

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA



TESIS DOCTORAL

**Influencia del campo de temperaturas en la dinámica
ambiental de la cueva de Altamira**



Autor: Daniel Rábago Gómez

Director: Carlos Sainz Fernández

Co-Director: Sixto Herrera García

Santander 2019



Carlos Sainz Fernández, Catedrático de Radiología y Medicina Física del Departamento de Ciencias Médicas y Quirúrgicas de la Universidad de Cantabria.

Sixto Herrera García, Profesor Ayudante Doctor del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación de la Universidad de Cantabria, (Acreditado ANECA para Profesor Titular de Universidad).

Declaran:

Que el presente trabajo titulado: **“Influencia del campo de temperaturas en la dinámica ambiental de la cueva de Altamira”** ha sido desarrollado por **Daniel Rábago Gómez** bajo su supervisión, y reúne los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor.

Y para que conste a todos los efectos oficiales, firman el presente certificado en Santander a 28 de Octubre de 2019.

Carlos Sainz Fernández

Sixto Herrera García

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a los directores de esta tesis doctoral por toda la ayuda que me han prestado. A Carlos Sainz por confiar en mí y haberme encomendado la responsabilidad de un trabajo de estas características teniendo en cuenta la calidad de todos los estudios que se han realizado hasta la fecha en la cueva de Altamira. A Sixto Herrera por su increíble disponibilidad y por todo lo que me ha enseñado, sin él una parte esencial de esta tesis nunca habría sido posible.

Debo agradecer de manera especial a Luis S. Quindós y a los miembros del Grupo Radón. Todo el trabajo que han realizado tanto en los controles del Seguimiento Ambiental como en el laboratorio ha sido una parte esencial de este estudio.

Al personal del Museo de Altamira por su disponibilidad y buena comunicación.

Por último, quiero extender mi agradecimiento a mi familia y amigos por el apoyo e interés en mi campo de investigación. De manera especial a todas las personas que han estado ahí durante los últimos momentos de la realización de esta tesis doctoral.

CONTENIDO

1. Introducción	11
1.1. La cueva de Altamira	12
1.2. Historia del Seguimiento Ambiental.....	16
1.3. Plan de Conservación Preventiva (PCP).....	21
2. Seguimiento de las condiciones ambientales.....	25
2.1. Características de la instrumentación utilizada.....	25
2.2. Control de calidad de los datos microclimáticos	32
2.3. Organización de la información.....	33
3. El campo de temperaturas en la cueva de Altamira	35
3.1. Series temporales de temperatura	36
3.1.1. Temperatura del aire y del suelo exterior.....	36
3.1.2. Temperatura del aire del interior de la cueva.....	42
3.2. Onda térmica	51
3.2.1. Método de la máxima correlación cruzada	53
3.2.2. Resultados	55
3.3. Gradiente térmico entre salas.....	58
3.4. Influencia del segundo cierre interior en la temperatura.....	64
3.4.1. Efecto de la apertura de la segunda puerta (2018)	67
3.5. Ciclos anuales de evaporación y condensación	71

4. Modelo predictivo de temperatura del aire de la sala de Polícromos	75
4.1. Modelo del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)	76
4.2. Modelo predictivo por corrección de sesgo “ <i>Bias Correction</i> ”	81
4.3. Validación de los modelos	87
4.3.1. Validación cruzada “ <i>Cross validation</i> ”:	87
4.3.2. Caracterización del modelo y evaluación de la robustez	88
4.4. Resultados	90
4.4.1. Periodo 2013-2018: Validación	90
4.4.2. Periodo 2019: Modelo operativo	97
5. La ventilación natural de la cueva de Altamira	101
5.1. Gases trazadores	103
5.1.1. Densidad del aire.....	104
5.1.2. Evaluación de tasa de ventilación	106
5.1.3. Composición isotópica $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2	107
5.2. Sistemas de medida de gases	109
5.2.1. Sistemas de medida de CO_2	109
5.2.2. Sistemas de medida de radón.....	112
5.3. Resultados.....	117
5.3.1. Series temporales de CO_2	117
5.3.2. Resultados del estudio de composición isotópica $\delta^{13}\text{C}$	124

5.3.3. Series temporales de Radón	126
5.3.4. Densidad del aire	135
5.3.5. Tasa de ventilación.....	139
5.4. Protección radiológica frente a la exposición al radón	140
5.4.1. Estimación de la dosis	143
5.4.2. Resultados	144
6. La influencia de las visitas públicas sobre el microambiente de la sala de Polícromos	147
6.1. Régimen de visitas públicas	148
6.2. Definición de límites de accesibilidad y alarma	151
6.3. Histórico del control de ocupación de la cueva	153
6.4. Influencia antrópica sobre la temperatura, CO ₂ y humedad	154
7. Conclusiones	161
Referencias	165

1. Introducción

El estudio de los procesos físicos y de las condiciones climáticas de una cueva es fundamental para determinar los factores que conducen al deterioro de su arte rupestre. La estrategia de conservación debe estar encaminada a medir o estimar el impacto en base a la experiencia obtenida, e intentar ralentizar en la medida de lo posible los procesos identificados como los más nocivos. Sin embargo, el seguimiento ambiental es solo uno de los aspectos a tener en cuenta en la preservación del patrimonio cultural, especialmente en el arqueológico que incluye pinturas y grabados rupestres. Entre otros riesgos de deterioro relacionados con los factores del medio se encuentra la estabilidad del soporte y la policromía, las aguas de infiltración y condensación, la proliferación de microorganismos, etc. Estos y otros aspectos se estudian normalmente de forma separada pero con un carácter global que relaciona unos con otros.

En este primer capítulo se presenta la cueva de Altamira y sus características, la historia del seguimiento ambiental de la cavidad con sus resultados más notables y el Plan de Conservación Preventiva (PCP) que contiene los protocolos a seguir en cada uno de los aspectos de conservación estudiados, los cuales se han basado en los estudios realizados con anterioridad y en los realizados específicamente dentro de su marco por un grupo multidisciplinar de investigadores y científicos.

En el segundo capítulo se expone la estrategia del seguimiento ambiental establecido en el PCP. Se detallan las características de la instrumentación para llevar a cabo el estudio de las condiciones climáticas de la cavidad, el control de calidad de cada uno de los parámetros obtenidos, así como la organización y análisis de los datos.

En el tercer capítulo se presenta el campo de temperaturas de la cueva de Altamira. La evolución temporal de la temperatura de cada una de las salas es un factor determinante en la influencia sobre los demás parámetros ambientales. Se muestran las series temporales de temperatura de cada una de las salas, así como la influencia que ejerce la temperatura exterior en forma de onda térmica sobre las mismas. Por último se estudia la influencia del segundo cierre interno.

A partir de la variación periódica tanto de la temperatura del exterior como de la sala de Polícromos, en la cual se encuentran las representaciones artísticas más destacables, en el capítulo cuarto se ha desarrollado un modelo predictivo con el fin de estimar la temperatura de la sala y así poder planificar la entrada de visitantes teniendo en cuenta los límites de accesibilidad establecidos en el PCP.

Los procesos de intercambio de materia y energía entre la cueva y el exterior son fundamentales en la conservación de las pinturas. En el capítulo quinto se estudia el intercambio gaseoso de la cavidad con el exterior y se relaciona con los parámetros ambientales con el fin de conocer dicha dinámica. Los gases trazadores utilizados han sido el dióxido de carbono (CO₂) y el radón (²²²Rn). Además, con el objetivo de identificar las fuentes de dióxido de carbono y sus patrones estacionales se ha estudiado la relación isotópica del carbono $\delta^{13}\text{C}$ del CO₂.

Las visitas públicas estandarizadas realizadas dentro del marco del PCP sirven como referencia para analizar la influencia de visitantes sobre el ambiente de la cueva. En el capítulo sexto se aborda la influencia antrópica sobre la temperatura, la concentración de CO₂ y la humedad.

Por último, en el capítulo séptimo se establecen las conclusiones de esta tesis doctoral y los trabajos futuros, que por un lado surgen de los resultados pero por otro se han identificado en base a deficiencias o lagunas en el estudio realizado hasta el momento.

1.1. La cueva de Altamira

La cueva de Altamira se encuentra en la zona superior de un cerro calcáreo situado en la localidad de Santillana del Mar, en la costa occidental de Cantabria, siendo sus coordenadas geográficas 4° 7' 11'' longitud Oeste y 43° 22' 37'' latitud Norte (X = 409289, Y= 4803279; UTM 30N, ETRS89). Se trata de una cavidad somera que tiene su entrada orientada hacia el norte a una cota de 152 m, se desarrolla en pasajes con forma de S y su longitud total aproximada es de 270 m, con el punto más bajo respecto de la entrada a unos 16 m (ver Figura 1).

En la Figura 1 se puede observar la situación de la cueva en Cantabria y su perfil georreferenciado superpuesto a la ortofoto del 2014 extraída del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) 25 cm con un tamaño de malla de 5 m × 5 m.

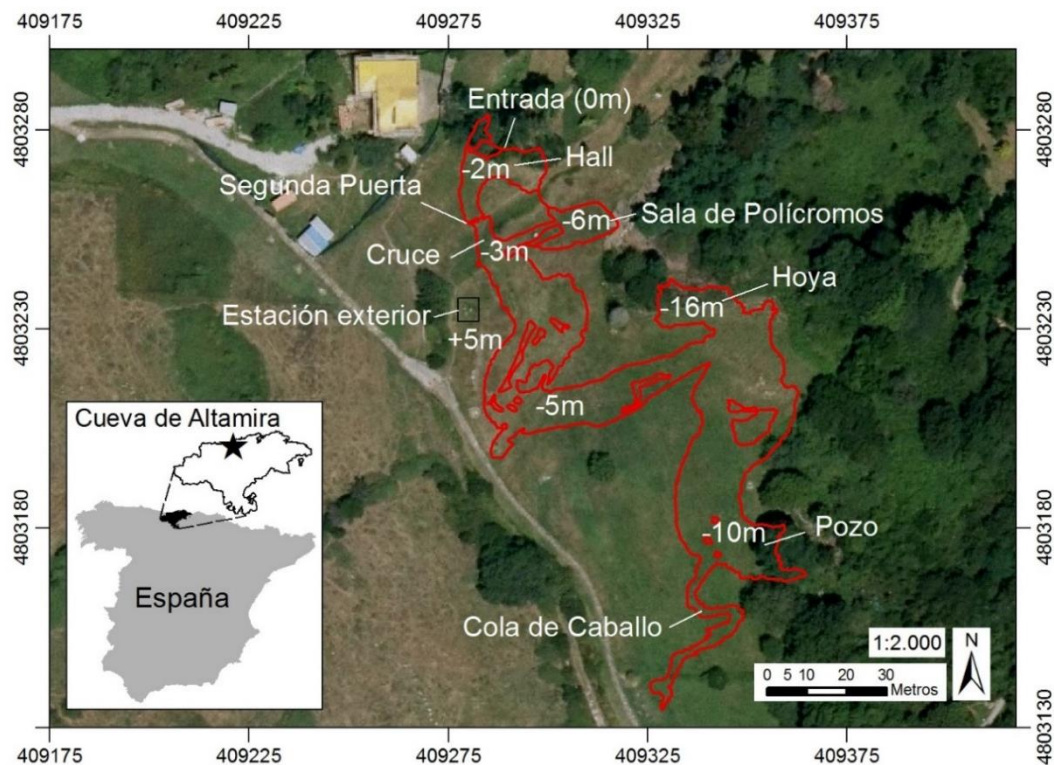


Figura 1. Situación de la cueva de Altamira en Cantabria (España) y su planta georreferenciada superpuesta sobre la ortofoto. Se indica la altura de cada zona expresada en metros tomando como referencia la entrada (cota 152 m).

El interés que suscita esta cavidad se debe principalmente a los grabados y pinturas paleolíticas que en ella se encuentran distribuidos, siendo una de las cuevas con contenido prehistórico más importantes de la humanidad, no solo de la península Ibérica sino de Europa occidental. En 1985 fue incluida dentro de la Lista de Patrimonio Mundial por la UNESCO (ver N° 310 de dicha lista: <http://whc.unesco.org/es/list/310>). Concretamente se resalta la denominada sala de Polícromos en la que se puede observar un gran número de animales pintados con ocre, negro y rojo, tal y como describe su descubridor Marcelino Sanz de Sautuola (Sanz de Sautuola, 1880). Su autenticidad histórica tropezó con el escepticismo de algunos expertos de la época, pero una vez fue reconocida su contribución al conocimiento de

las manifestaciones artísticas paleolíticas, se ganó el apelativo, según el afamado arqueólogo Joseph Déchelette (1862-1914), de la «Capilla Sixtina del Arte Cuaternario» (Déchelette, 1908).

Las características del karst en el que se encuentra la cueva vienen dadas por una formación tabular formada en el Plioceno hace entre 5.3 y 2.6 millones de años. La evolución de su estructura viene marcada fundamentalmente por hundimientos y desplomes de bloques, observándose una escasa formación de espeleotemas, depósitos minerales secundarios tales como estalactitas, estalagmitas, etc. (Hoyos, 1993). El desprendimiento de bloques es generalizado, incluso se produjeron desprendimientos en el vestíbulo o Hall durante las excavaciones de Obermaier en 1925 (Aguirre, 1996).

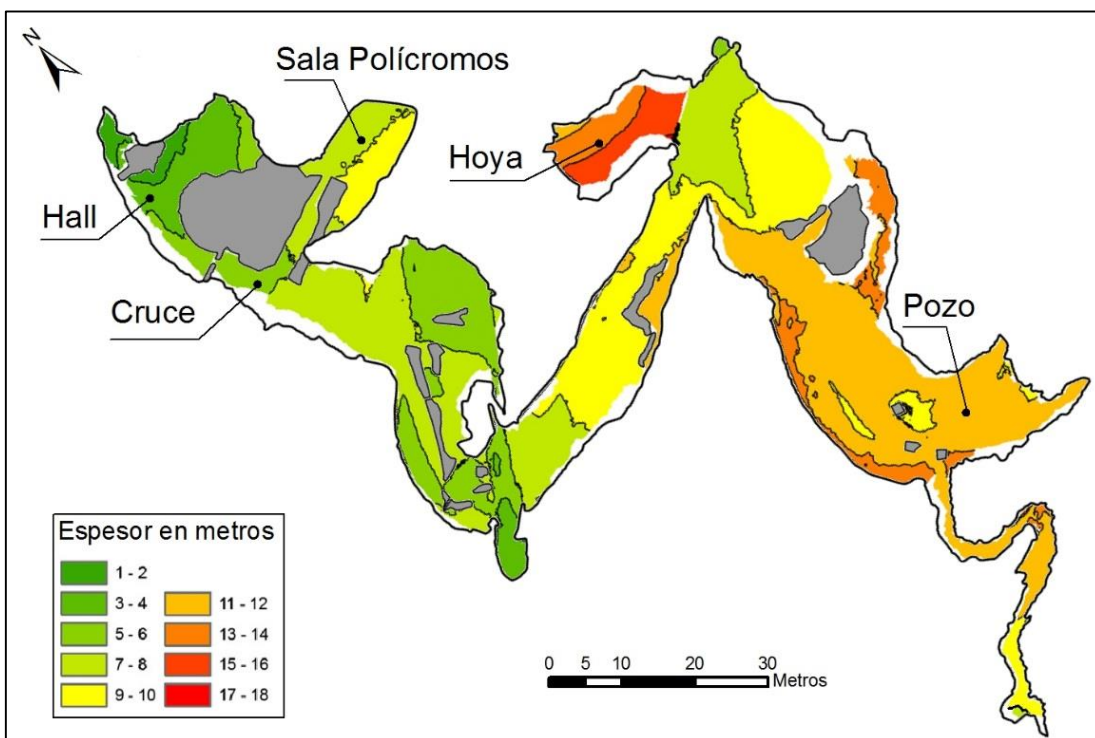


Figura 2. Espesor de roca y suelo entre el techo de la cueva de Altamira y la superficie exterior (modificado de Elez, 2013).

Dentro del perfil kárstico, la cueva se encuentra en la zona superior del mismo, en el ambiente hidrológico vadoso, por encima del nivel freático con una intermitente o nula saturación de agua, donde el aporte de agua es exclusivo de las precipitaciones. Debido a su configuración, con la mayoría de las estancias en una posición muy

superficial tal y como se puede observar en la Figura 2, en la que se detalla el espesor de roca y terreno desde el techo al exterior (Elez, 2013), los aportes laterales de agua infiltrada no son posibles ya que gran parte de la cueva y de su cobertera se encuentran por encima de la cota máxima de influencia. Por lo tanto, en el caso de la sala de Polícromos, el agua que aflora en el techo proviene de un área muy reducida (Hoyos, 1993).

Los estudios arqueológicos llevados a cabo hasta ahora documentan evidencias de ocupación humana dentro del Paleolítico Superior, en las fases de la cultura del Gravetiense, Solutrense y Magdaleniense entre hace 26784 y 16866 años BP (*Before Present*). Los estudios más recientes utilizando la técnica por datación de carbono 14 con la técnica de espectrometría de masas AMS han permitido datar las fases del Solutrense superior y del Magdalenienses inferior (Valladas, 1992; Moure, 2000). El estudio llevado a cabo por Pike et al. (2012), obtenido a partir de la aplicación del método del desequilibrio de la serie del Uranio, ha permitido obtener dos fechas de pinturas del gran techo de la sala de Polícromos. La primera sobre el gran caballo rojo con restos de puntuaciones en el vientre, de edad mínima de (22110 ± 130) años y de un signo rojo, situado en el sector central del gran techo, con edad mínima de (36160 ± 610) años (ver Figura 3).



Figura 3. Imagen del gran caballo rojo con restos de puntuaciones en el vientre (izquierda) y de un signo rojo (derecha), situados en el sector central del gran techo (extraído de Pike et al., 2012).

Tanto el entorno de la cueva como su interior han sufrido modificaciones significativas desde su descubrimiento (Hoyos, 1993). Entre las alteraciones más importantes se encuentra la explotación de una cantera (1868-1880) que redujo una parte importante de las capas que se encuentran por encima del techo de Polícromos, contribuyendo a su fisuración y alterando el almacenamiento y circulación de agua, así como los procesos de disolución/precipitación de carbonatos. A causa de la inestabilidad del techo de la sala, se construyeron muros que aislaron la sala de Polícromos, se rebajó el nivel del suelo (1925-1940) y se instaló la segunda puerta (ver zona gris de la Figura 2) alterando la morfología kárstica, los parámetros ambientales y la circulación de aire.

Por las modificaciones antrópicas llevadas a cabo desde antes de su descubrimiento hasta la actualidad, se estableció el Área de Inmediata Protección (AIP) o *Adjacent Protected Area (APA)*, definido como el área de máxima influencia para todos los procesos que pueden transferir materia o energía potencialmente dañina a la cueva. Se incluyó todo el conjunto de cavidades, galerías, fosas y sumideros que están directamente conectados al sistema kárstico y el área de infiltración pluvial y fluvial. Se tuvo en cuenta el comportamiento hidrogeológico del agua subterránea y sus zonas de drenaje, así como los accesos naturales o artificiales a la cueva. Además, el AIP contiene todas las áreas que influyen significativamente en el intercambio de gases y la ventilación en la cueva (Sánchez-Moral, 2014; Elez, 2013).

1.2. Historia del Seguimiento Ambiental

La importancia del conocimiento de las condiciones ambientales en la conservación del arte rupestre entraña un reto debido a sus características intrínsecas, el soporte en el que se han realizado, en el caso de pinturas y grabados, así como los constantes cambios en las condiciones ambientales a los que ha estado sometido. El caso particular de las pinturas rupestres implica que son inamovibles, no se pueden separar de su soporte ni se pueden restaurar, ya que no se conoce con precisión su estado original dado el deterioro que han sufrido. A su vez se encuentran sometidas a una lenta corrosión natural que hay que estudiar minuciosamente (Villar, 1993).

Desde su descubrimiento, la cueva de Altamira ha estado gestionada por diversos organismos públicos que han llevado a cabo modificaciones y estudios utilizando las tecnologías disponibles en cada momento. Este apartado se va a centrar en los estudios sobre parámetros climáticos, una ampliación de toda la historia se puede observar en el informe Vol. II Historia de la conservación de la cueva de Altamira (1868-2012) del IPCE (2014b).

Los primeros datos climáticos, temperatura y humedad, fueron registrados en la sala de Polícromos entre 1930 y 1932 por Breuil y Obermaier y fueron publicados en su obra “La cueva de Altamira en Santillana del Mar” (Breuil, 1984). En el periodo 1979-1984 es cuando el profesor Eugenio Villar de la Universidad de Cantabria elabora un proyecto científico-técnico para la conservación de las pinturas de la cueva de Altamira (Villar, 1981). Los objetivos del proyecto eran: Describir y caracterizar el ecosistema natural de la cueva sin presencia humana; Determinar la influencia de la presencia humana en la cueva bajo un régimen controlado de visitas; Establecer un régimen de visitas y Controlar los parámetros ambientales y su variación. Durante esta etapa se controlaron parámetros ambientales tales como la temperatura, humedad relativa, CO₂ y radón, así como al influencia antrópica sobre los mismos (Villar, 1983; Villar et al., 1984). Como colofón del proyecto, se describió la cueva desde el punto de vista microclimático y de analizaron los procesos de deterioro. A partir de dichos procesos se propuso un régimen de acceso. En la tercera fase del trabajo de investigación se proponía continuar con las medidas sistemáticas y evaluación de impactos, pero debido a problemas administrativos el régimen de visitas de Villar, provisional en sus inicios, se mantuvo desde 1984 hasta 1993 sin ningún tipo de seguimiento ambiental.

En 1997, durante el ciclo anual febrero 1997-enero 1998, se retomaron las medidas de diversos parámetros ambientales utilizando un sistema de monitorización en continuo instalado en la cueva. Este estudio se engloba dentro del proyecto “*Deterioration of prehistoric rock art in karstic caves by mass tourism*” coordinado por Manuel Hoyos, perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), y financiado por la Unión Europea, periodo 1996-99. Entre los resultados se destacan: la delimitación del Área de Protección Total (APT); la identificación de la

procedencia de contaminantes orgánicos en el agua; y la constatación de la existencia de poblaciones microbiológicas en muros y techos. Se analizó la variación de parámetros ambientales (temperatura del aire, CO₂ y humedad) provocada por el régimen de visitas establecido por Villar, y se llegó a la conclusión que algunas variables no llegaban a recuperarse entre ciclos, produciéndose un efecto acumulativo. Algunos de los parámetros ambientales obtenidos en este periodo se pueden ver en Cuezva (2008).

En 2002, a causa de la aparición de manchas de coloración verde sobre la roca soporte muy cerca de las pinturas, se decidió cerrar la cueva al público, y en 2003 comenzó el segundo convenio de colaboración Ministerio de Educación, Cultura y Deporte MECyD-CSIC (2003-2005) “Análisis de las condiciones de conservación de la cueva de Altamira y su arte Paleolítico” dirigido y coordinado por Sánchez-Moral desde el Departamento del Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC) en colaboración con el equipo de microbiólogos del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNAS-CSIC). Respecto a la caracterización microambiental, se puso en marcha un nuevo equipo de medidas, un sistema abierto con 32 sensores que registraron datos en el periodo agosto 2004-julio 2005. Los datos del periodo mencionado fueron de gran utilidad para comprobar la respuesta al cierre de 2002 y a las nuevas medidas adoptadas. El estudio confirmó que la cavidad presenta menores rangos de oscilación de los parámetros ambientales principales (temperatura, CO₂, radón y humedad), especialmente durante el verano (Cuezva, 2008).

El 22 de junio de 2005 se realizó una única visita experimental con 6 personas (5 visitantes más un guía). Los resultados de esta experiencia llevaron a proponer que tras 5 minutos de permanencia del grupo, el paso de vapor de agua a su fase líquida se hace efectivo y podría comenzar su condensación sobre los techos de la sala. La visita incidió sobre la temperatura del aire, la concentración de CO₂ y la humedad. Se remarcó la necesidad de controlar en detalle los tiempos de recuperación y el potencial efecto acumulativo, así como la necesidad de realizar un estudio más exhaustivo. Se concluyó con que las visitas deberían reducirse a un grupo diario de 5 personas más guía durante 10 minutos (recomendando incluso no exceder los 5 minutos). Sería

además aconsejable que se impidiera el acceso en los meses de verano, etapa en la que la apertura de la puerta debería ser mínima debido a la alta condensación natural por entrada de aire cálido y húmedo. Es destacable que las conclusiones que se sacaron fueron obtenidas en base a una única visita experimental controlada. Se planteó la instalación de un doble cierre, la cual se hizo efectiva en octubre de 2008, con el fin de reducir la entrada de partículas y el intercambio energético con la zona de la entrada. Por último, se apuntó que las especiales características microambientales y las condiciones dinámicas de las comunidades microbianas aconsejan el continuo control y monitorización a lo largo del tiempo, como forma de prevenir o detectar en sus fases iniciales estos microorganismos y, en caso de necesidad, tomar medidas correctoras activas y urgentes.

El tercer convenio MECyD-CSIC (2007-2009): “Estudio integral del estado de conservación de la cueva de Altamira y sus representaciones artísticas paleolíticas. Perspectivas futuras de conservación”, cuyos resultados se pueden ver en Sánchez-Moral (2014), partió de las conclusiones obtenidas en el anterior proyecto de 2003-2005. El principal objetivo fue la identificación de las perturbaciones microambientales que daban lugar al principal problema del deterioro, la colonización y proliferación microbiana. Los datos registrados en dos ciclos anuales (2007-2008 y 2008-2009) indicaron una clara disminución de la temperatura media interior en la sala de Polícromos respecto al mismo periodo de 1997-1998. El grado de conexión cavidad-exterior presenta un marcado carácter estacional como ya había descrito Villar en los trabajos previos. Se encontró un alto grado de aislamiento, elevadas concentraciones de CO₂ y Rn, durante el periodo invernal, mientras que en el verano las concentraciones de ambos gases fueron bajas. Entre ambas situaciones se encuentran la primavera y el otoño como periodos de transición, donde se inician los procesos de desgasificación y recarga de gases respectivamente.

Se mejoraron las características del cierre externo y en octubre de 2008 se cerró la segunda puerta con el fin de detener el intercambio de materia (ventilación) con el exterior, así como reducir el aporte de posibles nutrientes y la proliferación de microorganismos. Las oscilaciones en la concentración de CO₂ y ²²²Rn se redujeron

considerablemente y el periodo de gradual desgasificación se retrasó de marzo a junio. La oscilación térmica anual pasó de 1.54 °C en 2004-2005 a 1.39 °C en 2007-2008. Se registró un descenso notable de la velocidad del aire (< 0.02 m/s) respecto al mismo periodo del año anterior. En conclusión, se destacó el mayor aislamiento de la cueva, con la consecuente atenuación de los procesos aerodinámicos gracias a las mejoras efectuadas en la puerta de entrada y con el cierre permanente de la segunda puerta, limitando sustancialmente los procesos de intercambio de materia y energía de Polícromos con la zona de entrada y el exterior.

La última etapa del CSIC (2010-2012) viene con la firma de cuatro contratos con el MECyD para el control ambiental de la cueva de Altamira. Se realizó el mantenimiento del sistema de control medioambiental en el Hall, Cruce y sala de Polícromos con sus correspondientes medidas en continuo desde septiembre de 2010 hasta septiembre de 2012, algunos de los resultados se pueden ver en García-Antón (2014).

Tras la finalización de los trabajos y retirada de los equipos de seguimiento ambiental por parte del CSIC, el Patronato de la Cueva de Altamira encomienda al Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) iniciar una fase de estudios: “El Programa de Investigación para la Conservación Preventiva y Régimen de Acceso de la Cueva de Altamira” (2012-2014). Este programa, que se inició en septiembre de 2012, se diseñó desde una perspectiva global de estudio, con interrelación de profesionales de distintas disciplinas científicas y pertenecientes a diversas instituciones, entre las que se encontraba la Universidad de Cantabria, la Universidad del País Vasco y el Instituto de Ciencias del Patrimonio (INCIPIT) del CSIC. Este estudio trata de evaluar la dinámica natural actual de la cueva, el impacto antrópico en la conservación de la cueva y de sus pinturas basándose en modelos teóricos y experimentales. En este proyecto se establece por primera vez en la historia un Plan de Conservación Preventiva que contiene los protocolos a seguir en cada uno de los aspectos de conservación estudiados. Se definen los protocolos de acceso de investigadores y se diseñan las medidas de conservación preventiva (IPCE, 2014a). A raíz de este proyecto se volvió a abrir la cueva al público en forma de visitas experimentales normalizadas formadas por cinco personas más un guía en la que se

controlan las variaciones de temperatura, dióxido de carbono y humedad. En la actualidad se sigue con el Plan de Conservación Preventiva de la Cueva de Altamira (PCP) aplicándose los protocolos definidos en IPCE (2014c).

