



UNIVERSIDAD DE LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

TRABAJO FIN DE
GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
CURSO ACADÉMICO 2021/2022

**OBSERVACIÓN, ANÁLISIS Y
PREDICCIÓN DE LAS PISCINAS DE
AIRE FRÍO EN LA CUENCA DEL RÍO
LUNA (LEÓN)**

**MONITORING, ANALYSIS AND
FORECAST OF COLD AIR POOLS IN THE
LUNA RIVER BASIN (LEÓN)**

Autor: Ángel Argüelles Longo

Tutor: Andrés Merino Suances

Septiembre de 2022

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	3
2. Objetivos	4
3. Área de estudio	5
3.1. Entorno geográfico	5
3.2. Clima	6
3.3. Geología y litología.....	7
3.4. Fauna	8
3.5. Vegetación.....	9
4. Material y métodos	10
4.1. Base de datos meteorológicos	10
4.2. Entornos sinópticos en los que se producen CAPs.....	11
4.3. Condicionantes atmosféricos que favorecen la formación de CAPs.....	12
5. Resultados	14
5.1. Análisis de los datos de campo.....	14
5.2. Entornos sinópticos en los que se producen CAPs.....	18
5.3. Condicionantes atmosféricos que favorecen la formación de CAPs.....	22
6. Discusión	25
7. Conclusiones	27
8. Bibliografía	29

RESUMEN

En este trabajo se muestreó la dolina denominada Prado Veneiro, dentro del valle del río Luna (León), con el objetivo de conocer las condiciones atmosféricas a nivel sinóptico que favorecen la formación de Piscinas de Aire Frío (CAPs), una clase de inversión térmica muy localizada en el espacio y a veces persistente en el tiempo. Para ello, se realizó una comparación de las temperaturas mínimas y máximas entre la dolina y una ubicación ajena a estos fenómenos. Con los datos recogidos en campo, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) acompañado por un análisis clúster no jerárquico, así como un test de correlación de Pearson con diversas variables atmosféricas extraídas del Reanálisis ERA-5.

Los resultados, además de arrojar registros nunca observados en los fondos de valle leoneses (-29,7°C) indicaron la gran magnitud de las CAPs registradas en esta zona durante todo el año, llegando a superar los 20°C de diferencia. Además, destacó la aparición de episodios de Piscinas de Aire Frío Permanentes (PCAPs) en los meses invernales, que se desarrollaron durante las horas centrales del día. Por último, se observó que las CAPs y PCAPs se encuentran correlacionadas con distintas variables atmosféricas, indicando la importancia de la presencia de nieve reciente para la formación de las segundas.

Palabras clave: análisis clúster, dolina, inversión térmica, Piscina de Aire Frío, temperaturas mínimas.

ABSTRACT

The Prado Veneiro sinkhole, within the Luna River valley (León), was researched aiming to understand the atmospheric conditions at synoptic scale that trigger the formation of Cold Air Pools (CAPs), a kind of thermal inversion which is strongly localized in space, but sometimes quite persistent in time. Thus, a comparison of the minimum and maximum temperatures between the sinkhole and a location external to these phenomena was carried out. Subsequently, after the field work was made, a Principal Component Analysis (PCA) was carried out accompanied by a non-hierarchical cluster analysis, as well as a Pearson correlation test with various atmospheric variables extracted from the Reanalysis data from ERA-5.

Results showed record-breaking temperatures never observed before in the low valleys of León (-29.7°C), demonstrating the strength of the CAPs recorded in this area throughout the year, which reached differences of over 20°C. In addition, the presence of Permanent Cold Air Pools (PCAPs) in the winter months, which developed during the midday, was highlighted. Ultimately, CAPs and PCAPs showed they were correlated with different atmospheric variables, suggesting the need of a recent snow base for a strong PCAP development.

Keywords: cluster analysis, Cold Air Pool, minimum temperatures, sinkhole, thermal inversion.

1. Introducción

Las inversiones térmicas son procesos naturales ampliamente estudiados y conocidos en meteorología (Marvin, 1914), debido a sus implicaciones sobre las condiciones meteorológicas en importantes superficies de nuestro planeta. Su origen puede ser debido a un gran número de factores: desde procesos de inversión térmica producidos por el enfriamiento radiativo de la superficie terrestre, por procesos de advección, por la presencia de frentes cálidos, por subsidencia o por procesos de turbulencias atmosféricas (Czarnecka et al., 2019). Todos estos procesos se suelen desarrollar en la parte inferior de la troposfera, normalmente en lo que se conoce como capa límite atmosférica, la más superficial y que se encuentra bajo la influencia de la superficie terrestre (Castro et al., 1991).

Sin embargo, dentro de todas las tipologías existentes, destaca una clase de inversión térmica menos estudiada, que acontece generalmente en depresiones topográficas cerradas, como dolinas, poljes o cuencas fluviales endorreicas, que recibe el nombre de Piscina de Aire Frío, o Cold Air Pool (CAP en adelante). En estas ubicaciones, las CAPs pueden ser muy acusadas y persistentes, dando lugar a unas condiciones meteorológicas muy singulares respecto a las de su entorno.

En gran parte del valle del río Luna, debido a los procesos de karstificación en la roca caliza, aparecen numerosas dolinas de diversa morfología, las cuales pueden albergar procesos de CAPs.

1.1. Antecedentes

Existen algunos trabajos previos acerca de las CAP en diversos puntos del planeta, si bien estos estudios se enfocaron en un principio en las dolinas de la cordillera de los Alpes, debido a que estos lugares alcanzaron las temperaturas mínimas a nivel nacional y llamaron la atención de la comunidad científica.

Las primeras aportaciones al conocimiento de las CAP vinieron de la mano de Schmidt & Beckmann (1930), que aportaron información meteorológica acerca de Grünloch, una dolina en los Alpes austriacos. Estos autores pudieron comprobar una gran diferencia de temperaturas respecto al entorno, alcanzando en varias ocasiones los -50°C (récord oficial de $-52,6^{\circ}\text{C}$; Geiger, 1965), que siguen siendo los registros más bajos en todo el país tras 90 años de serie climática. Esta ubicación ha sido estudiada durante un largo periodo de tiempo para comprobar los mecanismos que producen este tipo de inversiones térmicas, así como su

persistencia o la rotura de las mismas (Whiteman et al., 2003; Whiteman et al., 2004; Steinacker, 2007).

De igual manera, Clements et al. (2003) analizaron la formación y estructura de las CAPs acontecidas en una dolina en Utah (EEUU), denominada Peter Sinks y muy conocida por alcanzar las temperaturas más bajas dentro de los Estados Unidos Contiguos. Esta dolina alcanzó los $-56,3^{\circ}\text{C}$ el 1 de febrero de 1985, siendo reportados por el estudiante de meteorología Zane Stephens en el lugar.

Sin embargo, no ha sido hasta las últimas tres décadas hasta que se empezó a estudiar de forma más generalizada el comportamiento de estos lugares. El 7 de febrero de 1991, un sensor establecido en la dolina suiza de Glattalp alcanzó los $-52,5^{\circ}\text{C}$ (Vertačnik et al., 2007), siendo así el registro más bajo de Suiza. De esta manera, se pudo comprobar la singularidad de estas ubicaciones dentro de los Alpes y su tendencia a provocar temperaturas extremas bajo condiciones de estabilidad atmosférica y cobertura nevosa abundante. De igual manera, empezaron a demostrarse evidencias de la formación de CAPs en determinados puntos de Japón (Yoshino, 1984).

En años recientes, se ha intensificado el estudio de este tipo de sistemas en distintas zonas del mundo, tanto con estudios descriptivos como analíticos y predictivos. Vitasse et al. (2017) describió el comportamiento de las inversiones térmicas en el valle ciego de La Brevine (Suiza), en el que se registran temperaturas inusualmente bajas debidas a la formación de CAPs. En Eslovenia, Verbovšek & Gabor (2019) describieron las propiedades morfométricas de las dolinas del suroeste del país, cuyos resultados podrían ser de interés a la hora de conocer el comportamiento de las CAPs.

En España, la primera aproximación al comportamiento de las CAPs tuvo lugar en los jous (dolinias de origen glaciokárstico) de Picos de Europa, sondeados por Iglesias González (2014). Además de un estudio descriptivo de los principales sistemas que arrojó registros por debajo de -30°C , se realizó un análisis pormenorizado de las condiciones atmosféricas que favorecen este tipo de fenómenos, teniendo en cuenta la aparición de CAPs que persisten durante las horas centrales del día (PCAPs, o Persistent Cold Air Pools), frecuentes en grandes valles durante los meses invernales (Zhong et al., 2001).

Tras este primer trabajo, han aparecido diversas publicaciones en otras zonas de la Península Ibérica, destacando las acontecidas en los Sistemas Béticos (Espín Sánchez et al., 2018; Espín

Sánchez et al., 2019; Espín Sánchez, 2021), donde se han descrito numerosos procesos de formación de CAPs y se ha demostrado la posibilidad de localizar la ocurrencia de estos fenómenos mediante el uso de termografías satelitales.

De forma adicional a los trabajos científicos, numerosos aficionados están llevando a cabo el muestreo térmico de numerosas dolinas dentro de la Península Ibérica, enmarcado dentro de asociaciones como ACAMET (Asociación de Cazatormentas y Aficionados a la Meteorología), AVAMET (Associació Valenciana de Meteorología) o NOROMET (Asociación Meteorológica del Noroeste Peninsular). Esta recogida de datos, basándose en las pautas propuestas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), ha arrojado resultados bastante destacables, entre los que se encuentran abundantes registros inferiores a los -30°C durante el mes de enero de 2021: $-35,8^{\circ}\text{C}$ en la Vega de Liordes (Macizo Central de Picos de Europa), $-34,8^{\circ}\text{C}$ en el Clot del Tuc de la Llanca (Pirineos de Lleida), $-34,1^{\circ}\text{C}$ en el Jou Santu (Macizo Occidental de Picos de Europa) o $-32,9^{\circ}\text{C}$ en la Vega de Camayor (Somiedo) y en Camalonga (Macizo de Larra, Navarra). Muchos de estos registros se publican en foros de aficionados, siendo el más relevante el caso de Meteored.

1.2. Justificación

Como puede deducirse de la bibliografía existente hasta el momento, existe relativamente poca información acerca de los factores meteorológicos que influyen sobre la formación de CAPs, así como de las condiciones imperantes en el interior de las dolinas cuando éstas se producen. Además, la mayoría de estudios se centran sobre registros puntuales o condiciones de abundante nieve en el suelo, cuando los procesos de formación de una CAP pueden variar notablemente en función de la época del año y la situación sinóptica general.

De forma adicional, existen numerosos registros extraoficiales de valores extremos en dolinas de alta montaña, pero las ubicaciones en media montaña o zonas más bajas no se encuentran muestreadas con la misma intensidad, a pesar de su mayor influencia sobre áreas habitadas o su proximidad a las mismas. Por otra parte, sería interesante comenzar a obtener registros oficiales y contrastados de estos lugares, debido a su enorme potencial para dar lugar a temperaturas extremas, aún dentro de un contexto de subida de temperaturas a nivel global, que puede favorecer que algunas especies utilicen estas zonas como refugio ante condiciones climáticas más desfavorables (Öztürk & Savran, 2020).

