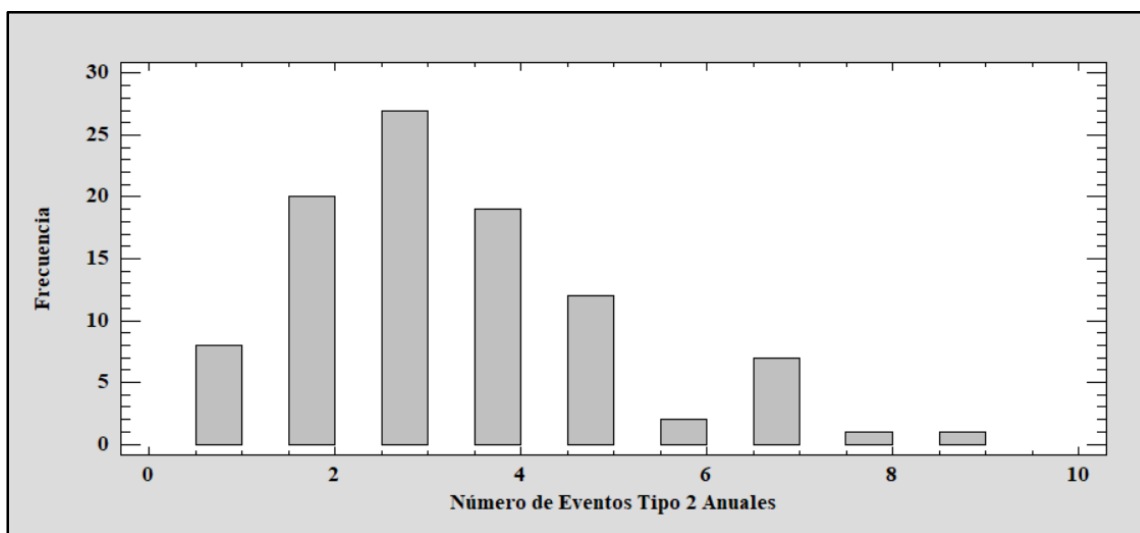


Fig. 20. Histograma de frecuencias de la evolución de DANAs (Tipo 2) en la península ibérica (1924-2023).
Elaboración propia.

Como hay tres años en los que no se detectó ninguna DANA que se reflejara en superficie únicamente con una isobara cerrada, el recuento es de 97, siendo el promedio anual igual a 3,54. Los datos obtenidos varían 1,71 respecto a la media, tal y como indica la desviación estándar, quedando el coeficiente de variación con un resultado poco fiable debido a que el sesgo estandarizado se encuentra por encima del rango situado entre -2 y 2, aunque la curtosis sí se mantiene en ese rango (Tabla 4).

| | |
|----------------------------------|--------|
| Recuento | 97 |
| Promedio | 3,54 |
| Desviación Estándar | 1,71 |
| Coefficiente de Variación | 48,48% |
| Mínimo | 1,0 |
| Máximo | 9,0 |
| Rango | 8,0 |
| Sesgo Estandarizado | 3,44 |
| Curtosis Estandarizada | 1,19 |

Tabla 4. Resumen estadístico de la evolución de DANAs (Tipo 2) en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Atendiendo al mayor grado de reflejo en superficie que se puede dar en estos fenómenos, es decir, teniendo en cuenta las DANAs que corresponden a borrascas frías aisladas y por tanto son visibles en los mapas de superficie formando varias isobaras cerradas con una disminución progresiva de presión hacia el centro, se observa la siguiente evolución para la serie histórica analizada (Fig. 21):

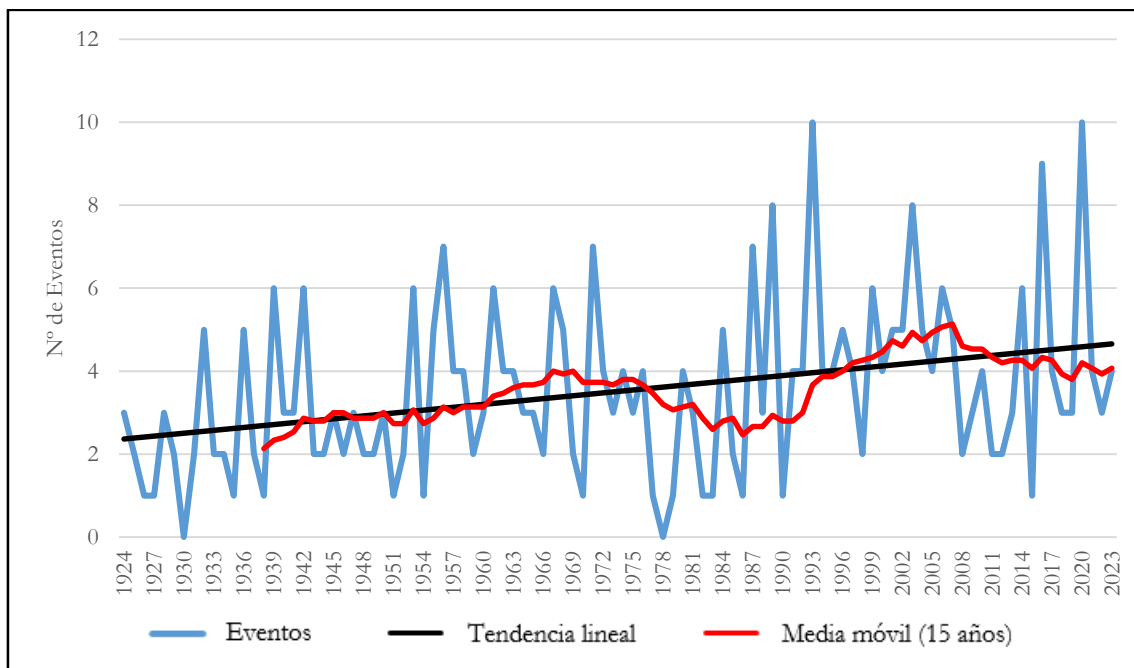


Fig. 21. Evolución anual de DANAs (Tipo 3) sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Al igual que en el resto, destaca una gran variabilidad entre un año y otro, aunque tal vez es especialmente amplia y marcada en este caso. Hay dos años en los que no se registró ninguna DANA con estas características, 1930 y 1978, y otros dos que conforman los máximos con 10 eventos de este tipo, 1993 y 2020. En cuanto a periodos de estabilidad en las observaciones cabe destacar la década de los 40.

| | |
|------------------|------------|
| Pendiente | 0,0219682 |
| Valor P | 0,00205019 |

En este caso, la pendiente indica una cierta tendencia al aumento de este tipo de DANAs con un valor aproximado de 0,022/año (0,22/década o 2,2/100 años). La **tendencia lineal mostrada sí es significativa** en la serie analizada, ya que el valor P es inferior a 0,05, pudiéndose constatar que la diferencia no es obra del azar. De esta manera, se puede afirmar que **existe una ligera tendencia al aumento de borrascas frías aisladas**.

Aunque, tal y como muestra el siguiente gráfico (Fig. 22), la curva polinómica en los últimos años es descendente (influida por ese *impasse* entre 2008 y 2015), si se abarcan los cien años, es sencillo intuir una tendencia continuada al aumento de este tipo de DANAs, con escasos valores extremos y repentinos que la distorsionen.

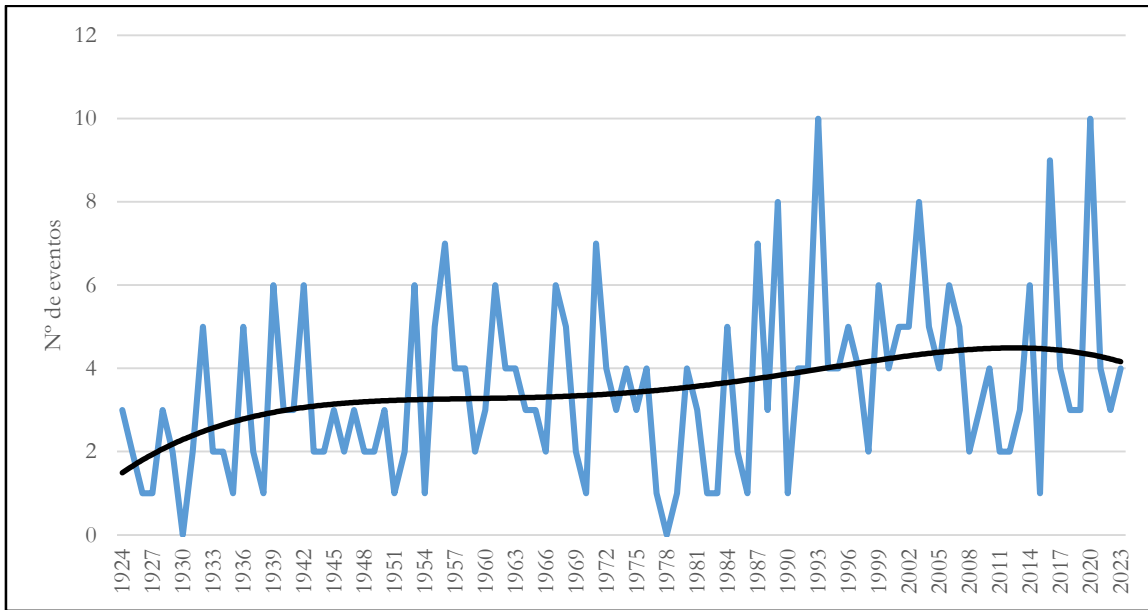


Fig. 22. Tendencia polinómica sobre la evolución de DANAs (Tipo 3) en la península ibérica (1924-2023).
Elaboración propia.

El gráfico de caja y bigotes afirma la existencia de escasos valores atípicos. Tan solo aparece uno alcanzado en los años 1993 y 2020, en los que hubo excepcionalmente más borrascas frías aisladas (10) respecto a la muestra analizada. La parte central de la misma, se sitúa entre los 2 y los 5 eventos y la mediana en 3 (Fig. 23).

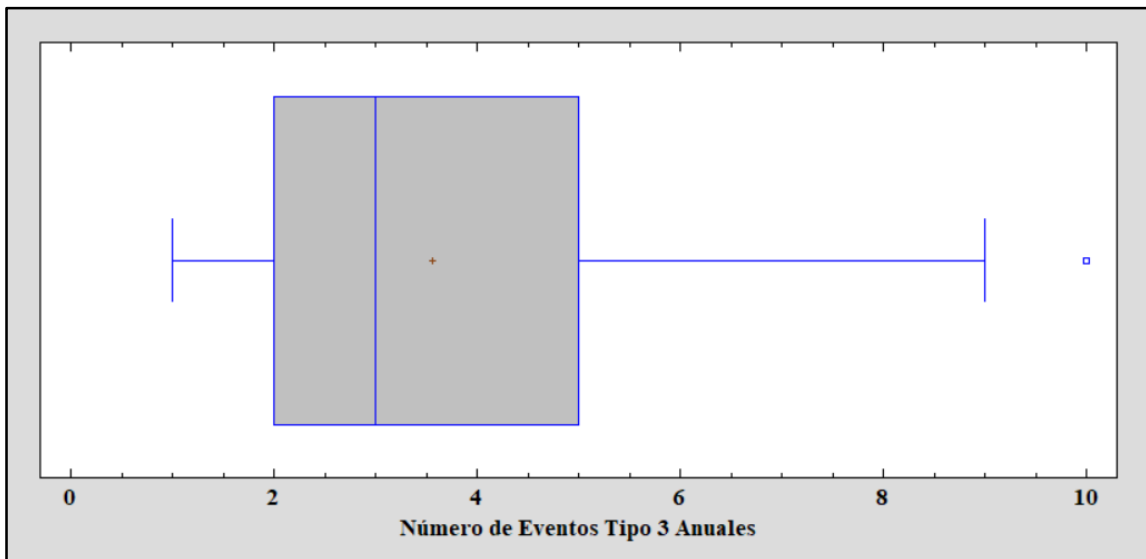


Fig. 23. Valores atípicos en la evolución de DANAs (Tipo 3) sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Además, tal y como se observa en la siguiente figura (Fig. 24), la mayoría de registros para este tipo de DANA se encuentra en los intervalos situados entre 1,75 y 4. Más allá de los 6 eventos anuales sería algo más inusual.

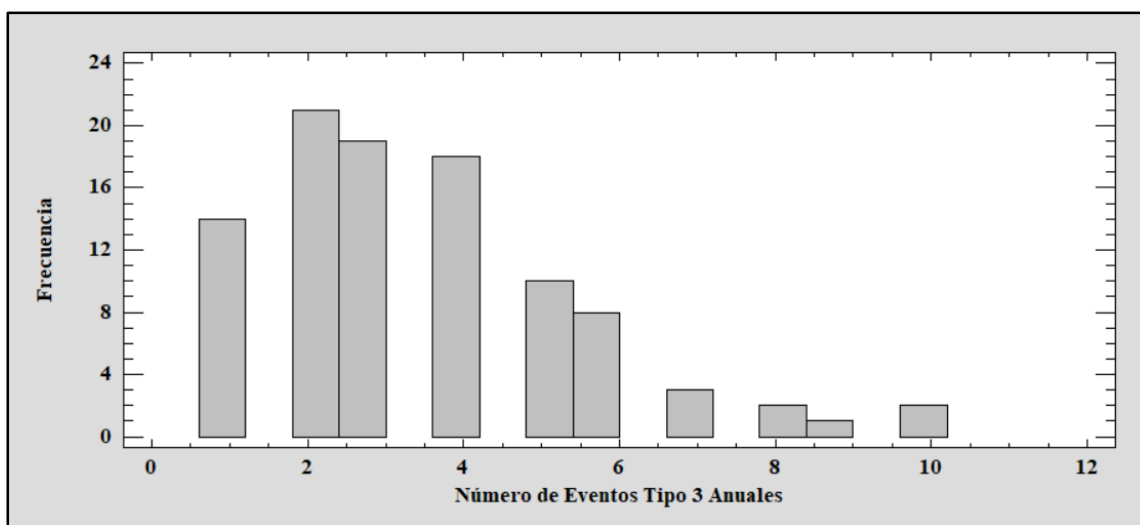


Fig. 24. Histograma de frecuencias de la evolución de DANAs (Tipo 3) en la península ibérica (1924-2023).
Elaboración propia.

El recuento estadístico está realizado sobre 98 DANAs tipo 3, ya que estas no se registraron en los años 1930 y 1978. Así, el promedio anual es de 3,58 existiendo una desviación de los datos respecto a la media igual a 2,05. El coeficiente de variación indicaría una dispersión alta; sin embargo, el sesgo estandarizado, al situarse fuera del rango comprendido entre -2 y 2, deja dicho resultado con poca fiabilidad (Tabla 5).

| | |
|----------------------------------|--------|
| Recuento | 98 |
| Promedio | 3,58 |
| Desviación Estándar | 2,05 |
| Coefficiente de Variación | 57,11% |
| Mínimo | 1,0 |
| Máximo | 10,0 |
| Rango | 9,0 |
| Sesgo Estandarizado | 3,97 |
| Curtosis Estandarizada | 1,96 |

Tabla 5. Resumen estadístico de la evolución de DANAs (Tipo 3) en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

El número total de DANAs registradas y analizadas entre 1924 y 2023 en la península ibérica es de 1489, de las cuales 795 no tuvieron reflejo en superficie (Tipo 1), 342 mostraron cierto reflejo mediante una isobara cerrada (Tipo 2) y 352 fueron visibles en los mapas de superficie conformando varias isobaras cerradas en forma de borrasca fría aislada (Tipo 3). Todo ello se traduce en la clara predominancia de las de tipo 1, por lo

que se puede constatar que en más de la mitad de las DANAs del último siglo no existe un reflejo isobárico en superficie, aunque eso no anula que puedan generar cambios de temperatura o viento, tal y como apuntan las actuales teorías en Meteorología (Fig. 25).