Durante el año 2015 se sigue con el control ambiental de la cavidad por parte de la Universidad de Cantabria bajo el contrato “Estudios analíticos para la propuesta de accesibilidad de la cueva de Altamira”. A partir del 2016 se conforma el proyecto dirigido por Luis S. Quindós “Control y seguimiento del biodeterioro y de las condiciones ambientales, del agua de infiltración y de las emisiones de gas radón, de la cueva de Altamira establecidas en el Plan de conservación preventiva de la Cueva de Altamira” con Carlos Sainz responsable del área de Seguimiento Ambiental, ambos pertenecientes a la Universidad de Cantabria (UC). Consecuentemente y hasta la actualidad se han adjudicado varios contratos y licitaciones al mismo grupo de investigación de la UC dando de esta manera continuidad a los estudios llevados a cabo en la cavidad. La presente tesis doctoral se enmarca dentro de dicho periodo.

1.3. Plan de Conservación Preventiva (PCP)

Durante el periodo de estudio en el que se enmarca el Plan de Conservación Preventiva de la Cueva de Altamira PCP (2012-2014) se han confirmado las medidas realizadas anteriormente y se han estudiado las perturbaciones provocadas tanto por visitantes como por investigadores. Además se retomaron los estudios relacionados con aspectos biológicos, los cuales pueden haberse visto alterados por la instalación de nuevas puertas en el año 2008 y por las excavaciones arqueológicas realizadas en la zona exterior de la entrada en los años 2008 y 2011.

El PCP es una herramienta a partir de la cual se define y articula la estrategia de conservación a corto, medio y largo plazo, que tiene como fin garantizar la pervivencia del patrimonio que se encuentra en la cueva de Altamira. Su objetivo es diseñar e implantar metodologías de trabajo que permitan minimizar los riesgos detectados durante el periodo de estudio y los descritos en estudios anteriores. Para ello se han tenido en cuenta las aportaciones de seis proyectos desarrollados en paralelo (control del biodeterioro, seguimiento ambiental, conservación del soporte y policromía,

accesibilidad, valor social y comunicación y memoria). Sin embargo este documento es de carácter abierto que ha de ser continuamente actualizado en función de la identificación y análisis de nuevos riesgos que puedan surgir ante la modificación del contexto actual.

Una vez finalizado el proyecto se propusieron los siguientes protocolos de trabajo sistemático, los cuales se siguen en la actualidad, cuyo objetivo es minimizar los riesgos de deterioro (IPCE, 2014c).

Protocolo nº 1: Normas de acceso

Protocolo nº 2: Control del biodeterioro

Protocolo nº 3: Control de la concentración de gas radón

Protocolo nº 4: Seguimiento ambiental

Protocolo nº 5: Seguimiento de humedades y puntos de goteo

Protocolo nº 6: Seguimiento del estado de conservación

Protocolo nº 7: Estabilidad geológica-estructural

Protocolo nº 8: Control de las actividades en la superficie de la zona de influencia de la cueva

Los protocolos más relacionados con el estudio que se va a exponer en apartados posteriores son el nº 3, 4 y 5, que son los que están directamente relacionados con las condiciones climáticas de la cavidad. En el protocolo nº 3 se detalla la utilidad de realizar medidas de la concentración de gas radón del aire de la cueva. Por una parte, su baja reactividad química lo convierte en un buen trazador de procesos atmosféricos. De este modo, el radón proporciona información del comportamiento de los gases presentes en el interior de la cueva desde el punto de vista del intercambio de materia y energía en el interior de la misma. Por otra parte, como medida de protección para la salud de las personas con acceso al interior de la cueva en cumplimiento de la normativa vigente, se establecen tiempos de permanencia máximos en la cavidad. En el protocolo nº 4 y 5 se detallan los procedimientos necesarios para aplicar un método de trabajo sistemático para la obtención, organización y análisis de los datos de los

factores ambientales, y la adopción de acciones para el seguimiento y control de los riesgos de deterioro identificados en relación a estos factores.

A continuación se muestra el esquema, extraído de IPCE (2014c), utilizado para elaborar los protocolos:

Objetivo	¿Por qué y para qué?
¿Quién debe realizar el trabajo?	Perfil profesional
¿Cuál es el instrumental necesario?	Equipamiento
¿Cómo es el proceso de trabajo?	
<p>Comprobaciones a realizar antes de entrar a la cueva</p> <p>Necesidad de aclimatación del equipo</p> <p>Manipulación y montaje del equipo en el interior de la cueva</p> <p>Parámetros de posicionamiento de medida o registro, toma de muestras...</p> <p>Secuencia del trabajo (pasos a seguir hasta obtener el resultado: imagen, medida, muestra...)</p> <p>En caso necesario, normas para retirada de equipos</p> <p>Normas para recarga de equipos, calibración, mantenimiento</p> <p>Consideraciones sobre almacenaje y cuidado de equipos</p> <p>Normas para almacenaje y traslado de muestras</p> <p>Procedimiento de procesado de datos o muestras</p> <p>Procedimiento para la valoración de la información</p> <p>Procedimiento para la elaboración de informe</p>	
“Carga” en cueva y en sala de Polícromos	Minutos × personas
Ubicación del punto de medida	Base cartográfica panimetría y ortofotografía del IGN
Situación y valores de referencia (si procede)	Nivel de tolerancia Nivel de alerta Nivel de emergencia
En su caso, respuesta en caso de superar el nivel de tolerancia	Respuesta en caso de alerta Respuesta en caso de emergencia

Definir cuál es el producto o resultado de la acción de seguimiento	Imágenes Muestras Datos Formato de archivos Metodología de archivo
Método de verificación	Sistema de verificación del PCP

2. Seguimiento de las condiciones ambientales

La importancia del conocimiento de las condiciones ambientales en la conservación del arte rupestre entraña un reto debido a varios factores, el soporte en el que se han realizado, en el caso de pinturas y grabados, así como los constantes cambios en las condiciones ambientales a las que ha estado sometido. El caso particular de las pinturas rupestres implica que son inamovibles, no se pueden separar de su soporte ni se pueden retocar, ya que no se conoce con precisión su estado original dado el deterioro que han sufrido. A su vez se encuentran sometidas a una lenta corrosión natural que hay que estudiar minuciosamente (Villar, 1993).

El estudio de la condiciones microclimáticas llevada a cabo desde finales del año 2012 se puede agrupar en dos grandes bloques, el primer bloque corresponde con el periodo inicial de investigación recogido en “El Programa de Investigación para la Conservación Preventiva y Régimen de Acceso de la Cueva de Altamira (PCP)” (2012-2014). El segundo bloque se inicia el año 2014 en el cual la Universidad de Cantabria se encarga del seguimiento ambiental siguiendo las pautas y protocolos del PCP. Sin embargo, los dispositivos utilizados para la monitorización no han cambiado sustancialmente a excepción de alguna de las estaciones que han sido suprimidas. Adicionalmente el equipo de la UC realiza toma de muestras en el interior de la cavidad con una periodicidad de dos semanas tal y como se detallará posteriormente.

En los subapartados siguientes se describen las características de la instrumentación para llevar a cabo el estudio de las condiciones climáticas de la cavidad, el control de calidad de cada uno de los parámetros obtenidos, así como la organización y análisis de la gran cantidad de datos obtenidos.

2.1. Características de la instrumentación utilizada

El sistema utilizado para el seguimiento de las condiciones ambientales instalado actualmente consta de un conjunto de estaciones conectadas a unos registradores de datos o *dataloggers*. Las estaciones están conectadas entre sí mediante cableado y a un ordenador central dotado de conexión a internet que permite su acceso remoto situado

en la denominada Casa del Guarda (1924) en la zona exterior de la cueva.

En total se cuenta con 6 estaciones de monitorización en el interior de la cueva (Exterior, Hall, Cruce, Polícromos, Hoya y Pozo) (ver Figura 6). Todos los sensores, conectados mediante cableado a los *dataloggers*, se han colocado en un soporte autoportante donde se disponen de manera general como se indica en el esquema de la Figura 4. Los soportes están constituidos principalmente por aluminio y acero al que se aplicado un tratamiento cincado con el fin de protegerlos contra la corrosión.

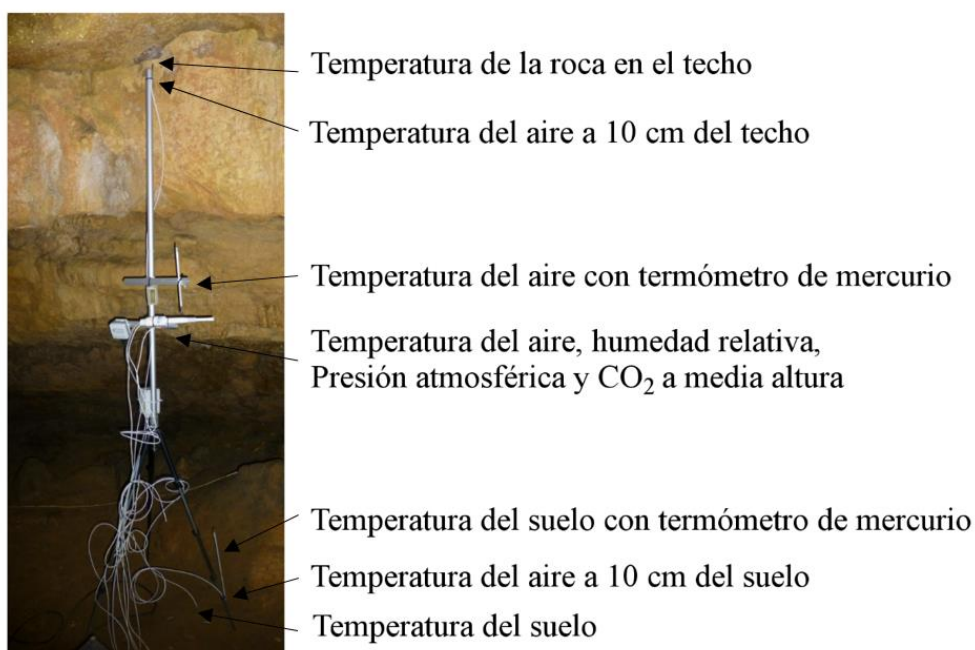


Figura 4. Configuración general de las estaciones de monitorización.

La estación de monitorización del exterior se sitúa sobre el cerro que ocupa la cueva. Además, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) dispone de la estación meteorológica “Cuevas de Altamira” situada en las proximidades del Museo de Altamira a unos 350 metros de la entrada a la caverna (ver Figura 5). En el exterior se mide la temperatura del aire y la del suelo correspondiente a 10 y 50 cm de profundidad respectivamente.

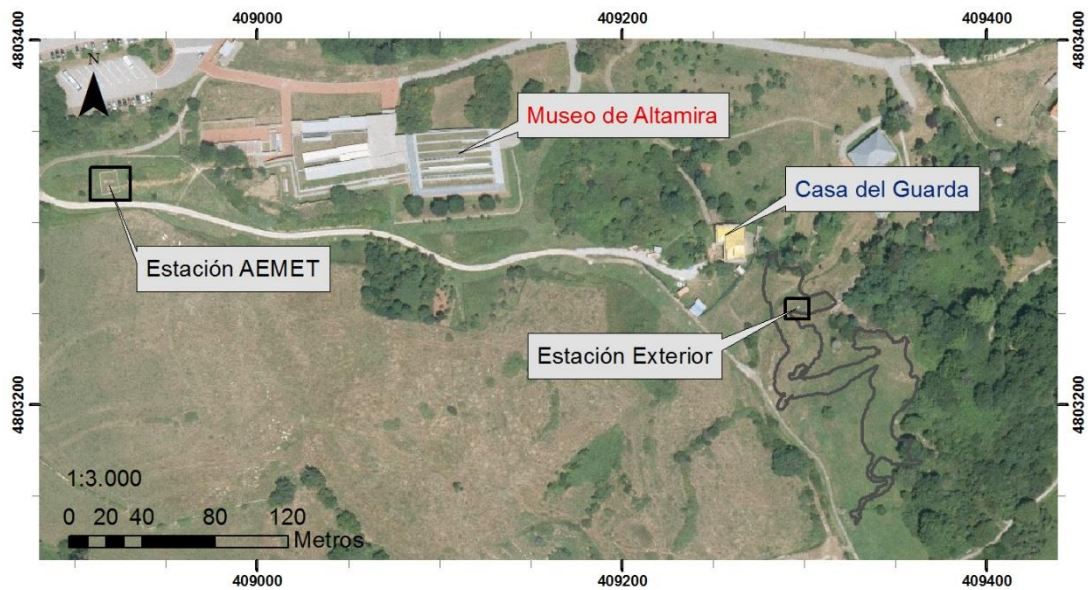


Figura 5. Situación de la estación de monitorización del exterior y de la correspondiente a la AEMET “Cuevas de Altamira”.

La temperatura de las estaciones del interior se mide en el perfil vertical para roca aire: suelo, inferior, medio, superior y exclusivamente en el caso de Polícromos se mide la temperatura de la roca del techo con un termómetro infrarrojo IR. Debido a la complejidad en las mediciones y a problemas en la calibración de los termómetros de infrarrojo las cuales se ven afectadas por las condiciones microclimáticas de la cueva, en noviembre de 2017 se han sustituido dichos termómetros por uno de contacto tipo Pt100. El termómetro de contacto empieza a estar operativo en diciembre de 2017. Debido a averías con el termómetro de contacto con el techo de Polícromos, en abril de 2019 se ha sustituido por otro con recubrimiento de acero inoxidable con el propósito de evitar su deterioro. La altura respecto al suelo (base de la estación) de cada una de las sondas colocadas en las estaciones del interior se puede ver en la Tabla 1.

Los sensores de presión atmosférica, de concentración de dióxido de carbono (CO_2) y de humedad relativa están situados a media altura en cada una de las estaciones tanto del interior como del exterior. En el caso de las estaciones del Cruce y del Pozo no se dispone de sensor de presión.

La frecuencia de muestreo para todos los sensores del equipo de seguimiento

ambiental es de 15 minutos, exceptuando para la sala de Polícromos que se registra cada minuto. Además existe el modo supervisión que permite la grabación de datos cada 3 segundos en el caso de necesitar un control más detallado de la variación de los parámetros ambientales.

Tabla 1. Altura respecto al suelo expresada en metros de las sondas de temperatura situadas en las estaciones de cada sala para el periodo 2012-actualidad.

	Hall	Cruce	Polícromos	Hoya	Pozo
Proximidad Techo	2.50	1.30	1.20	3.00	1.85
Altura media	1.40	0.70	0.40	1.80	1.00
Proximidad Suelo	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

Los *dataloggers* utilizados han sido Squirrel 2020 2f8 con 8 entradas dobles con licencia de software SQUIRRELVIEW 2 PLUS. Los dispositivos utilizados para medir la temperatura, concentración de CO₂, humedad relativa y presión atmosférica son:

- Temperatura del aire en interior: sondas Pt100 de 4 hilos inox AISI 316 con certificación ENAC de 0.06°C y una resolución de 0.01 °C.
- Temperatura de la roca en Polícromos: termómetro infrarrojo CT15:12937,00 con una precisión del 1% y resolución de 0.01 °C.
- Temperatura y humedad relativa en el exterior: dispositivo EE21 Series, 1°C ± 2% RH (0...90%) ± 3% RH (90...100%). Resolución 0.01 °C.
- Temperatura del perfil de suelo en el exterior utiliza la sonda PT100 con una precisión de 0.1 °C. Resolución 0.01 °C.
- CO₂: Sensor EE82: rango de medida de 0 a 10000 ppm. Resolución 0.01 ppm. Precisión ±(100 ppm + 5% del valor medido).
- Presión atmosférica: Delta OHM HD 9408 con una precisión ±0.4 mbar, a 20°C. Resolución 0,01.

- Concentración de partículas: TSI AeroTrak Handheld Particle Counter Model 9306-04. Rango de medida de tamaño de partículas de 0.5 a 25 μm separadas en los siguientes canales: 0.3, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0 μm . Resolución <15% a 0.5 μm . Flujo de la bomba 2.83 L/min con una incertidumbre de 5%. Calibración con trazabilidad al NIST. La toma de muestra se realiza durante un minuto cada hora. El contador de partículas se ha instalado en mayo de 2019 en el pasillo de Polícromos a una altura de 40 cm respecto del suelo.

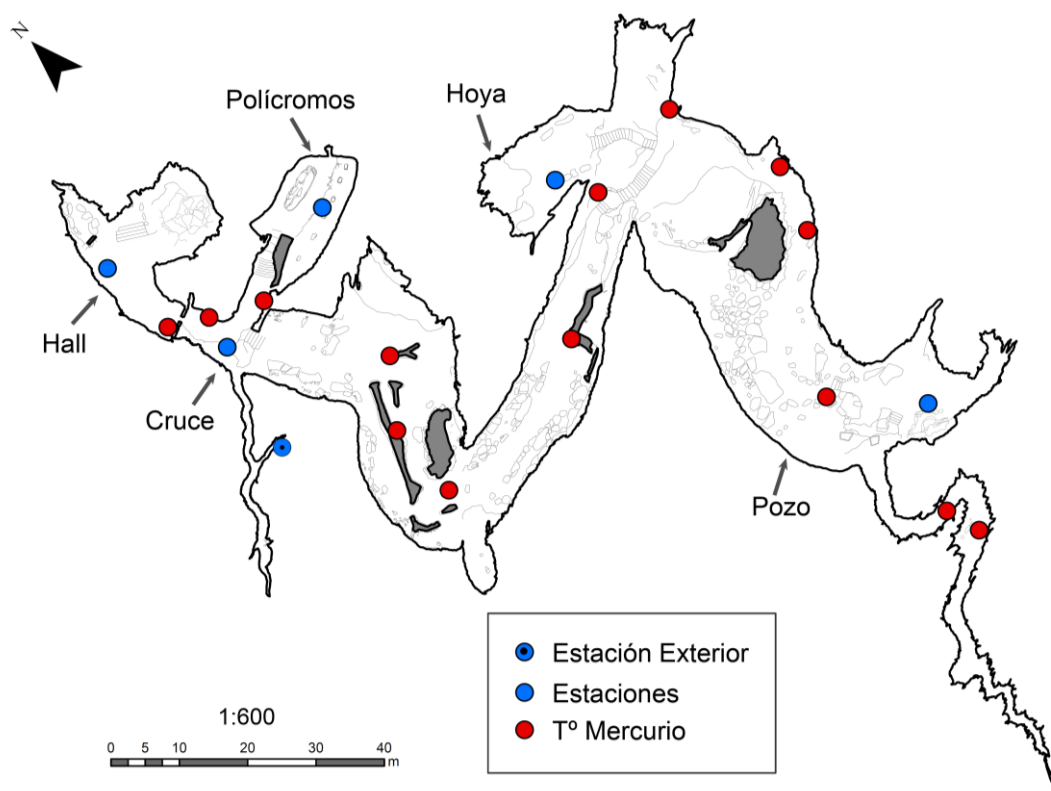


Figura 6. Localización de las estaciones de monitorización en el interior y exterior de la cueva de Altamira y de los termómetros de mercurio.

Como se ha mencionado, el equipo de la Universidad de Cantabria encargado del seguimiento ambiental realiza una entrada en la cueva cada miércoles con una periodicidad de 2 semanas para realizar distintas tareas. Durante dichas visitas, se realizan una variedad de actividades, relacionadas con la toma y descarga de datos, sustitución de equipos de medida y realización de lecturas directas de parámetros ambientales. Se llevan a cabo medidas instantáneas de la concentración CO_2 , de

concentración de partículas y de humedad relativa tanto en el aire exterior como en el aire de cada una de las salas y estancias del interior de la cueva. Se realiza la lectura de la temperatura del aire medida con los termómetros de mercurio que se muestran en la Figura 6. Adicionalmente se sustituyen los dispositivos de medida de la concentración radón que pueden verse afectados por la elevada humedad relativa del aire interior. Dicha sustitución conlleva la descarga de datos, su análisis y validación y, frecuentemente, la necesidad de realizar exposiciones de verificación en la cámara de radón disponible en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria (LaRUC) encaminadas a comprobar el adecuado funcionamiento de los mismos. El estudio y medida del radón, así como sus utilidades se detallan en el Capítulo 5.

En la sala de Polícromos además se recogen periódicamente muestras de agua y se determina del volumen en 9 puntos de goteo. Se determina el pH de algunos puntos in situ y se miden los TDS (Sólidos Totales Disueltos), cationes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+) y aniones (Cl^- , SO_4^{-2} , NO_3^- , NO_2^- y CO_3^{2-}) y el pH de las muestras en el laboratorio.

Los equipos utilizados por la Universidad de Cantabria para llevar a cabo las mediciones de los parámetros anteriormente mencionados son los siguientes:

- Temperatura del aire: Termómetro de dilatación de vidrio Ludwig Schneider. Situado en las estaciones de monitorización y en los emplazamientos que se muestran la Figura 6. Rango de -1 a 18 °C y sensibilidad de 0.05 °C. Calibrado por el laboratorio de calibración Ludwig Schneider Messtechnik acreditado según la Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) (D-K-15223-01-00).
- Concentración de CO_2 : Testo 445 más Sonda CO_2 con rango de medida de 0 a 10000 ppm. Resolución 1 ppm. Precisión $\pm(100 \text{ ppm} + 3\% \text{ del valor medido})$. Calibrado por el laboratorio de calibración Neurtek (ENAC 124/LC 10.091).
- Concentración de partículas: CPC TSI modelo 3007 (TSI Incorporated).

Este dispositivo bombea aire con un flujo $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ y lo hace pasar a través de una membrana porosa que contiene alcohol isopropílico. La medida realizada con este contador de partículas de condensación determina la concentración de las partículas/ cm^3 que presentan un tamaño entre $0,01$ y $1 \text{ }\mu\text{m}$.

- Humedad Relativa: Psicrómetro de aspiración wilh. Lambrecht kG Göttingen (modelo 761). La humedad relativa se calcula mediante la diferencia entre las temperaturas de dos termómetros denominada diferencia psicrométrica. Consta de dos termómetros, uno mide la temperatura ambiental seca y el otro la temperatura húmeda. La temperatura del termómetro húmedo disminuye con el aumento de la evaporación. Ambos termómetros están ventilados con velocidad del aire de aproximadamente 2 m/s . Rango de medida de temperatura de -10 a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ con una resolución de $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Rango de humedad de 0 a 100% con una resolución de 2% .
- Concentración de radón en continuo: Radon Scout (Sarad GmbH). Rango de medida de 0 a 10 MBq/m^3 . Incertidumbre inferior al 10% para una concentración de 1 kBq/m^3 con un tiempo de integración de 1 hora. La verificación y calibración de estos dispositivos se realizan en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria (LaRUC).
- Concentración de radón de forma integrada: Detectores de trazas CR-39 (Radosys). Rango de medida de exposición de 40 a $8000 \text{ kBq/m}^3 \text{ h}$. Incertidumbre $<10\%$ para una exposición aproximada de $1500 \text{ kBq/m}^3 \text{ h}$. Las medidas de radón con este tipo de detectores se realizan bajo la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 en el LaRUC, laboratorio de ensayos acreditado por ENAC.

2.2. Control de calidad de los datos microclimáticos

Los sensores dispuestos en las estaciones de monitorización se han calibrado por un laboratorio de calibración acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), organismo nacional de acreditación designado por el Gobierno de España. Las verificaciones y calibraciones en el interior de la cueva se realizan periódicamente tomando como sensor patrón de la temperatura y humedad el equipo Vaisala HMP155, en el caso de la concentración de CO₂ se ha tomado como patrón calibrado el dispositivo EE82. Para calibrar los sensores se sitúan junto al patrón a altura media en soporte auto-portante. En el caso de los sensores de temperatura es necesario mover los correspondientes al suelo, inferior, superior y roca para posteriormente situarlos en su emplazamiento original. Estas medidas de control se realizan con dispositivos calibrados en laboratorios acreditados ENAC para tal fin, y por ello suponen un elemento esencial en el control de calidad de las medidas que se obtienen desde las instalaciones automatizadas de medida continua instaladas en el interior de la cueva.

Además de las calibraciones periódicas que se llevan a cabo con las sondas mencionadas, en todas las estaciones hay colocados termómetros de mercurio calibrados ENAC tal y como se muestra en la Figura 4. Estos termómetros son utilizados como verificación continua de los sensores de temperatura anteriormente mencionados, estableciéndose como requisito que la diferencia porcentual entre el termómetro de mercurio y la sonda de temperatura sea inferior al 5%. Adicionalmente en otros puntos de la cueva hay colocados termómetros de mercurio del mismo tipo y características que los anteriores con el fin de obtener una distribución espacial de temperaturas dentro de la cueva lo más amplia posible (ver Figura 6).

Las verificaciones cada dos semanas realizadas comparando el valor de temperatura proporcionado por el termómetro de mercurio con la sonda de temperatura muestra la estabilidad en el comportamiento de las sondas mencionadas, lo cual permite dilatar en el tiempo las calibraciones hasta periodos comparables con la vida útil de las sondas. Las calibraciones en este periodo se han llevado a cabo en los años 2015 y 2018.

2.3. Organización de la información

La descarga de los datos se realiza de forma programada y automáticamente cada 24 horas, el acceso a los datos se realiza de forma remota a través del PC situado en el exterior de la cueva y conectado a internet. El intervalo de registro para todos los parámetros monitorizados es de 15 minutos. Desde marzo de 2017 el registro en la sala de Polícromos se ha cambiado a cada minuto, intervalo suficiente para detectar las variaciones en la temperatura, CO₂ y humedad relativa de la sala provocadas por la influencia antrópica.

El análisis de los datos para el seguimiento de las condiciones ambientales se realiza por medio de plantillas en formato Microsoft Excel. Estas plantillas se rellenan mensualmente a partir de los datos registrados por cada una de las estaciones de monitorización. Los datos son depurados y se aplica a cada sonda los factores correspondientes de acuerdo con la última calibración realizada. A partir de la información recogida en las plantillas se realiza un informe mensual en el que se detallan y analizan de cada uno de los parámetros ambientales de ese mes, se actualizan los datos anuales, se analizan las visitas públicas y se ponen de manifiesto las incidencias que puedan haber surgido.

Por motivos de seguridad el conjunto de plantillas se archivan en varias ubicaciones: en el ordenador del propio sistema, en el ordenador del técnico encargado de rellenaslas mensualmente de la universidad de Cantabria y una tercera determinada por la Subdirección General de Museos Estatales de la Secretaria de Estado de Cultura, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Para cada sala de la cavidad y el exterior existen dos plantillas mensuales en las que se muestra por un lado el gradiente vertical de temperatura y por otro la temperatura a media altura, la humedad relativa, la humedad específica, la concentración de CO₂ y la presión atmosférica. Por otra parte existen las mismas plantillas mencionadas pero para el periodo anual. Además hay plantillas comparativas anuales de cada uno de los parámetros estudiados, cada una de las temperaturas medidas, humedad relativa, humedad específica, CO₂, precipitaciones (IPCE, 2014c).