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio consistirá en conocer las condiciones atmosféricas a nivel sinóptico que favorecen la formación de CAPs en una dolina de la zona de Babia y Luna, para lo cual se perseguirán los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar datos de temperaturas máximas y mínimas, en igualdad de condiciones, del interior y el exterior de una dolina, con el fin poder establecer diferencias entre las dos zonas y asegurar la formación y persistencia de CAPs.
- Con los datos obtenidos del estudio de campo, verificar en qué situaciones meteorológicas la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de la dolina es máxima, y evaluar si se produjeron fenómenos de PCAP en la zona durante los meses invernales.
- Comprobar si existen diferencias apreciables en la frecuencia e intensidad de las inversiones térmicas en función de la época del año, tanto en las temperaturas máximas como en las temperaturas mínimas.
- Verificar, mediante un análisis de correlación, cuáles son las variables meteorológicas a nivel sinóptico que tienen una mayor influencia sobre la formación de CAPs y PCAPs.
- Elaborar una cartografía que muestre las situaciones sinópticas más favorables para la formación de CAPs y de PCAPs en función a los datos recogidos del estudio de campo, así como las más desfavorables.

3. Área de estudio

3.1. Entorno geográfico

El área de estudio se encuentra recogida dentro de la cuenca hidrográfica del río Luna, concretamente dentro del término municipal de San Emiliano. En el fondo de valle de este río, que discurre por las comarcas de Babia y Luna, aparece un paraje denominado “Prado Veneiro” en Iberpix, dividido en dos por una carretera que comunica San Emiliano con el resto de poblaciones al oeste del valle. Este paraje cobija en su interior una dolina de relieve suave, alcanzando unos 20m de profundidad y unas 20 hectáreas de superficie. El punto más bajo, a 1204m sobre el nivel del mar, es un pequeño sumidero de unos 2m de profundidad. Al sur del mismo, la dolina acaba abruptamente con una pequeña elevación (**Fig. 1**), separando así su reducida cuenca hidrográfica de la del río Luna y propiciando una menor insolación en los meses invernales.



Fig. 1. Dolina de Prado Veneiro observada desde la elevación presente al sur de la misma, con el Macizo de Las Ubiñas de fondo. Elaboración propia

Al noroeste de Prado Veneiro, a 3,5km en línea recta, se encuentra la localidad de Robledo de Babia, un pueblo de 36 habitantes que se encuentra a unos 100m por encima del fondo del valle, en una suave ladera de orientación sur (**Fig. 2**). Este lugar, cuya meteorología se ve ligeramente influenciada por valle principal (pero lejos de cualquier dolina o depresión cerrada), será el que se tome como referencia de las condiciones habituales dentro de una zona a media ladera de la Comarca de Babia.

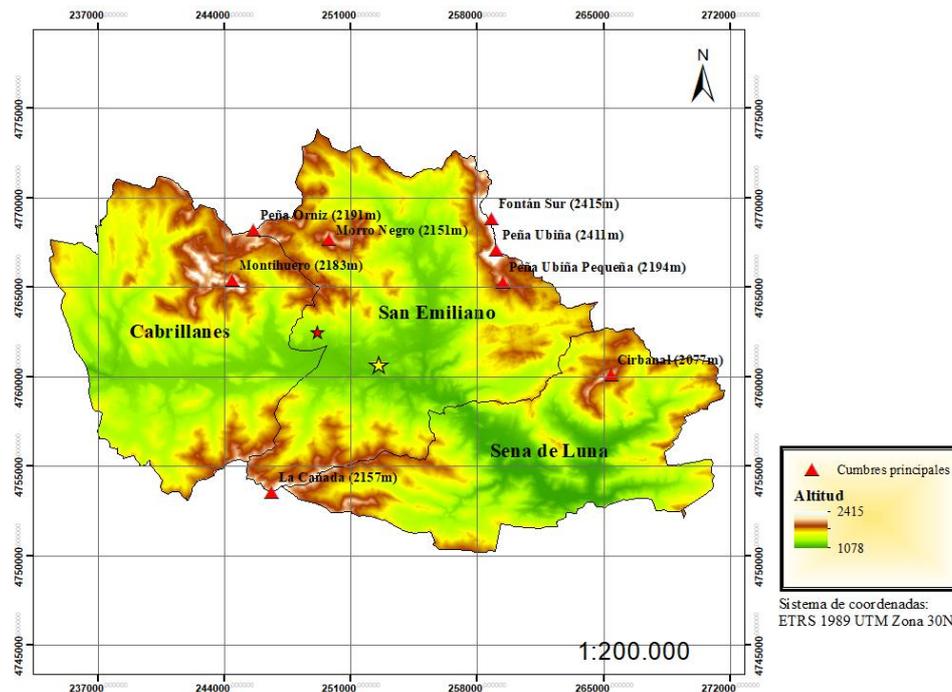


Fig. 2. Relieve de la Comarca de Babia y Sena de Luna, indicando las cumbres principales y los puntos estudiados en el estudio (en rojo Robledo de Babia, en amarillo Prado Venciro)

3.2. Clima

Las temperaturas de Babia y Luna son predominantemente frescas, con veranos templados y con grandes amplitudes térmicas diarias, así como inviernos fríos y prolongados. La temperatura media anual en los fondos de valle ronda los 8°C, si bien las mínimas bajan de cero en promedio durante los meses de invierno, según los datos proporcionados por el SIGA (Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios) para la serie termopluviométrica ubicada en Rabanal de Luna en el período 1961-2003.

El clima de estos fondos de valle, según la clasificación climática Köppen (1923), es un clima oceánico con verano seco (Csb). En cambio, las cumbres montañosas se clasifican como clima continental de verano seco y suave a frío en función de la altitud (Dsb y Dsc). A nivel general, la temperatura media anual oscila los 2°C en los puntos más elevados a los 9°C en las zonas más templadas de los valles, que en todo caso se encuentran por encima de 1100m sobre el nivel del mar. La precipitación media anual también varía bastante con la altitud, desde los 700mm por la sombra pluviométrica del valle de San Emiliano hasta los 1800mm en las cumbres, que reciben una alta pluviometría, procedente tanto de sistemas frontales atlánticos como de la influencia del Mar Cantábrico. Los días de nieve son muy abundantes en toda la zona, pudiendo acumularse importantes espesores durante los meses invernales.

No existen, teóricamente, grandes diferencias entre Prado Veneiro y Robledo de Babia en los mapas de precipitación y temperatura, indicando por tanto que el régimen térmico de las dos ubicaciones debería ser similar a lo largo del año (**Fig. 3**). No obstante, la formación de CAPs, no recogida en este tipo de mapas por la ausencia de datos históricos y su baja resolución espacial, podría implicar grandes diferencias en la temperatura a nivel local.

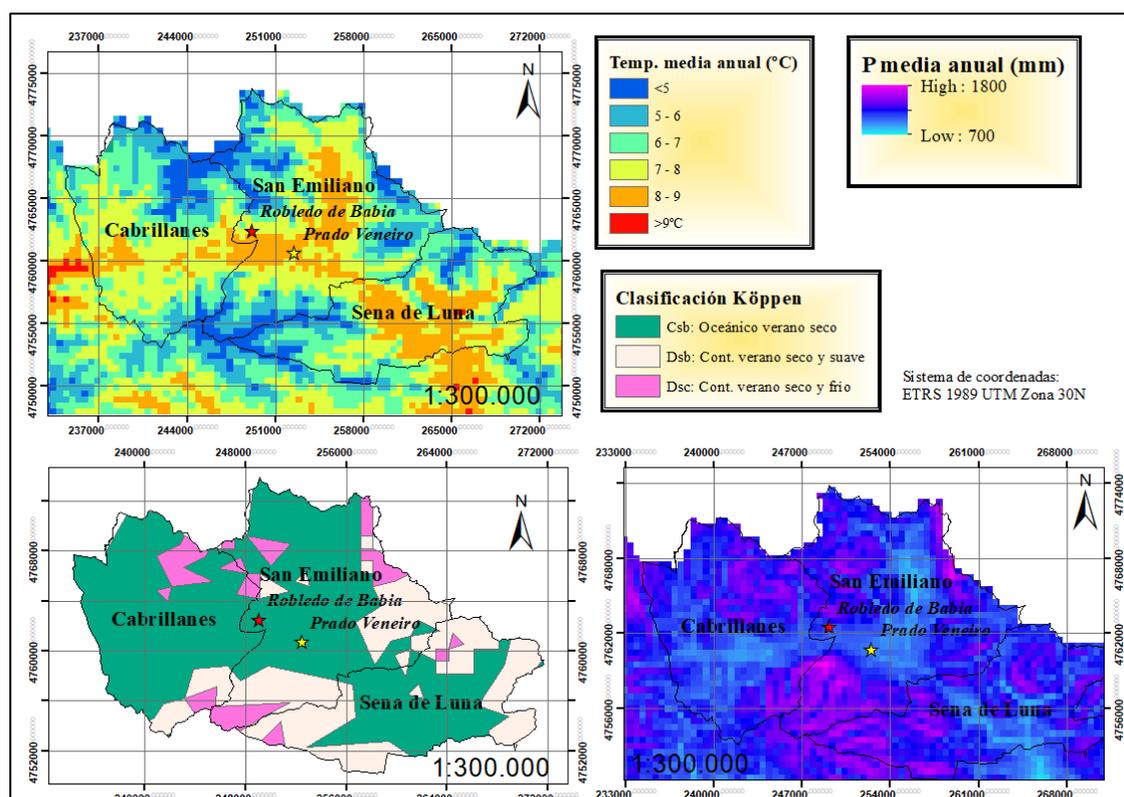


Fig. 3. Temperatura y precipitación media anual, así como la clasificación climática Köppen de la zona de estudio. Datos obtenidos del Atlas Agroclimático de ITACyL.

3.3. Geología y litología

Al igual que otras zonas de la vertiente asturiana próximas a Babia, la litología de la zona está claramente dominada por la roca caliza del Cámbrico, Devónico y Carbonífero (**Fig. 4**), influenciada por los plegamientos y cabalgamientos acontecidos durante la Orogenia Varisca (Santos González & Fernández Martínez, 2011). De forma ocasional, existen algunas zonas cuarcíticas y pizarrosas en el extremo sur, así como una banda que atraviesa el municipio de San Emiliano por el noroeste, a la altura de Torrestío. Son también frecuentes en los fondos de valle los coluviones, que son acumulaciones de material depositado como consecuencia de procesos erosivos. De igual manera, abundan los depósitos sedimentarios de los fondos de valle, de naturaleza principalmente básica como consecuencia de la litología de la zona.

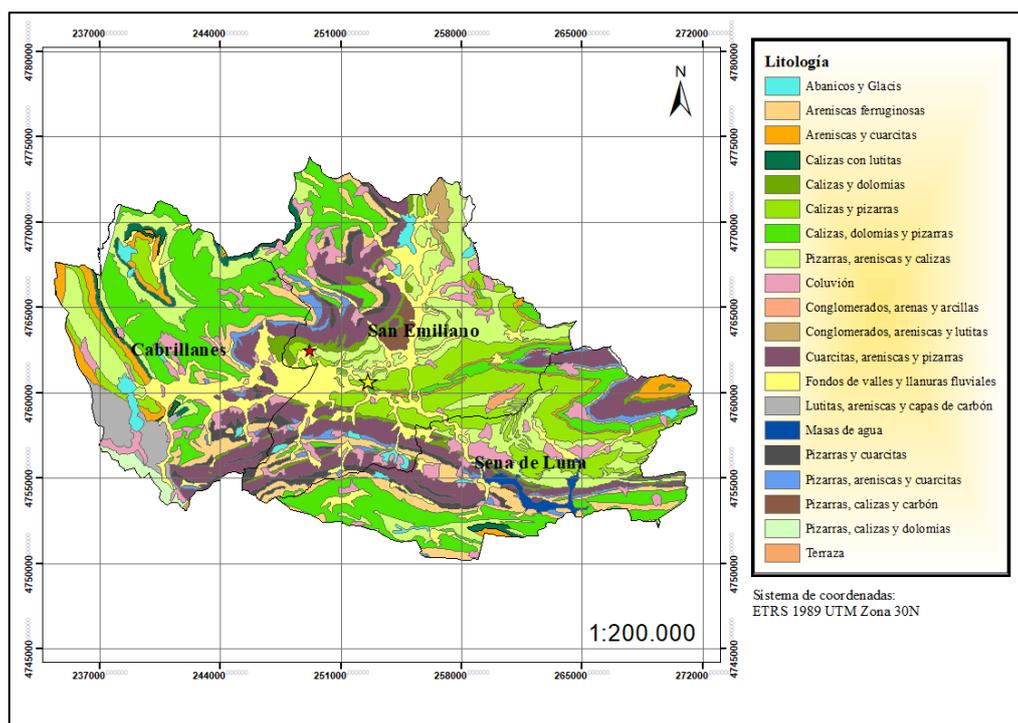


Fig. 4. Litología de la Comarca de Babia y Sena de Luna, destacando con colores verdes las formaciones litológicas en las que predomina la roca caliza. Datos obtenidos del Servicio Cartográfico de IDECyL.