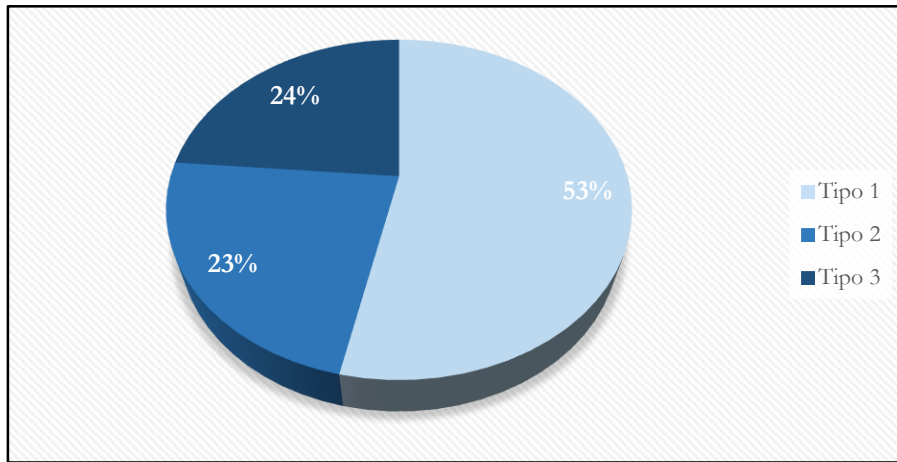


Fig. 25. Distribución de Tipologías de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

- **Localización de las DANAs en la península ibérica**

Una vez conocido el número de DANAs registrado sobre la península ibérica en el último siglo, es procedente conocer su situación sobre la misma, tomando el área de estudio y su zonificación descrita en la metodología.

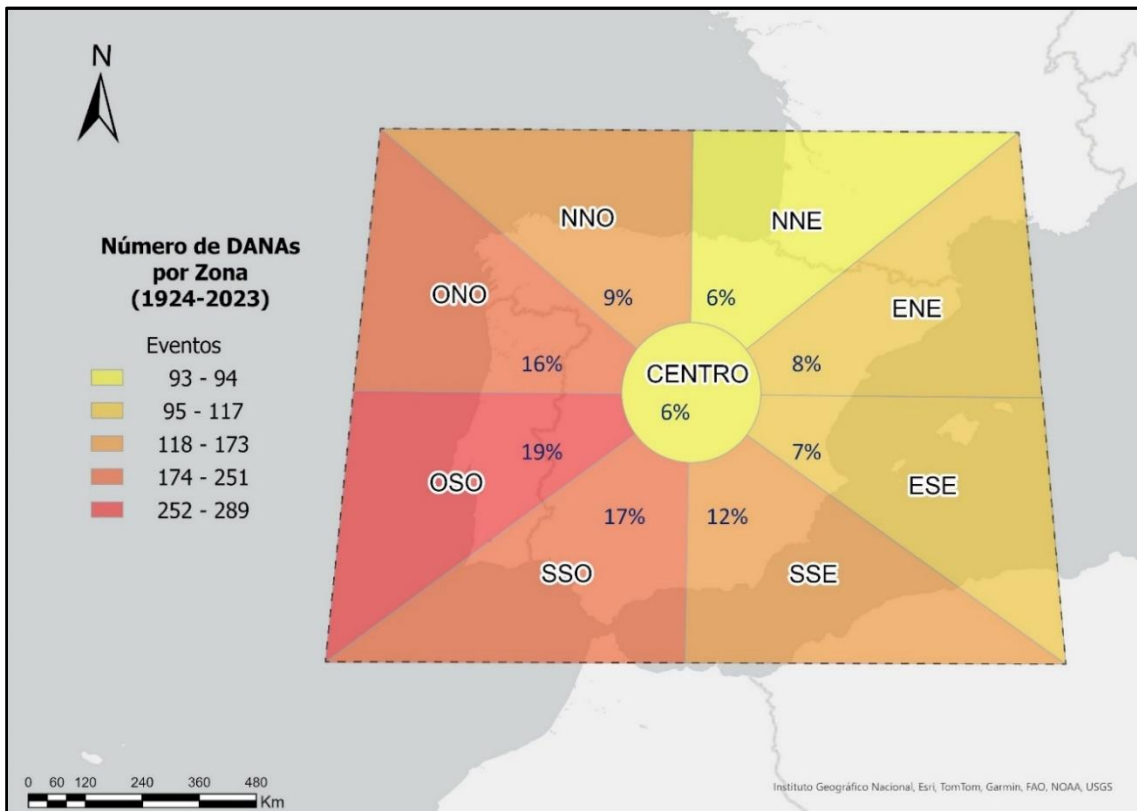


Fig. 26. Posición de las DANAs registradas entre 1924 y 2023 sobre el área de estudio. Elaboración propia.

El mapa (Fig. 26) muestra una clara diferencia en cuanto a la recurrencia de posicionamiento entre el este y el oeste de la península en este tipo de fenómenos, algo lógico teniendo en cuenta la dirección de la corriente en chorro (W-E), existiendo, por lo general, un patrón predominante de circulación del oeste en nuestras latitudes. Así, el cuadrante OSO es el que más observaciones de DANAs ha registrado, con un 19% del total; muy cerca, y compartiendo intervalo entre sí, se encuentran los sectores SSO y ONO. Por el contrario, los puntos en los que se han registrado menos posicionamientos de DANAs son los correspondientes al NNE y al centro peninsular. Aunque este último sector no sea lógicamente comparable con los demás al tener menor tamaño y, por tanto, la probabilidad de que se localice una depresión aislada sobre él es menor, sí permite conocer con mayor exactitud la relación entre estos fenómenos y dicha área de la península, fundamentalmente con la Comunidad de Madrid.

- **Recurrencia estacional de las DANAs entre 1924 y 2023**

Atendiendo a la división en estaciones meteorológicas ya mencionada en la metodología, se prueba que la mayoría de DANAs sobre la península ibérica tienen lugar en primavera (508 del total) seguida, en segundo lugar, del otoño, con un 29% que representa 436 eventos. Ambas estaciones predominan sobre el invierno y el verano, con 317 y 232 DANAs, respectivamente (Fig. 27).

Este resultado es, en cierta manera, similar al obtenido por Llasat Botija en su estudio de recurrencia elaborado entre 1974 y 1983, en el que la mayor parte de las DANAs fueron registradas en primavera con un 38%; sin embargo, el orden cambia desde ese punto, ya que el verano fue la segunda estación con más recurrencia para esos años con un 25%, seguido del otoño e invierno con un 19% y 17%, respectivamente (Llasat Botija, 1991). Esta comparación no arroja una conclusión que conduzca con claridad a determinar un posible cambio de estacionalidad en este tipo de fenómenos por dos factores: el corto período de tiempo abarcado por Llasat y el hecho de que este estudio se realizó tomando la definición de gota fría o DANAs tipo 1, es decir, que solo se tuvieron en cuenta aquellas presentes únicamente en altura.

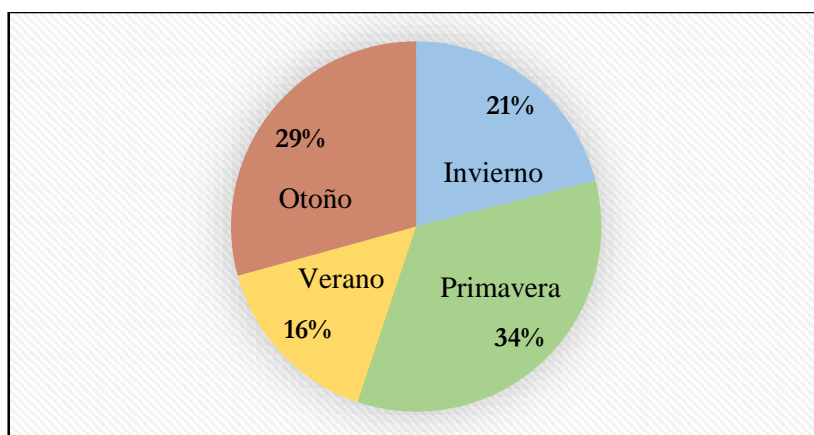


Fig. 27. Distribución de DANAs por estación del año en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Profundizando en la estacionalidad de estos fenómenos, se pueden desglosar los resultados por meses del año. Mayo y abril son los meses en los que se han registrado más DANAs en los últimos cien años, mientras que julio y agosto, casi empatados, conforman el mínimo de observaciones (Tabla 6).

| Mes | Nº DANAs |
|----------------------|-------------|
| Enero | 105 |
| Febrero | 88 |
| Marzo | 136 |
| Abril | 183 |
| Mayo | 187 |
| Junio | 117 |
| Julio | 58 |
| Agosto | 57 |
| Septiembre | 110 |
| Octubre | 166 |
| Noviembre | 158 |
| Diciembre | 124 |
| Total general | 1489 |

Tabla 6. Distribución mensual sobre el número total de DANAs registradas en la península ibérica (1924-2023).
Elaboración propia.

Es interesante combinar las tres variables de resultados hasta ahora presentadas en un único gráfico (Fig. 28):

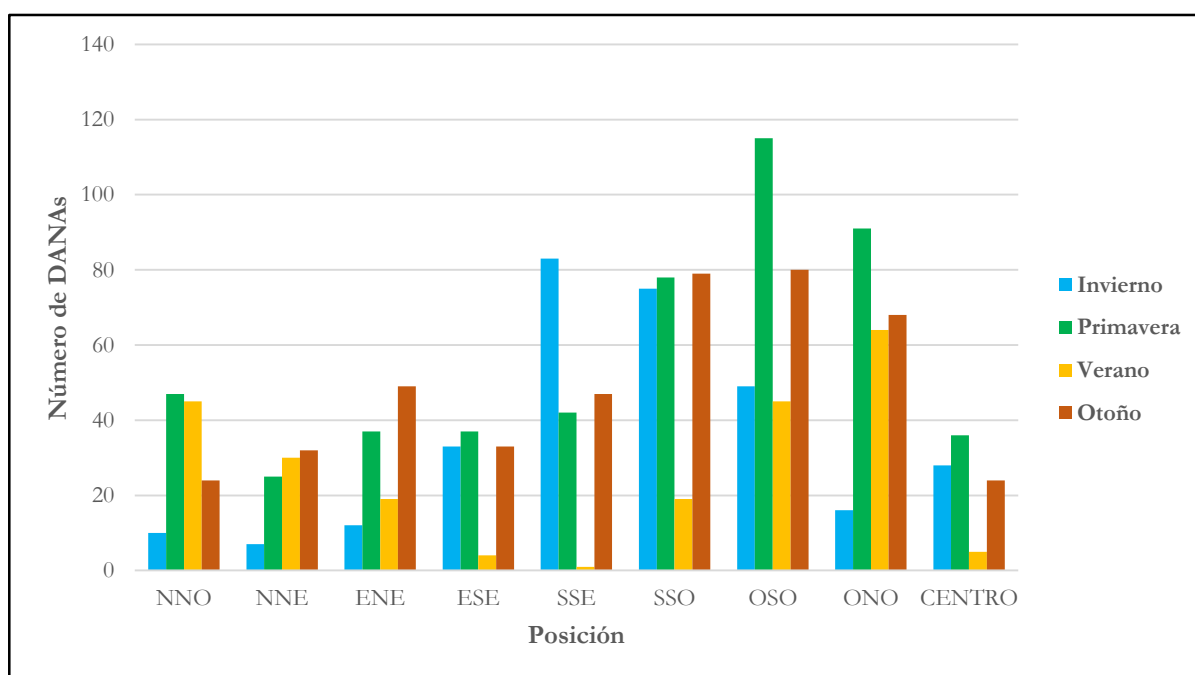


Fig. 28 Distribución estacional y posicional de los eventos de DANA en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Esta figura plantea un patrón relevante. El máximo de DANAs se alcanza en primavera en la gran mayoría de sectores situados en la mitad occidental de la península, salvando la excepción del cuadrante SSO, aunque la diferencia es mínima. Sin embargo, al este de la península, la estación con más DANAs suele ser el otoño, dominante en 2 de los 4 sectores de la zona oriental, a excepción del cuadrante ESE, en el que la primavera supera al otoño por muy poco, y el SSE, que presenta un resultado distinto a todas las demás posiciones, contabilizándose el mayor número de estos eventos en invierno. Finalmente, la zona centro muestra un resultado acorde al promedio, siendo la primavera la estación con más observaciones y el verano la que menos.

- **Duración de las DANAs: análisis de tendencia y relación con su localización**

Otra de las variables fundamentales a analizar en el estudio de recurrencia es la duración. Para ello, se ha seguido una estructura similar a la presentada para el número de DANAs, obviando, en este caso, la diferenciación en tipos de este fenómeno, ya que no se considera que, en este aspecto, el cambio de denominación de gota fría a DANA conduzca a posibles resultados diferentes o conflictos entre los mismos.

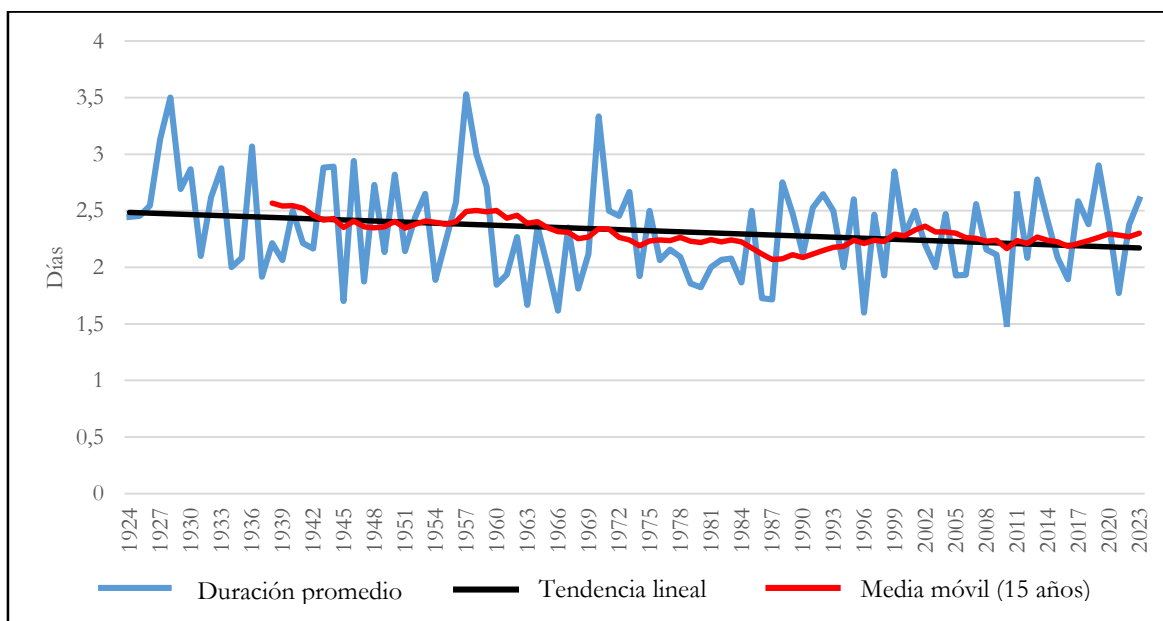


Fig. 29. Evolución del promedio anual de duración de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

El gráfico (Fig. 29) muestra la evolución del promedio de duración anual de DANAs en días. De manera clara, se observa que la muestra oscila entre los 1,5 días como mínimo (alcanzado en 2010) y algo más de los 3,5 días como media registrados en 1957 como máximo. Asimismo, existen bastantes oscilaciones de no mucha amplitud a lo largo de toda la serie. Cabe mencionar la existencia de dos “valles” en los que la duración fue algo menor a la habitual, localizados en la década de los 60 y desde 1975 a 1985 aproximadamente, siendo este último más claro que el primero de los valles mencionados.

| | |
|------------------|-------------|
| Pendiente | -0,00313863 |
| Valor P | 0,0316872 |

La pendiente obtenida en la tendencia lineal indica una ligera predisposición a la disminución del promedio de duración con un valor aproximado de -0,0031 días al año, (-0,03/década o -0,3/100 años). Dado que el valor P es inferior a 0,05, el resultado sí es significativo, pudiéndose constatar que **hay una muy ligera tendencia a la disminución de la duración temporal de este tipo de fenómenos.**

Dicha disminución en el promedio de días de duración es observable claramente en gran parte de la línea de tendencia polinómica mostrada a continuación, que plantea un sentido descendente hasta finales de los años noventa. Desde entonces, el resultado es algo más confuso, existiendo igualmente variación, al cambiar ligeramente el sentido de la curva, influida probablemente por el resultado al alza del último año de la serie y por el valor de 2019, un poco por encima de lo alcanzado en años precedentes (Fig. 30).