El listado de plantillas se muestra a continuación:

Mensuales:

Plantilla Mensual de Exterior/Hall/Cruce/Polícromos/Hoya/Pozo del Gradiente vertical T^a

Plantilla Mensual de Exterior/Hall/Cruce/Polícromos/Hoya/Pozo de T^a-HR-HE-CO₂-Presión

Anuales:

Plantilla Anual Comparativa de CO₂ y Precipitación

Plantilla Anual Comparativa de HE aire

Plantilla Anual Comparativa de HR aire

Plantilla Anual Comparativa de T^a aire inferior / aire media / aire superior / roca inferior

Plantilla Anual Comparativa de T^a gradiente ext-int

Plantilla Anual Comparativa de CO₂-Radón-Precipitaciones

Plantilla Anual Comparativa de 2 ciclos anuales T^a-HE-CO₂

Plantilla Anual de Exterior/Hall/Cruce/Polícromos/Hoya/Pozo del Gradiente vertical T^a

Plantilla Anual de Exterior/Hall/Cruce/Polícromos/Hoya/Pozo de T^a-HR-HE-CO₂-Presión

Histórico:

Plantilla Histórico – Valores de Referencia de Polícromos de T^a – HE – CO₂

Predicción:

Plantilla Predicción T^a de Polícromos

3. El campo de temperaturas en la cueva de Altamira

La distribución de temperaturas de la roca y el aire juega un papel muy importante en las características climáticas de una cavidad, debido a la influencia que tiene sobre los demás parámetros ambientales. La temperatura condiciona los mecanismos como los movimientos de masas de aire, controla la densidad del aire (De Freitas et al., 1982; Sainz et al., 2018) dominando en gran parte el grado de conexión interior-exterior. Además influye en la concentración de radón, en la presión del dióxido de carbono CO₂, en la humedad relativa, en los procesos de evaporación y condensación (De Freitas & Schmekal, 2006), las reacciones químicas, los cambios de fase, etc. Por lo tanto se puede decir que el campo de temperaturas sirve como motor de los demás parámetros ambientales de la cavidad.

Conocer el campo de temperaturas de la cueva resulta fundamental para establecer las variaciones microclimáticas y la dinámica de flujos de materia y energía (Villar et al., 1983; Cuezva, 2008). Debido a las características propias de la cueva de Altamira, sistema kárstico somero en el cual el calor generado en la superficie exterior se propaga a través de la roca y, junto a la ventilación natural de la cavidad determinan la temperatura del aire interior, el estudio debe extenderse tanto a las temperaturas de las superficies rocosas, como a las del aire en las distintas salas, ya que son un factor determinante en el intercambio de materia y energía entre el ambiente exterior y el interior de la cueva.

Con respecto al seguimiento de temperaturas, los resultados obtenidos van a servir como referencia para poder determinar la influencia que tiene sobre los demás parámetros ambientales monitorizados. En el apartado 3.1 se muestra la distribución de temperaturas tanto del exterior como de las salas de la cueva utilizando los sensores situados en las estaciones de monitorización descritas en el capítulo 2. En el apartado 3.2 se describe el mecanismo por el cual el calor se propaga por la masa rocosa y acaba determinando la temperatura del aire interior, del mismo modo se obtiene el desfase temporal observado entre la temperatura de la cueva y el exterior a partir de un método matemático. Por último, y debido a la apertura de la segunda puerta en enero de 2018

la cual fue cerrada inicialmente en 2008, se ha estudiado el efecto que tiene sobre la temperatura de la cavidad y más en detalle sobre la correspondiente a la sala de Polícromos.

3.1. Series temporales de temperatura

En este apartado se presentan las series de temperaturas para el periodo desde julio de 2013 hasta agosto de 2019 tanto del exterior como del interior de la cueva. En el caso del exterior se incluye la temperatura del aire y del suelo a 10 cm y 50 cm de profundidad. La temperatura de la cavidad se analiza por salas, haciendo énfasis tanto en los gradientes térmicos interior-exterior como en la existente entre las diferentes salas, responsables en última instancia la dinámica atmosférica de la cueva.

3.1.1. Temperatura del aire y del suelo exterior

Como se ha señalado anteriormente, la temperatura exterior juega un papel fundamental en las condiciones ambientales de la cavidad, determinando la distribución de temperaturas del interior principalmente a través de la masa rocosa que la encierra. Los resultados que se presentan a continuación se refieren a la temperatura del aire exterior y del suelo a 10 y 50 cm de profundidad.

Los datos registrados por la estación del exterior permiten llevar a cabo un seguimiento en continuo, detectar episodios de periodo corto, semanal y/o diario, y modelizar las posibles repercusiones sobre los parámetros ambientales del interior de la cueva. Asimismo los datos de la AEMET, mensuales, permiten validar los datos anteriores y obtener las tendencias generales. En la Tabla 2 se muestran los valores medios mensuales de la temperatura del aire exterior y su evolución en escala temporal en la Figura 7.

El objetivo de la monitorización de la temperatura en el suelo reside en poder estudiar la onda térmica, la transmisión de calor en el suelo, y utilizar estas temperaturas, las cuales no están tan afectadas por factores como el viento o la lluvia exterior como la del aire, para relacionarlas con la temperatura del interior de la cavidad.

3. El campo de temperaturas en la cueva de Altamira

Tabla 2. Temperatura media mensual del aire del exterior (°C) obtenida de la estación de monitorización del exterior. Los datos sombreados corresponden a la estación meteorológica “Cuevas de Altamira” de la AEMET.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013	9.1	8.0	10.4	11.0	11.5	14.7	20.3	19.2	18.1	16.7	11.0	9.7
2014	10.3	9.6	10.6	13.2	13.5	17.4	18.8	19.1	19.8	17.8	13.3	9.5
2015	8.4	7.1	9.8	13.9	14.7	17.5	19.9	19.6	16.4	15.4	13.5	13.1
2016	10.7	9.4	9.5	11.6	14.8	17.1	19.3	20.0	18.6	15.0	11.0	11.4
2017	7.4	10.5	11.4	11.9	15.9	18.3	18.8	19.1	16.8	16.2	11.2	8.8
2018	9.7	6.6	10.1	13.1	13.9	17.4	20.2	20.2	18.8	14.4	12.3	11.1
2019	7.7	10.5	10.9	11.9	13.7	16.5	19.8	19.9				

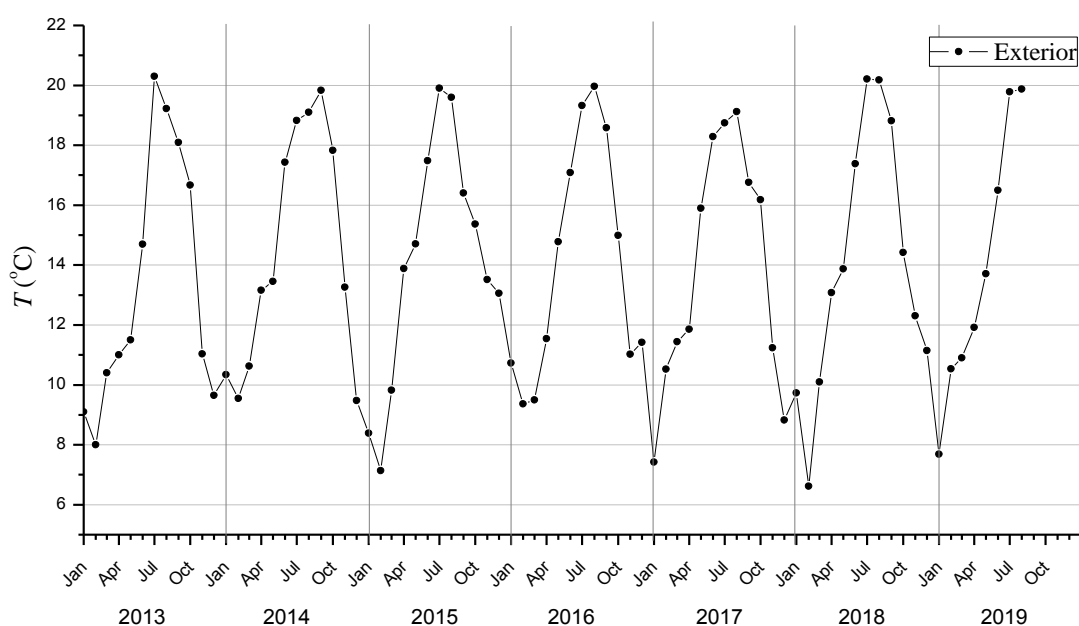


Figura 7. Temperatura media mensual del aire exterior de la cueva de Altamira. Datos obtenidos de la estación de monitorización del exterior y de la AEMET (ver Tabla 2).

A partir de las temperaturas medias mensuales de cada año reflejadas en la Tabla 2 se ha obtenido la media anual, el mes con mayor y menor temperatura media de cada año y la desviación estándar SD que indica del grado de dispersión de los datos (ver

Tabla 3). La temperatura media en el periodo 2013-2019 se encuentra en torno a 13.9 °C, con un rango medio, diferencia entre la temperatura media máxima y la media mínima, de unos 11.9 °C. Siendo los meses con mayor temperatura típicamente los de verano (julio-agosto) y los más fríos los de invierno (diciembre-enero-febrero).

Tabla 3. Estadística descriptiva de la temperatura media mensual del aire exterior (°C) realizada por años. Datos obtenidos de la Tabla 2.

	Media	Máxima	(mes)	Mínima	(mes)	rango	SD
2013	13.3	20.3	(Ago.)	8.0	(Feb.)	12.3	4.3
2014	14.4	19.8	(Sept.)	9.5	(Dic.)	10.4	4.0
2015	14.1	19.9	(Jul.)	7.1	(Feb.)	12.8	4.1
2016	14.0	20.0	(Ago.)	9.4	(Feb.)	10.6	3.9
2017	13.9	19.1	(Ago.)	7.4	(Ene.)	11.7	4.1
2018	14.0	20.2	(Jul-Ago)	6.6	(Feb.)	13.6	4.4
2019	13.9	19.9	(Ago.)	7.7	(Ene.)	12.2	4.5

En la Figura 8 se muestra la representación gráfica del registro cada 15 minutos de la temperatura del aire y del suelo en perfil vertical en la zona exterior entre julio 2013 y agosto 2019. Se observa que la temperatura del aire exterior tiene una variación más amplia comparada con las temperaturas en profundidad. En la Tabla 4 se muestra su estadística descriptiva para los años completos 2014-2018, la temperatura media anual, el valor máximo y mínimo absoluto, y la desviación estándar que indica el grado de dispersión de los datos respecto al valor promedio.

La dispersión de los datos en el caso de la temperatura del suelo es inferior a la del aire, siendo la desviación estándar de la temperatura del aire la más grande y la correspondiente a la temperatura a la profundidad de 50 cm la más pequeña. El suelo por lo tanto atenúa las variaciones de periodo más corto disminuyendo el rango de oscilación térmica anual.

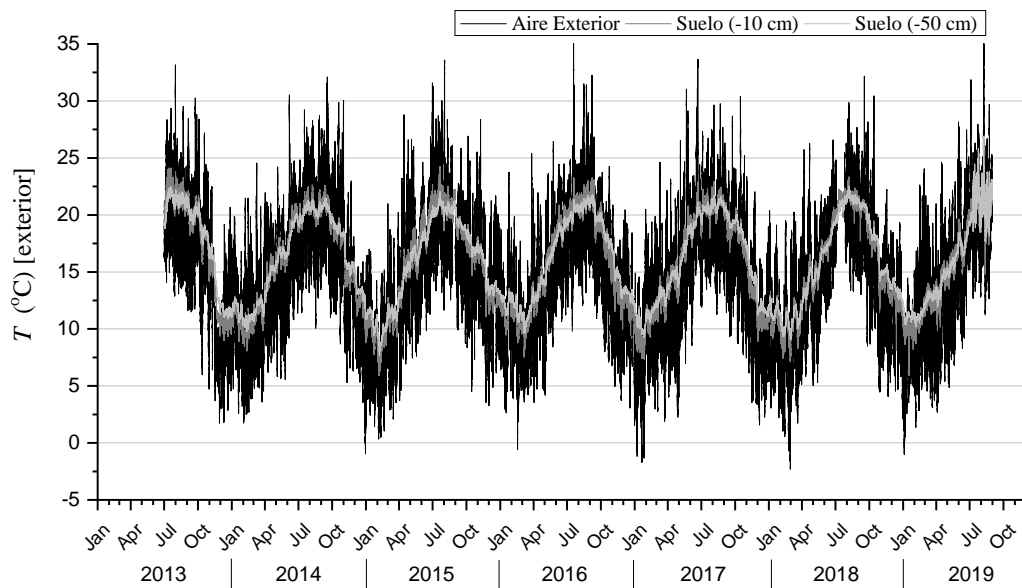


Figura 8. Registro de la temperatura del aire (negro) y del suelo a 10 cm (gris oscuro) y 50 cm (gris claro) de profundidad en la zona exterior para el periodo julio 2013-agosto 2019.

A partir de la estadística anual que se muestra en la Tabla 4 se destaca que a medida que se aumenta en profundidad las temperaturas medias aumentan, siendo éstas superiores a la correspondiente del aire exterior. Respecto a los máximos y mínimos absolutos, las temperaturas máximas absolutas son mayores en el exterior que en el suelo, siendo la del suelo a 10 cm de profundidad superior a la de 50 cm, lo mismo sucede con las temperaturas mínimas, la mínima exterior es más baja que la de 10 cm y ésta que la correspondiente con la de 50 cm. Este fenómeno observado en el perfil de temperaturas es típico en la propagación de una onda térmica periódica en el suelo. La explicación física de la amortiguación de la onda de temperatura con la profundidad radica en el hecho de que cierta cantidad de calor es absorbida o liberada a la largo de la propagación cuando la temperatura del suelo se incrementa o disminuye respectivamente.

Tabla 4. Estadística descriptiva de la temperatura del aire y del suelo (°C) para los años completos 2014 a 2018 correspondiente a las medidas quinceminutales que se muestran en la Figura 8.

		Media	Máxima	Mínima	rango	SD
	Aire	14.4	32.1	-1.0	33.1	5.1
2014	- 10 cm	15.9	22.6	8.1	14.6	3.9
	- 50 cm	16.1	21.5	9.8	11.7	3.5
	Aire	14.1	33.6	0.4	33.2	5.2
2015	- 10 cm	15.6	24.3	5.9	18.4	4.3
	- 50 cm	15.8	22.0	8.0	14.1	3.7
	Aire	14.0	37.9	-0.6	38.5	5.0
2016	- 10 cm	15.6	23.3	7.5	15.8	3.9
	- 50 cm	16.0	21.8	9.6	12.2	3.5
	Aire	13.9	33.6	-1.7	35.3	5.3
2017	- 10 cm	15.6	22.9	7.3	15.6	4.1
	- 50 cm	16.0	21.7	9.2	12.5	3.7
	Aire	14.0	32.2	-2.3	34.5	5.3
2018	- 10 cm	15.4	23.3	7.1	16.2	4.2
	- 50 cm	15.8	22.5	9.1	13.4	3.8

Se han analizado las distribuciones de las temperaturas del aire exterior y del suelo y sus medias a partir de los test estadísticos Kolmogorov-Smirnov y Welch respectivamente con el objetivo de observar la influencia que tiene el suelo sobre las temperaturas en profundidad. Se ha llegado a la conclusión de que las temperaturas del aire y del suelo no siguen la misma distribución de los datos. En el caso del aire exterior se sigue una distribución que se asemeja a la normal, debido a la alta dispersión que tienen los datos. Se centra aproximadamente en el promedio, mientras que los datos del suelo siguen un comportamiento bimodal centrado en los máximos y mínimos de

la onda pseudo-sinusoidal tal y como muestra la función densidad de probabilidad de la Figura 9. Por lo tanto la influencia de los parámetros que afectan a la temperatura exterior tales como viento, lluvia, radiación solar, etc, no repercuten del mismo modo a las correspondientes en profundidad, siendo otros factores como el contenido de humedad del mismo y la conductividad térmica más relevantes en este último caso.

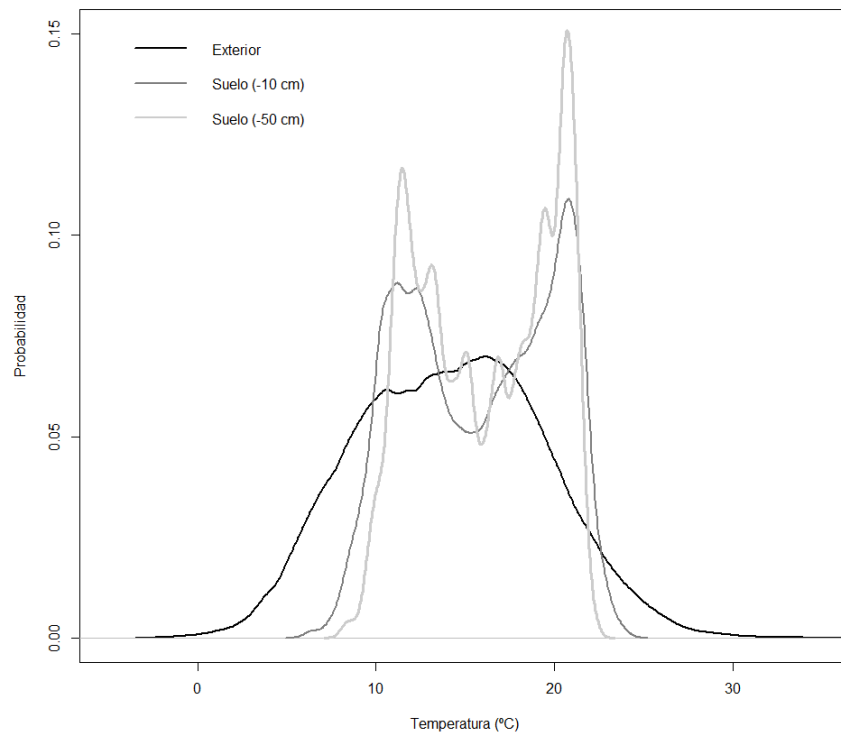


Figura 9. Función densidad de probabilidad obtenida a partir de los datos experimentales para la temperatura del aire exterior (negro), del suelo a -10 cm (gris oscuro) y -50 cm (gris claro) para el periodo julio 2013-agosto 2019.

Pese a las diferencias tanto de distribución de datos como de media anual de las temperaturas del suelo y del aire exterior, se ha realizado el estudio de correlaciones entre la serie del aire exterior y en profundidad, obteniéndose un coeficiente de correlación de Pearson $r = 0.99$ y 0.98 para las series de -10 cm y -50 cm con el aire exterior respectivamente. Asimismo se ha determinado el retraso o delay entre las series del suelo y la del aire exterior con el método de la máxima correlación (ver apartado 3.2.1). Se concluye con que no existe retraso entre las series, por lo tanto las series del suelo pueden servir para determinar el retraso entre las series temporales de las salas correspondientes al interior de la cueva y el exterior, ya que se elimina la

contribución de “ruido” que introduce la alta dispersión y variación de periodo corto de la temperatura del aire exterior.

3.1.2. Temperatura del aire del interior de la cueva

Como ya se ha indicado, el campo de temperaturas de la cueva de Altamira está determinado fundamentalmente por las oscilaciones térmicas del exterior. Estas oscilaciones son transmitidas a través del espesor variable de roca en cada sala (Elez et al., 2013). La transmisión de calor a través de la roca provoca amortiguamiento y retraso de la onda térmica en cada caso (Monteith & Unsworth, 2013). Los máximos y mínimos de temperatura interior están retrasados temporalmente respecto a la onda descrita en la temperatura del aire exterior. Del mismo modo la oscilación térmica anual disminuye conforme aumenta el espesor de roca del techo de cada una de las salas de la cueva. Es estudio de la onda térmica de aborda en detalle en el apartado 3.2.

A continuación se presentan las temperaturas de cada una de las salas de la cueva de Altamira: Hall, Cruce, sala de Polícromos, Hoya y Pozo.

► Hall

La temperatura media mensual del aire a altura media en la zona del Vestíbulo o Hall se presenta en la Tabla 5 y Figura 10. La temperatura media anual se encuentra sobre 14.7 °C con una variación anual promedio entre temperaturas medias mensuales de 3.7 °C. El máximo anual de temperatura media mensual en el Hall se alcanza durante el mes de septiembre, un mes de retraso respecto al máximo de temperatura de agosto del aire/suelo exterior. El mínimo mensual de temperatura media mensual se alcanza en los meses de marzo-abril. La tendencia general viene dada por la propagación de la onda térmica. Sin embargo, y como se muestra en apartados posteriores, el elevado grado de conexión de esta sala a través del primer cierre con el exterior hace que las oscilaciones de periodo corto que se producen fuera se presenten también en esta sala sin retraso notable.

3. El campo de temperaturas en la cueva de Altamira

Tabla 5. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del Hall (°C).

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013							14.52	15.73	15.56	15.66	15.51	14.61
2014	13.79	13.16	12.73	12.76	13.18	13.97	15.07	16.05	16.61	16.53	16.06	15.22
2015	14.31	13.24	12.68	12.67	13.20	13.95	15.31	16.03		15.80	15.54	14.80
2016	14.42	13.82	13.26	13.05	13.45	14.23	15.29	16.30	16.78	16.55	15.96	15.11
2017	13.83	13.47	13.23	13.28	13.66	14.64	15.65	16.39	16.66	16.60	16.13	15.25
2018		13.66	13.23	13.12	13.17	13.89	15.49	16.67	17.05	16.81	16.06	15.29
2019	14.50	13.65	13.41	13.36	13.58	14.13	15.29	16.21				

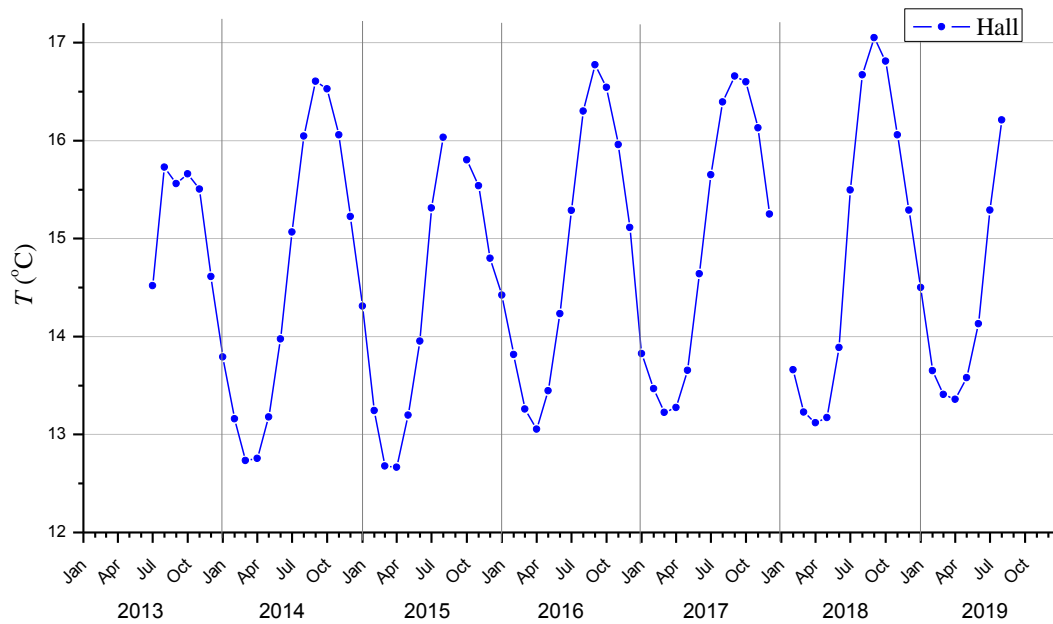


Figura 10. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del Hall.

► Cruce

La temperatura del aire a altura media en la zona del Cruce se presenta en la Tabla 6 y Figura 11. La temperatura media anual se encuentra sobre 14.4 °C con una variación anual entre temperaturas medias mensuales aproximadamente 1.6 °C. Las temperaturas mínimas y máximas en la zona del Cruce se alcanzan en los meses de mayo y noviembre respectivamente, 3 meses de retraso respecto a las correspondientes del exterior.

En el periodo 2004-2005 (Cuezva, 2008) el rango anual, diferencia entre las temperaturas medias mensuales máximas y mínimas, era del orden de 2 °C. Esta aparente disminución en el rango de oscilación de la temperatura del Cruce puede venir suscitada por el cierre de la segunda puerta en el año 2008 (IPCE, 2014b), provocando un mayor aislamiento de las zonas posteriores a la misma, disminuyendo de este modo la conexión con la zona de la entrada. Este hecho se hace especialmente importante en los periodos de mayor intercambio gaseoso debido al gradiente térmico negativo entre las dos estancias. Tras la apertura de la segunda puerta en enero de 2018 la diferencia entre la temperatura media mensual mínima y la máxima es de 2.16 °C. Este hecho se estudiará con más detalle en el apartado 3.4.

Tabla 6. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del Cruce (°C). Los valores sombreados corresponden al promedio de la temperatura media mensual de los niveles superior e inferior.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013							13.36	13.86	14.37	14.70	14.77	14.80
2014	14.53	14.13	13.78	13.55	13.48	13.53	13.80	14.33	14.86	15.15	15.20	15.18
2015	14.91	14.39	13.90	13.58	13.47	13.52	13.82	14.36	14.76	15.00	15.07	15.01
2016	14.82	14.46	14.06	13.79	13.65	13.68	13.91	14.46	14.78	15.03	15.13	15.12
2017	14.79	14.54	14.13	13.88	13.78	13.82	14.05	14.52	14.93	15.33	15.40	15.22
2018	14.82	14.29	13.92	13.58	13.42	13.51	14.06	14.80	15.38	15.53	15.58	15.43
2019	15.03	14.56	14.25	13.92	13.79	13.82	14.05	14.56				

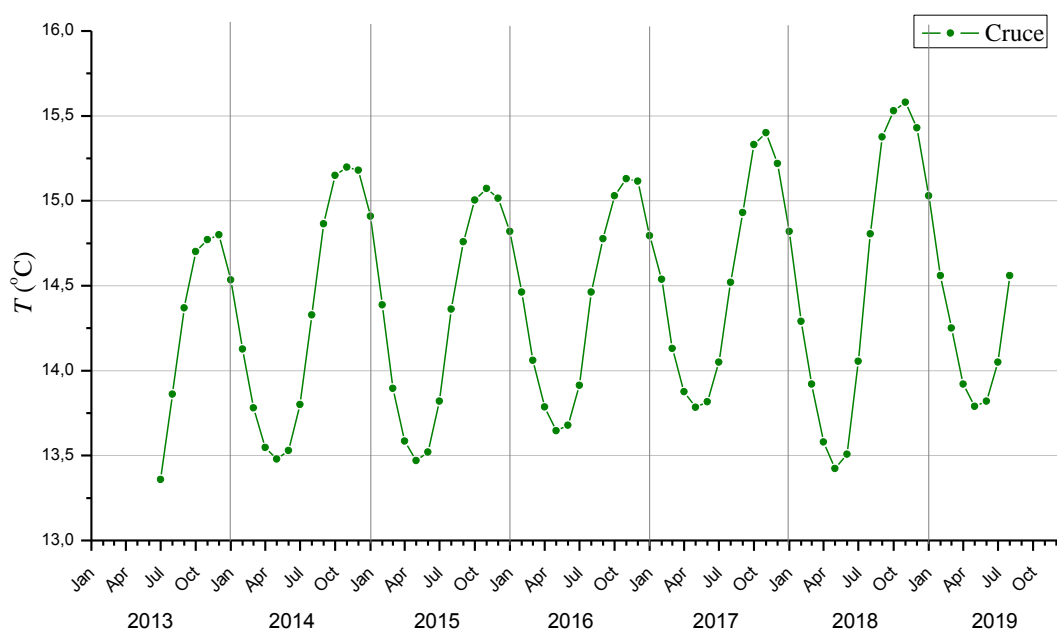


Figura 11. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del Cruce.

► Sala de Polícromos

La temperatura del aire a altura media en la sala de Polícromos se presenta en la Tabla 7. Debido a que es la sala en la que se encuentran la gran mayoría de las representaciones artísticas de la cavidad, el seguimiento ambiental en la misma ha sido más amplio y por tanto se dispone de un histórico de datos mayor en todos los periodos de investigación (Villar et al., 1983; Fernández, 1983; Cuezva, 2008; Sánchez-Moral et al., 2014; García-Antón, 2014; Sainz et al., 2018) cuya recopilación y detalles técnicos se pueden ver en Rábago (2017).