Esta clara predominancia calcárea es indispensable para que se produzcan los fenómenos de inversión térmica que se estudiaron, puesto que los procesos de karstificación favorecen la aparición de depresiones cerradas en las que se pueden producir CAPs. Cabe destacar que la dolina de Prado Veneiro es el único sistema de estas características ubicado en el fondo de valle, puesto que el resto de dolinas se encuentran en zonas elevadas de los macizos calcáreos, ocasionalmente a cotas de 1900-2000m sobre el nivel del mar.

3.4. Fauna

La fauna silvestre de la zona es muy diversa, con más de 250 vertebrados descritos en el entorno de la Reserva de la Biosfera. Un elevado porcentaje de estas especies están recogidas en el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas. Dentro de ellas destacan algunos grandes mamíferos emblemáticos, como el oso pardo (*Ursus arctos*) o el lobo ibérico (*Canis lupus signatus*). También se encuentran diversas especies de interés, en algunos casos endémicas de la Península Ibérica: perdiz pardilla (*Perdix perdix*), liebre de piornal (*Lepus castroviejoii*), nutria (*Lutra lutra*), gato montés (*Felis sylvestris*), desmán ibérico (*Galemys pyrenaicus*), alimoche (*Neophron percnocterus*) o águila real (*Aquila chrysaetos*), entre muchas otras. En los alrededores de Prado Veneiro se pudo observar con frecuencia la presencia de zorro (*Vulpes vulpes*).

3.5. Vegetación

La flora de la de todo el entorno estudiado es muy diversa, comprendiendo un total de 1738 especies vegetales según la base de datos GBIF. Algunos taxones presentes en la zona son endémicos del NW Peninsular, como *Tragopogon pseudocastellanus* (endemismo exclusivamente babiano), *Saxifraga babiana*, *Fritillaria legionensis*, *Centaurea janeri subsp. babiana* y *Centaureium somedanum*.

En cuanto a la vegetación actual, las prácticas agrícolas y ganaderas tradicionales de trashumancia ovina acontecidas durante siglos han propiciado que las formaciones vegetales predominantes sean las de matorrales y pastos, que se encuentran intercaladas entre sí. Debido a la predominancia de los pastizales, en Babia existe una elevada representación de familias que prefieren ese tipo de formaciones vegetales, como las gramíneas o las orquídeas, que se desarrollan con abundancia en la ladera más umbría de la dolina estudiada (**Fig. 5**). Las masas arbóreas, aunque ocupan una extensión testimonial en Babia, ganan importancia hacia los extremos centro y sur, donde aparecen de forma ocasional robledales y abedulares.



Fig. 5. Orquídea mosca (*Ophrys insectifera*) en el interior de la dolina en la que se recopilaban los datos meteorológicos. Elaboración propia

Dentro de la dolina de Prado Veneiro abunda la sabina rastrera (*Juniperus sabina*), una especie típicamente oromediterránea adaptada a los grandes cambios de temperatura y la sequía estival de la zona. Se observaron varias especies de arbustos caducifolios habituales en el fondo de valle babiano (*Berberis vulgaris*, *Ribes uva-crispa*, *Rhamnus cathartica* y *Prunus spinosa*), de los cuales solo la primera especie fue capaz de fructificar, debido a las constantes heladas que acontecen durante todo el año. Se pudo observar en más de una ocasión la pérdida prematura de follaje por parte de la vegetación a causa de fuertes heladas en el mes de septiembre, así como la aparición muy tardía de las hojas, prácticamente en el mes de junio. Excluyendo estas especies, lo que predomina en la zona son los pastos herbáceos, y los árboles se encuentran totalmente ausentes, sobre todo por el intenso pastoreo, pero también por las difíciles condiciones para el crecimiento de plantas jóvenes (especialmente frondosas).

4. Material y métodos

4.1. Base de datos meteorológicos

Una vez seleccionadas las dos ubicaciones del estudio, se procedió a obtener la base de datos de cada uno de los lugares. Debido a reciente instalación de estaciones meteorológicas en la zona, apoyada por aficionados a la meteorología de distintas asociaciones, el periodo de datos estudiado comprendió desde el 15 de noviembre de 2019 hasta el 31 de enero de 2022, unos meses después de que se instalaran ambos equipos de medición.

En el caso de Robledo de Babia, los datos de temperatura se obtuvieron por medio de una estación meteorológica Davis Vantage Pro2, ubicada en una vivienda de la población a 2m por encima del tejado de la misma, de manera que la influencia de esta superficie artificial sobre las temperaturas fuera inapreciable (**Fig. 6**). Esta ubicación se eligió por ser la estación meteorológica más cercana a la dolina que se encuentra ligeramente por encima del fondo de valle, por lo que es un punto de referencia adecuado para establecer comparaciones entre las condiciones fuera y dentro de las CAPs que se forman en Prado Veneiro.



Fig. 6. Estación meteorológica Davis Vantage Pro2 ubicada en Robledo de Babia

Por otra parte, para la estación meteorológica instalada en Prado Veneiro se utilizó el modelo Davis Vantage Pro con un sistema Holfuy, con el fin de poder consultar los datos meteorológicos en tiempo real. A pesar de las pequeñas variaciones en el modelo, presenta el mismo sensor de temperatura y la misma garita de protección que la ubicada en Robledo de Babia. En este caso, la instalación tuvo lugar en el fondo de la dolina, a 1,5m sobre el suelo. De forma adicional, se añadió un registrador de datos (datalogger) del modelo Elitech RC-5

(Fig. 7) en una garita meteorológica artesana, con el fin de recuperar posibles pérdidas de datos de temperatura si la conexión con la estación dejara de funcionar.



Fig. 7. Instalación de la estación meteorológica Davis Vantage Pro con sistema Holfuy en la dolina de Prado Veneiro, el 28 de julio de 2019. A la derecha, datalogger Elitech RC-5 utilizado como apoyo para una posible pérdida de datos

De manera ocasional, se verificaron las mediciones de las estaciones meteorológicas con sondeos manuales en campo durante noches en las que la CAP fuera especialmente intensa, incluyendo episodios con presencia de cubierta nivosa en el suelo. Para ello, se utilizaron diversas sondas meteorológicas previamente calibradas con los datos ofrecidos por la estación.

Por último, para la obtención de datos sobre parámetros atmosféricos a nivel sinóptico se utilizó la base de datos de reanálisis ERA5 (Herbasch et al., 2018), ofrecida por el ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

Con la información obtenida de los datos de campo, además de definir las situaciones en las que las CAPs fueron más intensas y las diferencias a nivel global presentes entre Robledo de Babia y Prado Veneiro más destacables, se utilizarán una serie de análisis estadísticos para cumplir con los objetivos propuestos previamente en este estudio. De forma independiente, se realizó un Análisis de Componentes Principales y un test de correlación de Pearson.

4.2. Entornos sinópticos en los que se producen CAPs

Con el fin de clasificar las diferencias encontradas en los datos recopilados por las estaciones meteorológicas y representar los entornos sinópticos bajo los que se producen CAPs, se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (PCA), seguido de un análisis clúster no jerárquico realizado mediante el software RStudio.

El PCA, también conocido como transformada de Karhunen-Loève, es una herramienta estadística básica para el manejo de variables cuantitativas, de las cuales permite extraer información con el fin de distribuir los datos recopilados, de manera que estos puedan ser clasificados o visualizados a posteriori, facilitando su interpretación y eliminando el “ruido” producido por variables interrelacionadas entre sí (Kurita, 2020). Debido a su versatilidad, su uso se ha extendido a diversas disciplinas del ámbito científico, donde se lleva aplicando desde hace cerca de un siglo (Hotelling, 1933).

Los datos introducidos para realizar el PCA en este estudio fueron la altura del geopotencial de 500 hPa y presión al nivel del mar, puesto que estudios previos han demostrado su eficacia para identificar situaciones propensas para las inversiones térmicas en función de la distribución de los centros de altas y bajas presiones (Pascual et al., 2013). En total, se introdujeron 797 eventos para las temperaturas máximas (todos los días con datos) y 667 eventos para las temperaturas mínimas (todos los días que se produjo inversión térmica y $T_{min_Diff} < 0$) que tuvieron lugar entre el 15 de noviembre de 2019 y el 31 de enero de 2022.

El PCA se ha utilizado para la reducción del número de variables manteniendo una fuerte representación de la variabilidad contenida en los datos originales. En el presente estudio se seleccionaron las componentes que representan al menos el 90% de la varianza total.

En base a los resultados del PCA, se realizará un análisis clúster no jerárquico k-means, extrayendo una serie de clústeres claramente diferenciados en base a unas condiciones sinópticas concretas, que indicarán la frecuencia de las variables T_{min_diff} y T_{max_diff} para cada conjunto de datos. Se eligió la distancia euclidiana para clasificar grupos de datos según su similitud. Una de las fuentes de subjetividad en este método es el requisito de que el número de conglomerados finales (k) esté predeterminado de antemano. La selección de k se determinó minimizando las distancias intragrupo.

4.3. Condicionantes atmosféricos que favorecen la formación de CAPs

De forma paralela al PCA, se llevará a cabo un test de correlación de Pearson para conocer qué variables atmosféricas a nivel sinóptico guardan una mayor correlación con las diferencias de temperaturas registradas entre Robledo de Babia y Prado Veneiro. Para ello, se compararon las siguientes variables, todas ellas obtenidas a partir de ERA-5 0,25°: Temperatura a 500hPa (T_{500}), temperatura a 850 hPa (T_{850}), temperatura a 1000 hPa (T_{1000}), altura del geopotencial de 500 hPa (HGT 500), altura del geopotencial de 850 hPa

(HGT 850), altura del geopotencial de 1000 hPa (HGT 1000), nubosidad (Cloud cover), temperatura de la nieve (Temperature snow), profundidad de la nieve (Snow depth), presión al nivel del mar (mslp), temperatura estimada a 2m (t2m), punto de rocío a 2m (td2m), y velocidad del viento a 10m y 100m sobre la superficie en las componentes zonal y meridional (u10, v10, u100, v100). Todas estas variables se correlacionarán con las variables Tmin_Diff y Tmax_Diff, obtenidas de la base de datos meteorológicas recopilada.

Los archivos de reanálisis del ERA-5 proporcionan una recreación bastante precisa de las condiciones sinópticas acontecidas en el pasado, combinando la compleja red de observaciones meteorológicas ya existentes en la actualidad con modelos meteorológicos complejos. Debido a que los datos obtenidos del reanálisis son de periodos temporales recientes, la información que aportan acerca de las condiciones acontecidas para cada día del periodo de estudios es bastante fiable, si bien no tienen en cuenta las condiciones de orografía local debido a su resolución espacial, de aproximadamente 27km.