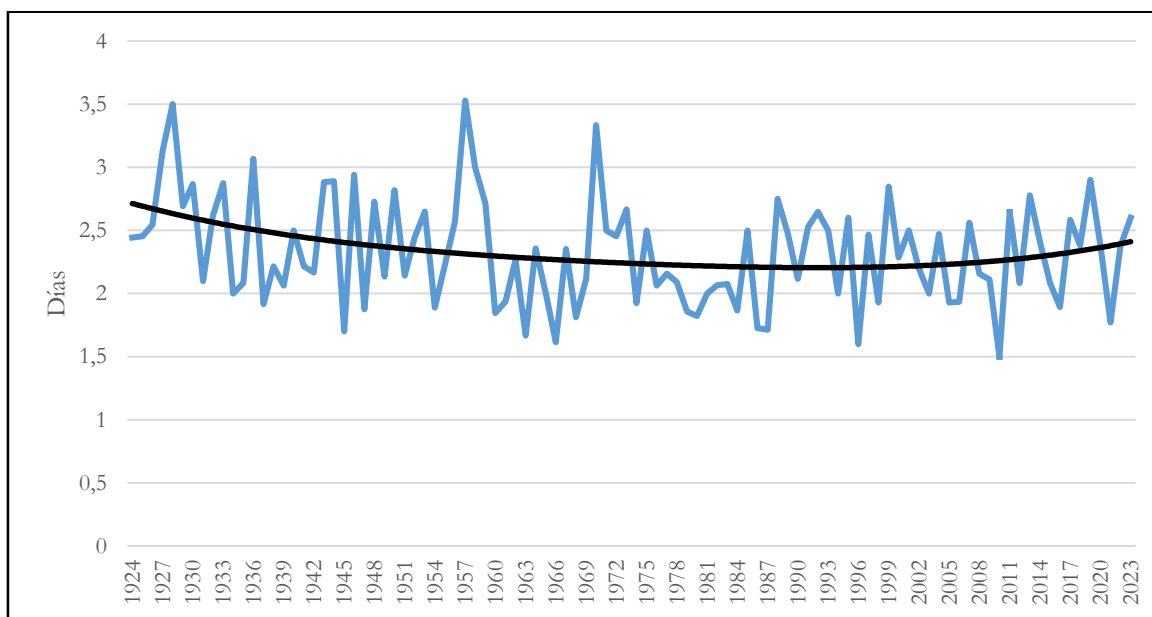


Fig. 30. Tendencia polinómica sobre la duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023).
Elaboración propia.

En toda la muestra analizada, tan solo se detecta un valor atípico en cuanto a duración. Este corresponde a los 3,53 días de promedio alcanzados en 1957, tal y como se observa en el gráfico de caja y bigotes. La parte central de la muestra se encuentra entre los 2 y los 2,6 días de duración aproximadamente, siendo la mediana igual a 2,32 (Fig. 31).

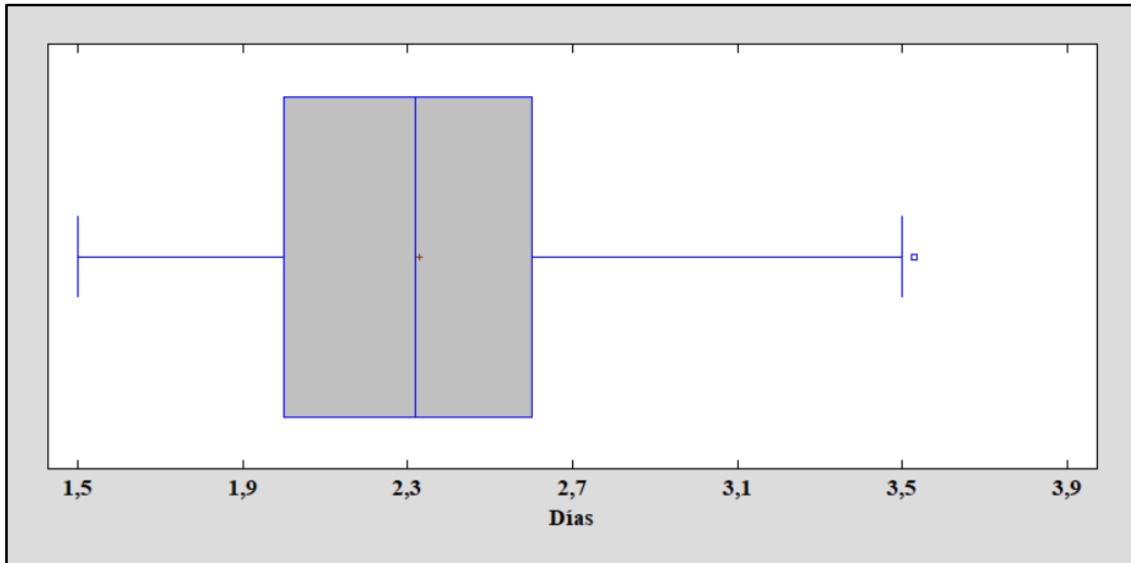


Fig. 31. Valores atípicos sobre la duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Por otro lado, tal y como se observa en el siguiente histograma (Fig. 32), la mayor parte de la muestra se sitúa en los intervalos conformados entre 1,9 y 2,7 días de duración, siendo bastante excepcionales aquellos años en los que el promedio descendió por debajo de 1,7 o que aumentó por encima de los 2,9 días.

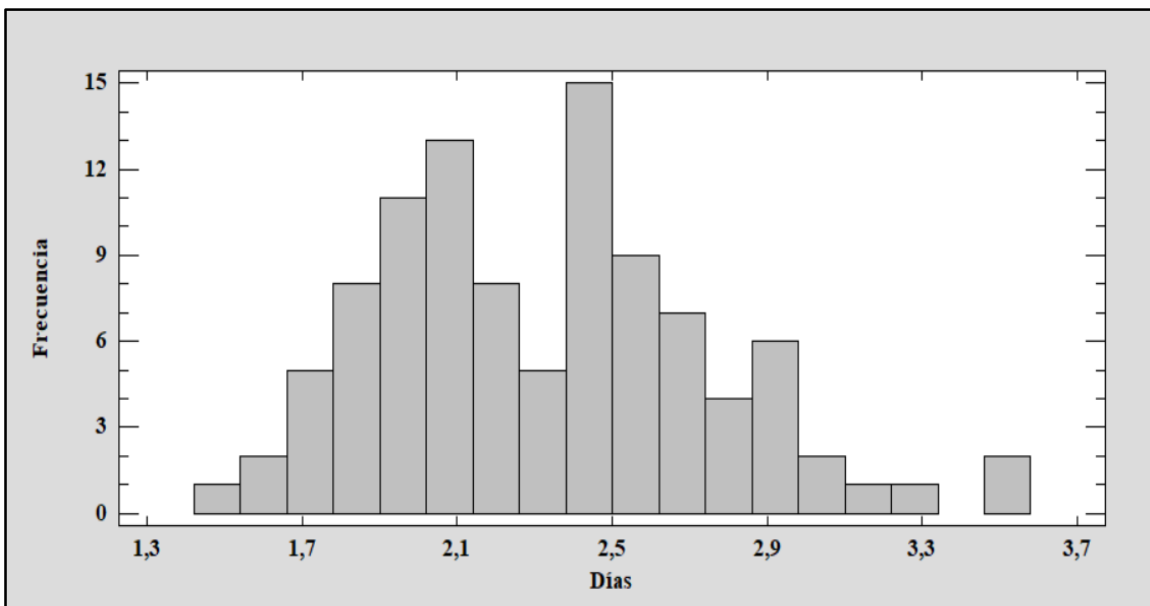


Fig. 32. Histograma de frecuencias de la duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

A modo de resumen estadístico sobre la variable de duración, es importante señalar que el promedio para toda la serie es de 2,32 días, siendo la desviación respecto a la media igual a 0,42. Por otro lado el coeficiente de variación refleja una variabilidad moderada de los datos, resultado que se puede interpretar como fiable, ya que tanto el sesgo

estandarizado como la curtosis estandarizada se encuentran en el rango establecido entre -2 y 2 (Tabla 7).

| | |
|----------------------------------|--------|
| Recuento | 100 |
| Promedio | 2,32 |
| Desviación Estándar | 0,42 |
| Coefficiente de Variación | 18,18% |
| Mínimo | 1,5 |
| Máximo | 3,53 |
| Rango | 2,03 |
| Sesgo Estandarizado | 1,89 |
| Curtosis Estandarizada | -0,02 |

Tabla 7. Resumen estadístico de la duración de DANAs en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

Se considera procedente relacionar la duración con otras variables anteriormente comentadas. Por ejemplo, si tomamos la duración promedio en relación a la posición de DANAs dentro del área de estudio, se obtiene que estos fenómenos tienen su máxima permanencia en el centro peninsular, seguido de los sectores situados al suroeste, mientras que los cuadrantes NNO y ENE registran la menor duración promedio, apenas alcanzando los 2 días (Fig. 33).

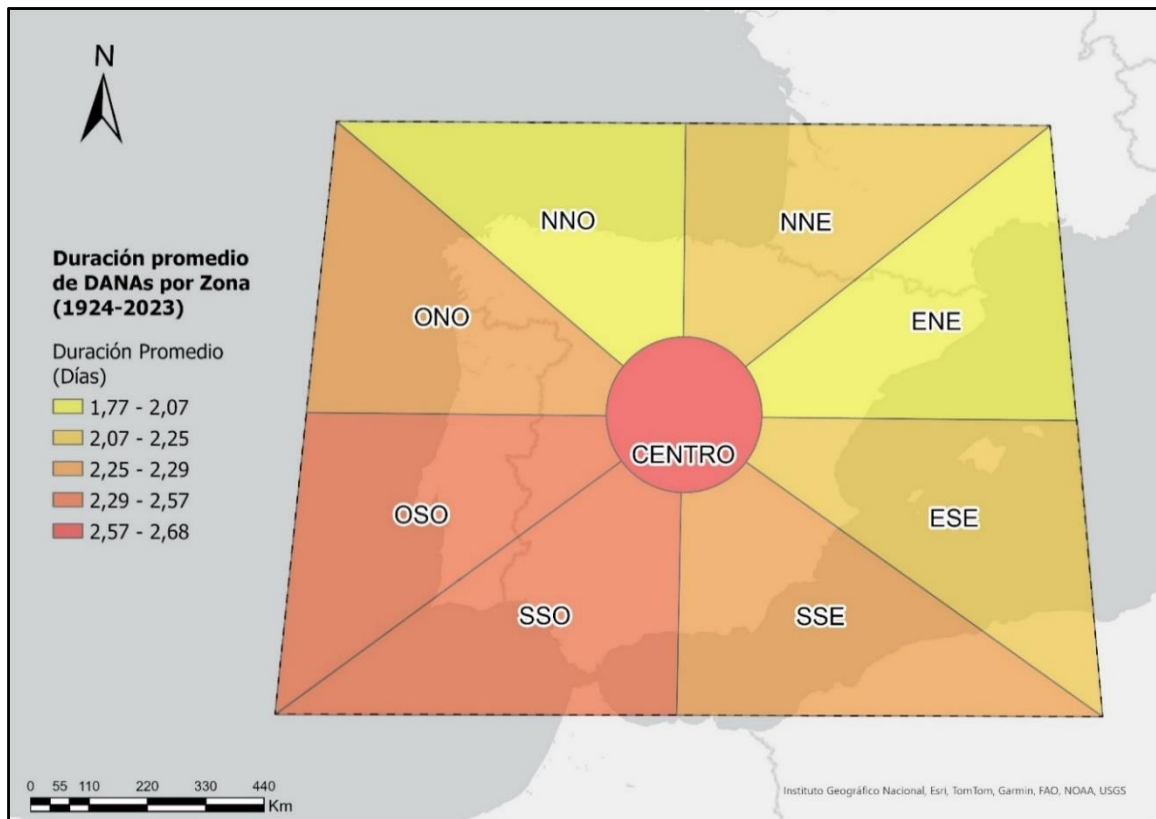


Fig. 33. Duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023) por zona. Elaboración propia.

En cuanto a la correspondencia entre la duración y la estacionalidad, se puede concretar que las DANAs tienen una mayor permanencia durante el otoño, seguidas de la primavera y verano con resultados muy similares. El invierno es, por tanto, la estación del año en la que estos fenómenos presentan menor duración (Fig. 34).

El hecho de que las DANAs duren más días en otoño y que en esta estación se localicen en el este peninsular mayoritariamente, tal y como se ha señalado anteriormente, podría reforzar la lista de causas (temperatura del mar, orografía...) por los que esta región suele ser la más castigada por inundaciones generadas a partir de estos fenómenos, ya que una DANA prolongada puede aumentar la cantidad de lluvia acumulada.

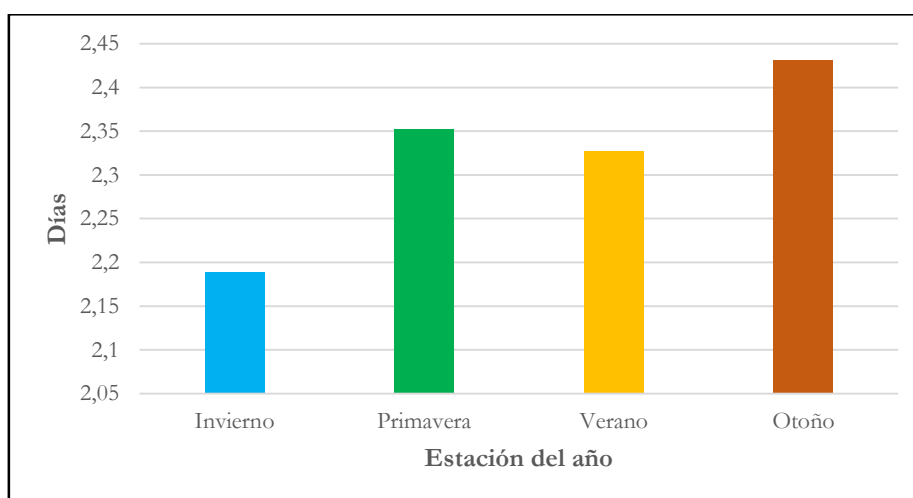


Figura. 34. Duración promedio de las DANAs en la península ibérica (1924-2023) por estación del año meteorológica. Elaboración propia.

Si se profundiza en la relación comentada entre posición, duración promedio y estación del año, se obtiene que, en todos los sectores orientales, la permanencia es mayor durante el otoño, coincidiendo, por tanto, el máximo de duración y de recurrencia (número de DANAs) en esta estación sobre el este peninsular (Fig. 35). Esto refuerza la explicación de que este resultado sea una de las causas (unida a otras muchas) por las que esta región es la más castigada por inundaciones provocadas a partir de este tipo de situaciones sinópticas. Se dan, en definitiva, muchos de los ingredientes necesarios durante el otoño: mayor duración, mayor recurrencia y un máximo de temperatura de la superficie del mar Mediterráneo, lo que acentúa la diferencia térmica entre masas de aire al aparecer una DANA, favoreciendo la generación de importantes precipitaciones. La orografía, conformada por cadenas montañosas paralelas a la costa y los vientos de levante, hace el resto. A todo ello hay que añadir que, otra de las posiciones (fuera del este) en la que se podría favorecer precipitaciones en esta zona de la península, la SSO, también tiene su máximo de duración en otoño.

Por otro lado, en el resto de sectores, la máxima permanencia se alcanza en verano, siendo más destacada la diferencia en el centro peninsular, donde se superan hasta los 3 días.

Como excepción se encuentra la situación en el cuadrante NNO, donde la mayor duración de estos fenómenos, es, por poco, en primavera.