La estación actual se encuentra en la parte derecha de la sala sobre la zona elevada, en este caso se dispone de una sonda de temperatura a media altura, 40 cm respecto de la base de la estación y aproximadamente 1 metro del suelo rebajado. De este modo se introduce una pequeña incertidumbre respecto a los datos recogidos en los otros periodos de investigación, aunque se ha observado que diferencias entre los puntos monitorizados son pequeñas. Se asume por tanto la homogeneidad de temperaturas en la sala de Polícromos y se mide en un único punto de la estancia.

Tabla 7. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos (°C).

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013							13.12	13.26	13.56	13.90	14.23	14.38
2014	14.30	14.10	13.83	13.57	13.40	13.36	13.47	13.70	14.03	14.38	14.64	14.79
2015	14.76	14.50	14.11	13.77	13.54	13.48	13.57	13.76	14.11	14.43	14.62	14.73
2016	14.69	14.53	14.24	13.91	13.73	13.69	13.75	13.84	14.25	14.67	14.89	14.97
2017	14.87	14.62	14.31	13.99	13.81	13.76	13.86	14.11	14.41	14.73	14.91	15.01
2018	14.84	14.48	14.11	13.76	13.49	13.42	13.53	13.82	14.23	14.66	14.88	14.97
2019	14.89	14.64	14.32	14.01	13.83	13.75	13.79	13.99				

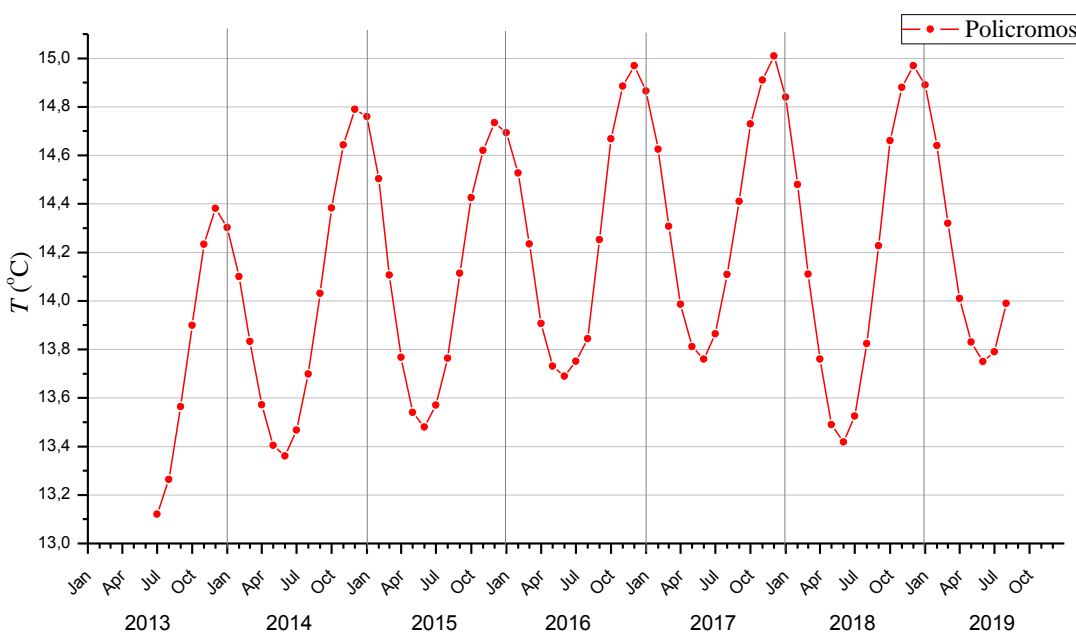


Figura 12. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos.

En la Figura 12 se recogen las medias mensuales de temperatura a nivel medio de la sala de Polícromos. A partir de estos datos se ha realizado la estadística anual, teniendo en cuenta exclusivamente los años completos 2014 a 2018, de las medias mensuales (ver Tabla 8). El patrón evolutivo de la temperatura es básicamente

sinusoidal al igual que los casos del Hall y del Cruce. La variación anual de la sala de Polícromos se encuentra en el rango 1.3-1.4 °C, 0.2 °C menos que el caso del cruce y 2.6 °C menos que el Hall, debido al mayor grado de aislamiento. Respecto al exterior, la evolución de la temperatura en esta sala tiene un retraso de 4 meses debido a la propagación de la onda térmica en los 7-8 metros de espesor de roca del techo como se verá en el apartado 3.2.

Tabla 8. Estadística descriptiva de la temperatura media mensual del aire de la sala de Polícromos (°C) realizada para los periodos completos 2014-2018.

	Media	Máxima	Mínima	rango
2014	13.96	14.79	13.36	1.43
2015	14.12	14.76	13.48	1.28
2016	14.26	14.97	13.69	1.28
2017	14.37	15.01	13.76	1.25
2018	14.18	14.97	13.42	1.55

Debido a la aparente tendencia creciente que se visualiza en la temperatura media mensual más acusada en los mínimos anuales se han analizado estadísticamente las tendencias a partir de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. Efectivamente se obtienen tendencias significativas al 95% de confianza para la serie de temperaturas medias mensuales de la sala de Polícromos para el periodo 2013-2018, al igual que se encontraron para el periodo 2009-2012 (Rábago, 2017). Esta observación sugiere que desde el año 2009 se ha estado produciendo calentamiento en la sala de Polícromos.

Se ha evaluado la tendencia creciente de temperatura en la sala de Polícromos para dos etapas dentro del periodo de estudio 2013-2018. Para comparar estas dos etapas se han tomado el mismo número de meses, cuyo inicio y final es el mismo, siendo ciclos anuales completos. En este caso se han tomado 36 meses, en la primera etapa mayo 2014-abril 2017 y en la segunda mayo 2015-abril 2018 ya que como se puede ver en la Tabla 7, aparentemente durante año 2018 el incremento de temperatura es menor. Para la etapa analizada mayo 2014-abril 2017 se obtiene un incremento total de 0.65

°C, tendencia de 0.018 °C/mes, mientras que para la etapa mayo 2015-abril 2018 el incremento es 0.50 °C, tendencia de 0.014 °C/mes. La tendencia en la segunda etapa seleccionada es menor. Una de las principales razones de esta disminución es la temperatura de los primeros meses de 2018 cuya temperatura no se incrementa al ritmo de los últimos años.

Cómo medida previa para descartar factores que contribuyan al calentamiento de la sala de Polícromos se han separado las posibles fuentes de calor tales como registradores de datos de la estación de monitorización y no se observa una disminución en la temperatura.

Como ya se ha resaltado anteriormente a partir de febrero de 2018 se observa que los valores de temperatura son significativamente más bajos que los del año 2017. Las hipótesis planteadas que explican tal disminución son las siguientes: la influencia del ambiente exterior, la influencia antrópica y el efecto de la apertura de la segunda puerta. Esta última cuestión se aborda en el apartado 3.4.

► **La Hoya**

A continuación se presentan las temperaturas medias mensuales de la sala de la Hoya, cota más baja de la cueva, 16 metros por debajo del nivel de la entrada, una altura media aproximada en la sala de 4 metros y un espesor de cobertera/roca en el techo de unos 15-16 metros (ver Figura 2). Este grado de aislamiento hace que la variación anual de la temperatura media mensual sea aproximadamente 0.2 °C.

Las medias mensuales de temperatura del aire obtenidas a partir de los datos registrados por el sistema de monitorización son los correspondientes a la Tabla 9 y la representación gráfica de la Figura 13. Debido al sucesivo fallo de los sensores de temperatura en los niveles superior y medio de la sala de la Hoya se ha decidido tomar como referencia el nivel inferior que es el más completo. La máxima diferencia en el perfil vertical de esta sala es de 0.2 °C como máximo comparando la temperatura del nivel inferior con el nivel medio y superior.

Tabla 9. Temperatura media mensual del aire a nivel inferior de la sala de la Hoya (°C).

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013												13.07
2014	13.12		13.14	13.11	13.09	13.04	13.02	13.01	13.03	13.08	13.13	13.2
2015	13.26	13.29	13.28	13.24	13.21	13.17	13.14	13.12	13.14	13.19	13.24	13.27
2016	13.3	13.32	13.33	13.31	13.29				13.22	13.26	13.3	13.35
2017	13.39	13.41	13.41	13.39	13.35	13.32	13.30	13.29	13.31	13.35	13.40	13.46
2018	13.50	13.51	13.48	13.42	13.42	13.36	13.3	13.28	13.29	13.33	13.39	13.46
2019	15.50											

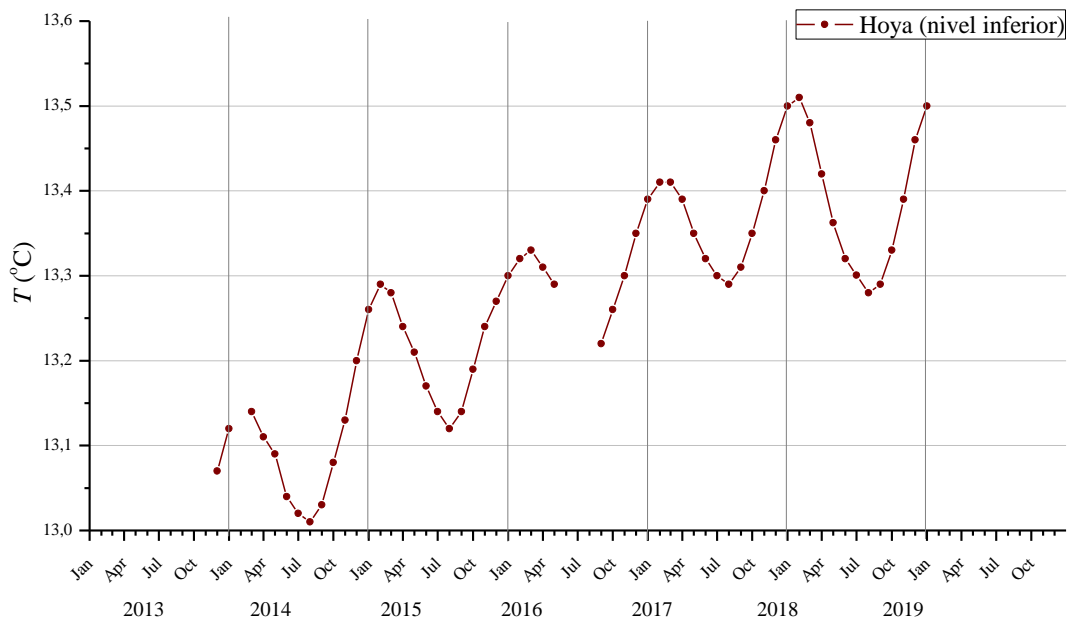


Figura 13. Temperatura media mensual del aire a nivel inferior de la sala de la Hoya.

Se ha analizado la tendencia de la serie de temperaturas de la Hoya y se ha obtenido una tendencia estadísticamente significativa a partir del test Mann-Kendall. Para estimar el incremento aproximado anual se ha obtenido la pendiente para el periodo completo que se muestra en la Figura 13 es de 0.007 °C/mes, lo que se deriva en 0.08 °C/año.

► El Pozo

La sala del Pozo junto con la cola de caballo se encuentra en el sector más alejado respecto a la zona de la entrada. El interés del seguimiento de las condiciones ambientales de esta sala viene motivado por la potencial entrada de aire directa del exterior tal y como se sugiere en el trabajo de García-Antón et al. (2013).

A continuación se presentan las temperaturas medias mensuales de la sala del Pozo. La sala del Pozo es la más alejada de la puerta aunque menos profunda que la Hoya, sin embargo el grado de aislamiento de esta parte de la cavidad es también grande. La variación anual de la temperatura es aproximadamente 0.4 °C.

Las temperaturas medias mensuales se muestran en la Tabla 10 y Figura 14. Debido a fallos en el sistema de adquisición de datos, algunos meses se han tomado como promedio de las sondas de temperatura superior e inferior. Esta estimación tiene una significación limitada por lo que hay que tenerlo en cuenta para análisis posteriores.

Tabla 10. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala del Pozo (°C). Los valores sombreados corresponden al promedio de la temperatura media mensual de los niveles superior e inferior.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2014		13.59	13.51	13.49	13.43	13.39	13.38	13.38	13.43	13.51	13.61	13.76
2015	13.80	13.65	13.58	13.57	13.54	13.49	13.46	13.46	13.51	13.59	13.71	13.81
2016	13.86	13.86	13.75	13.73	13.68	13.63	13.61	13.61	13.59	13.59	13.62	13.69
2017	13.70			13.81	13.77	13.75	13.74	13.75	13.82			
2018		13.84	13.80	13.74	13.51	13.47	13.46	13.60	13.50	13.78	13.96	14.05
2019	14.04	14.06	14.01	13.94	13.89	13.83	13.78	13.78				

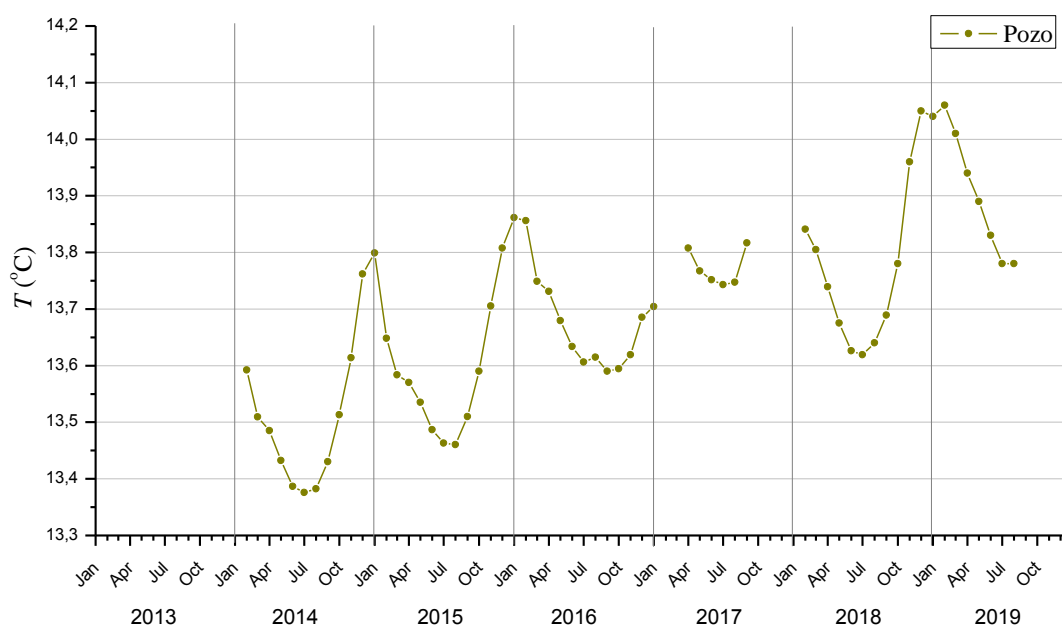


Figura 14. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala del Pozo.

Se ha analizado la tendencia de la serie de temperaturas del Pozo y se ha obtenido una tendencia estadísticamente significativa a partir del test Mann-Kendall. La pendiente obtenida para el periodo completo que se muestra en la Figura 14 es de 0.007 °C/mes, el mismo incremento que el caso de la Hoya. Esta tendencia positiva aumentaría la temperatura anual en 0.08 °C/año en ambas salas, un incremento muy inferior al que sufre la sala de Polícromos.

3.2. Onda térmica

La temperatura de un sistema subterráneo situado en la zona superior de la corteza terrestre depende, en la mayoría de los casos, de la energía de origen geotérmico y del calor que proporciona el ambiente exterior a través de su superficie. En el caso de cuevas turísticas como la que nos ocupa, la presencia antrópica puede ser una fuente de calor añadida. Además, los procesos de evaporación y condensación en un ambiente con un alto grado de humedad puede alterar la temperatura debido a la modificación del balance energético durante los cambios de la fase acuosa (Villar, et al., 1983; Domínguez-Villar et al., 2013).

Los gradientes geotérmicos dependen fundamentalmente de la estructura y

composición del terreno, permaneciendo aproximadamente constantes entre 2.5 a 5 °C por cada 100 m de profundidad. En el caso de la zona vadosa de un karst, la infiltración de agua puede modificar dicho gradiente. Por encima de cierta profundidad, entre 50 m y 150 m, el flujo térmico de origen atmosférico/solar cobra mayor importancia como fuente o sumidero de calor desde la superficie del terreno (Stevens et al., 2008).

Las oscilaciones periódicas de temperatura de la superficie exterior dan lugar a la propagación de una onda térmica que depende de las características del suelo-roca por el que se propaga (Monteith & Unsworth, 2013). La respuesta en la temperatura del interior de la cavidad es una oscilación similar a la del exterior pero amortiguada y desfasada respecto de esta. Es decir, la amplitud de las oscilaciones térmicas disminuye con la profundidad de la sala y espesor de roca de su techo, mientras que el desfase temporal respecto al exterior aumenta con estos parámetros. Los ciclos térmicos estacionales, amplitud y desfase, se ven completamente atenuados por debajo de cierta profundidad, generalmente alrededor de 20 metros (Pollack & Huang, 2000).

Como se ha visto en el apartado 3.1.1 el comportamiento de la temperatura media mensual del aire del exterior presenta una variación periódica, con periodo de un año. En la representación de los datos medidos en continuo (ver Figura 8) se observa que pese al comportamiento claramente de tipo sinusoidal existen variaciones diarias incluso superiores a 10 °C. Sin embargo las temperaturas del suelo atenúan esas variaciones de periodo corto dibujando una onda sobre la temperatura exterior. Dichas variaciones se ven más atenuadas que las de periodo largo puesto que la profundidad de amortiguación es inversamente proporcional a la frecuencia de las fluctuaciones de temperatura (Hillel, 1982), es decir, cuanta más frecuencia tenga la variación de la temperatura en la superficie más amortiguación habrá y menor será la profundidad que alcance.

La variación de la temperatura de cada una de las salas analizadas en el apartado 3.1.2. tiene un patrón sinusoidal claro que viene dominado por la temperatura exterior. Uno de los parámetros que caracterizan térmicamente a cada una de las salas de la cueva de Altamira es el retraso que sufre la onda térmica al propagarse por la roca y que se refleja en la temperatura del aire de cada una de ellas. Un esquema de la

propagación de la onda térmica en la cobertera sobre el Cruce y la sala de Polícromos se puede ver en la Figura 15.



Figura 15. Esquema de la propagación de la onda térmica en la cobertera situada por encima del Cruce y de la sala de Polícromos.

En este apartado se muestran las series temporales de temperatura de cada una de las salas que incluye tanto los valores mensuales mostrados anteriormente como la evolución continua con resolución de 15 minutos. Del mismo modo se presenta el método matemático utilizado para obtener el retraso de cada una de las series temporales respecto a la del exterior.

3.2.1. Método de la máxima correlación cruzada

El método implementado para determinar el retraso entre dos series temporales se basa en la técnica de la correlación cruzada (Derrick & Thomas, 2004) implementado en lenguaje R (R Core Team, 2019). Se trata de realizar un desplazamiento temporal h conocido de una serie x_t respecto de otra y_t y calcular el coeficiente de correlación de Pearson r_{xy} . Realizando este procedimiento de forma repetida se obtienen un conjunto de coeficientes de correlación con su correspondiente significación para cada uno de los desplazamientos. El desplazamiento que corresponda con el coeficiente de correlación más alto determina el retraso. Si la máxima correlación se encuentra para un valor negativo de h significa que x conduce a y , en caso contrario la variable y explicaría la x (Venables, 2002).

A modo de ejemplo, en la Figura 16 se muestra la gráfica resultante al aplicar el método implementado para obtener el retraso entre dos series desplazándolas temporalmente entre sí. Para cada uno de los retrasos se obtiene un coeficiente de correlación r significativo o no al 95% marcado por las líneas de trazos. En este ejemplo la máxima correlación positiva se obtiene para un retraso de -4 meses con un coeficiente de correlación $r = 0.61$.

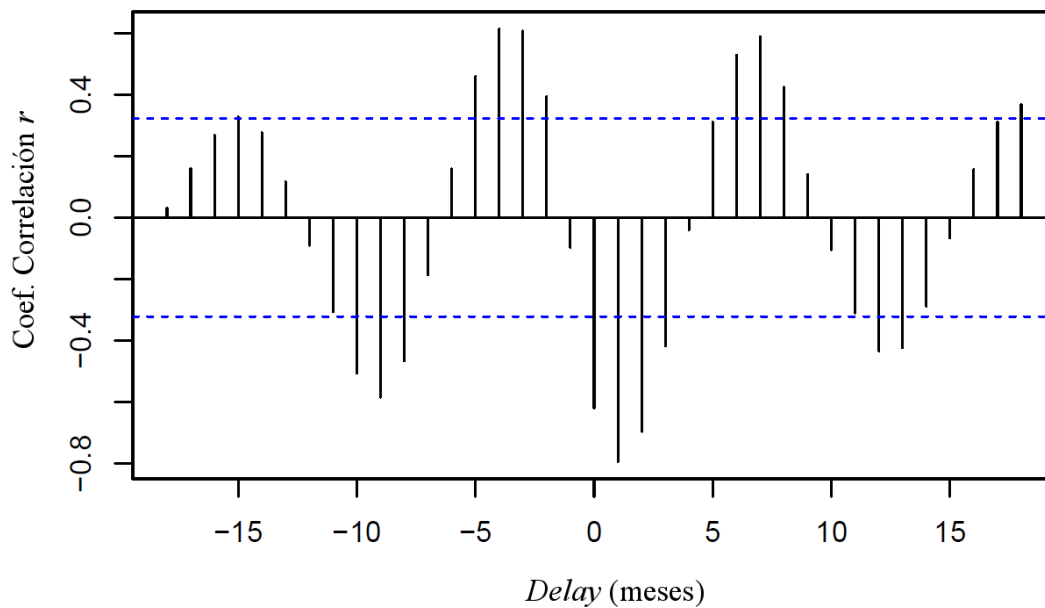


Figura 16. Gráfica obtenida al realizar correlación entre dos series aplicando un retraso o delay conocido. Las líneas de trazos indican el intervalo de confianza del 95% que determina la significación de la correlación.

Este método se ha utilizado para obtener el retraso introducido por la onda térmica del exterior sobre las temperaturas del suelo del aire de cada una de las salas de la cueva. Se ha de tener en cuenta exclusivamente la máxima correlación positiva, en la cual el coeficiente de correlación es positivo, que indica que un crecimiento en la temperatura exterior genera una respuesta creciente en el interior y viceversa. Del mismo modo se toma el retraso negativo que significa que la temperatura del exterior es la que influye sobre la de la cavidad.

3.2.2. Resultados

A continuación se muestra el histórico de las series temporales de temperatura del exterior y de cada una de las salas monitorizadas desde julio de 2013. En la Figura 17 se representan los datos de la temperatura media mensual del aire del exterior y de las salas de la cueva que se han expuesto en los apartados 3.1.1 y 3.1.2 respectivamente. El registro en continuo cada 15 minutos se presenta en la Figura 18.

Tomando la serie temporal de temperatura del exterior como referencia, se observa la continua disminución de la amplitud de la onda descrita en cada una de las salas según aumenta el grado de aislamiento, siendo el Hall la sala con mayor conexión con el exterior y la Hoya la que menos. De acuerdo con esto, según disminuye la amplitud del ciclo anual de temperatura, aumenta el retraso respecto a los máximos y mínimos del exterior tal y como se ha expuesto en el marco teórico de esta sección. La influencia del exterior se ve atenuada a medida que se aumenta la distancia a la entrada y el espesor de roca de la cobertera aumenta.

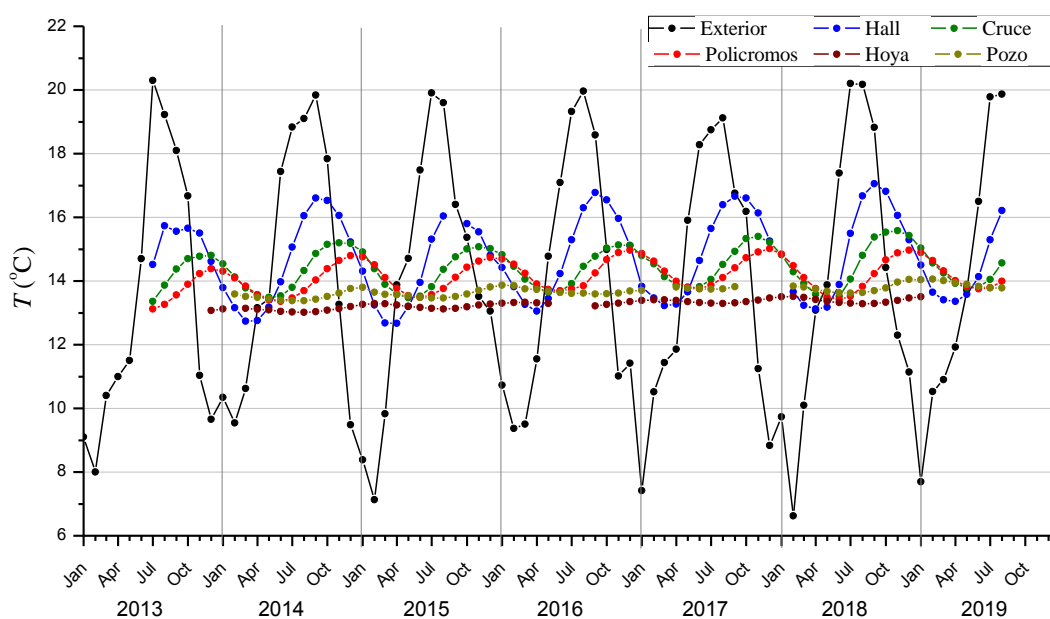


Figura 17. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del exterior y de las salas de la cueva de Altamira (Los valores de la sala de la Hoya corresponden a la sonda del nivel inferior).

Respecto a la temperatura media mensual del exterior, la temperatura media mensual de la cueva permanece por encima de forma aproximada durante los meses entre octubre y abril. Posteriormente entre los meses de abril a octubre la temperatura del interior se situaría por debajo de la correspondiente al exterior (ver Figura 17). Sin embargo al observar el registro en continuo de temperaturas que se muestra en la Figura 18, debido a la gran variabilidad del exterior, hay muchos intervalos en los cuales la tendencia general descrita anteriormente se invierte. Así mismo en los meses de octubre y abril, durante los cuales se produce un punto de inflexión, la temperatura de la cueva no se sitúa exclusivamente por encima o debajo de la temperatura del aire exterior sino que se deberían incluir los meses anteriores y posteriores como intervalo de transición entre ambos comportamientos.

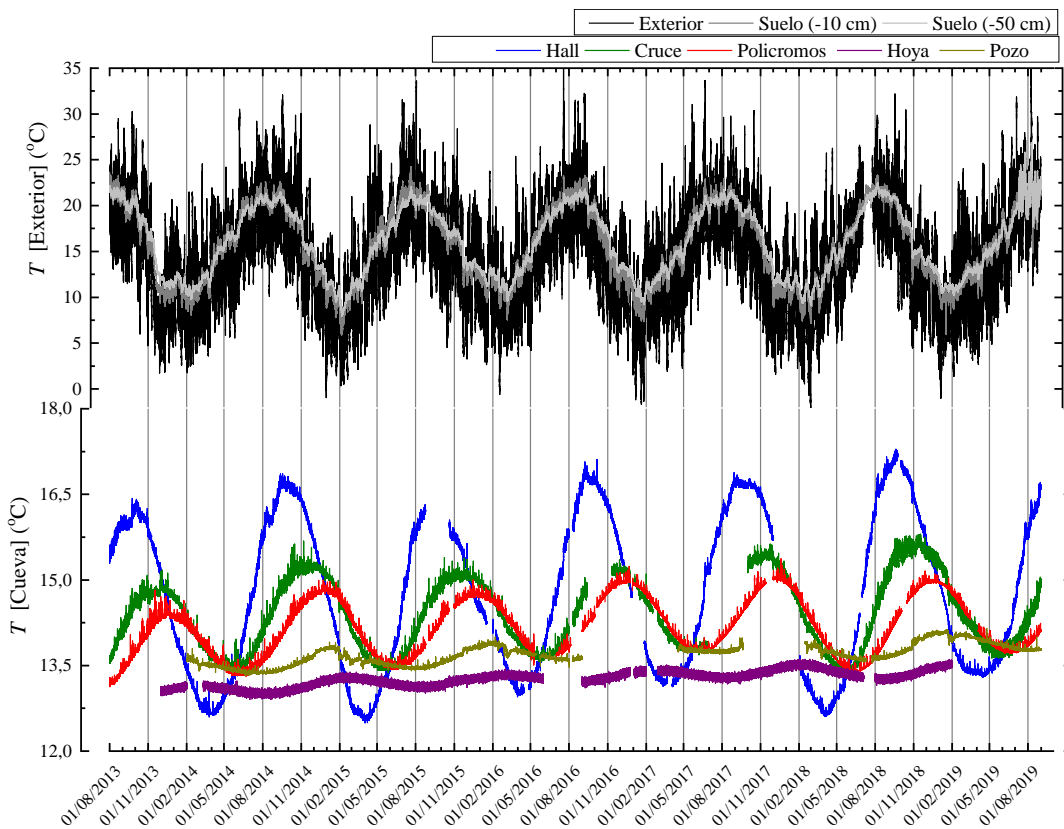


Figura 18. Registro de la temperatura exterior (aire a nivel medio y perfil vertical del suelo a -10 y -50 cm) e interior de la cueva de Altamira a nivel medio en las salas del Hall, Cruce, Polícromos, Hoya (nivel inferior) y Pozo.