El test de correlación de Pearson, asociado al coeficiente homónimo (**Fig. 8**), es una herramienta frecuentemente utilizada con variables cuantitativas y continuas que presentan una relación lineal entre sí. Permite cuantificar la relación existente entre los valores de una serie de variables estudiadas, pudiendo tomar un valor entre -1 y +1. Un valor de -1 en el coeficiente de correlación indicaría que dos variables presentan una relación inversa perfecta, y que al aumentar el valor de una disminuirá el de la otra en la misma proporción. Al contrario, un valor de +1 indicaría que dos de las variables estudiadas se encuentran perfectamente relacionadas. Un valor próximo a cero, en cambio, indicaría que no existe correlación alguna entre dos variables.

$$r_{xy} = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2] \times [n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Fig. 8. Fórmula para obtener el coeficiente de Pearson (r_{xy}), en el que X e Y son las variables evaluadas y n el tamaño de la muestra (número de datos disponibles)

Al igual que en el caso anterior, se introdujeron 797 eventos para las temperaturas máximas (todos los días con datos) y 667 eventos para las temperaturas mínimas (todos los días que se produjo inversión térmica y Tmin_Diff < 0) que tuvieron lugar entre el 15 de noviembre de 2019 y el 31 de enero de 2022.

5. Resultados

5.1. Análisis de los datos de campo

Los valores obtenidos en el muestreo de campo demostraron una patente diferencia tanto en las temperaturas mínimas como en las máximas observadas en las dos ubicaciones que fueron objeto de estudio. Por un lado, las temperaturas mínimas registradas fueron claramente inferiores en la mayor parte del periodo de estudio en la dolina de Prado Veneiro, aparentemente sin depender demasiado de la época del año (**Fig. 9**). Aun así, las diferencias más acusadas se dieron en días puntuales del invierno, coincidiendo con cobertura nivosa en la superficie. La mayor diferencia registrada fue de $-20,6^{\circ}\text{C}$ ($-2,8^{\circ}\text{C}$ de temperatura mínima en Robledo de Babia frente a $-23,4^{\circ}\text{C}$ en Prado Veneiro).

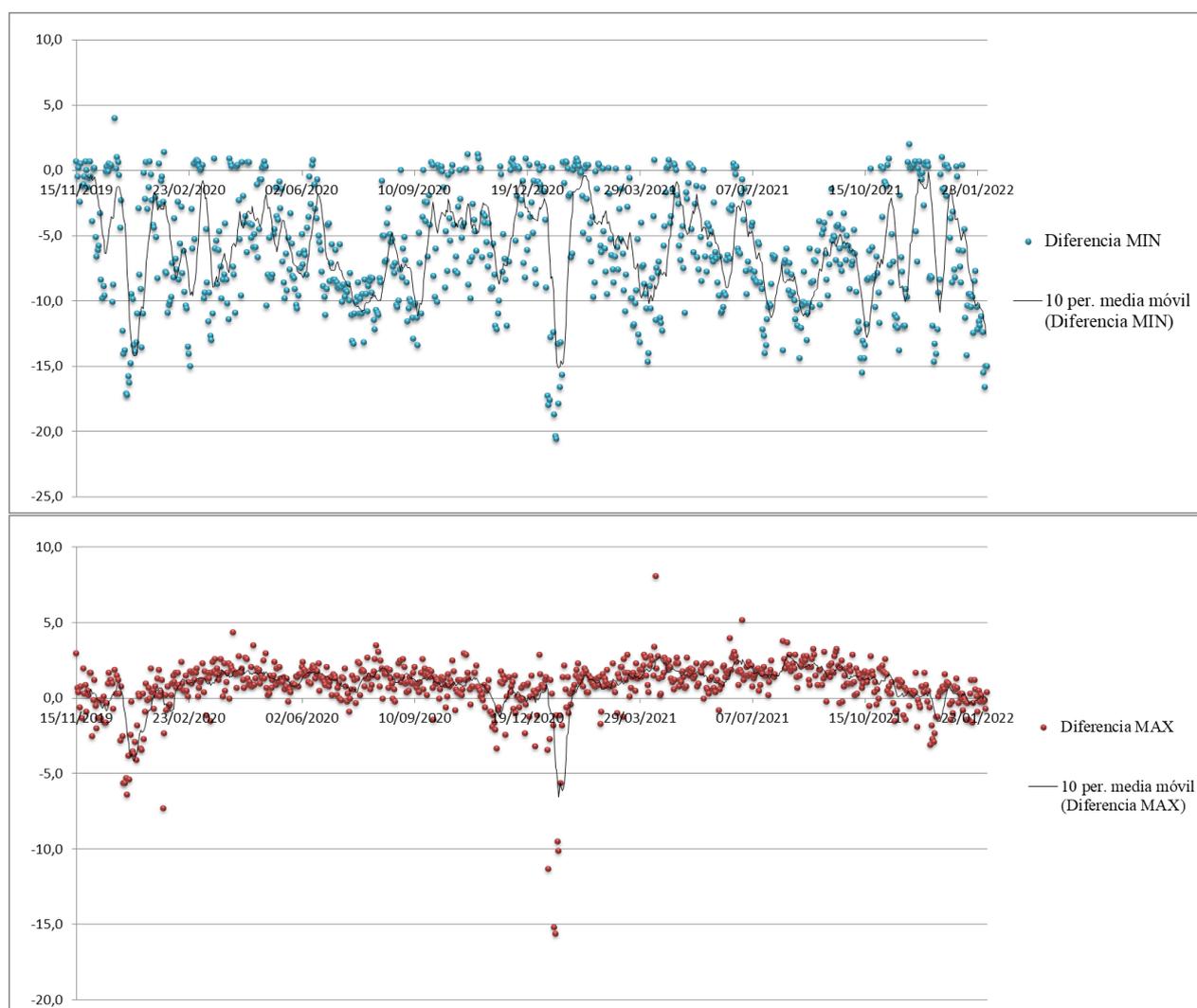


Fig. 9. Gráficas que muestran la diferencia de temperaturas mínimas (arriba) y máximas (abajo) entre Robledo de Babia (1320m) y la dolina de Prado Veneiro (1208m) desde el 15 de noviembre de 2019 al 31 de enero de 2022, acompañado por la media móvil de 10 días. Fuente: elaboración propia

En cambio, las temperaturas máximas se mantuvieron ligeramente por encima durante la mayor parte del periodo estudiado, a excepción de dos situaciones muy concretas en enero de los años 2020 y 2021, en los cuales hubo varios días con cielos despejados, escaso viento y nubosidad, por lo que esas máximas pudieron estar influenciadas por la formación de una PCAP (Permanent Cold Air Pool o Piscina de Aire Frío Permanente) que mantuvo la inversión térmica durante las horas centrales del día. Además, en el caso de enero de 2021 se añadió la presencia de cobertura nivosa reciente.

Por otro lado, los datos recogidos se agruparon en función de la época del año en diagramas de cajas (boxplot), con el fin de determinar si realmente existen diferencias apreciables en la intensidad y persistencia de las inversiones térmicas, tanto diurnas como nocturnas, según la estación del año.

Para las temperaturas mínimas, se pudo observar nuevamente cómo la diferencia es claramente negativa en la dolina de Prado Veneiro, y además sin depender de la estación del año (**Fig.10**). No obstante, sí se pueden percibir ligeras variaciones estacionales.

Por una parte, la mayor diferencia en el promedio en temperaturas mínimas no se produce en invierno, sino en los meses estivales, lo cual podría ser debido a la mayor persistencia de las condiciones de estabilidad atmosférica y noches despejadas durante esta época, que se puede deducir también de la poca dispersión que tienen los datos, la menor de todas las estaciones del año.

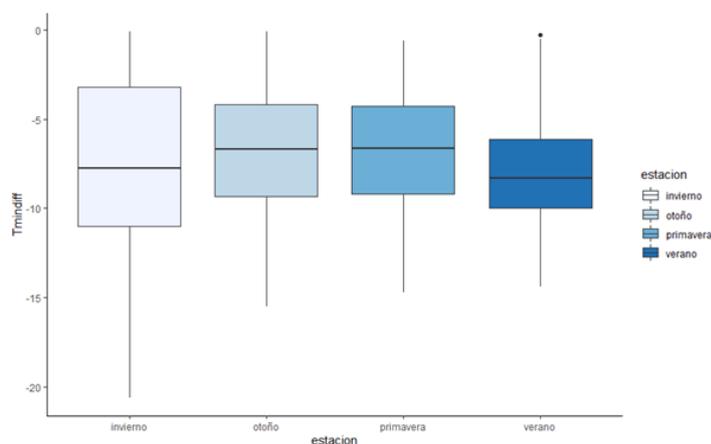


Fig. 10. Diagrama de cajas (boxplot) que representa la diferencia en las temperaturas mínimas de la dolina de Prado Veneiro (1208m) respecto a Robledo de Babia (1320m) según las estaciones del año. Elaboración propia

En el sentido contrario, la segunda estación del año en la que la diferencia de mínimas es mayor es durante el periodo invernal. No obstante, aunque las mayores diferencias diurnas se alcancen en esta época, la dispersión es la mayor de todas las estaciones. Esto delata que las condiciones adecuadas para las mismas, aunque sean las mejores, también son menos frecuentes, predominando en muchos casos entornos más advectivos que impiden la formación de grandes CAPs.

Por último, las estaciones en las que la diferencia es menor entre Robledo de Babia y la dolina de Prado Veneiro son la primavera y el otoño, presentando además una menor dispersión de los datos respecto al invierno. Esto se debe a que son los meses menos favorables a inversiones térmicas, con humedades ambientales más altas, episodios de lluvia más frecuentes y escasez de situaciones anticiclónicas persistentes.

Al comparar las diferencias de temperaturas máximas, se observa con claridad una baja dispersión de los valores, independientemente de la época del año, lo cual indica que existen pocas situaciones en las que las inversiones térmicas influyan sobre las temperaturas diurnas (Fig. 11). De hecho, la diferencia pasa a ser ligeramente positiva, lo cual indica que las temperaturas diurnas alcanzadas en Prado Veneiro son ligeramente superiores a las de Robledo de Babia. Curiosamente,

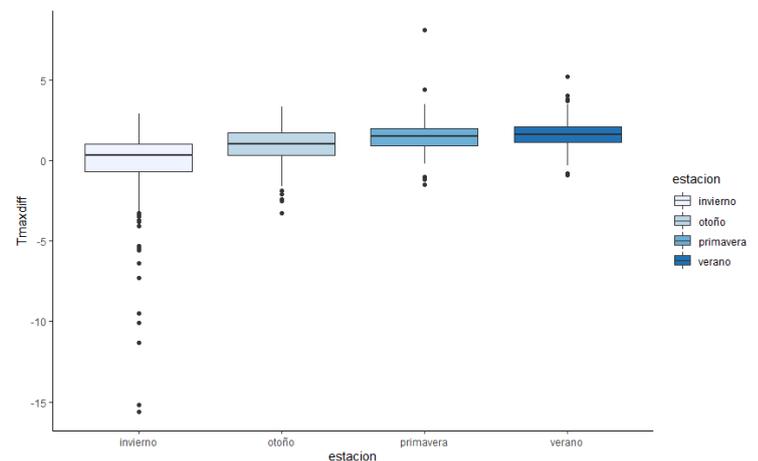


Fig. 11. Diagrama de cajas (boxplot) que representa la diferencia en las temperaturas máximas de la dolina de Prado Veneiro (1208m) respecto a Robledo de Babia (1320m) según las estaciones del año. Elaboración propia

esta diferencia tiende a ser similar al gradiente adiabático seco ($1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), que traducido a la diferencia altitudinal entre ambas estaciones sería de $+1,12^{\circ}\text{C}$, y no al gradiente térmico habitual en la atmósfera ($0,65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). No obstante, existen nuevamente pequeñas diferencias estacionales, que se exponen a continuación.