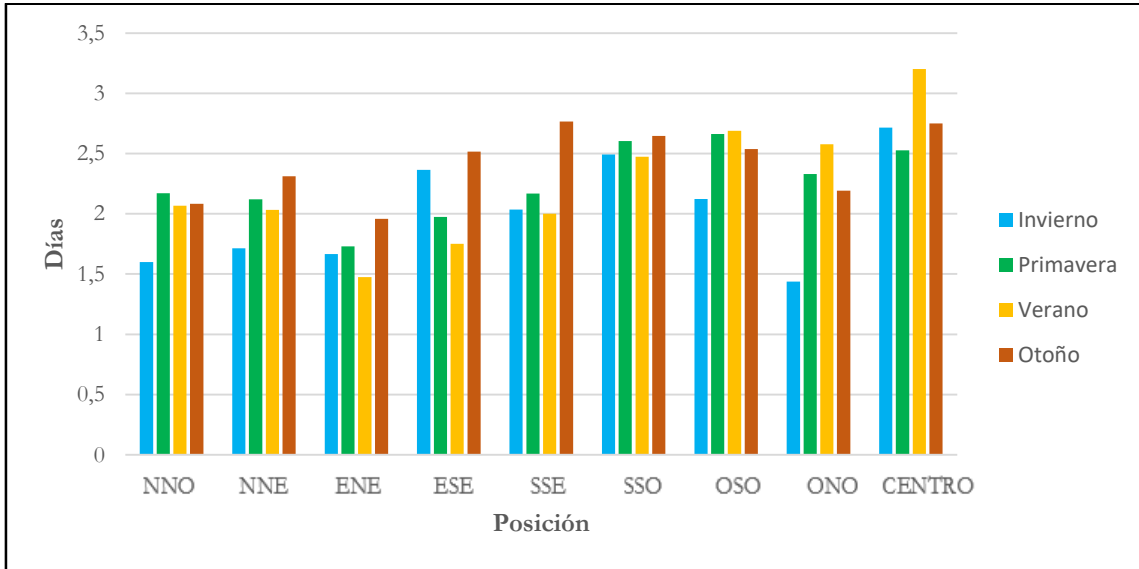


Figura 35. Duración promedio de DANAs en la península ibérica (1924-2023) en relación con la posición y estación del año meteorológica. Elaboración propia.

- **Masa de aire de origen de las DANAs entre 1924-2023**

En el siguiente gráfico (Fig. 36) se muestran los resultados obtenidos en el análisis de la variable masas de aire para toda la serie histórica:

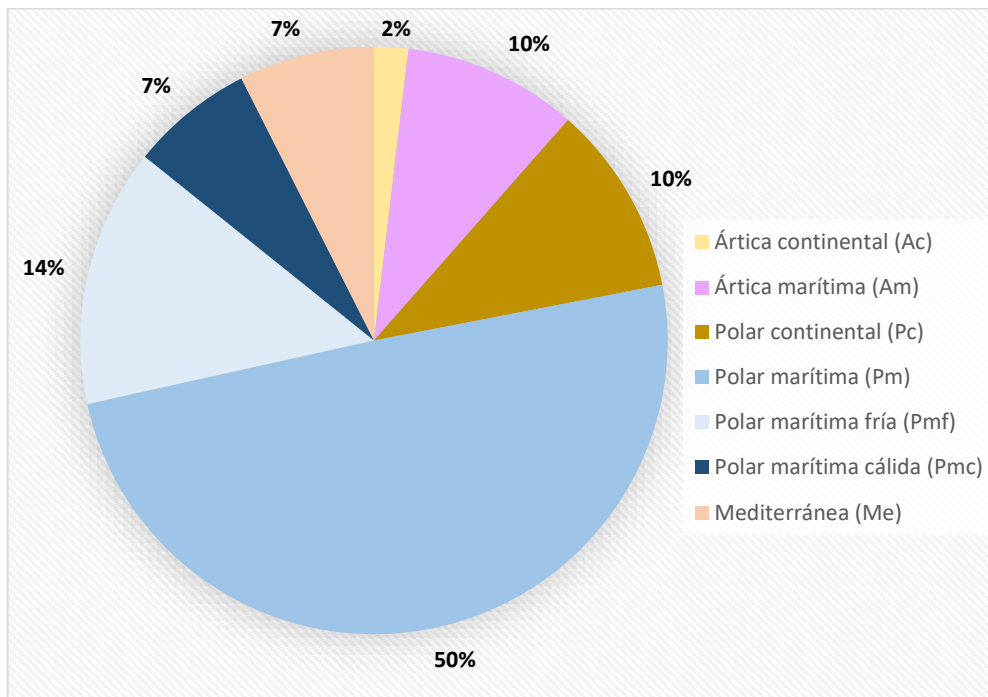


Fig. 36. Masa de aire de origen de las DANAs registradas en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

La masa polar marítima es claramente predominante sobre todas las demás, ya que la mitad de las DANAs registradas tuvieron esa masa de aire como origen, algo lógico ya que suele ser de por sí la más recurrente sobre la península ibérica en cualquier situación. En contraposición, la ártica continental apunta el menor porcentaje de influencia (con tan solo 28 eventos de los 1489 contabilizados) si bien no suele ser frecuente que la península reciba este tipo de masa de aire. Finalmente, al tener las DANAs su origen en la corriente en chorro polar, no se ha registrado la correspondencia con ningún tipo de masa de aire tropical como origen para estos fenómenos.

- **Altura geopotencial a 500 hPa en las DANAs entre 1924-2023: análisis de tendencia**

Partiendo de la consideración de que la altura geopotencial “normal” a 500 hPa es de 5500 metros (Martín Vide, 2022), la evolución registrada a lo largo del periodo estudiado refleja, según la tendencia lineal calculada, lo que parece una propensión progresiva al ascenso. Los datos del gráfico (Fig. 37) muestran variaciones continuas de no demasiada amplitud, algo que se acentúa en las décadas de los 70 y 80, en las que se alcanza el registro máximo con 5664, 61 metros como promedio anual en 1983. El mínimo corresponde al año 1928, muy al principio de la serie, con 5480 metros. Por otro lado, el valor medio obtenido para esta variable en relación a episodios de DANA en el último siglo es igual a 5560,5 metros.

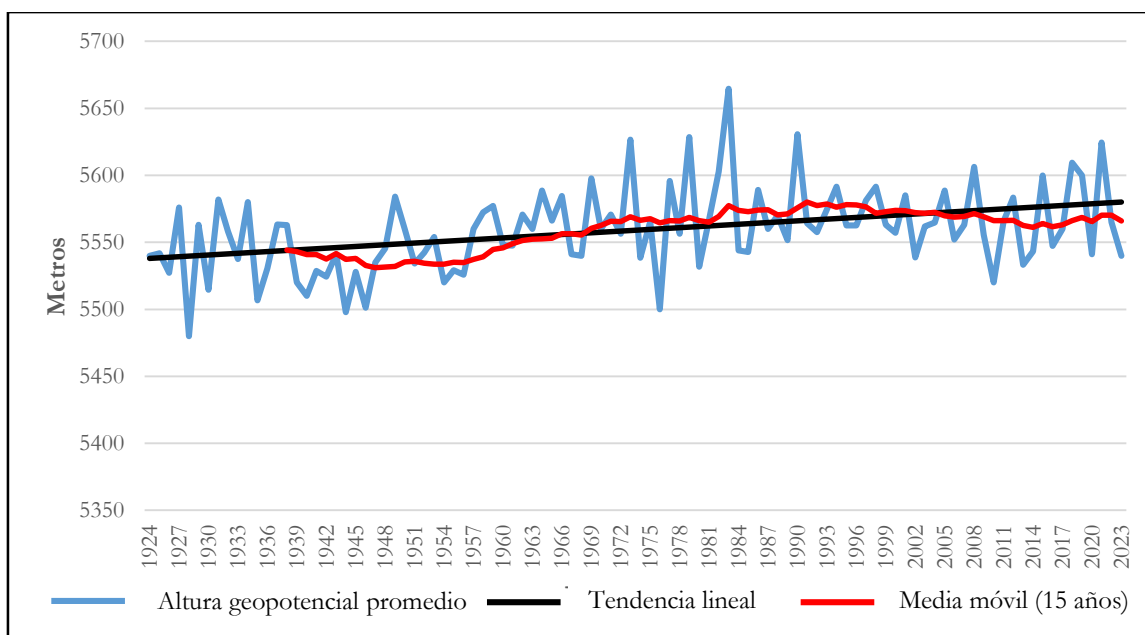


Fig. 37. Evolución de la altura geopotencial a 500 hPa en relación a la recurrencia de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

La línea de media móvil permite visualizar fácilmente la tendencia al alza desde la década de los 30 hasta principios del siglo XXI, desde entonces la curva decae ligeramente para posteriormente estabilizarse en los últimos años analizados.

| | |
|------------------|--------------|
| Pendiente | 0,423528 |
| Valor P | 0,0000529768 |

La pendiente correspondiente a la tendencia lineal indica una cierta propensión al aumento del promedio anual de la altura geopotencial a 500 hPa relacionada con episodios de DANAs con un valor aproximado de 0,424 metros al año, (4,24/década o 42,4/100 años. Como el valor P es inferior a 0,05, se puede afirmar que **la tendencia al aumento es significativa**.

De por sí, la altura geopotencial en altura alcanza su máximo en los meses de verano en nuestras latitudes, descendiendo en el resto del año según van tomando mayor protagonismo las masas polares.

En el caso de las DANAs sucede exactamente lo mismo: la altura geopotencial a 500 hPa máxima se alcanza en el mes de julio, descendiendo progresivamente hasta el mes de abril, en el que registra su mínimo (Fig. 38).

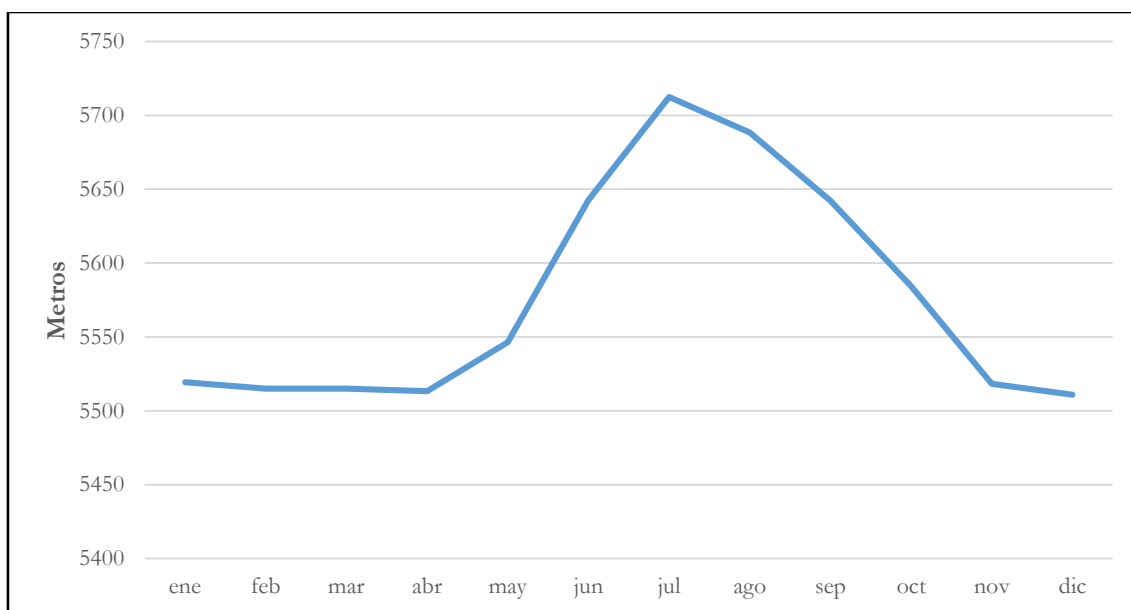


Fig. 38. Evolución mensual del promedio de altura geopotencial a 500 hPa en las DANAs registradas en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

- **Presión en superficie en las DANAs entre 1924-2023: análisis de tendencia**

Desde la definición de gota fría se apunta a que la presión en superficie suele corresponder en estos fenómenos con un campo bórico poco definido. Sin embargo, la evolución del concepto a DANA, incluyendo, por ejemplo, borrascas frías aisladas, en las que el campo bórico está claramente definido, podría mostrar un resultado contrario al establecido en un principio. Pese a ello, el promedio de presión en superficie obtenido tras el análisis de toda la serie histórica es igual a 1011,22 hPa, coincidiendo con un campo bórico poco

definido, lo que permite afirmar, por tanto, que el cambio de denominación no ha significado un resultado diferente en este aspecto. Esto es algo lógico si se tiene en cuenta que el 50% de las DANAs registradas son de tipo 1, es decir, solo visibles en altura, siguiendo el significado de gota fría.

Por otro lado, la evolución de la presión en superficie promedio en el último siglo en relación a estos fenómenos presenta variaciones y oscilaciones algo más pronunciadas que en el caso de la altura geopotencial. El valor promedio mínimo es de 1005 hPa, correspondiente al año 1945, mientras que el máximo es igual a 1015,7 alcanzado en 1990. Llama la atención un período de bastante estabilidad desde mediados de los 90 hasta 2006, volviendo a ser bastante variable en los últimos años de la serie (Fig. 39).

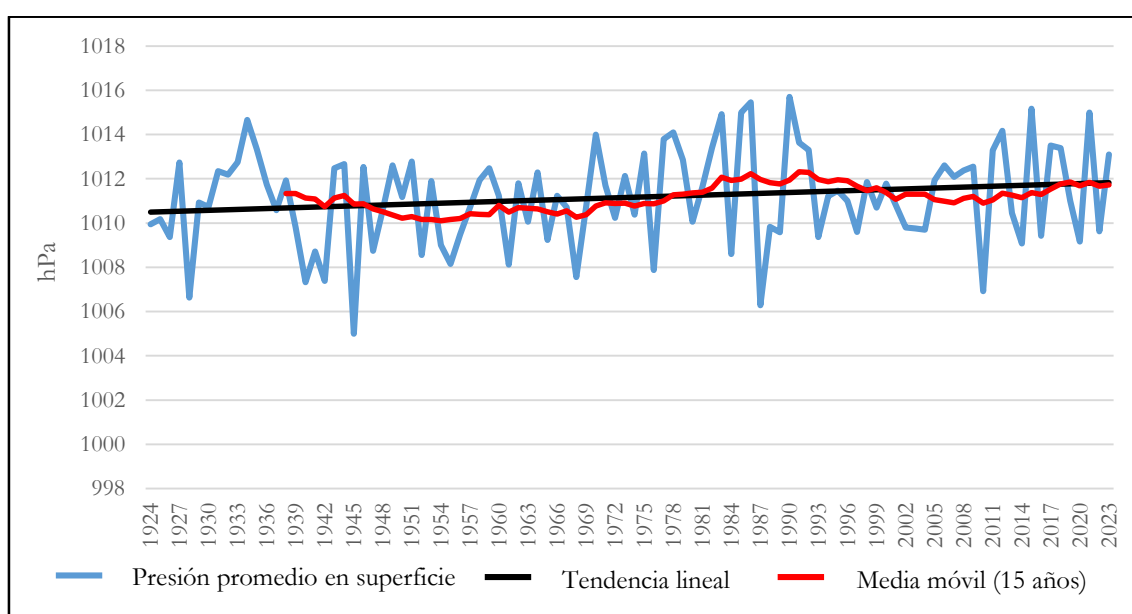


Fig. 39. Evolución del promedio anual de presión en superficie en relación a la recurrencia de DANAs sobre la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

La pendiente obtenida en la tendencia lineal indica una ligera propensión al aumento del promedio anual de la presión en superficie en hPa relacionada con episodios de DANAs con un valor aproximado de 0,013 hPa al año, (0,13/década o 1,3/100 años). Dicha tendencia, sin embargo, **no es significativa estadísticamente**, ya que el valor P es superior a 0,05, no pudiéndose afirmar que dicha diferencia no se deba al azar, por bastante poco, pero lo suficiente como para rechazar, hasta el momento, la existencia de una tendencia al alza en cuanto a esta variable.

| | |
|------------------|-----------|
| Pendiente | 0,0134161 |
| Valor P | 0,0763853 |

Finalmente, de manera genérica, al igual que la altura geopotencial, la presión promedio en superficie también varía en función de la época del año, registrándose por lo general menor presión en primavera y otoño, estaciones en las que hay mayor recurrencia de borrascas y lluvias sobre la Península. Por el contrario, en invierno y verano suele predominar un tiempo principalmente anticiclónico, siendo la presión en superficie mayor.

En relación con las DANAs, se cumple dicho patrón a la perfección, registrándose dos valles en primavera y otoño y dos crestas correspondientes al verano e invierno. El mínimo de presión superficial en relación con estos fenómenos se alcanza en mayo con 1008 hPa, mientras que el máximo recae sobre enero con 1017 hPa (Fig. 40).