Aplicando el método descrito en el apartado 3.2.1, mediante el cual se realiza el

estudio de correlación lineal de Pearson para cada desfase aplicado, se ha obtenido el desfase temporal entre la serie de temperaturas del exterior y la correspondiente a cada una de las salas de la cueva. En la Tabla 11 se muestra el retraso en escala mensual con su correspondiente coeficiente de correlación de Pearson máximo obtenido en el procedimiento.

Tabla 11. Retraso de las temperaturas del perfil vertical del suelo y de las salas de la cueva de Altamira respecto a la temperatura del exterior utilizando las temperaturas medias mensuales. Se indica el coeficiente de correlación máximo r obtenido.

	-10 cm	-50 cm	Hall	Cruce	Polícromos	Hoya	Pozo
Retraso (meses)	0	0	-1	-3	-4	-6	-5
r	0.99	0.98	0.87	0.85	0.80	0.26	0.45

Se observa que el retraso obtenido de las series del perfil vertical del exterior, profundidades del suelo de 10 y 50 cm, es de 0 meses. De este modo se podrían utilizar cualquiera de estas series para encontrar el retraso entre las salas de la cueva y el exterior. Debido a la menor variabilidad de las series de temperatura del suelo, los coeficientes de correlación obtenidos utilizando estas series como referencia serán mayores y así como la precisión en la determinación del retraso.

Respecto a la temperatura de la roca del techo de la sala de Polícromos, en la Figura 19 se muestra la serie temporal de temperaturas disponible. Se puede observar la dispersión en la temperatura monitorizada por el termómetro infrarrojo frente al de contacto. Debido a la complejidad en las mediciones y a problemas en la calibración de los termómetros de infrarrojo, las cuales se ven afectadas por las condiciones microclimáticas de la cueva, en noviembre de 2017 se han sustituido dichos termómetros por uno de contacto tipo Pt100. El termómetro de contacto empieza a estar operativo en diciembre de 2017. A causa de averías en el termómetro de contacto, en abril de 2019 se ha sustituido por otro con recubrimiento de acero inoxidable con el propósito de evitar su deterioro. Los sucesivos problemas tanto técnicos y de calibración como el escaso número de datos disponibles para la temperatura en contacto, hacen que no se haya podido realizar un estudio pormenorizado de estas

series de temperaturas.

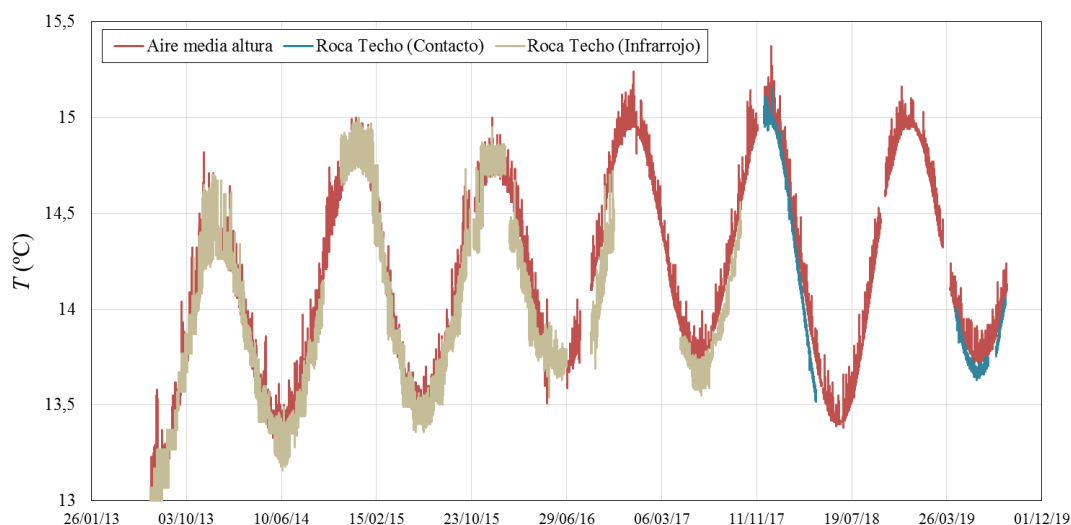


Figura 19. Registro de la temperatura del aire a nivel medio y de la roca del techo de la sala de Policromos. Los datos de la roca del techo hasta noviembre de 2017 corresponden al termómetro infrarrojo y a partir de esa fecha corresponden a los datos tomados con la sonda de contacto.

3.3. Gradiente térmico entre salas

La diferencia de temperatura entre las distintas zonas de la cavidad es un factor determinante en el intercambio de materia y energía entre las mismas. La circulación termoconvectiva del aire entre salas se ve propiciada a favor de un gradiente de densidad, donde el aire más frío y denso tiende a moverse por la zona más cercana al suelo hacia cotas más bajas. Del mismo modo el aire más caliente y menos denso tiende a moverse por la zona más cercana al techo hacia cotas superiores.

La situación del Hall, Cruce y Polícromos dentro de la cueva se puede observar en la sección transversal representada en la Figura 20, donde el Hall constituye la sala con una cota más alta y Polícromos la más baja. Como ya se ha resaltado anteriormente la sala del Hall es la más conectada con el exterior. De este modo la segunda puerta se convierte en un punto clave, puesto que es la conexión directa con el Cruce, zona de enlace con la sala de Polícromos y el resto de la cueva.

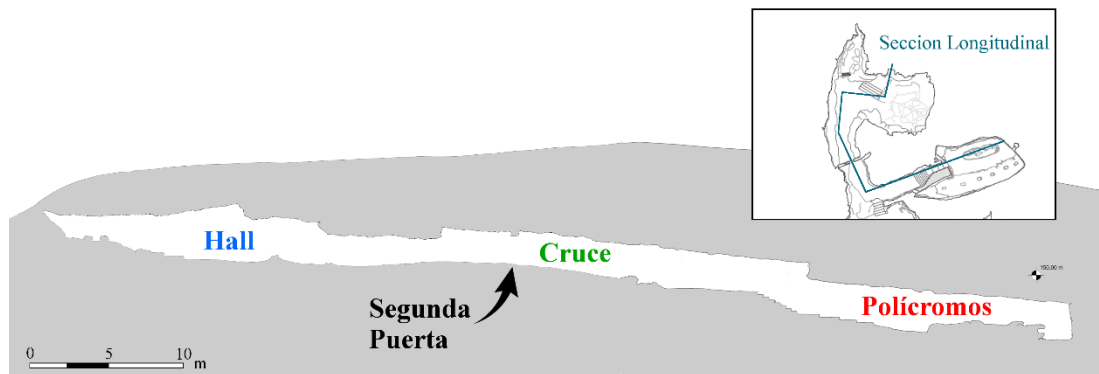


Figura 20. Sección transversal del levantamiento topográfico que transcurre desde el Hall hasta la sala de Polícromos. Se indica la localización de la segunda puerta.

En el caso de la conexión Hall-Cruce el periodo de mayor intercambio se sitúa de forma aproximada entre diciembre y junio, periodo en el cual la temperatura del Hall es inferior a la del Cruce, favoreciendo la circulación de aire más frío y denso hacia la el interior tal y como se puede ver en la Figura 21.

Respecto a la conexión del Cruce con la sala de Polícromos, el periodo de mayor intercambio termoconvectivo se produce cuando hay un gradiente térmico negativo desde la sala de Polícromos hacia el resto de la cavidad (Cruce y Entrada). Es decir, cuando la temperatura de la sala de Polícromos es superior que la del Cruce y/o Hall. Como se observa en la Figura 21, el periodo de mayor intensidad de circulación de aire se produce entre los meses de febrero y abril-mayo. El aire más frío y más denso del Cruce se mueve hacia cotas más bajas de la cavidad, entre las que se encuentra la sala de Polícromos, mientras que el aire más caliente y menos denso de Polícromos asciende por la parte superior del pasillo produciéndose así un intercambio termoconvectivo entre ambas salas. Una vez se revierte este gradiente, en el periodo de mayo-junio a febrero, la sala de Polícromos se encuentra en un estado de relativo aislamiento respecto a las zonas contiguas del interior de la cueva en lo que a intercambio de aire se refiere.

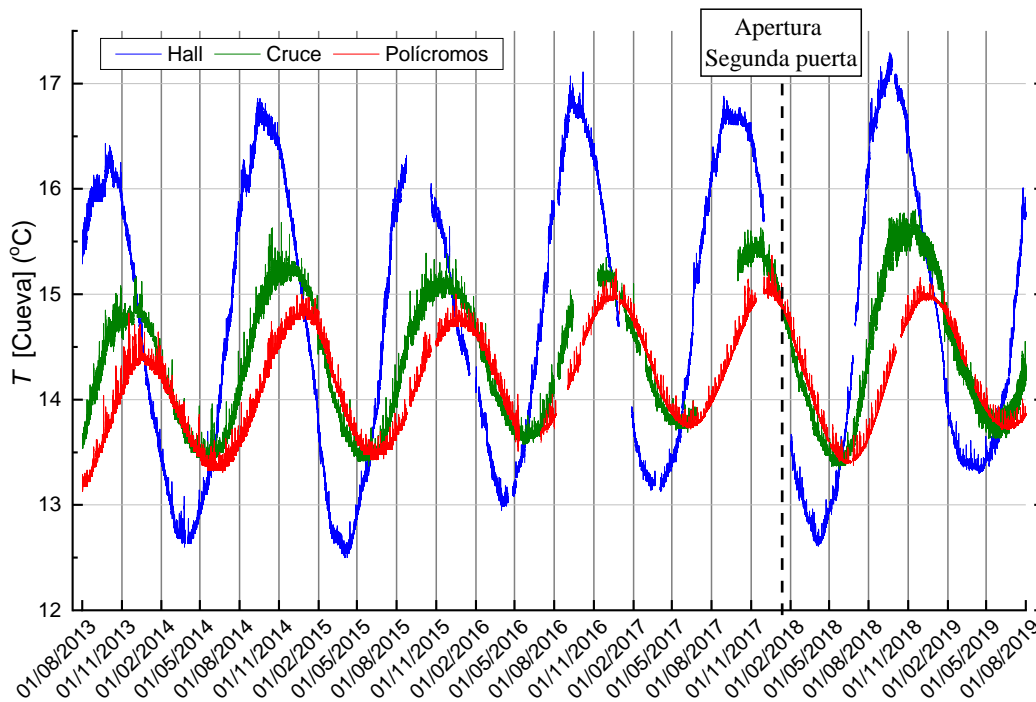


Figura 21. Registro de la temperatura nivel medio en el Hall, Cruce y Polícromos para el periodo 2013-2019.

En la Figura 22 se muestra en detalle el registro de temperatura del aire a nivel medio de las salas del Hall, Cruce y Polícromos para los años 2014 y 2015 donde se denota como Periodo 1 y Periodo 2 el considerado de mayor y menor intercambio termoconvectivo respectivamente. El mínimo anual de temperatura del Hall se alcanza a finales de marzo, principios de abril y se sitúa en torno a 12.5 °C. En cuanto al máximo anual, este se alcanza durante el mes de septiembre con una temperatura aproximada de 16.7 °C durante el periodo analizado. El rango de variación del Hall se encuentra aproximadamente en 4 °C ampliamente superior al de las otras dos salas mencionadas. El rango de variación en este periodo para el Cruce es de 1.8 °C, con una temperatura mínima anual que se alcanza en mayo con un valor aproximado de 13.5 °C, y la máxima sobre 15.3 °C en noviembre. La evolución de temperatura de la sala de Polícromos discurre con 4 meses de retraso respecto al exterior, un mes más que la evolución de la temperatura del Cruce. El valor mínimo anual es muy similar al del Cruce, 13.5 °C el mes de junio, mientras que el valor máximo alcanza a finales de diciembre, principios de enero un valor de 14.8 °C, 0.4 °C por debajo de la temperatura máxima del Cruce. Por lo tanto el rango de variación en este periodo para la sala de

Polícromos es de 1.4 °C.

Comparando los rangos anuales de temperatura en el periodo 2004-2005 (Cuezva, 2008) se tiene que para el Cruce la oscilación fue de 2.3 °C y para la sala de Polícromos 1.54 °C. Aparentemente, y como comprobó posteriormente el equipo del CSIC (Sánchez-Moral et al., 2014), la variación anual de temperaturas en estas dos zonas de la cueva se ve atenuada por el efecto que ejerce la segunda puerta sobre la conexión Hall-Cruce-Polícromos.

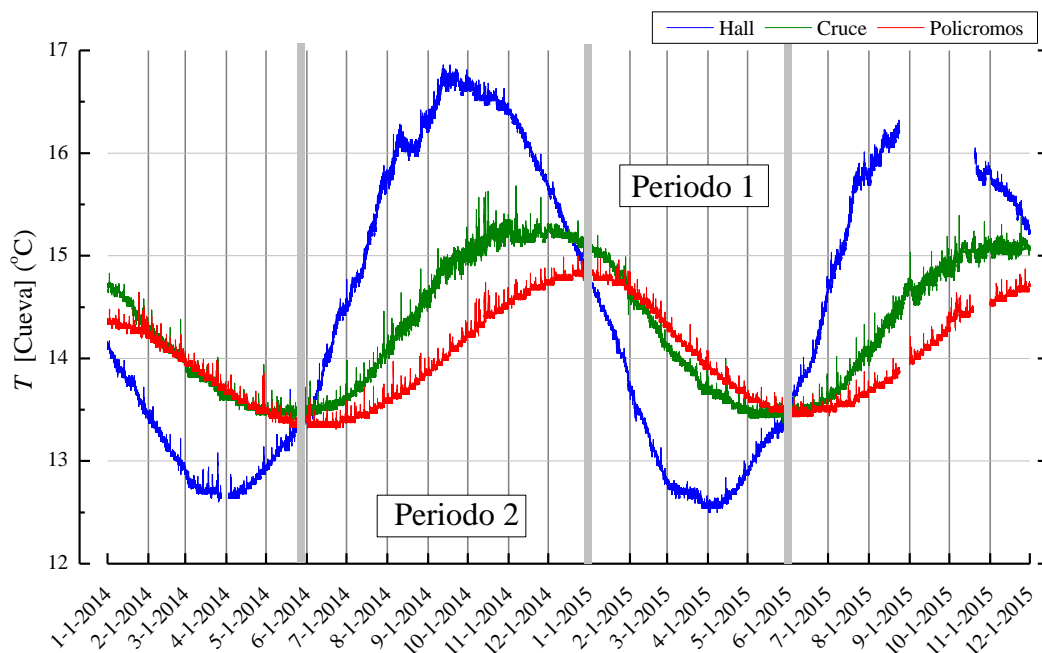


Figura 22. Registro de la temperatura nivel medio en el Hall, Cruce y Polícromos para el periodo 2014-2015.

Asimismo, comparando la evolución de las tres salas: Hall, Cruce y Polícromos, se observa que a finales de mayo, principios de junio, la temperatura de las mismas es similar, tomando un valor de 13.5 °C, coincidiendo con los valores mínimos anuales del Cruce y Polícromos. A partir de este punto la temperatura del Hall se mantiene por encima de las otras dos hasta mediados de diciembre, donde se iguala con el Cruce sobre 15.2 °C y posteriormente en enero con la sala de Polícromos en 14.8 °C.

En la Figura 23 se muestra la sección transversal Cruce-Polícromos que ilustra de forma gráfica la circulación termoconvectiva entre la sala de Polícromos con el Cruce

en el periodo de febrero a abril-mayo en la cual la temperatura de Polícromos es superior a la correspondiente al Cruce. El color azul representa una temperatura más baja que el color naranja, de esta manera la masa de aire más frío y más denso discurre hacia las cotas más bajas de la sala de Polícromos cuya masa de aire a una temperatura superior tiende a ascender.

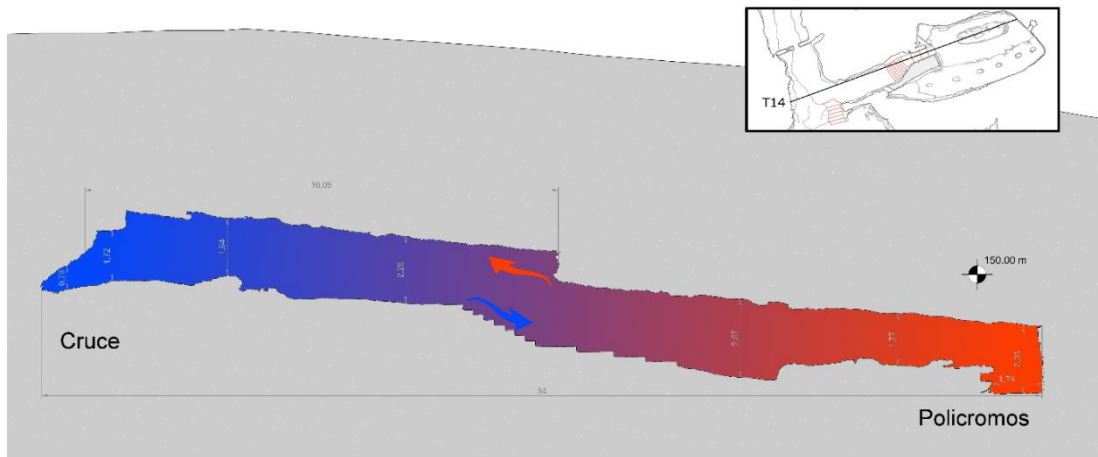


Figura 23. Esquema de la circulación termoconvectiva entre la sala de Polícromos con el Cruce en el periodo febrero-mayo ($T_{\text{Cruce}} < T_{\text{Polícromos}}$).

Finalmente, para visualizar de forma globalizada el registro de datos de temperatura de cada una de las estaciones y de los termómetros de mercurio situados en la cueva de Altamira, tal y como se muestra en la Figura 6, se ha elaborado un modelo de temperaturas para cada uno de los meses del año 2017. Partiendo de los valores medios mensuales de cada uno de los termómetros se ha realizado una interpolación espacial con el fin de estimar la temperatura en las zonas donde no se dispone de medidas.

Puesto que la variación anual de temperaturas de la cueva es periódica se ha tomado como ejemplo la serie temporal para todos los meses del año 2017. El método de interpolación aplicado en este caso es del tipo difusión Kernel con barreras (Gribov & Krivoruchko, 2011). Se ha incluido como barrera absoluta el contorno de la cueva, obligando al modelo a tener en cuenta dicho contorno para calcular las distancias entre puntos.

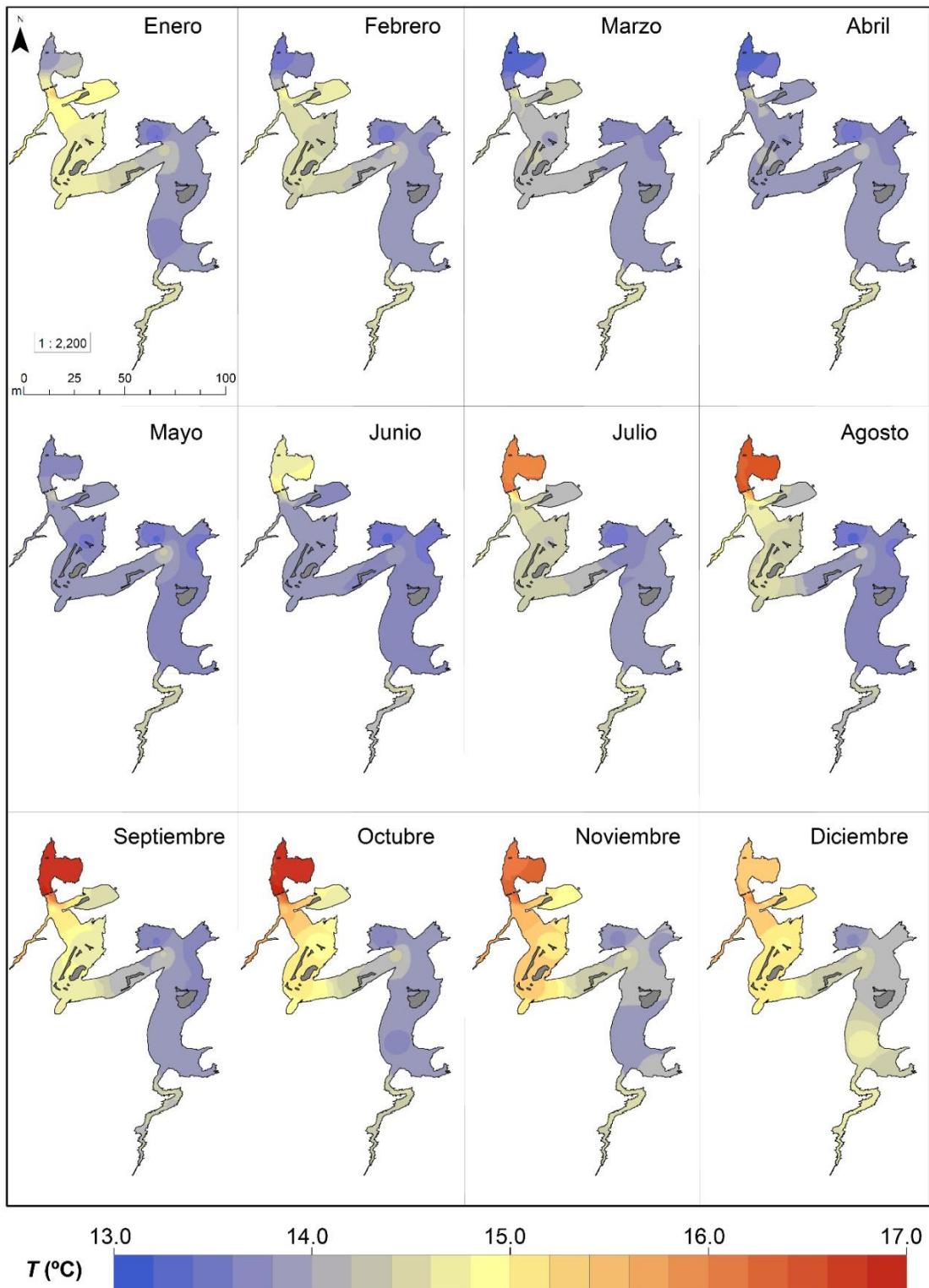


Figura 24. Distribución espacial de la evolución de temperatura de la cueva de Altamira por meses para el año 2017.

Tanto para la representación gráfica de los datos como para el modelado de temperaturas se ha utilizado el software comercial ArcMap 10.0 (www.esri.es) de análisis de Sistemas de información geográfica GIS. Las variables fueron representadas mediante un archivo tipo ráster continuo con un tamaño de pixel de salida de 2 metros, ajustándose a la extensión geográfica en la que está situada la cueva (ETRS_1989_UTM_Zone_30N), y se simbolizan aplicando una paleta de colores según unos valores máximos y mínimos previamente definidos.

En la Figura 24 se puede observar la temperatura de la cueva en su conjunto para cada mes del año 2017 obtenida a partir de los valores tomados de los termómetros de mercurio y de las estaciones de monitorización al aplicar la interpolación descrita anteriormente. Por una parte se aprecia el distinto grado de variabilidad anual de cada una de las salas. La parte de la Entrada experimenta una variación más acusada, desde su temperatura mínima en marzo alrededor de 13 °C hasta alcanzar en septiembre una temperatura media de 17 °C aproximadamente. Por el contrario, la zona de la Hoya hasta el Pozo tiene la variación anual más pequeña. Desde la Entrada hasta la zona de la bajada a la Hoya se aprecia el retraso causado por la onda térmica que se propaga a través de la cobertera rocosa, así como los posibles intercambios termoconvectivos entre salas.

3.4. Influencia del segundo cierre interior en la temperatura

Entre las recomendaciones realizadas por el CSIC durante el segundo convenio comprendido al periodo 2003-2005 se encuentran la mejora en el aislamiento del cierre de entrada a la cueva y la instalación de un segundo cierre interno entre la zona de Hall y del Cruce. Para este segundo cierre se sugirió el aprovechamiento del hueco vacío que en ese momento existía debido a la segunda puerta que fue instalada en 1957 y retirada en 1992 debido a su pésimo estado de conservación y a su falta de funcionalidad. Con estas medidas se pretendía limitar el intercambio de materia, nutrientes y partículas que pudieran suponer una proliferación de microorganismos en el interior. También se pretendió disminuir la variación térmica y la ventilación entre la sala de Polícromos y el Hall, sala que está muy influenciada por las condiciones atmosféricas del exterior.

En abril de 2009 se completaron los trabajos de aislamiento de la puerta exterior, que suponía el aislamiento térmico con espuma de poliuretano y la instalación de una plancha metálica en su parte del posterior. El 16 de octubre de 2008 se cierra la segunda puerta la cual es enteramente metálica y está provista de lamas separadas en un conjunto superior y otro inferior que pueden ser abiertas o cerradas con independencia. La localización de las puertas en la planta del mapa de la cueva de presenta en la Figura 25.

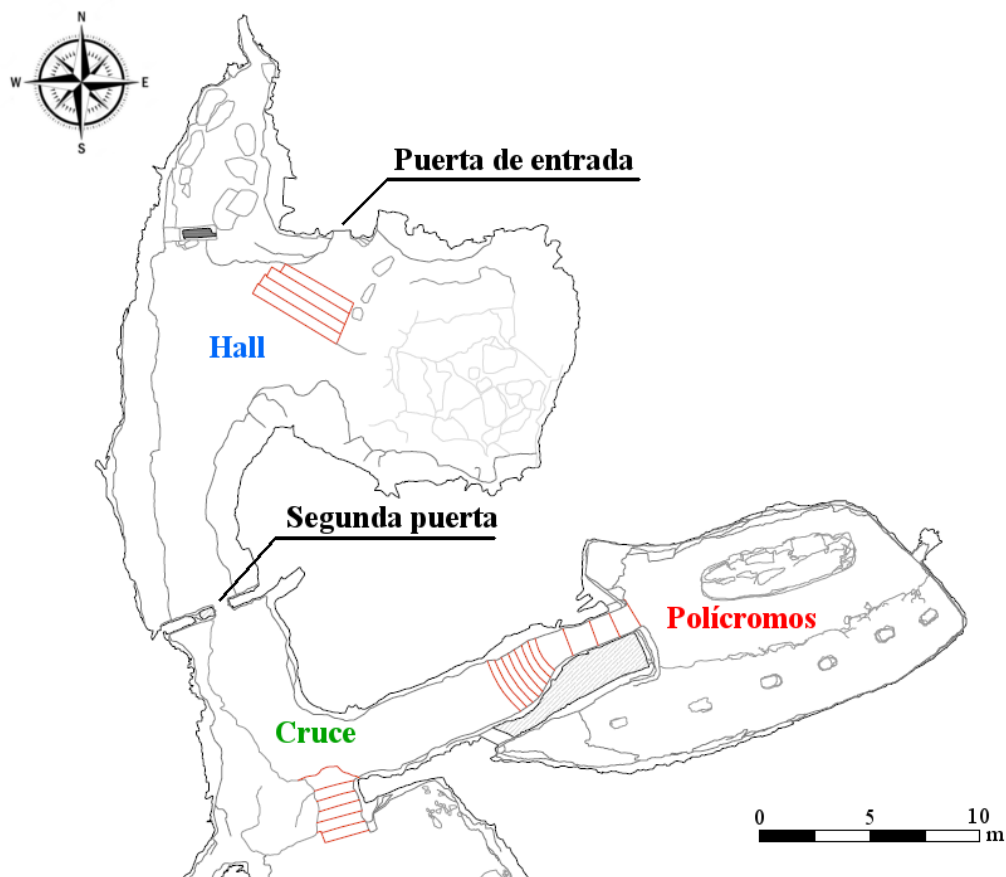


Figura 25. Mapa de la primera parte de la cueva donde se señala la localización de la puerta de la entrada y de la segunda puerta.