Aunque la diferencia sea positiva durante todas las estaciones del año, se observó que la diferencia es mucho mayor en los meses estivales, seguida de la primavera y el otoño y siendo mínimas las diferencias en invierno. Además, se observan numerosos “outliers”, muy especialmente en los meses invernales, en los cuales la diferencia de las máximas pasa a ser negativa. En el caso más extremo, la diferencia alcanzó $-15,6^{\circ}\text{C}$ ($9,4^{\circ}\text{C}$ de máxima en Robledo de Babia respecto a $-6,2^{\circ}\text{C}$ en Prado Veneiro). Estos valores más dispares, nuevamente, tienen lugar en días con presencia de cobertura nevosa y cielos despejados, delatando la formación de PCAPs.

Finalmente, se incluyen los resultados del sondeo realizado con una sonda datalogger Elitech RC-4 el día 12 de enero de 2020, a las 8:56h (UTC+1). Las condiciones en esta jornada eran de clara estabilidad atmosférica, con una dorsal anticiclónica estabilizada sobre la Península Ibérica y cielos mayormente despejados, acompañado de aire seco en capas medias de la atmósfera (**Fig. 12**). No había cobertura nivosa en el suelo en el momento del sondeo.

En definitiva, las mediciones se realizaron en un día con condiciones aptas para la formación de inversiones térmicas intensas, aunque no las óptimas debido a la ausencia de nieve en el suelo. Esto se realizó con el objetivo de medir las condiciones habituales que forman las CAPs de este lugar.

La sonda se elevó tomando como punto de partida la propia estación meteorológica situada en la dolina de Prado Veneiro (1208m), realizando un perfil de temperatura altitudinal hasta los 2020m, que pueden considerarse como atmósfera libre teniendo en cuenta que es una altura superior a la mayor parte de cumbres de la zona y, en consecuencia, no existirán inversiones térmicas que influyan en la temperatura.

Con estas condiciones, se observa la formación de un perfil con una inversión térmica muy marcada, de 17,8°C respecto a la atmósfera libre (-13,5°C a 1,5m respecto a 4,3°C a 800m sobre el suelo), registrándose un ascenso de la temperatura muy evidente a la vez que aumenta la altitud.

Durante los primeros 30m el ascenso de la temperatura es máximo, fruto de la estratificación del aire frío hacia las capas más cercanas del suelo y a la ubicación en una dolina, que favorece la intensificación de estos fenómenos a pequeña escala (**Fig. 13**). Posteriormente, la curva tiende a suavizarse, pues la inversión térmica que afecta a todo el valle de Babia es de menor intensidad. Al llegar aproximadamente a los 1500m, la temperatura se estabiliza en 4°C, semejante a la temperatura prevista a 850 hPa para dicha jornada. Por lo tanto, a partir de esta altitud ya no existe inversión térmica, y la sonda entra en la atmósfera libre.

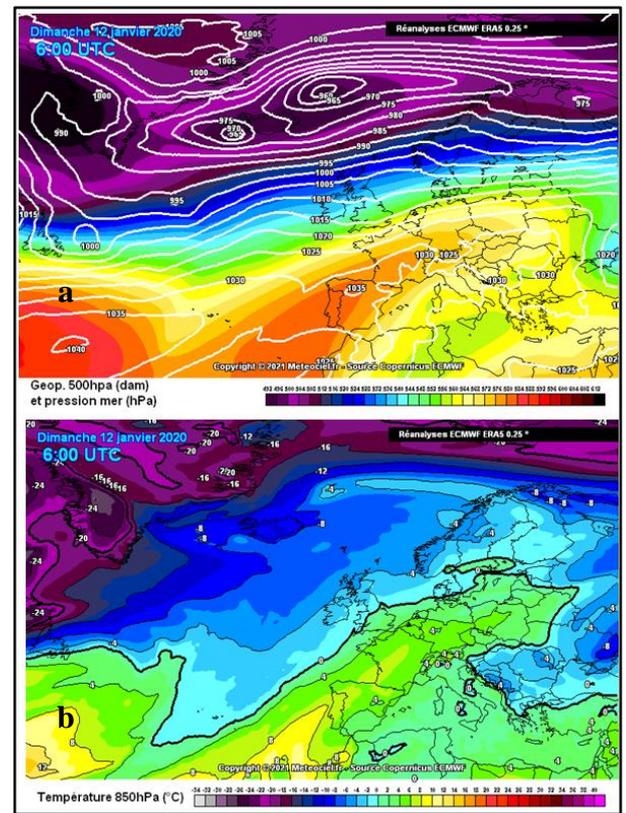


Fig. 12. Mapa con las condiciones del geopotencial a 500hPa y presión al nivel del mar del día 12 de enero del 2020 a las 6h UTC (a), así como la temperatura estimada a 850 hPa (b). Fuente: Meteociel. Réanalyses ERA-5 0,25°

Posteriormente, se observa un ligero descenso a partir de los 1900m, fruto del aumento en altitud de la sonda.

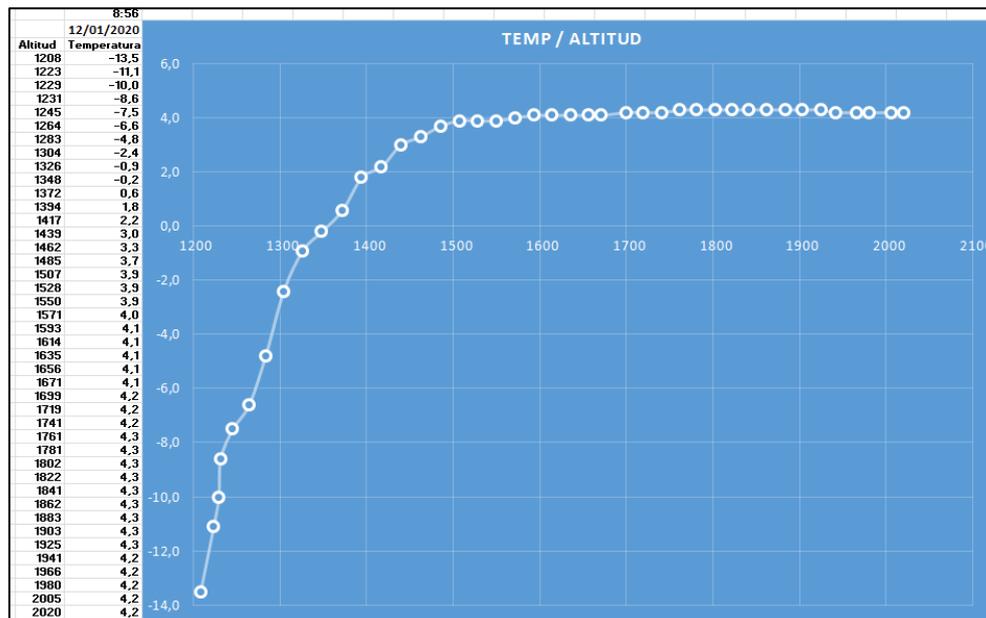


Fig. 13. Gráfica que representa la temperatura del aire en función de la altitud del día 12 de enero de 2020 a las 8:56h (UTC+1). Fuente: Adrián Rodríguez Martínez, socio de NOROMET

5.2. Entornos sinópticos en los que se producen CAPs

Con el fin de conocer las condiciones sinópticas en la atmósfera que favorecen la formación de CAPs, se utilizó la base de datos de reanálisis ERA-5, como ya se comentó previamente, para el periodo en el que se tomaron los datos de ambas estaciones meteorológicas. Las variables estudiadas se obtuvieron para la zona comprendida entre 30–60° N y 30° W–10° E, dentro de la cual se encuentra la Península Ibérica.

Una vez obtenida la información sobre las condiciones de la atmósfera para cada día del periodo de estudio, se procedió a realizar una clasificación de los datos en varios grupos (clústeres) en función de las diferencias de temperatura mínima y máxima, con el fin de ver qué situaciones de la atmósfera son las más propicias para la formación de CAPs más intensas y cuáles son menos propicias. En definitiva, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) seguido de un análisis clúster no jerárquico k-means, en base a 3 clústeres previamente seleccionados. Para las temperaturas mínimas se tuvieron en cuenta solamente los días en los que la diferencia entre las mínimas fuera $<0^{\circ}\text{C}$, mientras que en las temperaturas máximas se utilizó toda la serie de datos disponible.

En las temperaturas mínimas se observaron 3 situaciones sinópticas claramente diferenciadas. Por un lado, el clúster 1 está asociado a las mayores diferencias de temperatura entre Robledo de Babia y Prado Veneiro, es decir, a las CAPs más intensas. La situación atmosférica más propicia para estas circunstancias es, atendiendo a los resultados obtenidos, la formación de una extensa cuña anticiclónica en la que el centro de altas presiones se ubica sobre las Azores, acompañado de unos geopotenciales a 500hPa elevados, alrededor de 5700-5800m (**Fig. 14**). Es, en definitiva, un patrón atmosférico que en la Península Ibérica implica la predominancia de cielos despejados, vientos flojos y alta estabilidad, por lo que, a priori, es el óptimo para la formación de CAPs. Son situaciones generalmente asociadas a un índice NAO-.

Por el contrario, el clúster 2 agrupó los días en los que las diferencias de temperatura son escasas (inversiones térmicas débiles) o nulas (periodos advectivos), por lo que engloba aquellas condiciones sinópticas en las que es poco probable la formación de inversiones nocturnas (**Fig.7**). Aunque el anticiclón sigue teniendo su centro en Azores, la cuña anticiclónica se encuentra bastante alejada de la Península, favoreciendo el acercamiento de una zona de bajas presiones que se sitúa hacia las Islas Británicas. Esto provoca la presencia de geopotenciales más bajos (5600m), así como una evidente advección de vientos de componente NW. Además, este tipo de situaciones vienen acompañadas por una elevada nubosidad y precipitaciones, dificultando la formación de inversiones térmicas nocturnas.

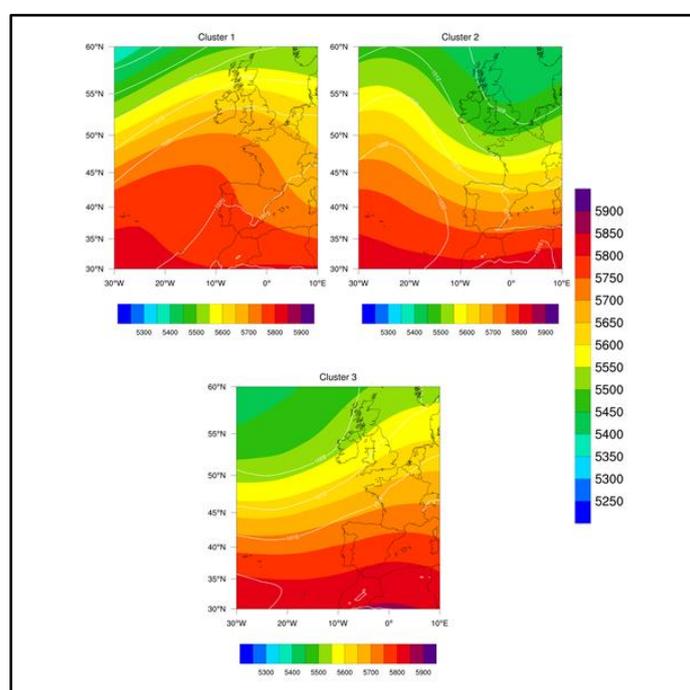


Fig. 14. Mapa en el que aparecen representadas las situaciones sinópticas en función de las diferencias en las temperaturas mínimas (Cluster 1, máxima diferencia; Cluster 2, mínima diferencia; Cluster 3, situación intermedia). Fuente: Elaboración propia a partir de reanálisis ERA-5 0,25°

Por último, el clúster 3 agrupa una situación intermedia, en la que es más frecuente que se produzcan inversiones térmicas, pero no de gran intensidad. A nivel sinóptico, se asemeja a una típica situación de índice NAO+, en la que el jet presenta pocas ondulaciones, con los centros de altas presiones estancados al sur de la Península Ibérica y un centro de bajas presiones ubicado hacia Groenlandia. Esta situación, bastante frecuente durante gran parte del año, aporta las condiciones de estabilidad suficientes para que se formen CAPs, pero viene

acompañada por ausencia de cobertura nivosa, mayor humedad ambiental y posible presencia de nubosidad, que limitan por tanto su intensidad.