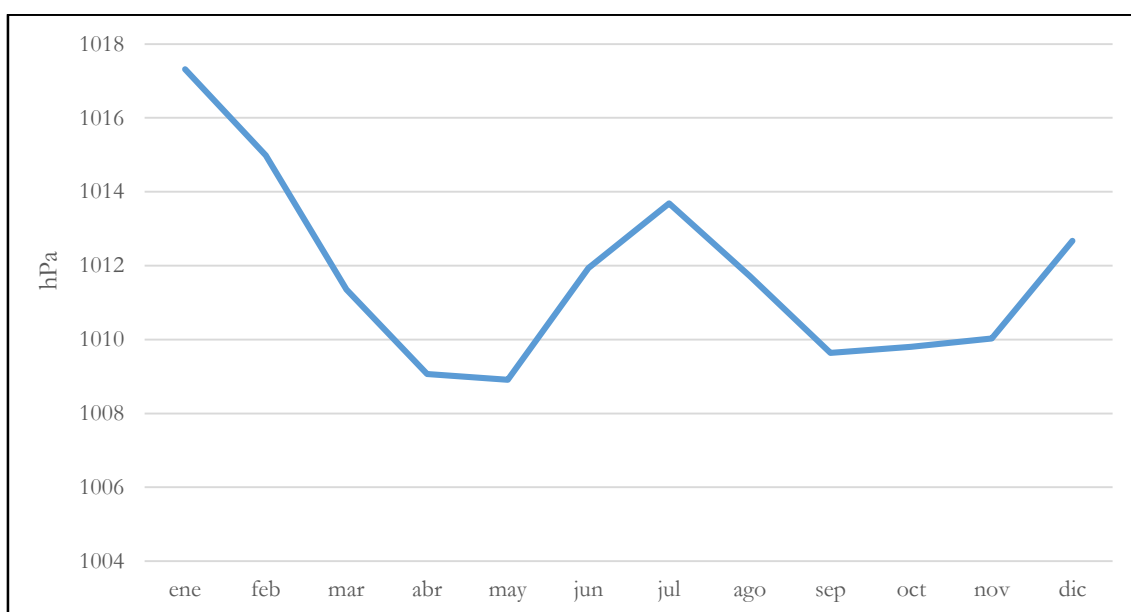


Fig. 40. Evolución mensual del promedio de presión en superficie en las DANAs registradas en la península ibérica (1924-2023). Elaboración propia.

- **Tablas comparativas por periodos CLINO y cuartos de siglo.**

A modo de conclusión del apartado de resultados, se considera procedente presentar una recopilación de los eventos meteorológicos analizados a través de tablas temporales comparativas que permitan una visión en conjunto de los datos obtenidos.

La primera tabla muestra una división temporal siguiendo el criterio de normales climatológicas establecido por la OMM. Este hace referencia al período más reciente de 30 años que finaliza en un año terminado en 0. De esta manera, en toda la serie histórica comprendida se encuentran tres de ellos: 1931-1960, 1961-1990 y 1991 a 2020 (Tabla 8). Como este sistema no permite abarcar la totalidad de los cien años estudiados, se ha decidido complementar con una segunda tabla dividida en cuatro periodos de 25 años cada uno, analizando las mismas variables (Tabla 9).

| PERIODOS CLINO | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| Variables | 1931-1960 | 1961-1990 | 1991-2020 |
| Nº Eventos | 433 | 457 | 460 |
| Invierno | 94 | 89 | 101 |
| Primavera | 152 | 150 | 155 |
| Verano | 54 | 85 | 72 |
| Otoño | 133 | 133 | 132 |
| Duración en días promedio | 2,47 | 2,18 | 2,3 |
| Invierno | 2,32 | 2,01 | 2,15 |
| Primavera | 2,53 | 2,24 | 2,28 |
| Verano | 2,44 | 2,18 | 2,47 |
| Otoño | 2,52 | 2,24 | 2,34 |
| Posición dominante | OSO | SSO | OSO |
| Masa de aire dominante | Pm | Pm | Pm |
| Presión promedio en superficie (hPa) | 1010,99 | 1011,33 | 1011,34 |
| Altura Geopotencial promedio (500hPa) | 5543,93 | 5569,98 | 5568,26 |

Tabla 8. Comparativa de datos según periodos CLINO. Elaboración propia.

En cuanto a número de eventos, se observa un aumento, más pronunciado entre el primer y segundo periodo que entre este y el último, en el que la diferencia es escasa. Si se profundiza tomando además datos de estacionalidad, no se puede establecer ninguna otra tendencia clara. En verano sí que difieren más los registros entre periodos en comparación con el resto de estaciones del año.

La duración en días promedio muestra un descenso entre el primer y segundo periodo, remontando en el tercero de ellos. Sucede de la misma manera siguiendo los datos en función de la estación del año.

La posición dominante varía en el período comprendido entre 1961 y 1990, correspondiendo al sector SSO, mientras que, en el resto, la mayor parte de las DANAs se situaron sobre el OSO.

Respecto a la masa de aire, la polar marítima es claramente dominante en cualquiera de los tres periodos analizados.

Por otro lado, la presión en superficie sí muestra una tendencia muy ligera al alza, algo que también sucede con la altura geopotencial, solo que en el último período el valor desciende ligeramente.

| PERIODOS | | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Variables | 1924-1948 | 1949-1973 | 1974-1998 | 1999-2023 |
| Nº Eventos | 345 | 390 | 377 | 377 |
| Invierno | 73 | 82 | 75 | 83 |
| Primavera | 120 | 125 | 127 | 136 |
| Verano | 45 | 56 | 78 | 53 |
| Otoño | 107 | 127 | 97 | 105 |
| Duración en días promedio | 2,5 | 2,4 | 2,2 | 2,3 |
| Invierno | 2,5 | 2,2 | 2,1 | 2,1 |
| Primavera | 2,5 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| Verano | 2,4 | 2,3 | 2,4 | 2,3 |
| Otoño | 2,6 | 2,6 | 2,1 | 2,4 |
| Posición dominante | OSO | SSO | OSO y ONO | OSO |
| Masa de aire dominante | Pm | Pm | Pm | Pm |
| Presión promedio en superficie (hPa) | 1010,8 | 1010,9 | 1011,7 | 1011,5 |
| Altura Geopotencial promedio (500hPa) | 5538,1 | 5561,5 | 5571,3 | 5569,2 |

Tabla 9. Comparativa de datos para el periodo analizado (1924-2023).

Si se toma una comparativa teniendo en cuenta el total de la serie histórica, los resultados obtenidos se ajustan más a la realidad (Tabla 9).

De esta manera, en cuanto al número de DANAs, no se puede afirmar la existencia de una tendencia positiva o negativa en el último siglo, tal y como apuntan los resultados desglosados de esta variable presentados anteriormente. Aparte, llama la atención el progresivo aumento de este tipo de eventos durante la primavera, algo que hasta ahora no se había constatado en la presentación de resultados. Sin embargo, si se halla el valor P del cómputo total de la tendencia lineal de DANAs en primavera, esa propensión al aumento no se considera, hasta ahora, significativa. En el resto de las estaciones, no se puede establecer una tendencia clara.

Respecto a la duración promedio, se observa en términos generales una tendencia ligera al descenso, exceptuando el periodo 1999-2023. Esto también coincide y refuerza el resultado mostrado con anterioridad respecto a esta variable. El desglose por estaciones del año muestra resultados similares al total: tendencia a la baja hasta el tercer periodo y un ligero ascenso en el último. Si acaso, el invierno sí parece apuntar a una tendencia a la baja un poco más clara, mientras que el verano se muestra bastante variable en este aspecto.

La posición dominante de las DANAs analizadas desde 1924 ha ido variado, prevaleciendo su localización en el sector OSO en tres de los cuatro periodos, empatada técnicamente en observaciones con el cuadrante ONO en el correspondiente a 1974-1998. La excepción en esta variable se encuentra en el segundo periodo, en el que la posición mayoritaria fue la SSO.

La masa de aire polar marítima refuerza aún más su resultado como masa de aire predominante en este tipo de fenómenos.

En cuanto a la presión en superficie y altura geopotencial, se hallan evoluciones totalmente similares: crecientes hasta el tercer periodo (más contundente en la segunda variable mencionada) y ligeramente decreciente en el último.

Finalmente, echando la vista atrás a los resultados mostrados en esta tabla y sus variaciones, cabría destacar que algunas de las tendencias encontradas parecen mostrar un punto de inflexión en el último periodo analizado, algo que resulta significativo e interesante. Por tanto, desde 1999, se rompe ligeramente la tendencia al descenso en cuanto a la duración promedio al igual que con la propensión al ascenso referida a la presión en superficie y la altura geopotencial.

3.2. Impacto en inundaciones en la Comunidad de Madrid. Ejemplos de casos y consecuencias

Resulta inevitable, para la población en general, relacionar la palabra DANA con inundaciones o situaciones catastróficas, tal y como se ha comentado anteriormente. Sin embargo, parece quedar patente que de las 1489 DANAs registradas, afortunadamente solo unas pocas se han traducido en eventos de este tipo sobre el territorio español, ya que el número de inundaciones es menor al promedio anual de 14,89 DANAs ya reseñado.

Queda comprender la relación existente entre este tipo de situaciones sinópticas y las inundaciones que han tenido lugar en la Comunidad de Madrid durante el mismo periodo de estudio. Para ello, y mediante la consulta de las fuentes bibliográficas citadas en la metodología, se han obtenido un total de 62 eventos de inundaciones significativas en la Comunidad de Madrid entre 1924 y 2023, de los cuales, tan solo 22 han estado previsiblemente provocadas por DANAs, lo que equivale a un 35% del total, según muestra el siguiente gráfico (Fig. 41). El porcentaje obtenido indicaría una influencia baja-moderada por parte de las DANAs en inundaciones en la Comunidad de Madrid.

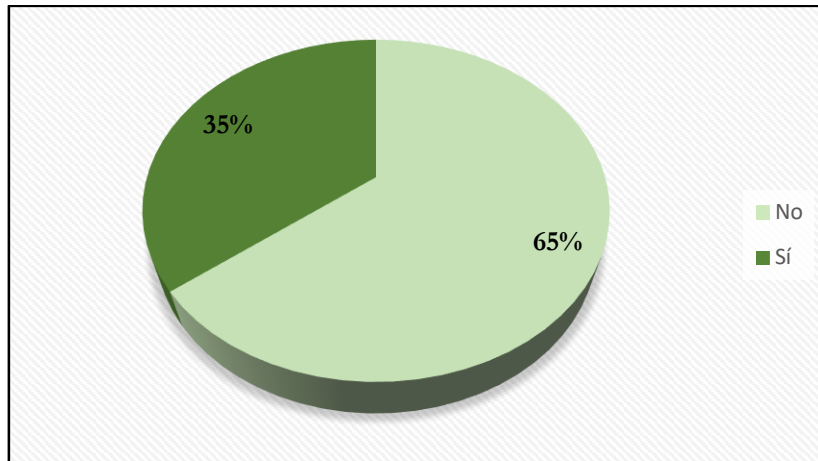


Fig. 41. Porcentaje de inundaciones provocadas por DANAs en la Comunidad de Madrid (1924-2023).

Esas 22 DANAs que han generado inundaciones en la región madrileña representan un 1,48% respecto al total correspondiente a 1489 obtenido en el estudio de recurrencia para la península ibérica entre 1924 y 2023.

Con estos dos resultados se podría afirmar que, aunque la probabilidad de que una DANA situada en torno a la península ibérica genere inundaciones en la Comunidad de Madrid, es muy baja, sí que existe un impacto algo más reseñable cuando se focaliza en la “culpabilidad” de estos eventos respecto a las inundaciones acontecidas en el último siglo en la región.

Ahondando en la temática, es fundamental conocer la distribución temporal y espacial de las inundaciones generadas por DANAs en la Comunidad de Madrid, así como su grado de impacto (siguiendo las categorías mencionadas en la metodología) y otras características de interés.

En primer lugar, se presenta un listado detallado que muestra cada uno de los eventos de inundación en la región registrados en las fuentes disponibles consultadas, y que, tras contrastar con el estudio de recurrencia realizado, se ha podido comprobar que fueron generados por DANAs. Asimismo, indica los términos municipales afectados y el grado de impacto (Tabla 10).

| FECHA | MUNICIPIOS AFECTADOS | IMPACTO |
|------------|--|-------------|
| 04/06/1930 | Estremera, Fuentidueña del Tajo y Madrid | Alto |
| 02/04/1946 | Aranjuez | Medio |
| 12/1958 | San Martín de la Vega | Medio |
| 29/11/1961 | San Fernando de Henares y San Martín de la Vega | Medio |
| 27/01/1970 | Alcalá de Henares y San Fernando de Henares | Medio |
| 03/11/1972 | Torrejón de Ardoz | Medio |
| 21/04/1975 | Aranjuez | Medio |
| 3/12/1989 | San Fernando de Henares | Medio |
| 6/12/1989 | Madrid | Medio |
| 26/12/1989 | Madrid, Paracuellos del Jarama y Móstoles y Aldea del Fresno | Medio |
| 24/06/1995 | Madrid | Alto |
| 24/01/1997 | Madrid , Móstoles, Guadarrama, Fuenlabrada, Leganés, Villalba, Titulcia, Perales de Tajuña, Chinchón, Carabaña y Ciempozuelos | Alto |
| 23/05/2007 | Madrid, Getafe, Villalba, Arroyomolinos, Valdemoro, Boadilla del Monte y Las Rozas | Medio |
| 21/09/2008 | Coslada , Rivas-Vaciamadrid, San Fernando de Henares y Torrejón de Ardoz | Alto |
| 11/10/2008 | Coslada, Rivas-Vaciamadrid y San Fernando de Henares | Medio |
| 11/06/2015 | Getafe y Madrid | Alto |
| 12/02/2017 | Robledo de Chavela | Medio |
| 08/07/2017 | Madrid | Medio |
| 11/09/2019 | Arganda del Rey, Nuevo Baztán, Villar del Olmo, Velilla de San Antonio, Campo Real, Villarejo de Salvanes y San Martín de la Vega | Medio |
| 26/05/2020 | Madrid y Coslada | Medio |
| 25/05/2023 | Madrid, El Escorial, San Lorenzo de El Escorial, Collado Villalba, Alcobendas, San Sebastián de los Reyes | Medio |
| 04/09/2023 | Villa del Prado, El Álamo, Daganzo de Arriba y San Martín de la Vega, Aldea del Fresno y Villamanta | Alto |

Tabla 10. Registro de inundaciones provocadas por DANAs en la Comunidad de Madrid (1924-2023). Elaboración propia.

Las inundaciones provocadas por DANAs en la Comunidad de Madrid han afectado a múltiples municipios según muestra la tabla anterior (Tabla 10). El siguiente mapa (Fig. 42) permite ver cómo el grueso de afecciones se sitúa, fundamentalmente, en la mitad sur de la región. Madrid es el término municipal con mayor registro de inundaciones provocadas por DANAs con un total de 10, a este le sigue San Fernando de Henares con 5, San Martín de la Vega con 4 y con 3 Collado Villalba y Coslada (Fig. 42). Se constata, por tanto, que, en líneas generales, los municipios más afectados suelen ser aquellos con mayor población e infraestructuras y/o próximos a cauces fluviales, sobre todo los ríos Jarama, Manzanares, Guadarrama, Henares, Tajuña y Alberche. Por ello, la exposición frente al riesgo resulta un factor determinante en este caso.

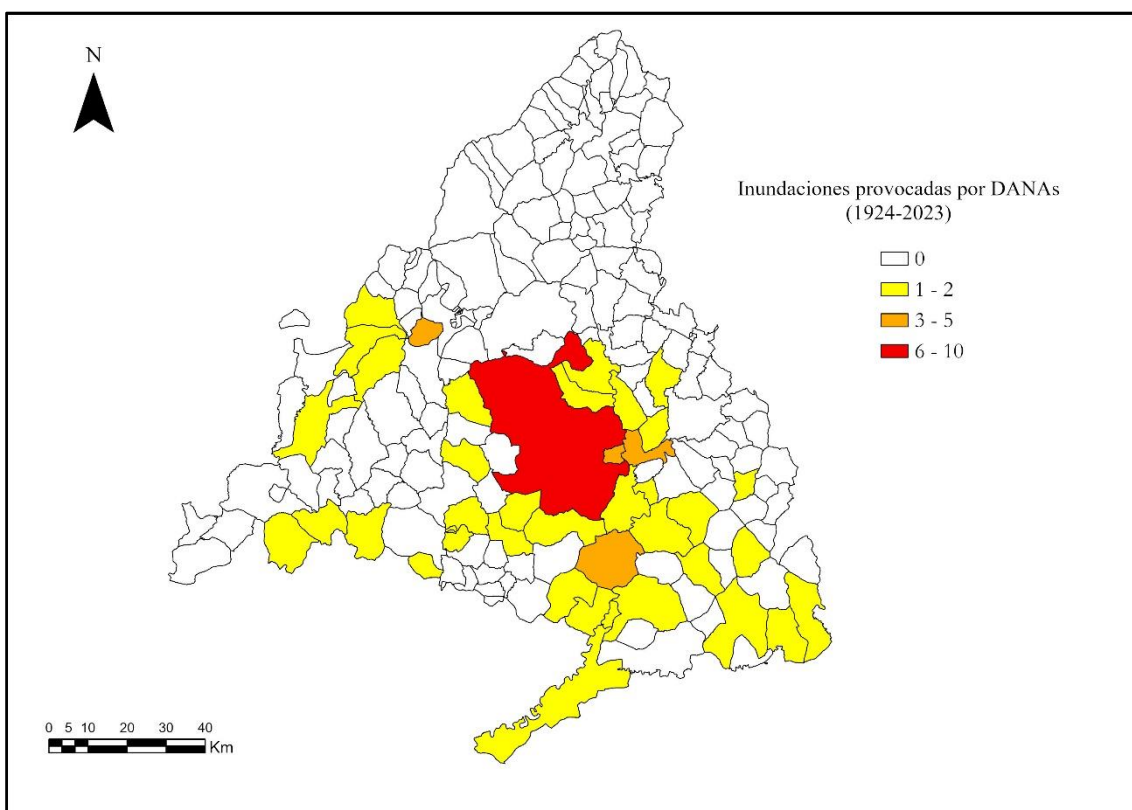


Fig. 42. Términos municipales de la Comunidad de Madrid afectados por inundaciones provocadas por DANAs (1924-2023). Elaboración propia.