En este punto, el cierre de la segunda puerta juega un papel relevante (Sánchez-Moral et al., 2014) puesto que se han modificado notablemente las condiciones ambientales y el intercambio de aire entre la zona del Hall y del resto de la cavidad, repercutiendo de este modo en el microclima de la sala de Polícromos y de las demás estancias de la cueva. El registro de la velocidad de aire realizado por el equipo del

CSIC mostró un descenso notable, así como las diferencias térmicas entre la entrada y el Cruce se vieran acentuadas.

Ante la tendencia creciente de aproximadamente $0.2\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ observada en la temperatura de la sala de Polícromos experimentada desde el año 2009 tal y como pone de manifiesto el análisis estadístico realizado para el periodo 2013-2018, al igual que para el correspondiente al periodo 2009-2012 (Rábago, 2017), el 15 de enero de 2018 se abrieron las lamas de la segunda puerta (ver Figura 26) por decisión de la Comisión de Seguimiento de Altamira con el objetivo de estudiar la repercusión en las temperaturas del Cruce y de la sala de Polícromos así como el gradiente Hall-Cruce-Polícromos.

La hipótesis planteada es que durante la primera parte del año, en la cual la temperatura del Hall se encuentra por debajo de la del Cruce y Polícromos, se favorezca el intercambio de masas aire entre salas enfriando las dos salas mencionadas. En la segunda parte del año, y teniendo en cuenta que el Cruce y Polícromos se encuentran en cotas más bajas, la conexión con el Hall debería ser mínima.



Figura 26. Imagen de la segunda puerta con las lamas abiertas desde la sala del Hall (izda.) y desde el Cruce (drcha.).

3.4.1. Efecto de la apertura de la segunda puerta (2018)

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, la temperatura del exterior es la causa principal que determina la temperatura dentro de la cavidad. Sin embargo, el gradiente térmico entre salas propicia la circulación termoconvectiva del aire que puede modificar la temperatura de las mismas. Para estudiar el efecto de la apertura de la segunda puerta sobre la temperatura del aire de las salas se va a analizar la evolución de la misma para el Hall, el Cruce y la sala de Polícromos con el fin de intentar discriminar por un lado el efecto de la onda térmica y por otro la influencia de los gradientes térmicos entre salas.

La influencia de la temperatura exterior sobre las salas mencionadas viene dada con el retraso que se muestra en la Tabla 11, 1 mes para el Hall, 3 meses para el Cruce y 4 meses para la sala de Polícromos. Por lo tanto, en la evolución de la temperatura mensual del exterior hay que tener en cuenta dicho desfase en cada caso.

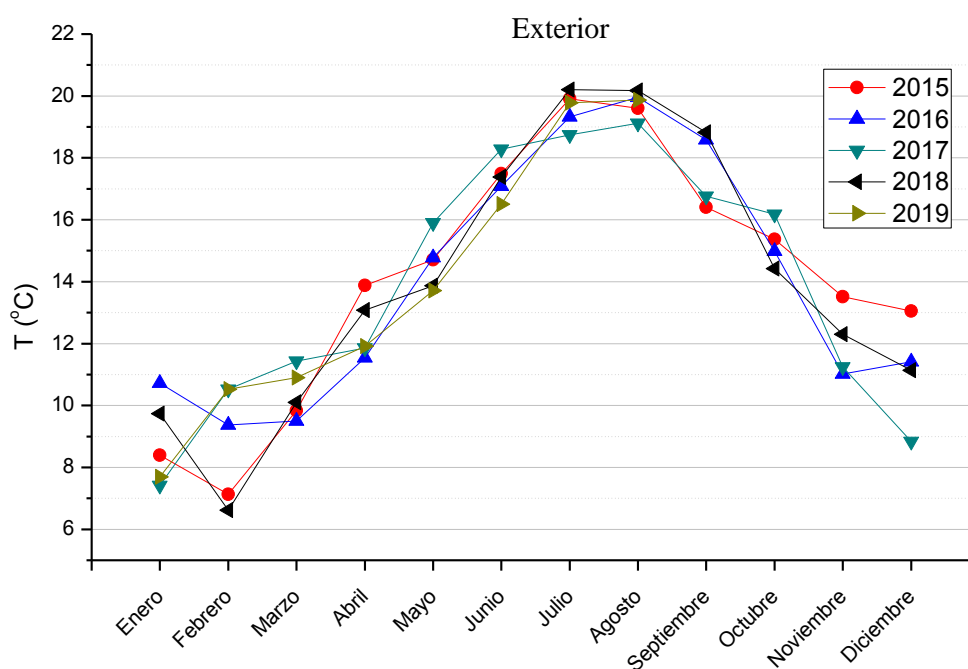


Figura 27. Temperatura media mensual del aire exterior de la cueva de Altamira desde el 2015 para los distintos años.

En la Figura 27 se muestra la temperatura media por meses para cada año desde el 2015 en el exterior. Se puede destacar el mes de febrero de 2018 como el más frío con

un temperatura media de 6.6 °C, 4 °C menos que la correspondiente a febrero de 2017 y 2019. La temperatura mensual máxima en el periodo julio-septiembre se alcanza durante el año 2018.

La variación anual de la temperatura media mensual del Hall desde el año 2015 (ver Figura 28) se encuentra en el rango 3.4-3.7 °C, durante el año 2018, tras la apertura de la segunda puerta se observa un incremento hasta 3.9 °C. En la primera mitad del año 2018, la temperatura media mensual disminuye respecto a la correspondiente del año 2017, de forma más acusada durante los meses de mayo y junio. Durante el periodo de agosto a octubre, la temperatura media mensual del 2018 es la máxima del periodo de observación, tal y como sucedió en el exterior con un mes de antelación.

Por lo tanto, la evolución de la temperatura del Hall tras la apertura de la puerta en enero de 2018 aparentemente describe la tendencia general del exterior sin variaciones atribuibles a dicha apertura.

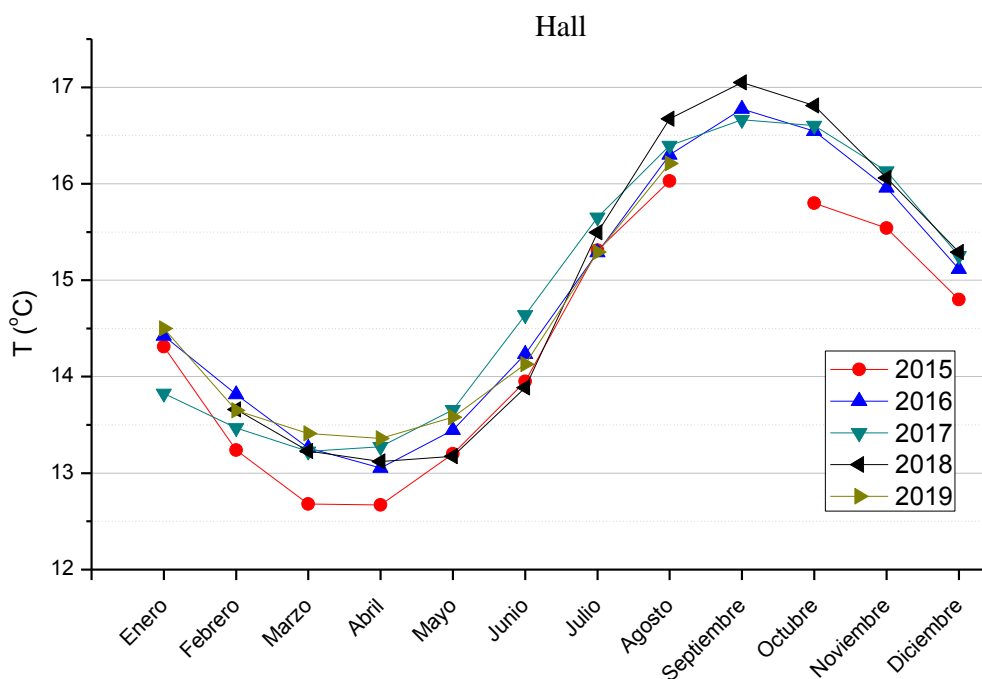


Figura 28. Evolución de la temperatura media mensual del aire a nivel medio del Hall.

La variación anual de la temperatura media mensual del Cruce desde el año 2015 (ver Figura 29) se encuentra en el rango 1.5-1.6 °C., durante el año 2018 dicha

variación se incrementa hasta 2.2 °C. Durante la primera mitad del año del 2018, la temperatura toma valores similares a los correspondientes a 2015. Sin embargo a partir de agosto, se alcanzan los máximos de todo el periodo. A continuación, durante el año 2019, se sigue con los máximos de todo el periodo hasta abril, para a partir de mayo asemejarse a los valores que temperatura del 2017.

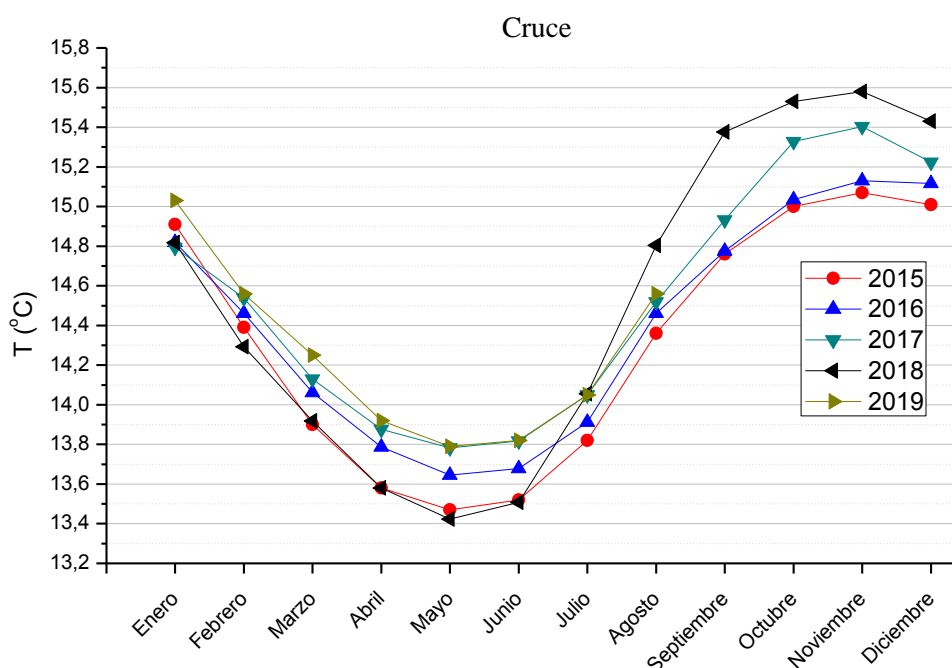


Figura 29. Evolución de la temperatura media mensual del aire a nivel medio del Cruce.

La influencia de la temperatura del exterior sobre la temperatura de Polícromos viene dada con 4 meses de antelación, por lo tanto es necesario estudiar la evolución de la temperatura exterior desde septiembre de 2017 para observar el efecto en la temperatura de la sala a partir de enero de 2018. De esta manera, el periodo de temperatura exterior septiembre 2017-febrero 2018 es el que corresponde con la temperatura de la sala de Polícromos enero 2018-junio 2018 respectivamente.

La variación anual de la temperatura media mensual de la sala de Polícromos desde el año 2015 (ver Figura 30) se encuentra en el rango 1.25-1.28 °C., durante el año 2018 dicha variación se incrementa hasta 1.55 °C. Durante la primera mitad del año 2018, se experimenta sistemáticamente una disminución de la temperatura media mensual, tomando valores similares a los del año 2015. En el periodo enero-junio en 2018 el

promedio de temperatura es 0.21 °C menos que la correspondiente a 2017 y 0.22 menos que la de 2019. Posteriormente a partir de agosto, la temperatura de la sala de policromos es prácticamente igual que la del año 2016. En el año 2018 la temperatura disminuye en promedio 0.18 °C respecto a la media del 2017. Durante lo que se lleva de año 2019, la temperatura es muy parecida a la del año 2017

La tendencia al alza experimentada desde el año 2009 a razón de 0.018 °C/mes analizado para el periodo mayo 2014-abril 2017 se ve reducida hasta 0.004 °C/mes tomando el periodo mayo 2016-abril 2019.

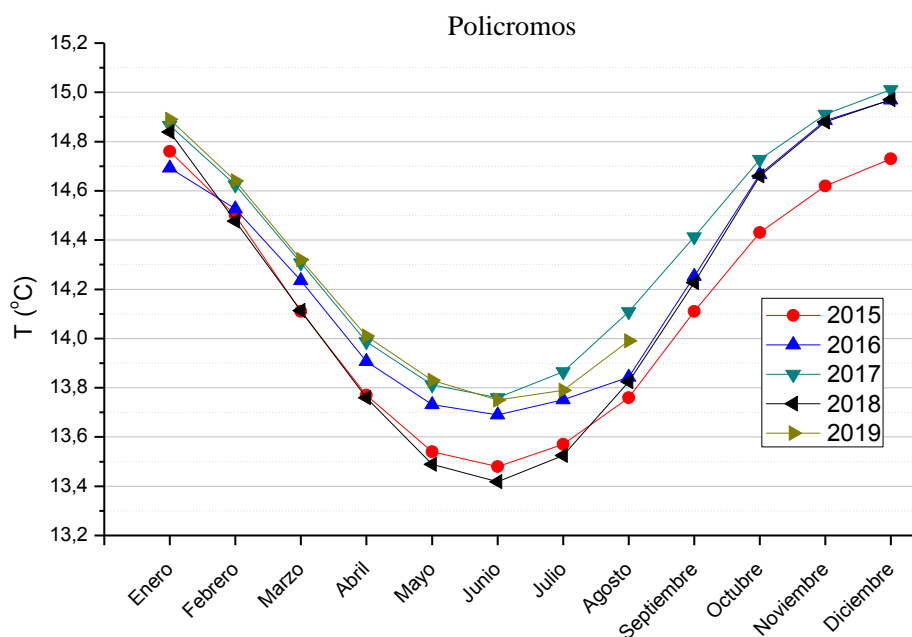


Figura 30. Evolución de la temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos.

La evolución de la temperatura exterior desde septiembre a febrero durante el periodo 2017-2018, que corresponde con enero-junio de 2018 en Polícromos, es de 11.6 °C, 0.8 °C menos que el periodo 2016-2017 y 0.9 °C menos que el periodo 2018-2019. Esta disminución en la temperatura del exterior puede propiciar la disminución mencionada en la sala de Polícromos.

El gradiente de temperaturas Cruce-Polícromos de febrero a mayo, periodo de mayor conexión de las salas, en los años 2017 y 2018 se mantiene de forma

aproximada. Sin embargo, durante el 2019 se reduce drásticamente, la temperatura de la sala de Polícromos es ligeramente superior a la del Cruce. Este efecto combinado con la subida de la temperatura exterior en el 2019 respecto al 2018 puede explicar el incremento de temperatura de la sala de Polícromos en dicho periodo.

En la comisión de seguimiento realizada en octubre de 2019 se acordó mantener las lamas de la segunda puerta abiertas hasta el 1 de junio de 2020 con el fin de extender el estudio, incluyendo los resultados de microbiología, la adecuación del cierre o apertura de la misma.

3.5. Ciclos anuales de evaporación y condensación

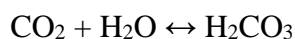
El contenido de vapor de agua dentro de una cueva en la zona vadosa de un sistema kárstico viene determinado principalmente por dos factores. El primero es la infiltración de agua a través de los poros y grietas que desemboca en el afloramiento por los techos de las salas, y el segundo factor que modifica la humedad dentro de una cavidad es el intercambio de masas de aire con distinto contenido en humedad, ya sea entre salas o con el exterior (Gillieson, 2009; Fernández, 1983).

La humedad del ambiente interior de la cueva influye en la densidad del aire debido al peso molecular del vapor de agua (18.8 g/mol) en comparación con el del aire seco (28.9 g/mol). Siendo un determinado volumen de aire cargado de humedad menos denso que el correspondiente de aire seco. Como se estudiará en profundidad en el capítulo 5, los gradientes de densidad pueden determinar el intercambio gaseoso y los movimientos de aire.

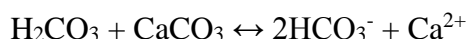
El agua de infiltración durante su paso a través de los poros y fisuras de la roca del techo va adquiriendo CO₂, lo que le proporciona un carácter ácido y la capacidad de disolver la roca caliza/dolomítica. En el momento en el que el agua aflora en el techo pierde parte del CO₂ por difusión al aire de la sala y adquiere un carácter incrustante. El carácter del agua se estima a partir de los índices de saturación y de un modelo geoquímico de baja temperatura que tiene en cuenta las especies químicas involucradas y las reacciones que se pueden llevar a cabo en el proceso (Parkhurst & Appelo, 1999).

La variación de temperatura dentro de la cavidad y su diferencia en la interfase roca-agua-aire provoca que el vapor de agua del aire interior se pueda condensar en las superficies rocosas o que el agua principalmente proveniente de la infiltración se pueda evaporar. El problema de corrosión normalmente viene asociado al proceso de condensación de la humedad del aire interior (De Freitas & Schmekal, 2006).

Los procesos de evaporación y condensación juegan un papel fundamental en lo que se refiere al posible deterioro de las pinturas rupestres tales como las que se encuentran en el techo de la sala de Polícromos. La condensación de agua sobre la superficie de roca caliza puede disolver de forma potencial el carbonato de calcio (CaCO_3). La concentración de CO_2 de la atmósfera interior hace que la humedad del aire contenga una gran cantidad de este gas disuelto. La disolución de CO_2 en el agua de condensación forma ácido carbónico (H_2CO_3), disminuyendo su pH y proporcionándole ese carácter corrosivo. A su vez la disociación del H_2CO_3 produce bicarbonato (HCO_3^-) e iones H^+ , responsables en última instancia del pH ácido de la disolución:



Por lo tanto, el dióxido de carbono, el agua, y el carbonato de calcio reaccionan para dar calcio disuelto e iones de bicarbonato en agua según:



La cantidad de calcita disuelta en el ciclo natural de condensación se puede estimar a partir de la concentración de CO_2 del aire y de la cantidad de humedad condensada (Sánchez-Moral et al., 1999). En este trabajo se han determinado los ciclos de evaporación y condensación natural de la sala de Polícromos y se ha estimado la masa de agua condensada en el techo que alberga las pinturas.

La humedad relativa (*HR*) durante el periodo de estudio julio 2013-agosto 2019 toma valores superiores al 98%, manteniéndose casi de forma constante por encima de

99.9%. Para efectos prácticos se supone que la HR está en el punto de saturación, 100%. Sin embargo, la cantidad de humedad absoluta del aire en la sala de Polícromos depende la temperatura y varía en el ciclo anual. El descenso en la temperatura del aire de la sala produce condensación al disminuir la presión de vapor de agua y el incremento de temperatura produce evaporación. A la vista de la variación de la temperatura en la sala se pueden delimitar los ciclos de condensación y evaporación. Por tanto, durante los meses de diciembre a junio se produciría predominantemente condensación y de junio a diciembre evaporación.

Para realizar la estimación de la cantidad de agua que se condensa de diciembre a junio es necesario conocer la diferencia de vapor de agua en el aire en cada uno de los meses citados. La masa de vapor de agua contenida en 1 m^3 de aire húmedo se define como humedad absoluta H_{abs} , suponiendo que el aire está saturado en vapor de agua, $HR=100\%$, la humedad absoluta se puede obtener a partir de la ecuación empírica:

$$H_{abs}(\text{g/m}^3) = 5.018 + 0.32321 \cdot T + 8.1847 \cdot T^2 + 3.1243 \cdot T^3 \quad (1)$$

donde T es la temperatura expresada en $^{\circ}\text{C}$ (Nave, 2017).

A partir de la humedad absoluta en los meses de diciembre y junio, y teniendo en cuenta que el volumen de la sala de Polícromos es 342 m^3 , donde la superficie del techo corresponde aproximadamente al 40% de la superficie total, la masa de agua condensada en el techo es:

$$m(\text{g}) = 0.4 \cdot 342 \cdot (H_{abs}[\text{Dic.}] - H_{abs}[\text{Jun.}]) \quad (2)$$

De manera ilustrativa se ha calculado la humedad absoluta para el periodo diciembre 2017-noviembre 2018 en la sala de Polícromos a partir de las temperaturas medias mensuales y de la Ec. (1). Se muestra como en la primera mitad del año la temperatura disminuye dando lugar a procesos de condensación, mientras que de junio hasta noviembre la temperatura aumenta, propiciándose los fenómenos de evaporación (ver Figura 31).

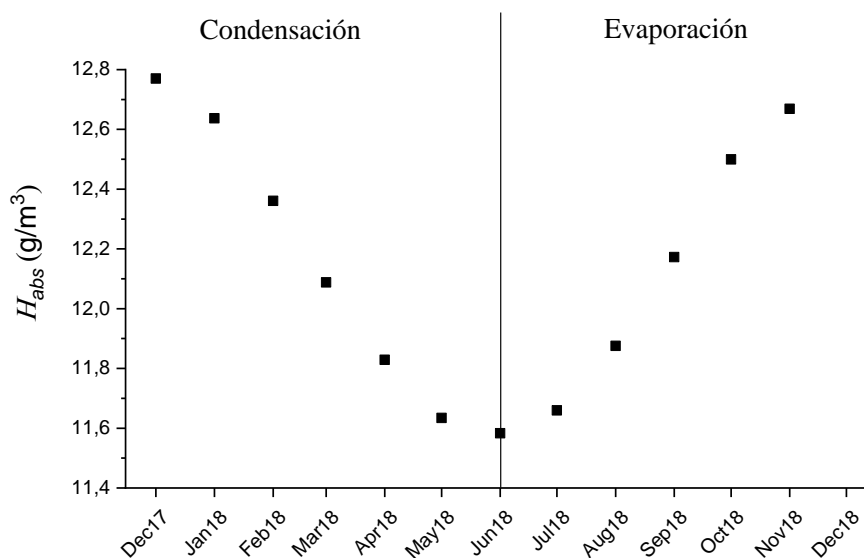


Figura 31. Humedad absoluta para el ciclo diciembre 2017-noviembre 2018.

A partir de los datos de temperatura media mensual que se muestran en la Tabla 7 y de la ecuación (2) se ha estimado la masa de agua condensada durante los distintos ciclos de condensación de periodo 2013-2019 (ver Tabla 12). Estos valores son similares a los obtenidos por el equipo del CSIC (Sánchez-Moral et al., 1999) y pueden servir como referencia para los cálculos de disolución de CaCO_3 en trabajos futuros.

Tabla 12. Estimación de la masa total de agua de condensación en el techo de la sala de Polícromos expresada en gramos para los distintos ciclos diciembre-junio del periodo 2013-2019.

	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019
m (g)	102	133	106	124	162	125

4. Modelo predictivo de temperatura del aire de la sala de Polícromos

El impacto antrópico sobre las condiciones microclimáticas de la sala de Polícromos se estudia a partir de la variación de la temperatura, de la concentración de CO₂ y de la humedad, debida a las visitas públicas. En el PCP se establece el límite de accesibilidad para cada uno de los parámetros estudiados en escala mensual, de modo que antes de iniciar la entrada/visita su valor ha de estar por debajo de su correspondiente límite de acceso.

En el caso de la temperatura, el límite de acceso se determina mediante la suma de la temperatura estimada (T_e) y la oscilación absoluta mensual, es decir, la diferencia entre la máxima y mínima del mes ($T_M - T_m$) obtenida para ese mes en el ciclo anual inmediatamente anterior. En base al promedio para cada mes de las diferencias históricas entre los valores estimados y observados, al valor resultante de la suma anterior se le resta 0.1 °C como margen de seguridad.

La temperatura estimada de la sala de Polícromos (T_e) se obtiene a partir de la temperatura del exterior de la cueva aplicando el modelo predictivo desarrollado por el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) cuyos fundamentos se pueden encontrar en el apartado 4.1.

A la vista del análisis realizado del modelo del IPCE en Rábago (2017), se llegó a la conclusión de que su capacidad predictiva y de generalización se ve limitada por la gran cantidad de parámetros del modelo que dan a un sobreajuste a la muestra de entrenamiento, limitando la capacidad predictiva del modelo ante nuevos eventos. Esta limitación es particularmente relevante en un periodo de clima cambiante como el actual, más aún cuando éste se caracteriza por un incremento significativo de las temperaturas. En el marco de esta tesis doctoral se ha implementado un modelo predictivo basado en el método estadístico de corrección de sesgos *quantil mapping* empírico (*bias correction method - empirical quantile mapping eQM*) aplicado habitualmente en los modelos climáticos (ver Gutiérrez et al., 2018).

En el apartado 4.1 se describe el modelo aplicado en la actualidad y en el 4.2 el desarrollado en base al método estadístico de corrección de sesgo, el cual pretende disminuir la complejidad del original, tanto de implementación como de fundamento, y el número de parámetros con el fin de poder adaptarse de manera más flexible a los cambios en un posible escenario de cambio climático. Se utilizan parámetros estadísticos para comparar ambos.

4.1. Modelo del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)

Con motivo de establecer criterios de accesibilidad para la temperatura y debido a la regularidad en el comportamiento térmico observado, se implementó un primer modelo predictivo de temperatura del aire interior. La base del modelo predictivo son los registros históricos y se tienen en cuenta las variaciones significativas en la temperatura exterior durante los meses previos a la predicción.

Tal y como se ha observado en las series temporales de temperatura del exterior y de la sala de Polícromos del apartado 3.1, y como se muestra en la Figura 32, el desarrollo en ambos casos tiene forma sinusoidal, que viene dada por la estacionalidad clara que se observa en latitudes medias. La amplitud de la onda descrita en el exterior se ve atenuada y desfasada 4 meses debido a la propagación de la onda térmica a través de la cobertera rocosa que se describe en el apartado 3.2. El sistema kárstico ejerce de filtro de paso lento filtrando las variaciones más rápidas (frecuencias altas) del exterior y dejando únicamente pasar las variaciones más lentas (frecuencias bajas). En este contexto una herramienta muy utilizada es el análisis de Fourier o de armónicos (Broughton & Bryan, 2011).

El objetivo del modelo es aproximar la serie de Polícromos a partir de la serie exterior ajustando el desfase temporal y estimando la amortiguación a partir del análisis de los modos de Fourier asociados a las frecuencias significativas.