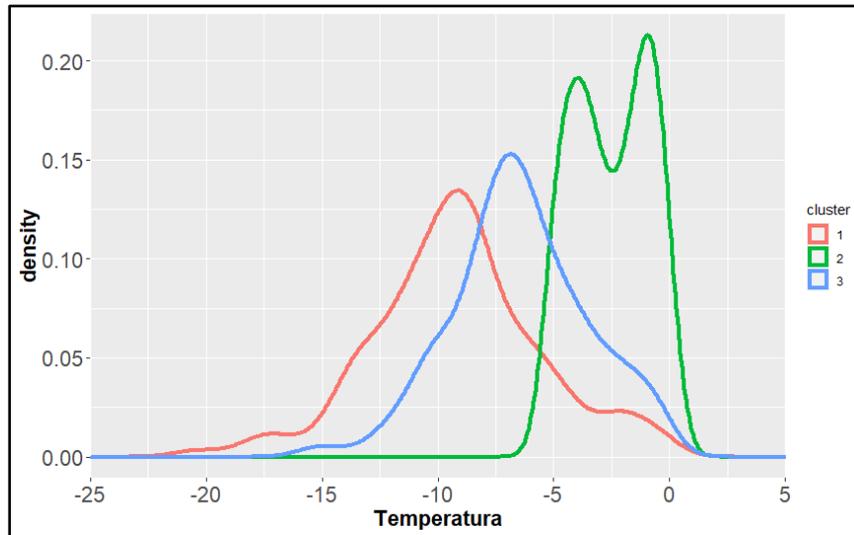


Fig. 15. Frecuencias en Tmin_Diff por Cluster. Cluster 1, máxima diferencia; Cluster 2, mínima diferencia; Cluster 3, situación intermedia. Fuente: elaboración propia

En las temperaturas máximas, al igual que en la diferencia de las temperaturas mínimas, también se realizó una clasificación en 3 clústeres en función de los datos obtenidos, si bien en este caso la separación es menos evidente debido a la menor variabilidad que presentan estos datos. Por una parte, el cluster 1 representa aquellos días en los que la temperatura máxima es superior en Prado Veneiro, en los que no existe ningún tipo de inversión térmica diurna. El resultado, a nivel sinóptico, es una situación típica tras el paso de un centro de bajas presiones por la Península Ibérica, con una advección débil de vientos de componente oeste y el anticiclón ubicado sobre las Islas Azores (Fig. 8). Esta situación, claramente advectiva y muy frecuente en la ubicación estudiada, favorece que se mantenga el gradiente altitudinal habitual de la atmósfera ($0,65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) e impide la estratificación del aire en capas bajas. Además, es una situación en la que generalmente no existe cobertura nivosa.

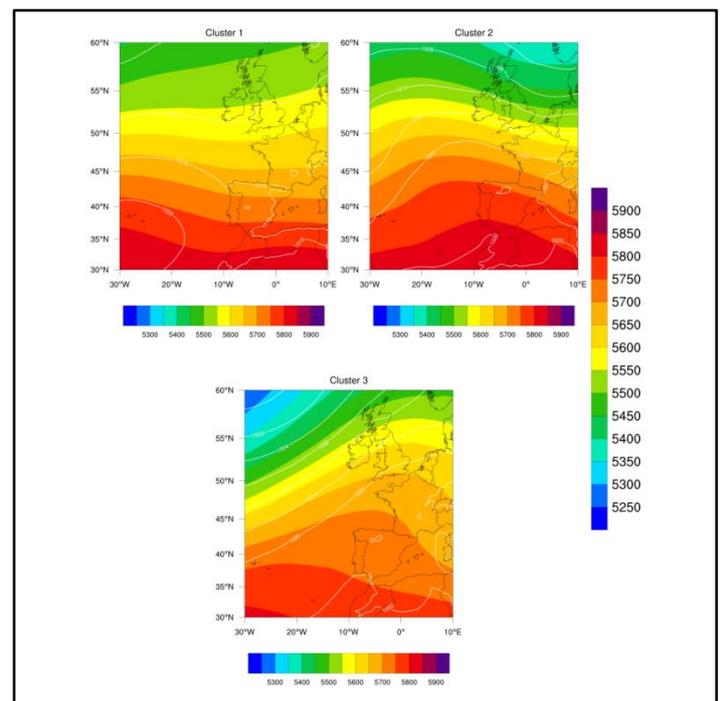


Fig. 15. Mapa en el que aparecen representadas las situaciones sinópticas en función de las diferencias en las temperaturas máximas (Cluster 1, máxima diferencia positiva; Cluster 2, sin diferencias; Cluster 3, máxima diferencia negativa). Fuente: Elaboración propia a partir de reanálisis ERA-5 0,25°

Por otro lado, el cluster 2 representa una situación intermedia, en la que las diferencias de las máximas tienden a cero o se encuentran muy ligeramente por debajo en Prado Veneiro, denotando la presencia de una inversión térmica diurna muy débil. Esto a nivel sinóptico se ve representado por la presencia de un centro de altas presiones ubicado directamente sobre la Península Ibérica, acompañado de geopotenciales a 500hPa bastante elevados (5800m). Es, por tanto, una situación que favorece las inversiones térmicas nocturnas, pero no tanto las diurnas, al venir acompañada de escasa nubosidad y cobertura nivosa, dificultando así la estratificación del aire en las horas centrales del día.

Por último, el cluster 3 es el más diferente de todos, debido a que incluye aquellas raras situaciones en las que se producen PCAPs, y por lo tanto existe una inversión térmica que persiste durante las horas centrales del día (**Fig. 16**). La situación atmosférica que produce este tipo de situaciones es bastante específica, pues requiere de la situación de una dorsal anticiclónica sobre la Península Ibérica tras el paso de un centro de bajas presiones invernal, que haya dejado precipitaciones en forma de nieve. Por lo tanto, la presencia de nieve en el suelo, acompañada de la estabilidad atmosférica, cielos despejados y escasa nubosidad, provocan la formación de inversiones térmicas que en el valle de Babia pueden persistir durante todo el día, siendo especialmente intensas en la dolina de Prado Veneiro.

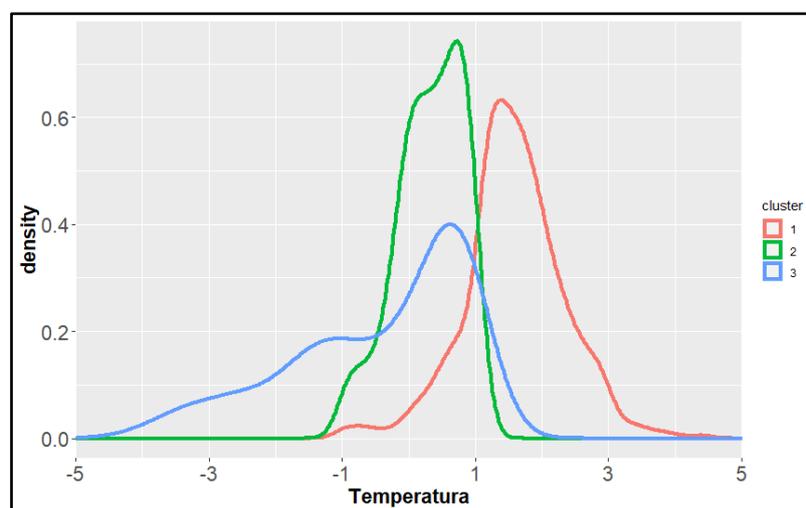


Fig. 16. Frecuencias en Tmax_Diff : Cluster 1, máxima diferencia positiva; Cluster 2, sin diferencias; Cluster 3, máxima diferencia negativa. Elaboración propia

No obstante, estos mapas generados no se encuentran asociados a ninguna estación concreta. Por lo tanto, para comprobar si existen diferencias según la estación del año en la distribución de los datos que tiene cada clúster, se realizó un gráfico de barras (barplot) que dividiera los datos en función de las distintas estaciones del año (**Fig. 17**). Los resultados demostraron que en la mayoría de escenarios no influye de forma significativa la estación del año, a excepción de dos casos. Por una parte, el cluster 3 en las temperaturas mínimas muestra que dicha situación sinóptica se produjo con más frecuencia en los meses de verano.

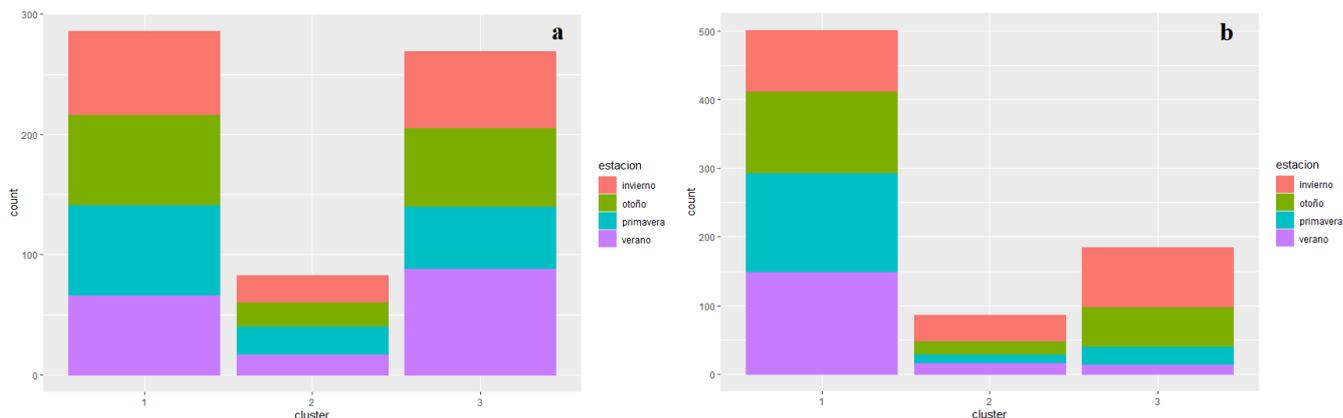


Fig. 17. Gráfico de barras (barplot) en el que se representa la distribución de los valores agrupados por cada clúster en función de la estación del año para las temperaturas mínimas (a) y temperaturas máximas (b). Elaboración propia.

Por otro lado, se pueden observar importantes diferencias en la distribución del clúster 3 en las temperaturas máximas. Según el gráfico de barras, es una situación mucho más frecuente en invierno y algo menos en otoño, pero muy poco frecuente en primavera y verano. Debido a que es una situación que requiere de baja radiación solar, cielos despejados y normalmente presencia de cobertura nival, es mucho más frecuente en los meses invernales que en el resto del año.