Por otro lado, el grado de impacto de dichas inundaciones ha sido alto (causando incluso fallecidos) en un 27% del total, mientras que en el resto (73%) los daños tuvieron que ver con pérdidas económicas o heridos. En este sentido, la exposición vuelve a ser un factor determinante, ya que más de la mitad de las inundaciones de impacto alto provocadas por DANAs han tenido lugar en la ciudad de Madrid (tabla 10), viéndose también afectado otro municipio densamente poblado como es Coslada. Aldea del Fresno y Villamanta son los términos municipales restantes, influidos, en este caso, por su proximidad al río Alberche.

Al igual que en varias de las variables del estudio de recurrencia, se estima procedente ofrecer una evolución temporal con sus respectivas líneas de tendencia (lineal y media móvil). Visualizando el gráfico, queda patente que es infrecuente que en un mismo año haya más de una inundación en la Comunidad de Madrid que esté provocada por una DANA; tan solo los años 1989, 2017 y 2023 superan dicho umbral, siendo el primero de ellos el que presenta el máximo, con 3 inundaciones relacionadas con dicha situación sinóptica (Fig. 43).

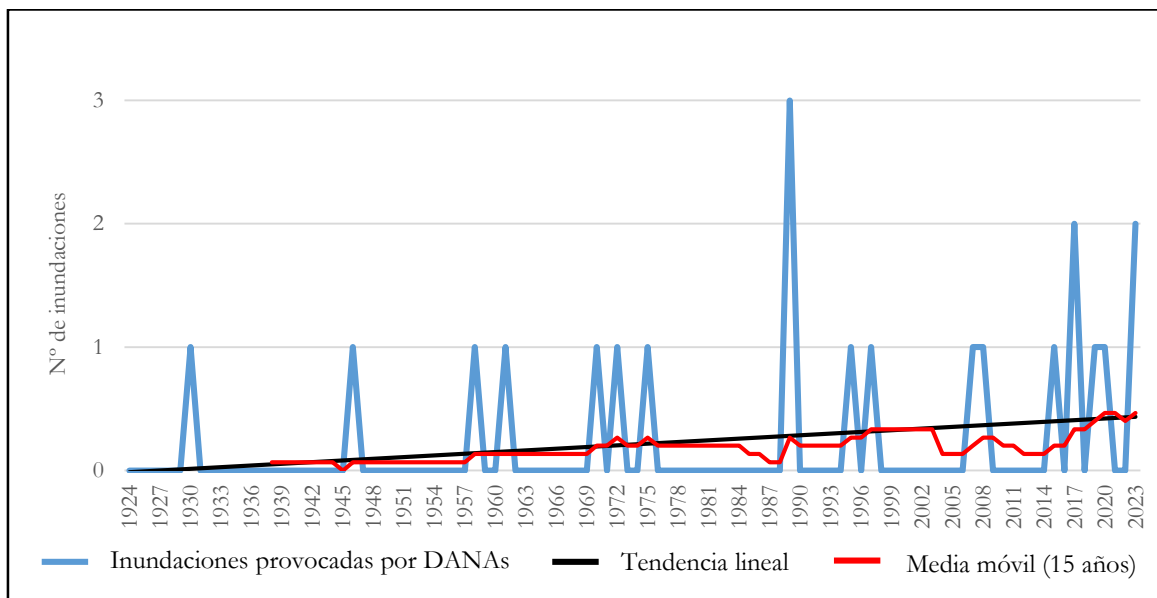


Fig. 43. Evolución de las inundaciones ocasionadas por DANAs en la Comunidad de Madrid (1924-2023).
Elaboración propia.

La tendencia lineal mostrada ofrece una pendiente positiva que indica una ligera propensión al aumento de inundaciones provocadas por DANAs en la Comunidad de Madrid. Dado que el valor P es inferior a 0,05, la tendencia, estadísticamente, podría considerarse significativa. Sin embargo, como se ha podido constatar durante la realización del estudio de inundaciones, es innegable que existe mucha más información y con un acceso mucho más sencillo desde los años 90 hasta la actualidad, por lo que no puede asegurarse de manera certera que no existan otros eventos de inundación que no hayan sido documentados por las fuentes consultadas o que tengan un acceso mucho más restringido, por lo que la significancia de la tendencia positiva obtenida puede ser no del todo válida.

| | |
|------------------|-----------|
| Pendiente | 0,0045184 |
| Valor P | 0,0111159 |

Para comprender el resto de características relacionadas con las DANAs que han provocado inundaciones en la Comunidad de Madrid desde 1924 a 2023, se presenta a continuación una tabla resumen (Tabla 11).

| Variables | 1924-2023 |
|--|------------------|
| Nº Eventos | 22 |
| Invierno | 6 |
| Primavera | 5 |
| Verano | 4 |
| Otoño | 7 |
| Duración en días promedio | 3,45 |
| Invierno | 1,7 |
| Primavera | 3 |
| Verano | 4,5 |
| Otoño | 4,71 |
| Posiciones por evento | 22 |
| NNO | 1 |
| ESE | 1 |
| SSE | 3 |
| SSO | 5 |
| OSO | 7 |
| ONO | 4 |
| Centro | 1 |
| Masa de aire dominante | Pm |
| Presión promedio en superficie (hPa) | 1011,36 |
| Altura Geopotencial promedio (500hPa) | 5596,36 |

Tabla 11. Características de las DANAs que han provocado inundaciones en la Comunidad de Madrid (1924-2023).
Elaboración propia.

En cuanto a la distribución de inundaciones provocadas por DANAs en la Comunidad de Madrid en relación a la estación del año meteorológica, los resultados obtenidos son muy similares, existiendo una diferencia de uno o dos eventos entre cada una de ellas. El otoño sería la estación del año con mayor recurrencia de inundaciones provocadas por DANAs en la región madrileña.

La duración promedio en días de dichas DANAs que han generado inundaciones ha sido de 3,45 días, prácticamente un punto por encima de la media obtenida en el estudio de recurrencia. Además, si se desglosa la variable en función de la estación del año, se

obtienen resultados muy irregulares. La mayor duración corresponde al otoño, mientras que la mínima recae en el invierno. Esto lleva a establecer la posible conclusión de que las DANAs con capacidad de provocar mayores daños en la Comunidad de Madrid, son las que tienen más duración, ya que, si se compara con la Tabla 10, las inundaciones con impacto alto tuvieron lugar en verano y otoño, coincidiendo con los mayores promedios de duración registrados.

Por otro lado, la posición dominante de estas DANAs se corresponde al cuadrante OSO, seguidas del SSO y ONO, mientras que tan solo una de las DANAs situadas en el centro peninsular ha tenido relación inundaciones en la Comunidad de Madrid en los últimos cien años. Eso permite corroborar la teoría de que es el borde delantero de estas depresiones el más activo en cuanto a precipitaciones. Al situarse al oeste la DANA, ese frente coincide con la comunidad autónoma madrileña.

La masa de aire predominante como origen de esas DANAs, es, al igual que en el estudio de recurrencia general, la polar marítima. La presión en superficie se mantiene también en una media muy similar a la registrada, confirmando el campo bórico poco definido de este tipo de depresiones.

Finalmente, la altura geopotencial promedio medida a 500 hPa es de 5596,36, una cifra algo mayor a la correspondiente como media total de las DANAs en la península ibérica entre 1924 y 2023, aunque este dato no parece mostrar ninguna tendencia o relación significativa con las inundaciones en la Comunidad de Madrid.

A continuación, se detallan dos de los episodios de inundaciones provocados por DANAs en la Comunidad de Madrid. En primer lugar, se comentará la situación correspondiente a diciembre de 1989, por la rareza que puede presentar la existencia de tres inundaciones relacionadas previsiblemente con DANAs en un corto espacio de tiempo. Para concluir, por relevancia en cuanto a impacto (2 fallecidos) y repercusión en medios de comunicación, así como su influencia para motivar la realización de este estudio, se analizará la inundación acontecida en septiembre de 2023.

- **Inundaciones diciembre de 1989**

Para comprender las inundaciones que tuvieron lugar en diversos puntos de la Comunidad de Madrid en diciembre de 1989, primero hay que partir de la base de que el mes anterior, noviembre, fue el más lluvioso de la década de los 80 en Madrid capital, alcanzando un acumulado de precipitación igual a 145,3 l/m² (Europa Press, 1989). En el Sistema Central dichas cantidades fueron bastante mayores, por lo que los cuatro embalses del río Alberche se llenaron por completo después de varios meses de sequía, mientras que los correspondientes al Canal de Isabel II alcanzaron un 85% de su capacidad.

El día 1 de diciembre una DANA se sitúa en el cuadrante ONO de la península ibérica, se mantiene bastante estacionaria hasta el día 2, en el que empieza a alejarse hacia el océano Atlántico en dirección W. El día 3 tiene lugar una inundación en San Fernando de Henares tras la crecida del río Jarama como consecuencia de la apertura de compuertas

del embalse de El Atazar, viéndose afectadas unas 400 personas que residían en infraviviendas cerca del cauce (Rodríguez, 1989). Partiendo de una situación con los embalses casi al límite de su capacidad, se entiende que dicha depresión pudo influir en nuevas precipitaciones sobre la región que obligaran a abrir compuertas de algunos embalses (Fig. 44).

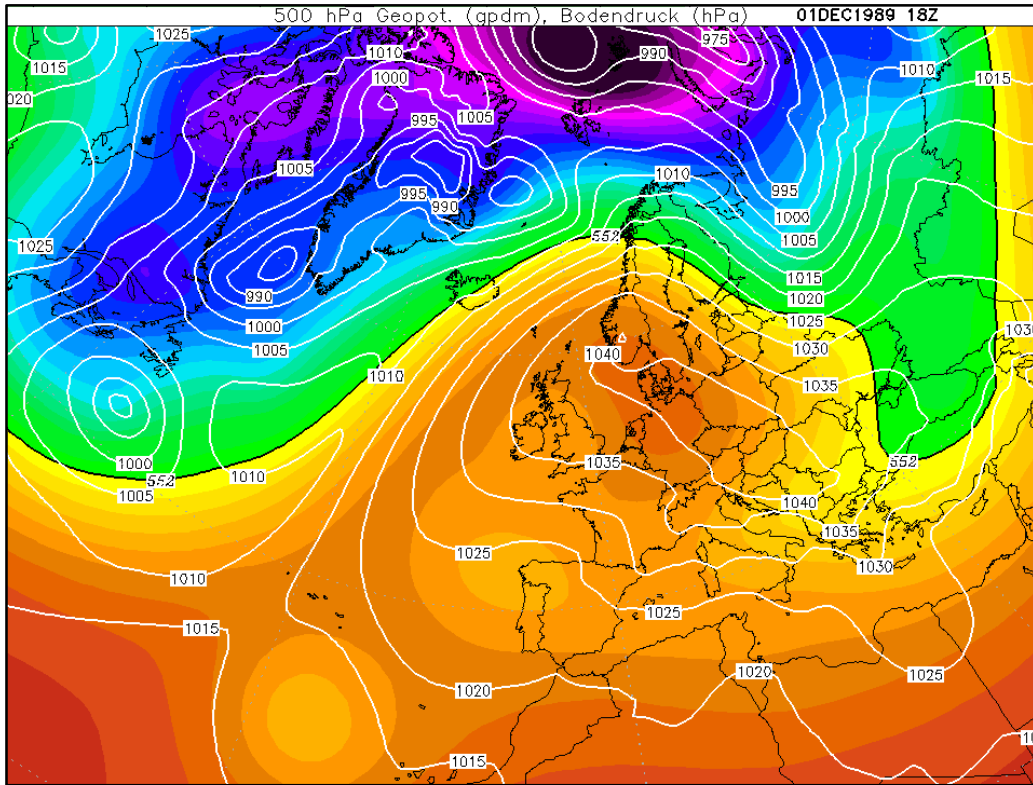


Fig. 44. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 1/12/1989. Fuente: Wetterzentrale.

Tal y como se ha descrito, la DANA se situó al noroeste de la Península, quedando su borde delantero próximo al centro de la misma. La situación sinóptica predominante sobre la Comunidad de Madrid fue la de pantano barométrico. Días más tarde, el 6 de diciembre, otra DANA se sitúa próxima a la península ibérica, en concreto en el sector OSO (Fig. 45). Las lluvias que tuvieron lugar ese día, junto al acumulado de todo el mes anterior, provocaron una crecida de 70 centímetros del río Manzanares en Madrid, generando filtraciones y anegando un paso subterráneo en la carretera de El Pardo (Redacción, 1989a).

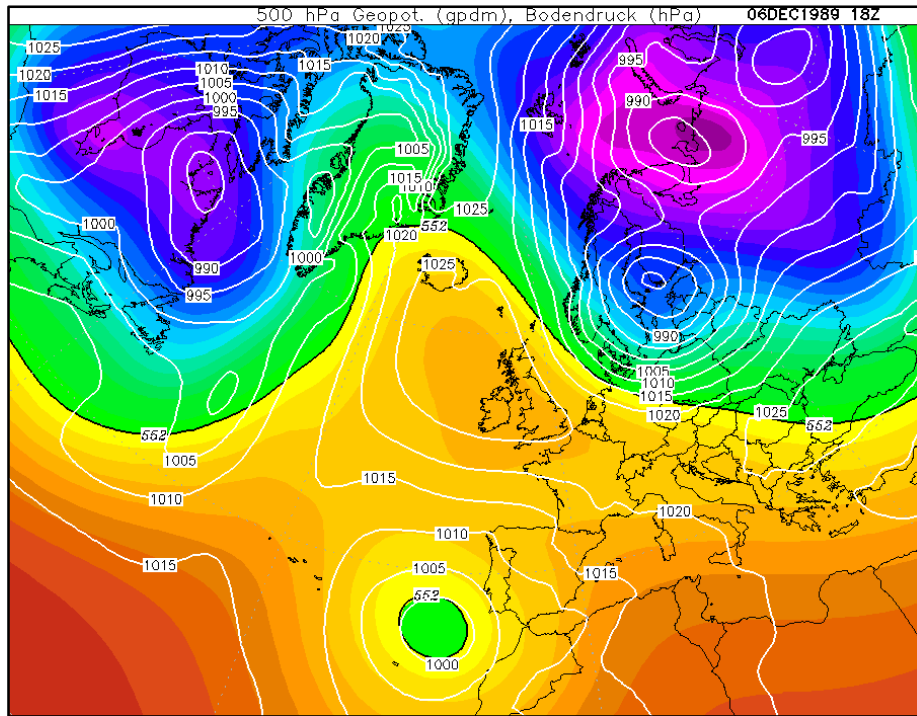


Fig. 45. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 6/12/1989. Fuente: Wetterzentrale

Esta DANA, en forma de borrasca fría aislada durante los primeros días, fue perdiendo fuerza a la par que se desplazaba hacia el norte siguiendo la costa portuguesa hasta volver a unirse a la corriente en chorro el día 8 (Fig. 46).