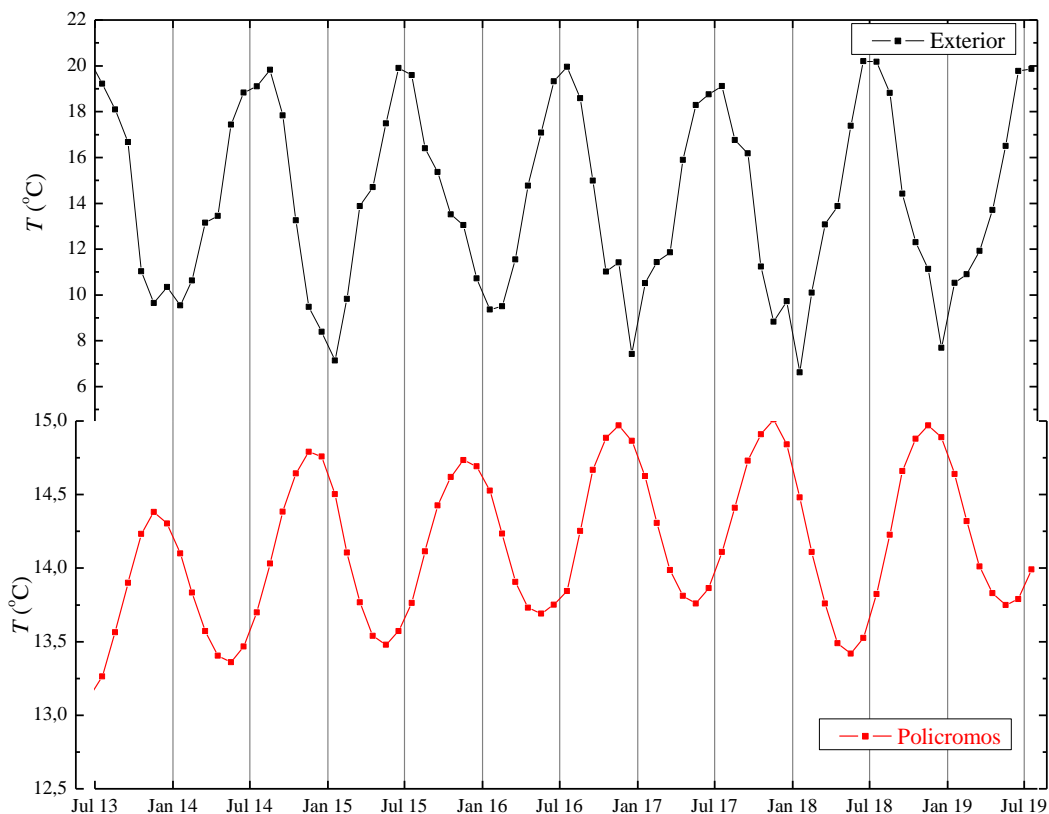


Figura 32. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del exterior y de la sala de Polícromos. El rango de variación anual del exterior es de aproximadamente 14 °C mientras que para la sala de Polícromos es inferior a 2 °C.

El primer parámetro que se considerado es el retraso entre la señal de Polícromos y la del exterior. Es fundamental determinar cuantos meses tarda la influencia del exterior en afectar a la sala para así poder hacer corresponder la excitación del exterior con la consecuente respuesta en el interior. En base a registros históricos el modelo implementado por el IPCE fija un retraso de 4 meses.

El siguiente paso es encontrar la relación de atenuación y desfase de la señal exterior que da lugar a la serie de Polícromos. Para ello, se aplica la transformada de Fourier a ambas series temporales, obteniendo la descomposición de cada señal como suma de señales de frecuencia, fase y amplitud determinadas. Para aplicar este método es necesario introducir los valores de la señal, función o curva a analizar tomados a intervalos iguales, es decir, se precisa de un muestreo determinado de la señal. Puesto que el modelo original esta implementado en Excel, se requiere que el número de

muestras sea una potencia de 2 para aplicar la transformada de Fourier. Se toman $2^6 = 64$, de tal manera que la frecuencia de muestreo, definida como el número de muestras por unidad de tiempo, sea mayor que la frecuencia principal de las señales.

Una vez obtenidas ambas señales y los coeficientes de Fourier asociados, para cada frecuencia i se obtiene la atenuación y desfase sufrida por cada armónico de la forma:

$$\begin{aligned} \text{atenuación}_i &= \frac{\text{módulo}_i(\text{Polícromos})}{\text{módulo}_i(\text{exterior})} \\ \text{desfase}_i &= \text{fase}_i(\text{Polícromos}) - \text{fase}_i(\text{exterior}) \end{aligned} \quad (3)$$

De este modo se obtienen los parámetros que transforman en el espacio de las frecuencias la serie del exterior en la serie de Polícromos, que serán aplicados para obtener la estimación de la temperatura media mensual en la sala de Polícromos a partir de una nueva muestra de la temperatura exterior.

De manera general, para entrenar el modelo se deben seguir los siguientes pasos:

- a. Se determina el retraso entre las temperaturas del Exterior y de Polícromos
- b. Se toma una muestra de 37 valores medios mensuales de la temperatura del exterior y de Polícromos teniendo en cuenta el retraso correspondiente.
- c. Se dividen ambas muestras en 9 partes y se realiza un ajuste polinómico de grado 4 a cada parte para obtener de esta manera un muestreo de las señales de 64 valores.
- d. Se aplica la transformada de Fourier a cada señal y se obtienen los i coeficientes en cada caso.
- e. A partir de los coeficientes de Fourier asociados a cada muestra se calcula la atenuación y el desfase según la Ec. (1) que en el espacio de las frecuencias transforman la serie del exterior en la de Polícromos.

Una vez se tiene entrenado el modelo, los pasos para predecir la temperatura en la en la sala de Polícromos son:

I. Se toma una muestra de 37 valores medios mensuales de la temperatura del exterior a partir de los cuales se quiere predecir los 3 meses posteriores.

II. Se divide la muestra en 9 partes y se realiza un ajuste polinómico de grado 4 a cada parte para obtener de esta forma un muestreo de la señal de 64 valores.

III. Se aplica la transformada de Fourier, de este modo se obtienen los armónicos, que son números complejos: módulo + fase·i, en el espacio de las frecuencias.

IV. Cada una de las frecuencias obtenidas han de ser corregida con los parámetros de la Ec. (1) calculados en el entrenamiento. El módulo se multiplica por la atenuación y a la fase se le resta el desfase.

V. Una vez corregidas las frecuencias se aplica la transformada de Fourier inversa para obtener los valores predichos de las temperaturas en Polícromos en el dominio del tiempo.

El número de parámetros en los que se sustenta el modelo son: el retraso de 4 meses, 9×5 de las 9 partes en las que se divide la muestra y se aplica un polinomio de grado 4 a cada una de ellas, 2×7 parámetros correspondientes con los desfases y atenuaciones para las 6 frecuencias de Fourier consideradas. Por lo tanto se manejan 60 parámetros frente a una muestra de 37 medias mensuales de temperatura. Esta gran cantidad de parámetros con respecto al tamaño de muestra puede dar lugar a lo que se denomina sobreajuste, el modelo puede reproducir con mucha precisión los datos del entrenamiento pero por el contrario no sea capaz de predecir correctamente nuevos datos introducidos.

Debido al muestreo de la señal, el resultado obtenido son 64 valores de temperatura predicha en la sala de Polícromos, desde mediados del quinto mes introducido de la serie del exterior hasta 3 meses posteriores al último valor de temperatura exterior en intervalos de aproximadamente 17 días. En este caso solo se tendrán en cuenta las predicciones para el primer mes debido a que la desviación respecto a los valores observados es menor, cuyos resultados proporcionan valores de la temperatura estimada de aproximadamente los días 4 y 21. Por ejemplo, si se introduce la serie del

exterior de enero 2010 a enero 2013 se toman los valores de temperatura predicha para los días 4 y 21 de febrero 2013 y así sucesivamente. De este modo se obtiene una serie de predicciones basada en los 37 meses del exterior anteriores a cada uno de los datos predichos.

La muestra de entrenamiento utilizada para crear el modelo predictivo toma los datos de mayo 2009 a mayo 2012 para el exterior y de septiembre 2009 a septiembre 2012 para Polícromos. Cabe destacar que en este programa se consideran los primeros 6 armónicos de la transformada de Fourier ya que se espera que por encima del sexto la aportación a la señal sea poco significativa. Los coeficientes de Fourier obtenidos se prefijan a partir de este periodo de entrenamiento, no siendo modificables en la plantilla de Excel utilizada.

Este modelo fue replicado por la Universidad de Cantabria en el lenguaje R, software libre desarrollado para el análisis estadístico y gráfico (www.r-project.org) tal y como se detalla en Rábago (2017). A diferencia del modelo original, en el desarrollado en R no se filtran las 6 primeras frecuencias del espacio de Fourier, sino que se consideran todas para evitar dejar fuera algún modo significativo a la hora de reconstruir la serie predicha de Polícromos.

En este último estudio citado se consideraron otros periodos de entrenamiento del modelo, por una parte el mismo intervalo que el utilizado por el IPCE (mayo 2009-mayo 2012 para exterior y septiembre 2009-septiembre 2012 para Polícromos) con el fin de replicar/comparar los resultados obtenidos con el Excel. Por otra parte se consideraron la serie de temperaturas correspondientes al último periodo de investigación llevado a cabo por la Universidad de Cantabria, marzo 2013-marzo 2016 para el exterior y julio 2013-julio 2016 para Polícromos. La comparación de los modelos se realizó en base a la predicción de la temperatura media mensual tomada como el promedio de las predicciones para los días 4 y 21 de cada mes.

Los posibles defectos que puede tener este modelo están directamente relacionados con la cantidad de parámetros que se manejan; hay una hiperparametrización que lleva al sobreajuste a la muestra de entrenamiento. Es decir, una vez obtenidos los

coeficientes de Fourier a partir de una serie de datos de entrenamiento, al intentar predecir el periodo que coincide con el entrenamiento, los ajustes son muy buenos, la diferencia con los valores reales de temperatura en la sala de Polícromos es pequeña. Sin embargo, al intentar predecir la temperatura fuera del periodo de entrenamiento, las diferencias con la temperatura real son superiores. Este hecho limita la capacidad predictiva y de generalización del modelo por culpa del sobreentrenamiento u *overfitting* (Gutjahr, 2013; Rabago, 2017).

4.2. Modelo predictivo por corrección de sesgo “*Bias Correction*”

El modelo predictivo de temperaturas de la sala de Polícromos implementado en el marco de esta tesis doctoral se basa en el método de corrección de sesgo (*bias correction method*), del cual se usa un caso particular, el denominado *empirical quantile mapping* (eQM). Durante los últimos años, este tipo de métodos se han vuelto muy populares y se han usado ampliamente para corregir el sesgo sistemático de las simulaciones de modelos climáticos (Gutierrez et al., 2018).

Los métodos de *quantile mapping* (QM) son una familia de métodos basados en la función de distribución acumulada (empírica o teórica) de modo que buscan una aplicación, funcional o empírica, que transforme la función de distribución simulada en la observada. En el caso de considerar la función de distribución teórica (QM paramétrico) (Piani et al., 2010), el método obtiene los parámetros (p.ej. media y varianza) de las funciones de distribución establecida a priori (p.ej. Gaussiana) a partir de las series simulada y observada, de modo que el valor ajustado viene dado por la expresión:

$$y = F_{obs}^{-1} \left(F_{PDF} (x) \right) \quad (4)$$

donde y es el valor ajustado, x es el valor simulado y F es la función de distribución teórica para las observaciones (sala de Polícromos) y el modelo (p.ej. exterior). Este método parte del conocimiento a priori de la distribución teórica de ambas series lo cual reduce el número de parámetros del modelo final obtenido pero impone restricciones que limita su aplicabilidad a ciertas distribuciones estadísticas (p.ej.

Gamma, Gaussiana, etc.). Como alternativa a la aproximación paramétrica surge el *quantile mapping* empírico (eQM), el cual considera las funciones de distribución empírica observada y simulada definidas a partir de los cuantiles obtenidos directamente de la muestra (Déqué, 2007; Themessl et al., 2012). De este modo, se obtiene de nuevo la ecuación, si bien en este caso la función F representa la función de distribución empírica. A lo largo de la tesis se considerará la implementación de este método propuesta por Déqué (2007), la cual ha sido utilizada y evaluada recientemente en el marco de la iniciativa Europea *Action COST VALUE* (Gutierrez et al., 2018; Maraun et al. 2015, 2016). En este caso se va a utilizar la distribución de temperaturas del exterior de la cueva para establecer los cuantiles simulados que se corregirán con la observación de la distribución de la temperatura de la sala de Polícromos.

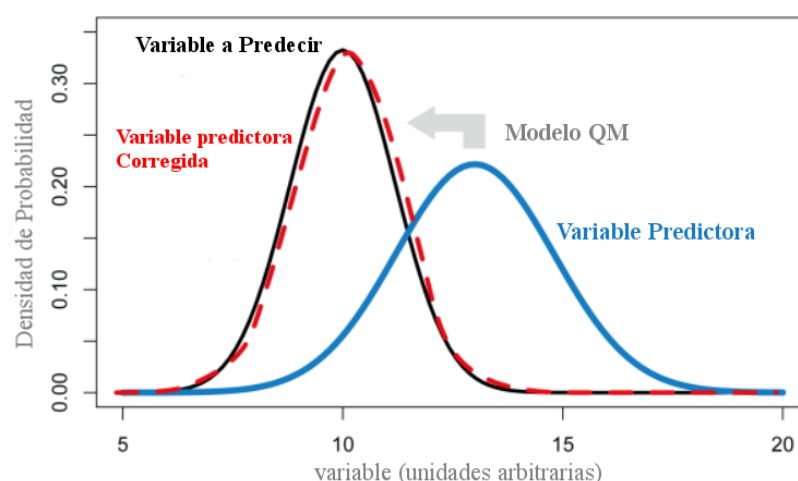


Figura 33. Esquema de la implementación del método Quantile Mapping en la que la distribución de probabilidad de variable simulada del modelo (azul) se corrige cuantil a cuantil con la variable observada (negro) obteniendo la variable corregida (rojo) (Modificado de Feigenwinter et al. (2018)).

En la Figura 33 se muestra de forma gráfica el procedimiento que se sigue al aplicar el método eQM. La función de densidad de probabilidad de la variable simulada (azul), la cual está sujeta tanto a un sesgo de la media como a un sesgo de la varianza, se corrige hacia una distribución observada (negro). La distribución de corrección de sesgo resultante (rojo discontinuo) a la que se ha aplicado el método QM se aproxima a la observada, que generalmente no es idéntica a esta debido principalmente a la

incertidumbre del muestreo durante la calibración de la función de corrección o a los detalles de la implementación específica de QM.

La implementación de este modelo se basa en los 99 percentiles, (100 cuantiles, del percentil 1 al 99) de cada una de las distribuciones y en la obtención de la función de corrección que asigna los percentiles con la misma probabilidad de la serie de temperaturas del exterior con la serie de Polícromos. Una vez establecido el modelo mediante la función de transferencia en la etapa de entrenamiento del modelo, en la aplicación del mismo, o etapa de test, la nueva serie del exterior puede contener extremos más allá de los marcados en el modelo. En este caso se realiza una extrapolación lineal para corregir dichos valores fuera de rango.

Siguiendo la aproximación utilizada por el modelo predictivo implementado en Excel por el IPCE (Durán, 2014), y replicado posteriormente en R (Rabago, 2017) (ver apartado 4.1), y para obtener un modelo directamente comparable, inicialmente se consideró como variable predictiva la serie de temperaturas del exterior para predecir la temperatura de la sala de Polícromos.

Sin embargo, debido a la versatilidad del modelo propuesto, posteriormente se consideraron otras mediciones alternativas. En particular, se ha utilizado la temperatura exterior del suelo como variable predictiva, ya que atenúa las variaciones de periodo corto que en ningún caso se observan en la serie de Polícromos. Del mismo modo se ha probado a predecir la temperatura de la sala de Polícromos a partir de la serie de temperaturas de la sala del Hall. A partir de los resultados obtenidos para la predicción de la temperatura de Polícromos, utilizando cada una de las series mencionadas anteriormente, se ha establecido un conjunto o también llamado *ensemble* de predicciones que permitirá establecer la incertidumbre del valor predicho. Del mismo modo, la predicción a través de conjuntos permite incluir en el modelo predictivo la incertidumbre asociada al error de éste obtenido en el proceso de evaluación.

La implementación del programa se ha realizado en lenguaje R *Software Environment for Statistical Computing and Graphics* (<https://www.r-project.org>) a

partir del código abierto “biasCorrection.R Bias correction methods” creado por el grupo de meteorología de Santander (Herrera & Iturbide, 2017) bajo la Licencia Pública General GNU. De modo general, la función del modelo eQM implementado en el lenguaje R es la siguiente:

$$\text{eqm} \leftarrow \text{function}(\mathbf{o}, \mathbf{p}, \mathbf{s}, n.\text{quantiles}, \text{extrapolation})$$

cuyos parámetros son:

o: Serie observada de temperaturas de la sala de Polícromos para el periodo de entrenamiento.

p: Serie de temperaturas de la variable predictora para el periodo de entrenamiento

s: Serie de temperaturas de la variable predictora para el periodo de test.

n.quantiles: Número de cuantiles considerados

extrapolation: Carácter que indica el método aplicado en el caso de encontrar valores fuera de los cuantiles del periodo de entrenamiento.

El archivo de datos que toma la implementación del programa R son las temperaturas registradas por las sondas cada 15 minutos en el exterior, suelo a la profundidad de 10 cm, sala del Hall a media altura y sala de Polícromos a media altura. A partir de los datos brutos se obtienen las medias diarias tanto para la variable predictiva (exterior, suelo, Hall) como para la sala de Polícromos las cuales se introducen en cada caso en la función eqm citada anteriormente.

El modelo QM se sustenta en 100 parámetros, considerando los 99 percentiles y el retraso entre las series del exterior y Polícromos. Sin embargo, el tamaño de muestra utilizado para entrenar el modelo son las medias diarias de temperatura de 6 años, 6×365 . Comparando el número de parámetros con el tamaño de muestra se justifica el uso de tal cantidad de parámetros para entrenar el modelo. Del mismo modo, la formulación QM permite tanto considerar otras series como pasar a modelos menos parametrizados como es el QM paramétrico. Da una flexibilidad que el del IPCE no

tiene al margen de los resultados obtenidos.

Por lo tanto, la predicción de la temperatura de la sala de Polícromos resultante de la aplicación del modelo viene dada en escala diaria. A partir de esta se obtiene la predicción mensual como el promedio de las predicciones diarias, a la cual se le asocia la desviación estándar como incertidumbre. Hay que tener en cuenta que para cada mes introducido en la serie del exterior la predicción corresponde con la sala de Polícromos 4 meses más tarde. Lo mismo sucede con las series del suelo y del Hall cuyo retraso con la serie temporal de Polícromos es 4 y 3 meses respectivamente. A diferencia del modelo propuesto por el IPCE, la estimación de este retraso fue incluida en Rábago (2017) de forma dinámica a partir de la correlación entre ambas series, introduciendo progresivamente un retraso y definiendo el desfase como el retraso con mayor correlación significativa entre ambas series.

Tal y como se muestra en el capítulo 3, referente al campo de temperaturas, se dispone de la serie temporal en escala quinceminutal de cada una de las estaciones de monitorización desde julio de 2013 hasta agosto de 2019. Esta serie temporal ha sido dividida en dos. Por una parte se ha utilizado la serie desde julio 2013 a diciembre 2018 para validar el modelo y, por otra parte, se ha considerado la serie correspondiente al 2019 como ejemplo de la aplicación operativa del modelo.

La validación del modelo en este caso ha sido la denominada “validación cruzada” cuyo fundamento y ejecución se describe en el apartado 4.3.1. La evaluación de los errores e incertidumbres asociados que caracterizan al modelo se obtienen con los parámetros que se describen en el apartado 4.3.2.

En la forma operativa del modelo nos encontramos en un determinado mes del cual queremos predecir su temperatura, por ejemplo el día 1 de marzo de 2019, conocemos por tanto la serie de temperaturas de las variables predictivas (exterior, suelo, Hall) y de la variable a predecir (Polícromos) desde julio de 2013 hasta febrero de 2019. Se utilizan las series temporales mencionadas entrenar el modelo. Para predecir la temperatura de la sala de Polícromos del mes de marzo de 2019 hay que introducir en la fase de test la serie de noviembre de 2018 del exterior, la de noviembre de 2018 del

suelo y la de diciembre de 2018 del Hall, para tener en cuenta el retraso de la sala de Polícromos.

Los términos de la función eqm, aplicado al ejemplo mencionado, utilizando la serie del exterior como variable predictiva, quedarían de la siguiente manera:

eqm ← función (*o*, *p*, *s*, *n.quantiles*, *extrapolation*)

donde: *o*: Serie escala diaria Polícromos [julio 2013 - febrero 2019]

p: Serie escala diaria Exterior [julio 2013 - febrero 2019]

s: Serie escala diaria Exterior [noviembre 2018]

n.quantiles: 100

extrapolation: “lineal”

El resultado proporciona la predicción en escala diaria de la temperatura de la sala de Polícromos para marzo de 2019 a partir de la cual se obtiene el promedio como valor predicho del mes y su desviación estándar, que se puede asociar a la incertidumbre de la misma.

Del mismo modo se obtiene la predicción mensual utilizando como variables predictivas las series del suelo y del Hall. Finalmente, la predicción por conjuntos se calcula a partir del promedio de las tres predicciones mensuales proporcionadas por cada predictor y su incertidumbre la desviación estándar de la media.

4.3. Validación de los modelos

A continuación se describe el proceso de la validación del modelo predictivo, así como los parámetros que lo caracterizan en base a las funciones de error que tienen en cuenta las predicciones y los valores observados.

4.3.1. Validación cruzada “*Cross validation*”:

El interés que tiene aplicar modelos estadísticos basados en las técnicas de aprendizaje automático bajo una serie de condiciones dadas, reside en su capacidad de generalización y en la determinación de su incertidumbre asociada. Una vez implementado el modelo (entrenamiento) es necesario validarlo, es decir, comprobar que funciona de manera correcta para un nuevo conjunto de datos que no han sido utilizados para desarrollarlo (test).

La poca flexibilidad del modelo original implementado por el IPCE en Excel, en el cual, entre otras cosas, no se puede modificar el periodo de entrenamiento, limita la aplicabilidad de este tipo de técnicas de validación cruzada y, por tanto, la evaluación de sus errores, el sobreajuste y su capacidad de generalización ante nuevas muestras.

El método empleado para realizar la validación cruzada ha sido el denominado *leave-one-out* aplicado a escala anual (Schneider & Moore, 2000; Kim, 2009). Esta aproximación separa los datos en n muestras, siendo n en este caso el número de años en la muestra de entrenamiento, de tal manera que en cada iteración se utilice una muestra para los datos de test y el resto para entrenar el modelo. En este caso se han tomado todos los años menos uno para la muestra de entrenamiento y el año restante para la muestra de test. Mediante un proceso iterativo se realiza el proceso para todos los años disponibles, de tal manera que se guarda en una variable la predicción dada para el periodo de test en cada caso.

En la Figura 34 se muestra como se ha aplicado la validación cruzada. La muestra tomada está comprendida en el periodo de julio 2013 a diciembre 2018 separado por años. En la primera iteración se toman todos los datos en escala diaria de los años 2014 a 2018 para entrenar el modelo. Posteriormente se predicen los meses correspondientes

al 2013 teniendo en cuenta el retraso calculado entre las variables predictivas y la de Polícromos.

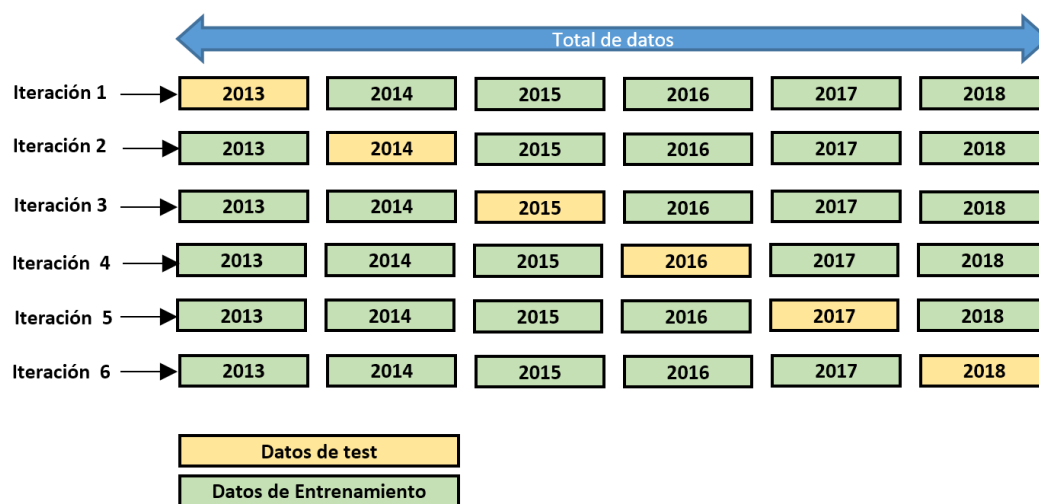


Figura 34. Esquema de la validación cruzada por el método *leave-one-out*.

4.3.2. Caracterización del modelo y evaluación de la robustez

Para evaluar la calidad de las predicciones proporcionadas por el modelo, es decir, determinar cuán cerca están los pronósticos o predicciones de los valores reales se utilizan funciones de error (Gutiérrez, 2004). A continuación se describen los estadísticos utilizados para valorar de forma cuantitativa las predicciones. En este caso se va a considerar la escala mensual de temperatura en la sala de Polícromos tanto la experimental obtenida de las estaciones de monitorización como la proporcionada por el modelo.

Para caracterizar el modelo en su conjunto se calcula el error absoluto medio *mae* (*mean absolute error*) definido como el promedio de la diferencia entre el valor predicho y el real en valor absoluto (Stauffer & Seaman, 1990):

$$mae = \frac{1}{n} \sum_i |T_i(\text{modelo}) - T_i(\text{Polícromos})| \quad (5)$$

siendo T_i (Polícromos) la temperatura observada de la sala de Polícromos para el mes i , T_i (modelo) la predicha del modelo para el mes i y n el número de predicciones consideradas en un periodo concreto.

El *bias* se define como el promedio de las diferencias entre el valor predicho y el real, cuantifica el error sistemático cometido por el modelo y proporciona información sobre diferencia en la media de las distribuciones observadas y predichas (Pielke, 2013):

$$bias = \frac{1}{n} \sum_i (T_i(\text{modelo}) - T_i(\text{polícromos})) \quad (6)$$

Del mismo modo se puede determinar el *bias* para un mes individual simplemente calculando la diferencia entre el valor predicho y el real.

Para evaluar la correspondencia temporal sin verse afectada por el *mae* o el *bias* se aplica la correlación de Pearson. De esta manera se obtiene un parámetro que relaciona la correspondencia estacional con independencia de las otras dos medidas de error citadas. El coeficiente de correlación de Pearson *r* se calcula como:

$$r = \frac{n \sum T_{i,\text{mod}} T_{i,\text{poli}} - \sum T_{i,\text{mod}} \sum T_{i,\text{poli}}}{\sqrt{n \sum T_{i,\text{mod}}^2 - (\sum T_{i,\text{mod}})^2} \sqrt{n \sum T_{i,\text{poli}}^2 - (\sum T_{i,\text{poli}})^2}} \quad (7)$$

donde $T_{i,\text{poli}}$ es la temperatura observada de la sala de Polícromos para el mes i , $T_{i,\text{mod}}$ es la temperatura predicha por el modelo para el mes i y n el número de predicciones consideradas en un periodo concreto.

Para este tipo de modelo predictivo a pequeña escala es necesario que el método proporcione unos resultados estadísticamente estables para seguir siendo válido en escenarios cambiantes, ya sea bajo condiciones de cambio climático u otras anomalías. Esta estabilidad es normalmente referida como robustez, varios estudios se han centrado en este tipo de problemas al utilizar modelos climáticos tanto globales como regionales (Frías et al., 2006; Vrac et al., 2007; Schmith, 2008).

Para establecer la robustez de los modelos y, con ello, obtener la estadística de los errores/incertidumbres que nos permitan usar el modelo de forma operativa, se ha utilizado el método descrito en Gutiérrez et al. (2013) y Dietterich (1998), en el cual se compara estadísticamente el *bias* de las predicciones para cada año. De esta manera

se determina si los errores cometidos en cada año son significativamente diferentes a los de los demás.

Para cuantificar si el *bias* obtenido para un año b_w dado es significativamente diferente del *bias* obtenido de los demás años b_k , $k= 1, \dots, n$ (los n años del proceso de validación cruzada), se aplica un test de Student a la media de las diferencias $\bar{d} = (1/n) \sum_n d_k = (1/n) \sum_n (b_w - b_k)$ para comprobar si la diferencia entre ambas es significativamente de cero. De esta manera se considera el siguiente test estadístico:

$$t = \frac{\sqrt{n} \cdot \bar{d}}{\sqrt{\text{var}(d)}}; \quad \text{var}(d) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_k - \bar{d})^2 \quad (8)$$

el cual sigue una distribución t-student con $n-1$ grados de libertad.