5.3. Condicionantes atmosféricos que favorecen la formación de CAPs

En la diferencia existente en las temperaturas mínimas (T_{min_diff}), se observó que el mayor valor de correlación (0,57) tiene lugar con la nubosidad, implicando por tanto que existe una fuerte correlación positiva entre ambas variables. Esto quiere decir que, a menor nubosidad presente, mayor es la diferencia negativa de temperaturas mínimas entre Robledo de Babia y Prado Veneiro, y más intensa será la formación de CAPs (**Fig. 18**).

La siguiente variable con mayor correlación sería la componente zonal del viento, que indica la velocidad del mismo en el sentido oeste-este, y alcanza un valor de 0,3 a 100m y de 0,22 a 10m. Esto significa que existe, nuevamente, una correlación positiva, que implica que cuanto menor sea la componente zonal, más negativo será el valor de la diferencia de temperaturas. Esto es bastante lógico comparado con los datos obtenidos anteriormente, puesto que las condiciones de fuerte viento zonal no suelen estar asociadas a importantes dorsales anticiclónicas establecidas sobre la Península Ibérica. Esta correlación se produce en mucha menor medida con la componente meridional del viento, lo cual podría ser debido a la orientación del valle (oeste-este), disminuyendo por lo tanto la influencia de las componentes norte-sur.

Otra variable con una importante correlación positiva es el punto de rocío a 2m, con un valor de 0,26. Esto implica que una menor temperatura de rocío favorece una mayor diferencia entre Robledo de Babia y Prado Veneiro. Esto tiene gran relación con el contenido en humedad del aire, puesto que si éste es elevado y se produce una inversión térmica, se alcanzará rápidamente la saturación y habrá fenómenos de condensación. Estos fenómenos aportan calor latente por condensación, limitando finalmente la intensidad de las inversiones. Adicionalmente, la presencia de nubosidad en capas bajas (nieblas) provoca un aumento en la absorción del flujo radiativo terrestre de onda larga, limitando notablemente el enfriamiento del aire.

Por otra parte, las mayores correlaciones negativas se dieron con el geopotencial a 850hPa (-0,47) y el geopotencial a 500 hPa (-0,43), implicando por tanto que, a mayor geopotencial en ambas capas, mayor es la diferencia negativa en temperaturas. Esto confirma, nuevamente, la importancia de la presencia de un anticiclón sobre la Península Ibérica, que favorezca procesos de subsidencia que dan lugar a inversiones térmicas. Esto se confirma también con una elevada correlación negativa con la presión al nivel del mar (-0,36).

También cabe destacar una importante correlación negativa con la temperatura estimada a 1000 hPa (unos 100-200m sobre el nivel del mar, por lo que en este estudio no obtiene datos

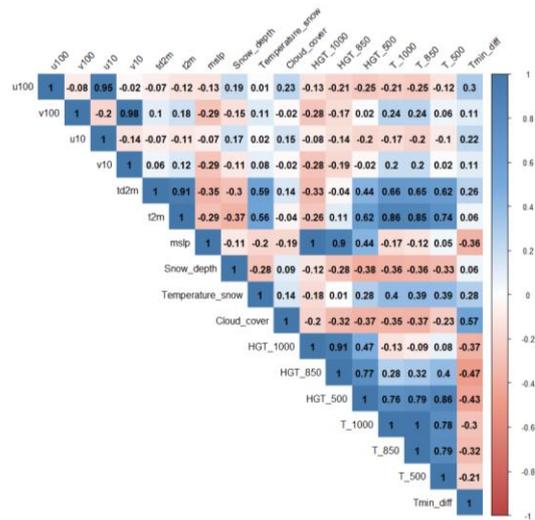
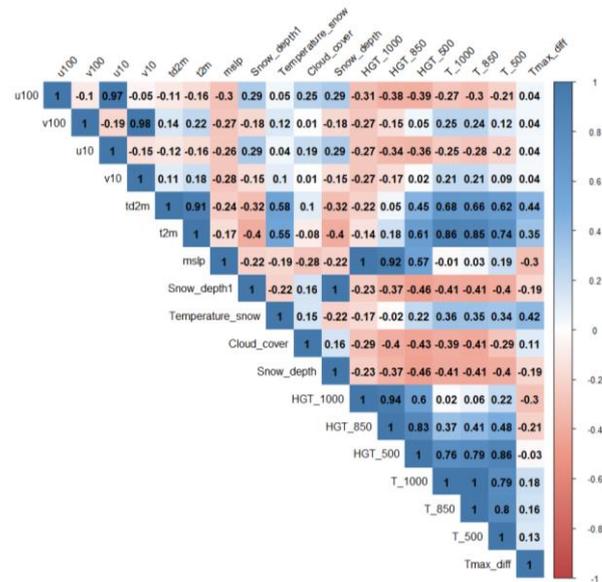


Fig. 18. Tabla de correlación entre las distintas variables atmosféricas proporcionadas por la base de datos de reanálisis ERA-5 0,25° respecto a la diferencia de temperaturas mínimas entre Robledo de Babia y Prado Veneiro (Tmin_diff). Elaboración propia

concluyentes), a 850 hPa y a 500 hPa, demostrando que normalmente, a mayor temperatura en todas las capas, mayor es la inversión térmica en términos absolutos, pues toma valores negativos.

En las temperaturas máximas, las correlaciones de muchas variables no fueron demasiado significativas debido a su menor variabilidad, pero existen algunas en las que sí se dio una correlación importante.

En primer lugar, destaca la importante correlación positiva respecto a la temperatura del punto de rocío a 2m, con un valor de 0,44 (Fig. 19). Esto implica que, a mayor temperatura del punto de rocío, mayor es la diferencia positiva en las temperaturas máximas, indicando por tanto que las temperaturas alcanzadas en Prado Veneiro durante el día serán superiores a las que alcanza Robledo de Babia. Esto implicaría, por lo tanto, la ausencia de inversiones térmicas. También se observa un alto coeficiente de



correlación (0,35) en la temperatura estimada a 2m, implicando que los días con temperaturas máximas elevadas (días soleados en los meses estivales) son en los cuales la diferencia positiva es más acentuada.

Fig. 19. Tabla de correlación entre las distintas variables atmosféricas proporcionadas por la base de datos de reanálisis ERA-5 0,25° respecto a la diferencia de temperaturas máximas entre Robledo de Babia y Prado Veneiro (Tmax_diff). Elaboración propia

Por otra parte, destaca una elevada correlación positiva con la temperatura de la nieve, la cual no estaba presente en las temperaturas mínimas (0,42). Esto indica la necesidad de la presencia de una cubierta nivosa para que se produzcan inversiones durante las horas diurnas. En consecuencia, cuanto más baja es la temperatura de la nieve, mayor es la diferencia negativa de temperaturas en Prado Veneiro, lo que indica que se está produciendo una PCAP durante las horas centrales del día.

Por último, en las correlaciones negativas, alcanzan unos valores destacables la presión al nivel del mar (-0,30) y la altura del geopotencial a 1000 hPa (-0,30). Esto quiere decir que, al igual que en las temperaturas mínimas, a mayor geopotencial mayor es la diferencia negativa en temperaturas, incidiendo de nuevo en la importancia de la presencia de un anticiclón sobre la Península Ibérica para que se induzca la formación de PCAPs.

6. Discusión

Al evaluar los resultados obtenidos de las estaciones meteorológicas de Prado Veneiro y Robledo de Babia, se pueden realizar las siguientes consideraciones:

En el caso de la dolina de Prado Veneiro, el periodo de estudio ha arrojado unos datos notablemente singulares. En tan solo dos años de estudio, se ha obtenido un registro nunca medido históricamente en la Comarca ($-29,7^{\circ}\text{C}$ el 7 de enero de 2021) y un elevado número de heladas anuales (superior a 200). Además, estas heladas se producen todos los meses del año, registrando temperaturas de hasta -8°C en pleno mes de agosto a pesar de un contexto de aumento de temperaturas a nivel global. Estos datos tan destacados a nivel peninsular reafirman la singularidad de este tipo de ubicaciones respecto a su entorno: los únicos registros oficiales que se encuentran por debajo la temperatura registrada en Prado Veneiro son los -30°C en Fuentes Claras (Teruel) del gélido mes de diciembre de 1963 y -32°C en Estany Gento (Lleida) en febrero de 1956 (Núñez et al., 2006; Aupí, 2016). Debido a la situación de la dolina estudiada, el impacto de este tipo de inversiones térmicas es mucho más apreciable que en el resto de ubicaciones estudiadas en alta montaña, al influir sobre el ganado de la zona y la circulación de personas a través del lugar.

Al comparar la diferencia de temperaturas observadas en Prado Veneiro y Robledo de Babia, se pudo observar una clara predominancia de condiciones de inversión térmica nocturna, puesto que las mínimas registradas en la dolina fueron inferiores la mayor parte de los días del periodo estudiado. En cambio, las máximas se mantuvieron ligeramente por encima en Prado Veneiro, respondiendo al gradiente altitudinal del valle y al calentamiento radiativo de la superficie, a excepción de dos episodios en enero de 2020 y enero de 2021. En este último, la espesa y reciente cobertura nivosa provocó la formación de una intensa PCAP que se mantuvo durante las horas centrales del día debido al elevado albedo de la nieve reciente (Zhang, 2005) y a unas condiciones de estabilidad atmosférica, con poco viento en todas las capas.

Las diferencias entre las temperaturas mínimas experimentaron variaciones según la época del año, si bien fueron mucho más significativas en las temperaturas máximas y durante los meses de invierno. Esto, de nuevo, está asociado a que la formación de PCAPs, fuertemente relacionada con la presencia de nieve reciente, causa un aislamiento de la dolina respecto a la atmósfera libre, manteniendo la inversión térmica a pesar de la insolación directa (Sheridan, 2019) y no aparece el resto del año. Fuera del invierno, las temperaturas máximas fueron más elevadas en Prado Veneiro, con una diferencia similar al gradiente adiabático seco

(1°C/100m) que puede ser debida al calentamiento de la superficie del fondo de la dolina por la insolación, ya que la diferencia se acentúa en los meses estivales (Millán, 2003). En cambio, en las temperaturas mínimas existe una menor variabilidad, si bien parece que la mayor persistencia de condiciones estables en la atmósfera durante los meses estivales e invernales acentúan las diferencias entre la dolina y el exterior del valle.

En cuanto a la modelización de situaciones atmosféricas que favorecen la formación de CAPs, se ha podido constatar que las inversiones térmicas más intensas se produjeron bajo una situación de cuña anticiclónica con geopotenciales a 500 hPa elevados, aunque también se produjeron CAPs de menor intensidad en situaciones de NAO+ con una circulación zonal en altas latitudes. Esto concuerda con los pocos estudios realizados a nivel nacional (Iglesias González, 2014; Espín Sánchez et al., 2018) e indica que las inversiones térmicas predominan durante la mayor parte del año, al igual que en zonas del sureste peninsular (Espín Sánchez, 2022).