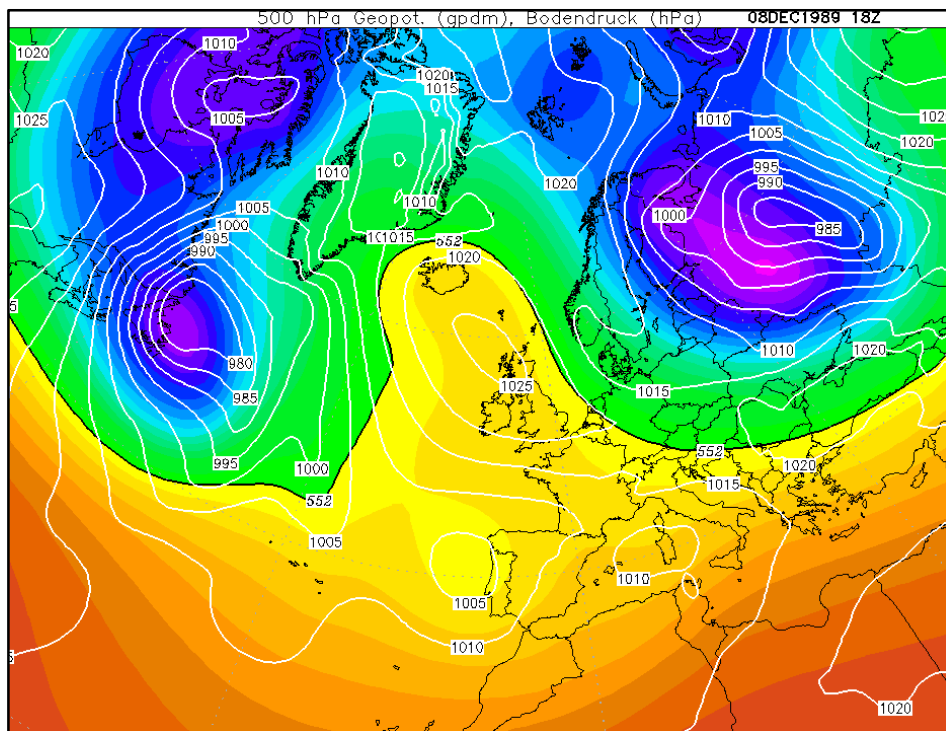
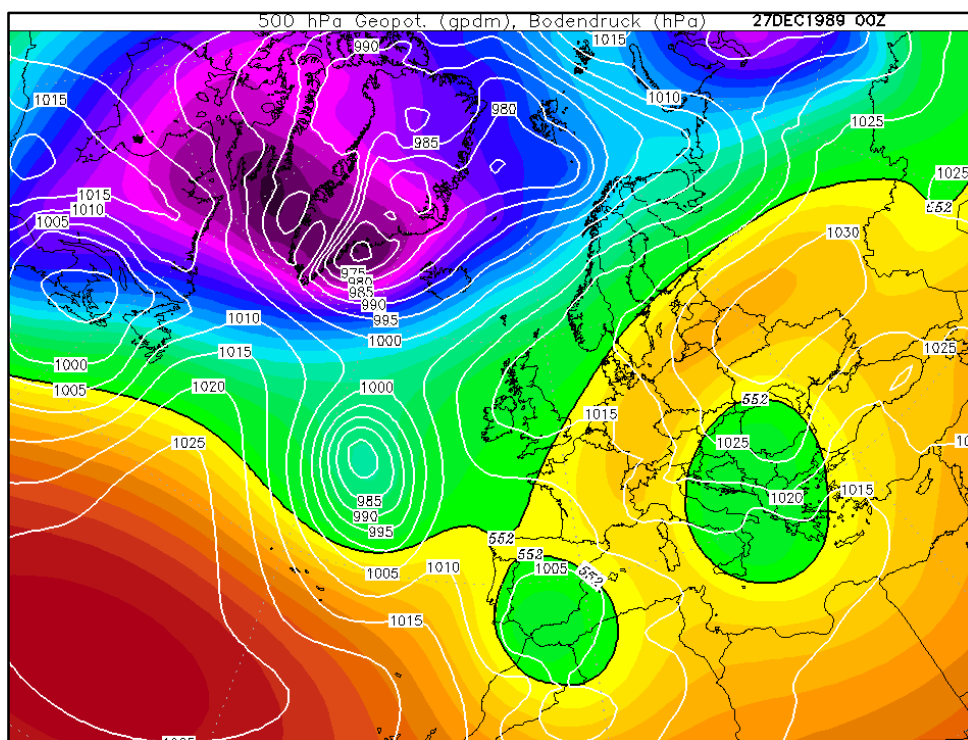


Fig. 46. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 8/12/1989. Fuente: Wetterzentrale.

Los días posteriores continuó lloviendo con fuerza sobre la Península, cruzando el territorio una importante borrasca polar entre los días 15 y 19 que aportó más lluvias, incluso inundaciones sobre la Comunidad de Madrid, aunque estas no forman parte del registro al no coincidir con una DANA. No fue hasta el día 26 por la tarde cuando una nueva Depresión Aislada en Niveles Altos se sitúa sobre el territorio español, generando precipitación en forma de nieve y lluvia sobre la región madrileña (Fig. 47). En la capital los bomberos recibieron más de 50 llamadas relacionadas con desperfectos causados por la lluvia (Redacción, 1989b), viéndose de nuevo afectado el paso subterráneo de la carretera de El Pardo. Mientras, en Paracuellos del Jarama, la crecida de este río, provocó inundaciones en el polígono industrial del municipio, y en Móstoles los bomberos tuvieron que rescatar a una familia de un poblado cercano al río Guadarrama que se vio anegado.



- **Episodio del 2 al 4 de septiembre de 2023:**

Se parte de una situación totalmente diferente a la descrita en el episodio anterior. Tras un verano muy cálido y seco sobre la Comunidad de Madrid y con sus embalses con acumulados inferiores al 50% aproximadamente, el día 2 de septiembre, después de desprenderse de la corriente en chorro, una DANA se dirige desde el norte hacia la península ibérica (Fig. 48).

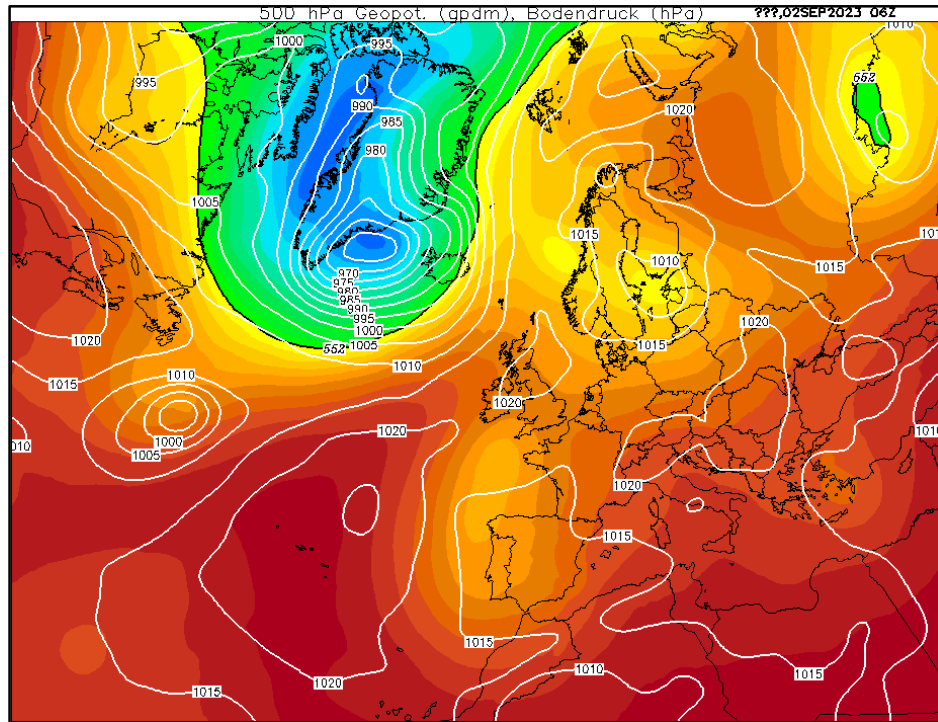


Fig. 48. Situación sinóptica sobre la península ibérica en la mañana del día 2/9/2023. Fuente: Wetterzentrale.

La formación de esta DANA ya había sido prevista y comunicada por primera vez el día 29 de agosto por parte de la AEMET, remitiéndose notas informativas los días 30 y 31, en las que se alertaba de la situación excepcional a producirse (AEMET, 2023). El viernes día 1 fue emitido un aviso especial —que constituye el mayor nivel de alerta meteorológica— para dicho episodio, además se activaron avisos amarillos y naranjas sobre gran parte de la península por tormentas y precipitaciones para los días 2 y 3 de septiembre.

El día 2 de septiembre, tal y como muestra la siguiente figura (Fig. 49), la DANA ya se había situado frente a las costas de Portugal, produciendo precipitaciones de carácter tormentoso en parte de la Península. La posición de la DANA, con su frente delantero situado aproximadamente sobre la Comunidad de Madrid, presagiaba la probabilidad de fuertes lluvias en la región, elevándose al nivel rojo de alerta los avisos por precipitación en la Mancha toledana y la totalidad de la región madrileña ante la posibilidad de que se pudieran registrar acumulados superiores a 120mm en 12 horas en dichas zonas el día 3.

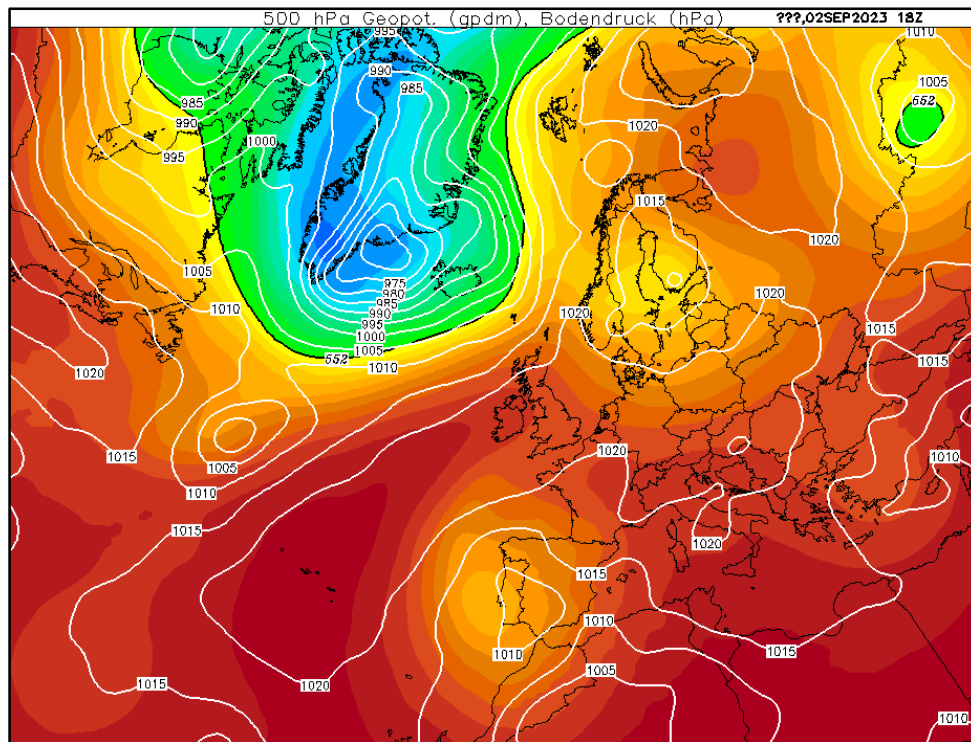


Fig. 49. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 2/9/2023 por la tarde. Fuente: Wetterzentrale.

Al ser dicha previsión una situación inusual y atípica en la Comunidad de Madrid y teniendo en cuenta que, de cumplirse, la cantidad de afecciones podría ser muy elevada por tratarse de una región muy poblada, se decidió enviar, por primera vez, una alerta masiva a los ciudadanos a través de los teléfonos móviles por parte de la Agencia de Seguridad y Emergencias 112. Dicha alerta fue enviada al mediodía del 3 de septiembre (Redacción, 2023).

Durante la primera mitad de la tarde apenas se produjeron precipitaciones sobre la Comunidad de Madrid, situándose los máximos de precipitación previstos para las siguientes horas en el suroeste de la región, algo desviados respecto a la situación inicial. Esto hizo que se bajara el nivel de alerta a naranja en los sectores de Metropolitana y Henares y Sierra de Madrid.

A últimas horas del día 3, con la DANA en una posición similar a la del día 2, las precipitaciones tormentosas se extendieron finalmente sobre la Comunidad de Madrid, especialmente en su sector suroeste, donde alcanzaron una intensidad torrencial. Los municipios de Aldea del Fresno, Villamanta, Villamantilla, Villa del Prado, El Álamo y Navalcarnero sufrieron especialmente las consecuencias de dichas precipitaciones. El río Alberche multiplicó rápidamente su caudal, provocando el derrumbe de los tres puentes de acceso a Aldea del Fresno (VVAA, 2023). En este término municipal, un vehículo fue arrastrado por las aguas del río, falleciendo uno de los ocupantes. En Villamanta, un anciano también perdió la vida como consecuencia de la inundación. Las incidencias se repartieron finalmente por prácticamente toda la región.

El día 4 de septiembre, la DANA comenzó a desplazarse hacia el norte siguiendo las costas portuguesas, perdiendo progresiva influencia sobre la península ibérica hasta unirse de nuevo a la corriente en chorro el día 6 (Fig. 50).

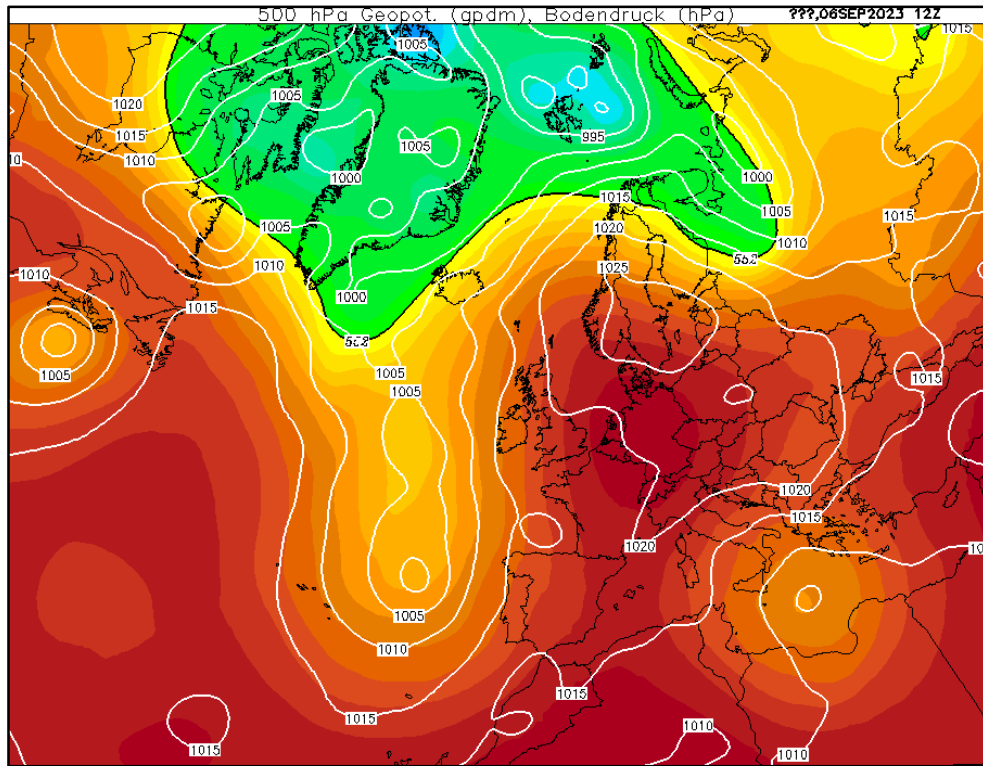


Fig. 50. Situación sinóptica sobre la península ibérica el día 6/9/2023. Fuente: Wetterzentrale

Los mayores acumulados de precipitaciones sobre la Península durante el episodio se registraron en el centro, coincidiendo con los avisos rojos emitidos por la AEMET. En la Comunidad de Madrid, varias estaciones meteorológicas superaron los 100 l/m² en ese periodo de tiempo, siendo la de Villanueva de la Cañada la que registró el máximo con 153,7 l/m² (AEMET, 2023).

Este episodio provocó el mayor impacto generado por una DANA en la Comunidad de Madrid en los últimos cien años, con dos víctimas mortales y numerosos daños socioeconómicos que tardaron meses en ser subsanados. Sin embargo, se trata de un hecho aislado, puntual e infrecuente siguiendo los resultados obtenidos.

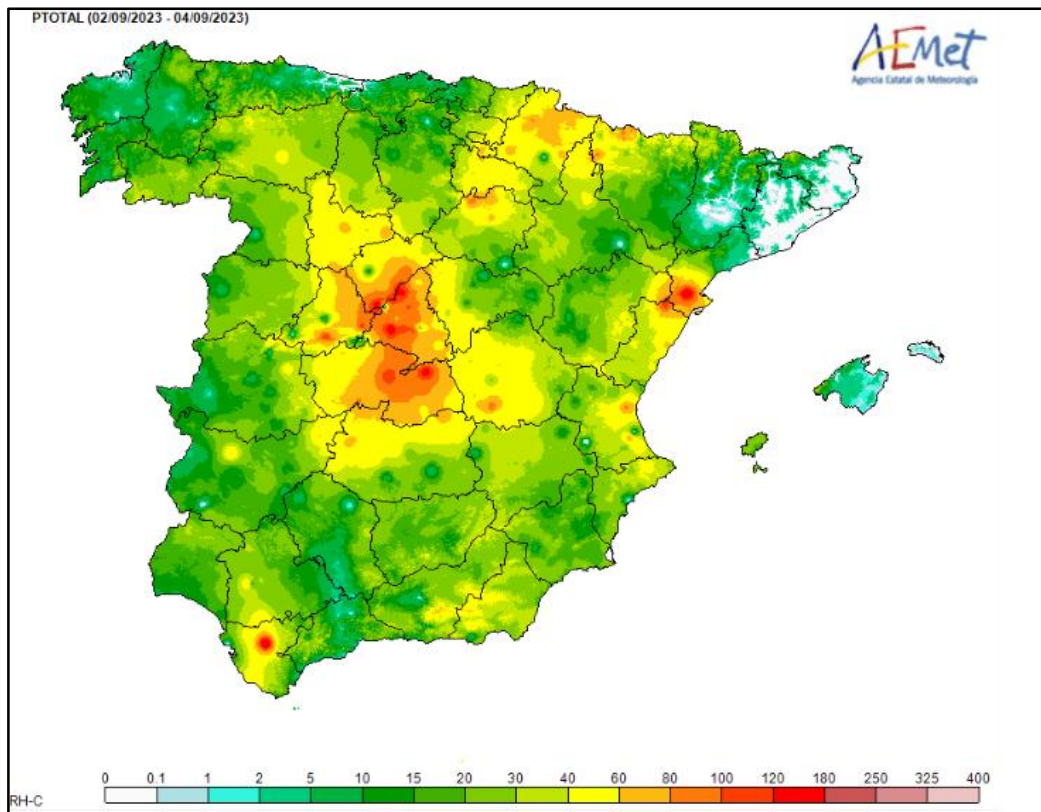


Fig. 51. Precipitación acumulada sobre la península ibérica entre los días 2 y 4 de septiembre de 2023. Fuente: AEMET.

Por otro lado, y en relación a ello, no tardaron en aparecer titulares en medios de comunicación afirmando una mayor recurrencia de este tipo de situaciones sinópticas sobre la península ibérica (Tascón, 2023). En estos, no se ofrecía ningún tipo de información que comprobara dicha aseveración, de hecho, en muchos, se acababa confundiendo y usando el término DANA como sinónimo de inundación, algo que ha quedado patente que no es así. Esta situación tan excepcional e impactante motivó el planteamiento y realización de este trabajo que espera arrojar algo de luz sobre este tema, el cual es fundamental entender y comprender antes de, si se da el caso, temer.

4. Conclusiones

El inventario y análisis de las DANAs en la península ibérica a lo largo del último siglo (1924-2023), ha permitido conocer mejor el comportamiento de uno de los eventos meteorológicos que produce eventualmente graves inundaciones.

En primer lugar, se han identificado o desechado hipótesis respecto a tendencias en este tipo de fenómenos. De esta manera, la evolución del promedio anual de DANAs en los últimos cien años no muestra una tendencia significativa, no pudiéndose afirmar, como erróneamente se hace, que existe una predisposición a su aumento en la península ibérica, al menos en cuanto a la parte meteorológica del fenómeno. Tampoco parece que existan grandes variaciones en cuanto a tendencias en el reparto de las DANAs respecto a las estaciones del año, ya que, aunque sí se haya detectado un progresivo aumento de estas situaciones sinópticas en primavera en toda la serie histórica analizada, esa propensión no se puede considerar, hasta el momento, significativa. Por otro lado, sí se puede constatar una muy ligera tendencia a la disminución de la duración temporal de este tipo de fenómenos, hecho que contrasta con otra de las tendencias significativas halladas: la del aumento del promedio de la altura geopotencial (500 hPa) de las DANAs que han afectado a la Península de 1924 a 2023. Merece ser mencionada la existencia un posible punto de inflexión en los últimos 25 años respecto a la duración de DANAs (que ha pasado a ser positiva) y respecto a la presión en superficie y altura geopotencial, que ha roto con la tendencia de los periodos anteriores para mostrar un muy ligero descenso de media.

En segundo lugar, en cuanto a las características identificadas más reseñables para este tipo de fenómenos, destaca que la mayoría de DANAs sobre la península ibérica tienen lugar en primavera y otoño, siendo en la mitad oriental más frecuentes en esta última estación, mientras que en la occidental dominan sobre todo en primavera. Además, la duración promedio es mayor en otoño, sobre todo en la mitad este, estableciendo de esta manera una posible explicación al por qué es esta región una de las más castigadas por las inundaciones generadas a partir de este tipo de situaciones sinópticas. En definitiva, en el litoral mediterráneo se dan muchos de los ingredientes necesarios para ello: mayor duración y recurrencia de DANAs en el momento en el que el mar Mediterráneo se encuentra a más temperatura superficial, unido a los vientos de Levante que empujan las masas cargadas de humedad contra la orografía conformada por cadenas montañosas paralelas a la línea de costa, favoreciendo el ascenso y la convección. Por otro lado, la posición dominante a lo largo de la serie de estos fenómenos se sitúa, en mayor medida, en la mitad occidental, algo lógico si se tiene en cuenta que la masa de aire de la que provienen las DANAs es, en un 50%, la polar marítima. Finalmente, se ha comprobado que el campo bórico en superficie relacionado con las Depresiones Aisladas en Niveles Altos es, en general, poco definido, situándose en torno a los 1011 hPa de media.

En tercer lugar, respecto a la influencia del cambio climático en estos fenómenos en la península ibérica, se descarta hasta el momento la hipótesis de que posibles alteraciones en la corriente en chorro estén produciendo más DANAs sobre el territorio analizado. Sin

embargo, resulta innegable que el aumento progresivo de las temperaturas superficiales del mar Mediterráneo puedan favorecer la generación de precipitaciones más intensas como consecuencia de las depresiones aisladas que se sitúen sobre dicha región, fundamentalmente desde finales de verano hasta mediados de otoño. A mayor contraste de temperaturas entre masas de aire, mayor inestabilidad atmosférica y, por tanto, mayor probabilidad de lluvias más importantes.

En lo relativo al impacto de las DANAs en la Comunidad de Madrid en los últimos cien años, se constata que, aunque la probabilidad de que una de estas depresiones cause inundaciones en la región es bastante baja, las DANAs son las causantes de un 35% de los eventos de inundación en el último siglo en esta comunidad autónoma. Por ello sí se debe tener en cuenta a estos tipos de fenómenos climáticos como posibles causantes de inundaciones en la Comunidad de Madrid, aunque la posibilidad y recurrencia de que esto suceda es bastante baja. Por otro lado, el factor exposición es fundamental de cara a determinar las zonas afectadas o el grado de impacto registrado en dichas inundaciones, viéndose más perjudicados aquellos términos municipales con mayor población e infraestructuras y/o próximos a un cauce fluvial. En cuanto a las tendencias identificadas, aunque aparece como significativa la propensión a un aumento de las inundaciones causadas por DANAs en la región madrileña, este resultado hay que tomarlo con precaución, teniendo siempre en cuenta que, en los últimos años, el acceso a la información es mucho más amplio y sencillo, motivo por el cual se pueden haber obviado eventos de inundación más antiguos no recogidos o localizados en las fuentes consultadas.

Por último, entre las características de las DANAs que han generado inundaciones en la Comunidad de Madrid, destaca claramente un mayor promedio de duración respecto a la media general del estudio de recurrencia en la Península, lo que lleva a pensar que existe una relación directa entre una mayor duración y probabilidad de generar acumulados destacados de lluvia. Además, la mayoría de dichas depresiones se han situado al oeste de la península ibérica, corroborando que es el borde delantero de las mismas el más activo en cuanto a precipitaciones. La distribución de estas DANAs a lo largo de las estaciones meteorológicas del año muestra unos resultados con pocas variaciones entre cada periodo, aunque es en verano y otoño cuando han tenido lugar las que han generado un impacto alto. En el resto de variables se obtienen resultados similares al estudio de recurrencia general entre 1924-2023.

En definitiva, se han determinado cómo son las tendencias lineales, medias móviles y polinómicas de las DANAs en el último siglo, hallado su significación estadística y profundizado en las hipótesis relacionadas con la influencia del cambio climático en este tipo de eventos indagando en sus características fundamentales. Para ello, se ha tomado como referencia el mayor periodo de estudio abarcado hasta la fecha, enfocando parte de los resultados en un tema carente de una amplia bibliografía hasta el momento como es el impacto de las DANAs en las inundaciones en la Comunidad de Madrid.

Fuentes y bibliografía:

- Agencia Estatal de Meteorología. (s.f.) *Efemérides y sucesos*. Agencia Estatal de Meteorología.
https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/efemerides_sucesos
- Agencia Estatal de Meteorología. (2023). *Informe sobre el episodio meteorológico de precipitaciones intensas ocasionadas por una DANA durante los días 2,3 y 4 de septiembre de 2023*.
https://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/detalles/dana_sep_2023
- Agencia Estatal de Meteorología (s.f.) *SINOBAS*. Agencia Estatal de Meteorología.
<https://sinobas.aemet.es/>
- Bazo Zambrano, J. C., Torre Ramos, L. de la, & Nieto Muñiz, R. (2010). Ocurrencia de Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAs) en el Hemisferio Norte desde principios del siglo XX. *Avances en ciencias de la tierra*, 1, 147-156.
- Campillo Artero, C. (1996). Interpretaciones erróneas de los valores de p. *Atención Primaria*, 17(3), 221-224.
- Cuadrat, J. M., & Pita López, M. F. (2006). *Climatología* (4ª edición). Cátedra.
- Cuevas, E., & Rodríguez, J. (2001). *Estadística de las depresiones aisladas en niveles altos*. Instituto Nacional de Meteorología, V Simposio Nacional de Predicción. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
<http://hdl.handle.net/20.500.11765/4710>
- Danovaro, R. (2020). El trópico llega al Mediterráneo. *Investigación y ciencia*, 525, 74-81.
- Pozo, Á. del (1989, diciembre 8). Los embalses del Canal de Isabel II tienen reservas de agua suficientes para dos años. *ABC*.
- Europa Press. (1989, diciembre 7). El mes de noviembre ha sido el segundo más lluvioso de la década en Madrid. *El País*.
- Ferreira, R. N. (2021). Cut-Off Lows and Extreme Precipitation in Eastern Spain: Current and Future Climate. *Atmosphere*, 12(7), 835.
<https://doi.org/10.3390/atmos12070835>
- Forrester, N. (2023). Meet the scientists planning for disasters. *Nature*, 619(7971), S1-S3. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-02312-2>
- Gil Olcina, A., & Olcina Cantos, J. (1997). *Climatología general*. (1ª edición) Ariel.
- Gutiérrez Puebla, J. (1995). *Técnicas cuantitativas: (Estadística básica)*. (1ª edición). Oikos-tau.

- Jansá Guardiola, J. M. (1959). *Tratado de meteorología teórica*. (1ª edición). Servicio Meteorológico Nacional.
- Jiménez Blasco, B. C., García Rodríguez, M. P., García Alvarado, J. M., & Pérez González, M. E. (2024). Evolución de los episodios de inundación en la Comunidad de Madrid: Factores territoriales y sinópticos. *Estudios Geográficos*, 85(296). Aceptado para su publicación.
- Llasat Botija, M. del C. (1991). *Gota fría*. (1ª edición). Boixareu universitaria.
- Llasat, M.-C., Martín, F., & Barrera, A. (2007). From the concept of “Kaltlufttropfen” (cold air pool) to the cut-off low. The case of September 1971 in Spain as an example of their role in heavy rainfalls. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96(1-2), 43-60. <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0220-9>
- Martín León, F. (2003). *Las gotas frías / DANAs: Ideas y conceptos básicos*. Instituto Nacional de Meteorología. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/5117>
- Martín Vide, J. (2022). *Los mapas del tiempo: Análisis y clasificación* (Edición de 2022). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Agencia Estatal de Meteorología.
- Martín-Vide, J., Moreno-García, M. C., & López-Bustins, J. A. (2021). Synoptic causes of torrential rainfall in South-eastern Spain (1941–2017). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47(1), 143-162. <https://doi.org/10.18172/cig.4696>
- Medina Isabel, M. (1976). *Meteorología básica sinóptica*. (1ª edición). Paraninfo.
- Meteologix. (s.f.) *Climate reanalysis*. Meteologix <https://meteologix.com/es/reanalysis/ecmwf-era5>
- Molina Arias, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p? *Pediatría Atención Primaria*, 19(76), 377-381.
- Montero Granados, R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. *Documentos de Trabajo en Economía Aplicada*, 1-61.
- Pérez González, M. E., & Jiménez Blasco, B. C. (2022). Causas sinópticas de las Inundaciones en Aranjuez y Alcalá de Henares (España), entre 1836-2020. En Martínez Cárdenas, R., Cabrales Barajas, L.F., García Hernández, M., de la Calle Vaquero, M. Mínguez García, C. y Troitino Torralba, L. (Eds.), *Leyendo el territorio. Homenaje a Miguel Ángel Troitino* (pp. 116-126). Universidad de Guadalajara - México. Centro de Investigación e Innovación para las Organizaciones (CIIO) <https://hdl.handle.net/20.500.14352/98660>
- Raso Nadal, J. M., Martín Vide, J., & Clavero Paricio, P. (1987). *Estadística básica para ciencias sociales* (1ª edición). Ariel.
- Redacción. (1989a, diciembre 6). La subida del nivel del Manzanares causa la inundación de un paso subterráneo. *El País*.

- Redacción. (1989b, diciembre 27). Alerta por las inundaciones y colapso de los bomberos. *El País*.
- Redacción. (2023, septiembre 3). La Comunidad de Madrid envía por primera vez una alerta masiva a sus ciudadanos para avisar del riesgo extremo por tormentas. *20 minutos*. <https://www.20minutos.es/noticia/5169172/0/todos-los-telefonos-ubicados-comunidad-madrid-reciben-un-mensaje-alerta-emitido-por-112/>
- Rodríguez, J. A. (1989, diciembre 4). 400 personas tuvieron que abandonar de madrugada sus chabolas por el desbordamiento del Jarama. *El País*.
- Tascón, F. (2023, septiembre 7). Las DANAS, cada vez más frecuentes e intensas. *Cadena SER*. <https://cadenaser.com/castillayleon/2023/09/07/las-danas-cada-vez-mas-frecuentes-e-intensas-radio-bierzo/>
- VVAA. (2023, septiembre 3). Dana: Inundaciones en España el 3 y 4 septiembre | La muerte de un hombre de 50 años eleva a tres el número de fallecidos por la dana en Toledo. *El País*. <https://elpais.com/espana/2023-09-03/el-temporal-ultimas-noticias-en-directo-de-la-dana.html>
- Wetterzentrale (s.f.) *Archiv reanalyse*. Wetterzentrale <https://www.wetterzentrale.de/de/default.php?clan=de>
- Woollings, T., Drouard, M., O'Reilly, C. H., Sexton, D. M. H., & McSweeney, C. (2023). Trends in the atmospheric jet streams are emerging in observations and could be linked to tropical warming. *Communications Earth & Environment*, *4*(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00792-8>