Se ha observado, en base a la matriz de correlación, que las variables con mayor correlación sobre la diferencia de temperaturas mínimas entre Robledo de Babia y Prado Veneiro son la nubosidad (0,57), la temperatura a 850 hPa (-0,47), la temperatura a 500 hPa (-0,43), la presión al nivel del mar (-0,36) y la temperatura del punto de rocío (0,26). Estos valores indican que las mayores diferencias de temperatura nocturnas se tienden a registrar en noches con poca nubosidad, temperaturas bajas en superficie y capas medias, presión al nivel del mar elevada y un punto de rocío bajo, lo cual concuerda con otros estudios realizados a nivel mundial sobre este tipo de fenómenos (Yoshino, 1984; Clements et al., 2003; Whiteman et al., 2004; Steinacker, 2007; Vitasse et al., 2017). En cambio, la diferencia de temperaturas máximas en los días que se formaron PCAPs tuvo una correlación considerable con el punto de rocío (0,44), la temperatura de la nieve (0,42), la temperatura a 2m (0,35) y la presión al nivel del mar (-0,30). Esto indica la gran importancia de la presencia de nieve en superficie, que provoca un albedo muy elevado e inhibe el calentamiento de la superficie durante el día, impidiendo así la rotura de la CAP. Por tanto, para que se formen PCAPs en Prado Veneiro debe haber presencia de cobertura nivosa (la cual estará a menor temperatura cuanto más intensa sea la PCAP), puntos de rocío bajos y una presión alta, influyendo en menor medida los geopotenciales que para las temperaturas mínimas. Estos valores se encuentran respaldados por otros estudios realizados sobre PCAPs en Utah, en las que la cobertura nivosa provoca eventos de varios días de duración (Laureau et al., 2013).

7. Conclusiones

En vista a los resultados ofrecidos por el estudio y su comparación con otras publicaciones previas, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. La dolina de Prado Veneiro, en el municipio de San Emiliano de Babia, ha registrado la temperatura más baja medida en los fondos de valle de la provincia de León, bajando a $-29,7^{\circ}\text{C}$ el 7 de enero de 2021. Además, este paraje destaca por sus bajas temperaturas durante todo el año, habiendo registrado valores de -8°C en pleno periodo estival, a pesar de su ubicación en latitudes medias bajo un contexto de subida de temperaturas a nivel global.
2. El sondeo vertical realizado en el interior de la dolina demostró la existencia de una fuerte inversión térmica nocturna en el valle de Babia que se ve amplificada de forma local por la presencia de la dolina, indicando la formación de CAPs en su interior.
3. Al comparar los registros entre la dolina de Prado Veneiro y el pueblo de Robledo de Babia, en la ladera del valle, se ha podido constatar una predominancia absoluta de situaciones de inversión térmica nocturna, con diferencias de temperatura que puntualmente han llegado a superar los 20°C de diferencia en apenas 100m de desnivel, mucho mayores que las generadas por el resto del fondo del valle del río Luna. Esta situación, no obstante, se revierte durante el día, aunque en mucha menor medida, respondiendo al calentamiento radiativo de la superficie terrestre. No obstante, en algunas situaciones puntuales durante los meses de invierno, se ha observado la persistencia inversiones térmicas durante las horas centrales del día, alcanzando los $15,9^{\circ}\text{C}$ de diferencia negativa en el episodio más intenso, de enero de 2021, en lo que se conocen como PCAPs.
4. La diferencia en las temperaturas mínimas entre las dos ubicaciones estudiadas se mantuvo negativa durante todo el año, si bien es más intensa los meses estivales e invernales y más débiles durante la primavera y el otoño. En cambio, las temperaturas máximas se alcanzaron valores más positivos durante los meses de verano, mientras que en invierno la diferencia fue mucho menor entre ambos emplazamientos, a excepción de situaciones puntuales de PCAP.

5. El análisis clúster no jerárquico realizado con la diferencia de temperaturas mínimas reflejó que existen dos situaciones que favorecen la formación de CAPs, siendo la situación más favorable la formación de una extensa cuña anticiclónica en la que el centro de altas presiones se ubica sobre las Azores, acompañado de unos geopotenciales a 500hPa elevados, alrededor de 5700-5800m.
6. El análisis clúster no jerárquico realizado con la diferencia de temperaturas máximas reflejó que la situación más favorable para la formación de PCAPs en la dolina de Prado Veneiro es una dorsal anticiclónica recién establecida tras el paso de un centro de bajas presiones que haya provocado en los días anteriores importantes precipitaciones en forma de nieve, esencial para que se produzcan estos fenómenos.
7. Las variables sinópticas con mayor influencia sobre la intensidad de las CAPs nocturnas en Prado Veneiro son la nubosidad (0,57), la temperatura a 850 hPa (-0,47), la temperatura a 500 hPa (-0,43), la presión al nivel del mar (-0,36) y la temperatura del punto de rocío (0,26).
8. Las variables sinópticas con mayor influencia sobre la intensidad de las PCAPs invernales en Prado Veneiro son el punto de rocío (0,44), la temperatura de la nieve (0,42), la temperatura a 2m (0,35) y la presión al nivel del mar (-0,30), demostrando la importancia de la presencia de nieve para que se produzcan este tipo de fenómenos.

8. Bibliografía

- Aupí, V. (2016). 30 años de observaciones meteorológicas en el corazón del polo del frío español. XXXIV *Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española (Teruel, 29 febrero – 2 marzo 2016)*, ISBN: 978-84-617-5240-9.
- Castro M., González R. & Portela A. (1991). Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico. *Física de la Tierra* **3**, 103-138
- Clements, C. B., Whiteman, C. D., & Horel, J. D. (2003). Cold-Air-Pool Structure and Evolution in a Mountain Basin: Peter Sinks, Utah. *Journal of Applied Meteorology* **42**(6), 752-768. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2)
- Czarnecka, M., Nidzgorzka-Lencewicz, J. & Rawicki, K. (2019). Temporal structure of thermal inversions in Łeba (Poland). *Theor Appl Climatol* **136**, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2459-8>
- Espín Sánchez, D. (2021). Minimum summer temperatures in the southeast of the Iberian Peninsula through satellite thermographies. *Revista de Estudios Andaluces* **42**, 8-33. <https://dx.doi.org/10.12795/rea.2021.i42.01>
- Espín Sánchez, D. (2022). Estructura vertical y características de las inversiones térmicas nocturnas en el SE de España. *Cuadernos Geográficos* **61**(1), 79-106.
- Espín Sánchez, D., Ruiz Álvarez, V., Martí Talavera, J., García Marín, R. (2018). Estudio preliminar de las inversiones térmicas en el sureste de la Península Ibérica: el caso de los campos de Hernán Perea. *Pirineos* **173**, e036. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2018.173003>
- Espín Sánchez, D., Ruiz Álvarez, V., Martí Talavera, J., Ruiz Álvarez, M., Amor Jiménez, J.A., Sandoval Gómez, F., Requena, M.A., Gómez Cascales, P.J., Serna García, J.M. (2018). Características de las Piscinas de Aire Frío (CAPs) en el interior Sureste Peninsular. *19º Encuentro Hispano-Luso de Meteorología. León. 5-7 de marzo de 2018. Predicción de tiempo y clima orientada a impactos*, 432-450. ISSN- 2605-2202 (edición digital)
- GBIF.org (2022). Descarga de citas del Reino Plantae para Babia y Luna. <https://doi.org/10.15468/dl.qkze7d>. Consultado el 14 de junio de 2022
- Geiger, R. (1965). The climate near the ground. *Harvard University Press*, 482 pp.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology* **24**(6), 417–441. <https://doi.org/10.1037/h0071325>
- Iglesias González, M. (2014). Estudio de inversiones térmicas y Piscinas de Aire Frío (Cold Air Pools) en el entorno de Picos de Europa. Trabajo Fin de Máster. Facultad De Ciencias Físicas, Universidad Complutense De Madrid, España. 46pp.
- Köppen, W.P. (1923) Die Klimate der Erde. Grundriss der Klimakunde. <https://doi.org/10.1515/9783111491530>
- Kurita, T. (2020). Principal Component Analysis (PCA). *Computer Vision. Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2_649-1
- Lareau, N. P., Crosman, E., Whiteman, C. D., Horel, J. D., Hoch, S. W., Brown, W. O. J., & Horst, T. W. (2013). The Persistent Cold-Air Pool Study. *Bulletin of the American Meteorological Society* **94**(1), 51-63.
- Marvin, C.F. (1914) Air drainage explained. *Mon Weather Rev* **10**, 583–585 [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1914\)42<583:ADE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1914)42<583:ADE>2.0.CO;2)
- Meteored, foro de tiempo.com. Foro general de Seguimiento: Polos del Frío 2020/2021 <<https://foro.tiempo.com/polos-de-frio-2020-2021-t150522.0.html>>, [Consultada: 15-02-2022].

- Millán, M. (2003). Calidad del aire y perturbaciones del ciclo hidrológico en la cuenca mediterránea. *Mediterráneo Económico: Mediterráneo y Medio Ambiente* **4**, 199-215.
- Muñoz Sabater, J. (2021): ERA5-Land hourly data from 1950 to 1980. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Núñez, J.A., Muedra, C., Aupí, V. (2006). La gran ola de frío de febrero de 1956 en la España mediterránea. *Repositorio de AEMET. Calendario meteorológico*. **2007**, 267-278. Consultado en: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/2288>.
- Öztürk, M.Z. & Savran, A. (2020). An oasis in the Central Anatolian steppe: the ecology of a collapse doline. *Acta Biologica Turcica*, **33(2)**, 100-113.
- Pascual, A., Martín, M.L., Valero, F., Luna, M.Y., & Morata, A. (2013). Wintertime connections between extreme wind patterns in Spain and large-scale geopotential height field. *Atmospheric Research* **122**, 213–228.
- Santos González, J. & Fernández-Martínez, E. (2011). Guía de campo: Patrimonio geológico en las Reservas de la Biosfera del Valle de Laciana y de Babia (León). *Avances y retos en la Conservación del Patrimonio Geológico en España. Actas de la IX Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico. Sociedad Geológica de España (SGE)*, 279-293.
- Schmidt, E., & Beckmann, W. (1930). Das Temperatur-und Geschwindigkeitsfeld vor einer Wärme abgebenden senkrechten Platte bei natürlicher Konvektion. *Technische Mechanik und Thermodynamik*, **1(11)**, 391-406.
- Sheridan, P.F. (2019). Synoptic-flow interaction with valley cold-air pools and effects on cold-air pool persistence: Influence of valley size and atmospheric stability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **145(721)**, 1636-1659. <https://doi.org/10.1002/qj.3517>
- Steinacker, R., Whiteman, C. D., Dorninger, M., Pospichal, B., Eisenbach, S., Holzer, A. M., Weihs, P., Mursch-Radlgruber, E. & Baumann, K. (2007). A sinkhole field experiment in the Eastern Alps. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88 (5)**, 701-716. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-5-701>
- Vitasse, Y., Klein, G., Kirchner, J. W. & Rebetez, M. (2017). Intensity, frequency and spatial configuration of winter temperature inversions in the closed La Brevine valley, Switzerland. *Theor Appl Climatol* **130**, 1073–1083. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1944-1>
- Whiteman, C. D., Haiden, T., Pospichal, B., Eisenbach, S. & Steinacker, R. (2004). Minimum Temperatures, Diurnal Temperature Ranges, and Temperature Inversions in Limestone Sinkholes of Different Sizes and Shapes. *Journal of Applied Meteorology* **43**, 1224-1236
- Whiteman, C. D., Pospichal, B., Eisenbach, S., Steinacker, R., Dorninger, M., Mursch-Radlgruber, E., & Clements, C. B. (2003). Temperature inversion breakup in the Gstettneralm sinkhole. *In International Conference on Alpine Meteorology and MAP*.
- Yoshino, M. M. (1984). Thermal belt and cold air drainage on the mountain slope and cold air lake in the basin at quiet, clear night. *GeoJournal* **83**, 235-250
- Zhang, T. (2005). Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics* **43(4)**.
- Zhong, S., Whiteman, C. D., Bian, X., Shaw, W. J., & Hubbe, J. M. (2001). Meteorological processes affecting the evolution of a wintertime cold air pool in the Columbia basin. *Mon. Wea. Rev.* **129**, 2600-2613