4.4. Resultados

Los resultados de los modelos predictivos se separan en dos, por una parte se ha considerado el periodo 2013-2018 el cual se ha utilizado como validación, y por otra parte el año 2019 se ha tomado como periodo operativo, en el cual se trabaja en las mismas condiciones de la predicción real.

Tanto en el periodo de validación (2013-2018) como en el operativo (2019) se ha predicho la temperatura media mensual de la sala de Polícromos utilizando como variables predictivas la temperatura del exterior, del suelo, del Hall y del conjunto de las tres. En el primer caso se ha seguido el procedimiento de la validación cruzada y en el segundo se han considerado todos los meses anteriores al mes predicho para entrenar el modelo. Se han obtenido también las predicciones del modelo del IPCE. Con el fin de comparar los resultados de todas las aproximaciones utilizadas se han obtenido los parámetros estadísticos mencionados anteriormente.

4.4.1. Periodo 2013-2018: Validación

A continuación se muestran los resultados de la predicción mensual con su incertidumbre utilizando como predictores de la temperatura de la sala de Polícromos, la serie de temperatura del exterior, la del suelo a una profundidad de 10 cm y la del

Hall. Las predicciones han sido realizadas en base al procedimiento de la validación cruzada, por lo tanto cada año predicho ha sido obtenido a partir del entrenamiento con los demás años. A partir de estas predicciones se ha obtenido la predicción por conjuntos tomando para cada mes la predicción promedio obtenida de las otras tres y como incertidumbre su desviación estándar.

A continuación se muestra de forma gráfica la predicción de la temperatura media mensual de la sala de Polícromos con su incertidumbre junto con la temperatura observada para cada una de las aproximaciones consideradas. Se añade la gráfica de las diferencias entre la predicción y la observación. Por lo tanto se tienen dos gráficas para cada situación considerando como variable predictiva la serie del exterior (Figura 35 y Figura 36), la serie del suelo (Figura 37 y Figura 38) y la serie del Hall (Figura 39 y Figura 40).

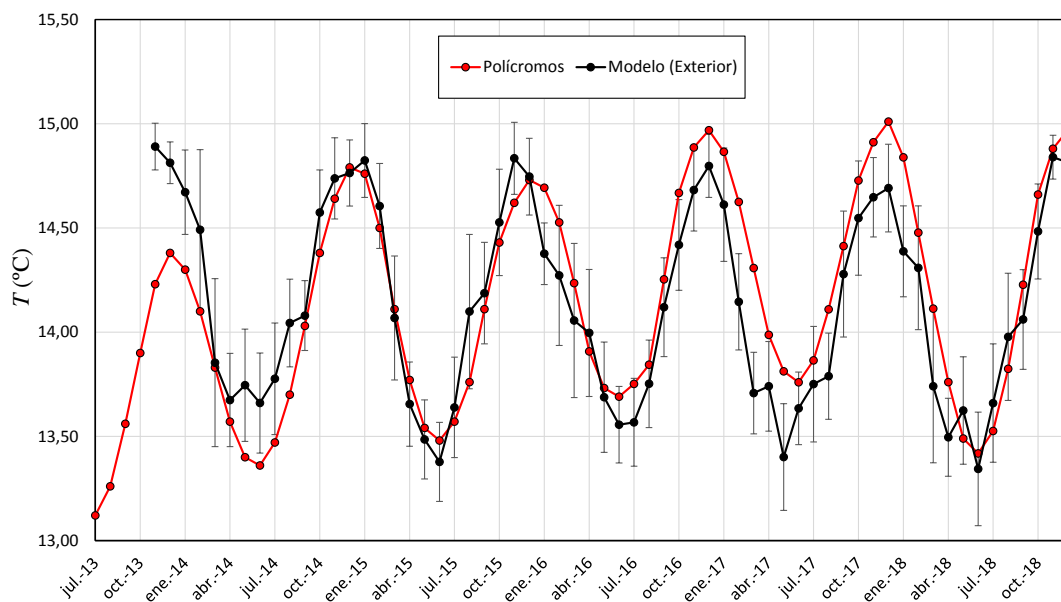


Figura 35. Predicción de la temperatura obtenida del modelo por corrección de sesgo utilizando como predictor la serie del exterior en comparación con la serie de Polícromos.

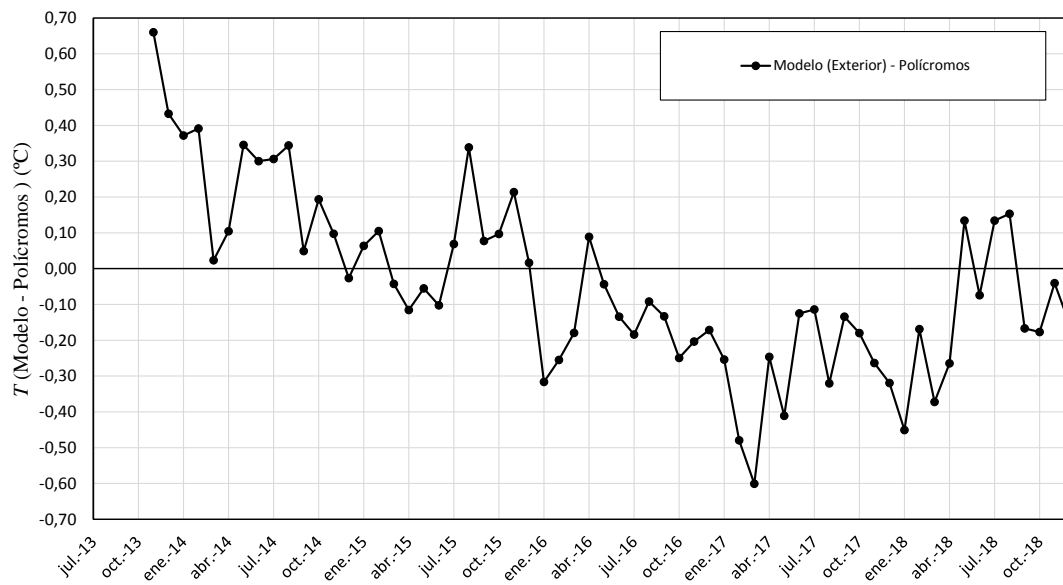


Figura 36. Diferencia entre la predicción utilizando como predictor la serie del exterior y la temperatura de Polícromos.

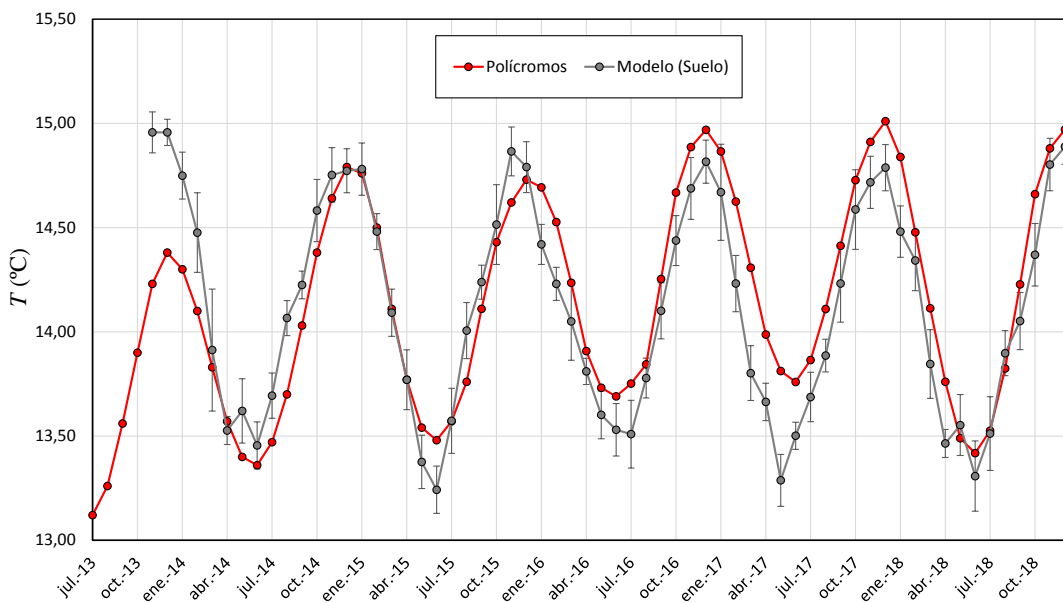


Figura 37. Predicción de la temperatura obtenida del modelo por corrección de sesgo utilizando como predictor la serie del suelo en comparación con la serie de Polícromos.

4. Modelo predictivo de temperatura del aire de la sala de Polícromos

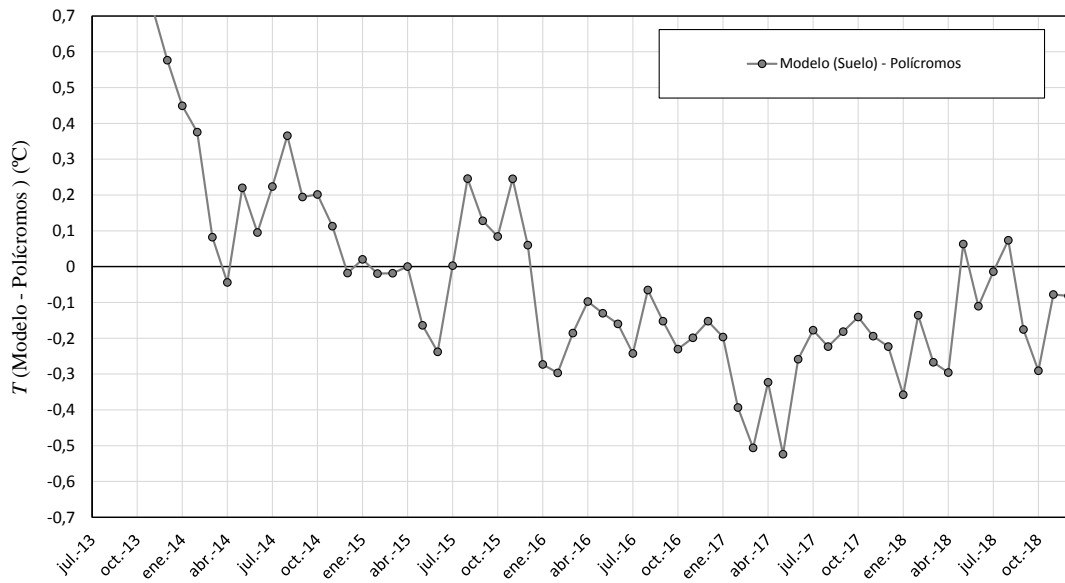


Figura 38. Diferencia entre la predicción utilizando como predictor la serie del suelo y la temperatura de Polícromos.

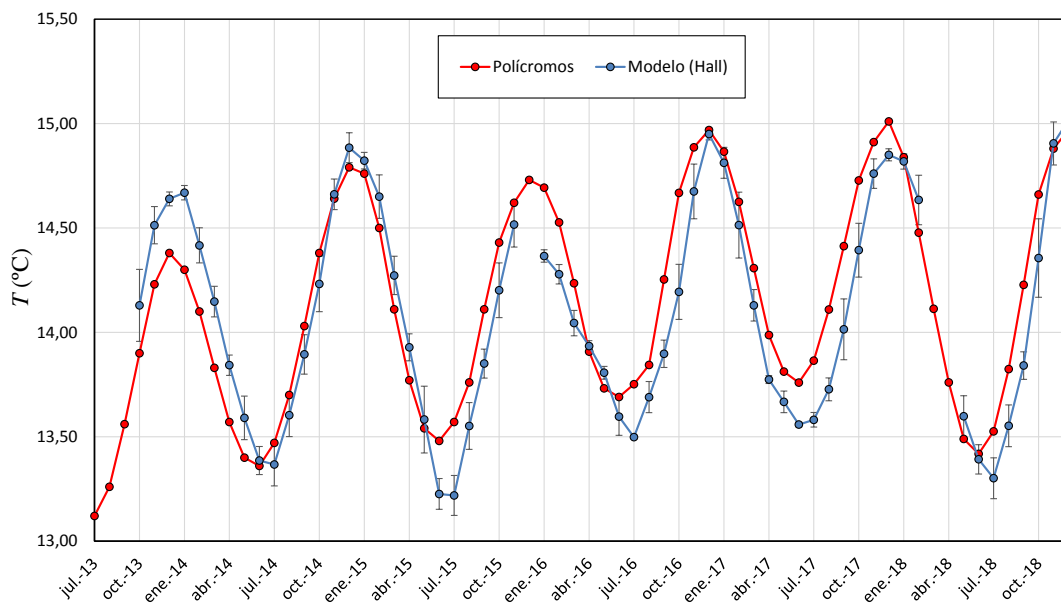


Figura 39. Predicción de la temperatura obtenida del modelo por corrección de sesgo utilizando como predictor la serie del Hall en comparación con la serie de Polícromos.

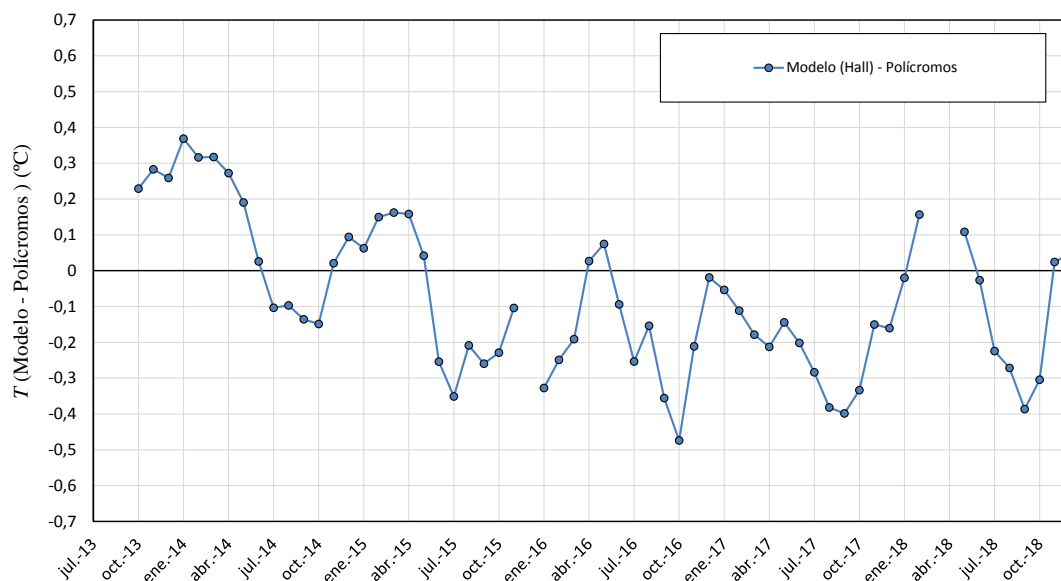


Figura 40. Diferencia entre la predicción utilizando como predictor la serie del Hall y la temperatura de Polícromos.

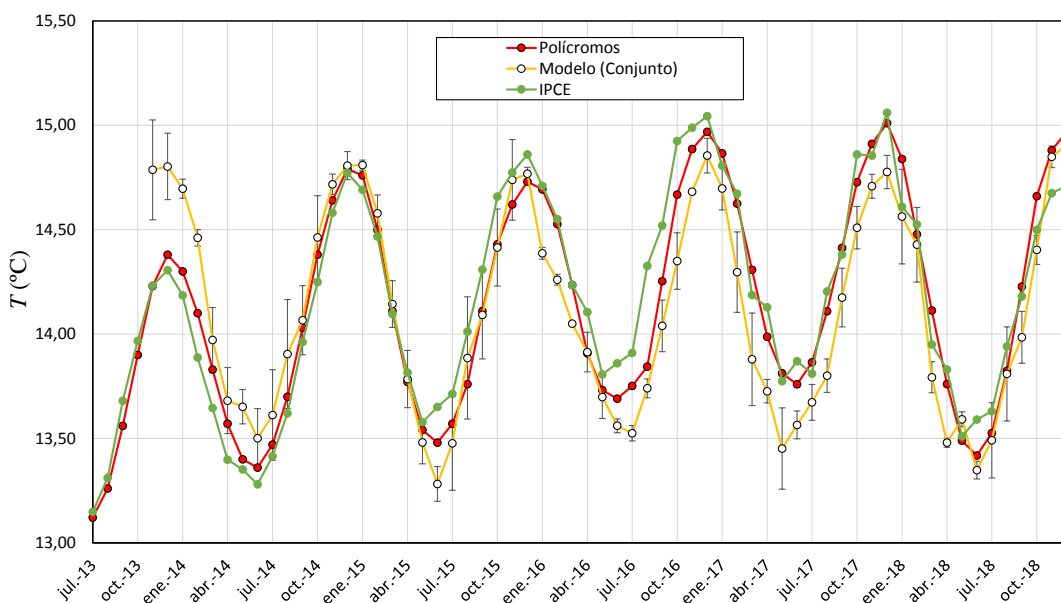


Figura 41. Predicción de la temperatura obtenida del modelo por corrección de sesgo utilizando la aproximación por conjuntos (amarillo) en comparación con la obtenida del modelo implementado por el IPCE (verde) y con la serie de Polícromos observada.

A partir de las predicciones que se muestran anteriormente utilizando las series del exterior, suelo y Hall, se ha obtenido la predicción por conjuntos. La predicción obtenida por conjuntos se compara con los resultados obtenidos con el modelo del

IPCE (ver Figura 41) así como las diferencias entre el modelo y los valores observados de Polícromos (ver Figura 42).

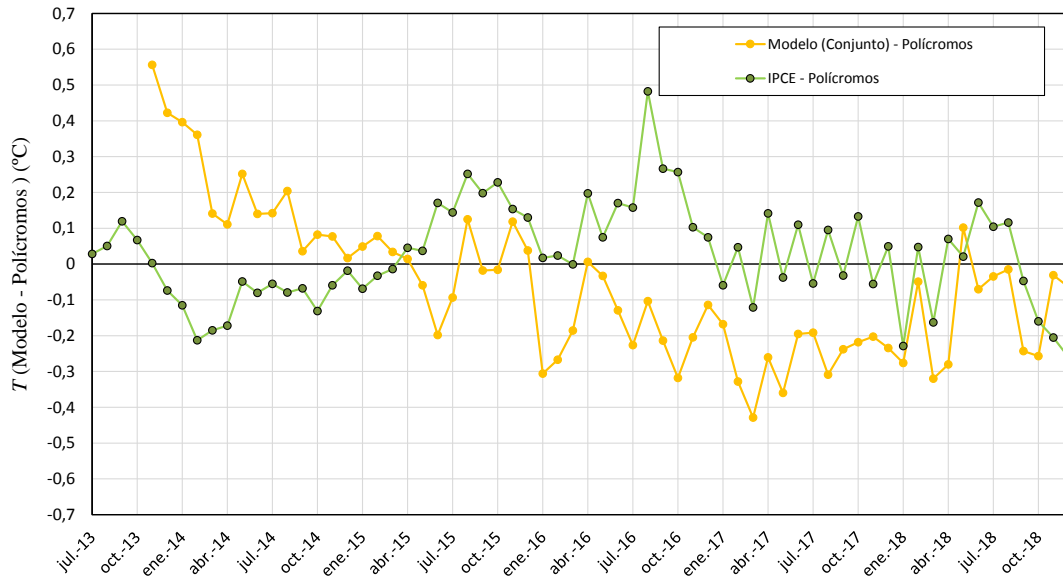


Figura 42. Diferencia entre la predicción por conjuntos, la obtenida del modelo implementado por el IPCE y la temperatura de Polícromos observada.

Teniendo en cuenta las predicciones que se muestran gráficamente para cada una de las aproximaciones, se han obtenido el *mae*, el *bias* y el coeficiente de correlación (ver Tabla 13).

Tabla 13. Error absoluto medio (*mae*), *bias* y coeficiente de correlación para las cuatro aproximaciones del moldeo eQM y para el modelo del IPCE en el periodo 2013-2018. Datos expresados en °C.

	Exterior	Suelo	Hall	Conjunto	IPCE
<i>mae</i> (2013-18)	0.21	0.20	0.19	0.18	0.12
<i>mae</i> (2018)	0.19	0.16	0.16	0.15	0.13
<i>bias</i>	-0.04	-0.05	-0.08	-0.07	0.04
<i>r</i> (correlación)	0.87	0.88	0.92	0.91	0.95

Analizando el *mae* de las series predictoras del exterior, suelo y Hall tanto para el periodo julio 2013-diciembre 2018 como para el año 2018 se puede observar que

utilizar la serie del Hall como predictor proporciona un error absoluto medio más bajo. Al utilizar la predicción por conjuntos dicho resultado se ve mejorado. Se obtiene un *mae* de 0.18 °C para el periodo 2013-18 y de 0.15 para el año 2018. Por lo tanto la mejor predicción observada viene dada para la predicción por conjuntos.

Respecto al modelo predictivo del IPCE, parece que la aproximación por conjuntos no mejora el modelo original en lo que a error cometido se refiere, ya que este tenía un *mae* de 0.12 °C en el periodo 2013-18 y 0.13 °C en el 2018. Sin embargo se está comparando el modelo operativo del IPCE con la validación cruzada del modelo eQM. Los resultados realmente comparables son los que se obtienen para el 2019 que se muestran en el apartado 4.4.2.

El error sistemático o *bias* para cada una de las aproximaciones es similar para el periodo 2013-2018, siempre negativo y por encima de -0.1 °C. Utilizando cualquiera de las 3 series de temperatura para predecir (exterior, suelo, Hall, conjunto), el comportamiento es similar. Se sobreestima y subestima la temperatura en los mismos periodos. El *bias* para cada año se muestra en la Tabla 14. Se observa un cambio de tendencia en el *bias* de positivo a negativo a partir del año 2016 para luego estabilizarse. El coeficiente de correlación es muy alto en todos los casos debido al grado de estacionalidad de los datos.

Tabla 14. *Bias* por año. Se han tomado las predicciones de temperatura en escala mensual para cada año. Datos expresados en °C.

	Exterior	Suelo	Hall	Conjunto	IPCE
2013	0.55	0.65	0.26	0.49	0.03
2014	0.21	0.19	0.09	0.16	-0.10
2015	0.06	0.03	-0.08	0.01	0.10
2016	-0.16	-0.18	-0.19	-0.17	0.15
2017	-0.29	-0.28	-0.22	-0.26	0.02
2018	-0.12	-0.14	-0.09	-0.13	-0.04

La robustez de cada una de las aproximaciones se ha analizado a partir de la

comparación de los *bias* de cada año mediante un test estadístico. Se ha determinado si los errores cometidos en cada año son significativamente diferentes a los de los demás. En la Tabla 15 se indica el p-valor resultante del test de Student llevado a cabo. Un valor inferior a 0.05 indica que el *bias* de ese año no se puede considerar estadísticamente igual al de los demás.

Tabla 15. p-valor resultante del test de robustez llevado a cabo para cada una de las aproximaciones del modelo predictivo. Los datos sombreados corresponden a valores inferiores a 0.05.

Año	Exterior	Suelo	Hall	Conjunto	IPCE
2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56
2014	0.10	0.16	0.13	0.12	0.19
2015	0.54	0.78	0.51	0.78	0.13
2016	0.30	0.23	0.05	0.18	0.04
2017	0.06	0.07	0.02	0.05	0.08
2018	0.42	0.36	0.29	0.31	0.63

A la vista de los resultados del p-valor obtenido con el test estadístico que se muestra en la Tabla 15, se puede concluir con que tanto modelo por corrección de sesgo con cada una de sus aproximaciones, como el del IPCE son robustos en cuanto a los errores introducidos. En el caso del año 2013 el eQM no es robusto en ninguna de sus variantes, esto se debe a que solo hay predicción para los meses de noviembre y diciembre los cuales proporcionan un error respecto al valor considerado real muy superior a los demás tal y como muestra la Tabla 14.

4.4.2. Periodo 2019: Modelo operativo

Una vez realizada la validación cruzada, se procede a establecer el modelo de forma operativa, de este modo para obtener la predicción de un mes dado se entrena con todos los meses anteriores y se predice ese. Se ha predicho la temperatura de la sala de Polícromos del año 2019 hasta agosto a partir de cada una de las aproximaciones mencionadas, las tres variables predictivas más el conjunto del modelo eQM y

utilizando el modelo del IPCE.

Los resultados de la predicción por conjuntos de forma operativa y la correspondiente al modelo del IPCE para el año 2019 se muestran en la Figura 43. En la Tabla 16 se muestra la diferencia entre el valor predicho y la temperatura observada de Polícromos para cada una de las aproximaciones consideradas.

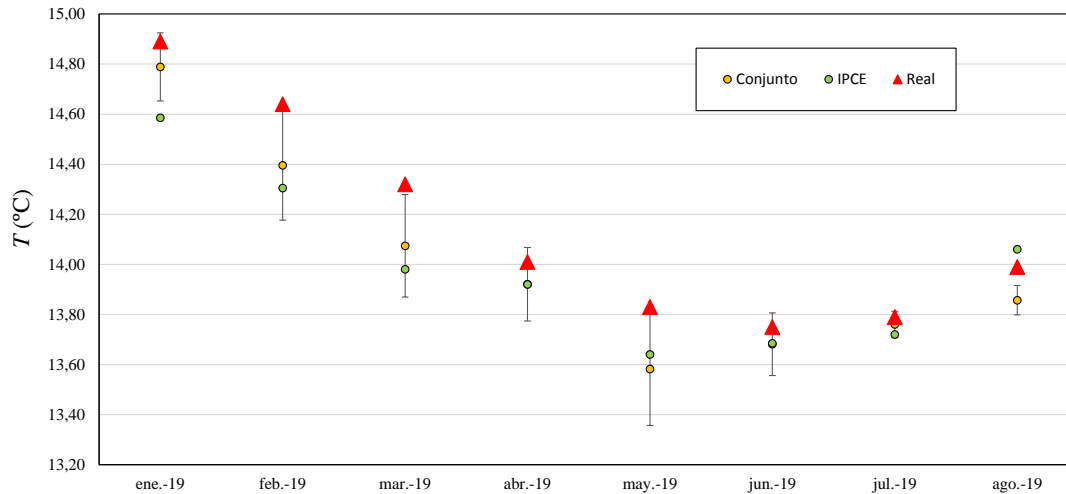


Figura 43. Predicción operativa del conjunto EQM y el dado por el modelo del IPCE para el periodo enero-agosto 2019.

Tabla 16. Diferencias entre la temperatura medida y predicha utilizando cada una de las series y el conjunto de ellas para el periodo enero-agosto 2019. Se incluye el *bias* para este periodo.

Mes (2019)	Exterior	Suelo	Hall	Conjunto	IPCE
Enero	-0.18	-0.18	0.06	-0.10	-0.31
Febrero	-0.40	-0.34	0.00	-0.24	-0.34
Marzo	-0.38	-0.35	-0.01	-0.25	-0.34
Abril	-0.17	-0.18	0.08	-0.09	-0.09
Mayo	-0.38	-0.38	0.01	-0.25	-0.19
Junio	0.01	-0.21	0.00	-0.07	-0.06
Julio	-0.01	0.01	-0.09	-0.03	-0.07
Agosto	-0.11	-0.09	-0.20	-0.13	0.07

<i>bias</i>	-0.20	-0.22	-0.02	-0.15	-0.17
-------------	-------	-------	-------	-------	-------

A la vista de los resultados de la predicción operativa se puede observar que el error cometido utilizando la serie del Hall como predictor es muy bajo, un *bias* de -0.02 °C en comparación con el -0.2 °C de las series del exterior y suelo. Como ya se ha observado previamente, la variabilidad de periodo temporal corto en la serie de temperaturas del Hall es muy pequeña en comparación con las series del exterior y suelo. Esta característica le confiere una mayor estabilidad en cuanto a predicción debido a la mayor similitud en dicho comportamiento con la serie observada de Polícromos.

La predicción por conjuntos mejora ligeramente la predicción del IPCE tal y como se observa en la Figura 43. Además en todos los casos a excepción de la predicción de agosto de 2019, el valor observado se encuentra contenido en la incertidumbre proporcionada por el modelo. En el caso del IPCE no se dispone de una incertidumbre asociada al mismo.

En todos los casos se ha obtenido un *bias* negativo, eso quiere decir que se está subestimando la temperatura observada. Puesto que el límite de acceso viene definido en base a la temperatura predicha, estos resultados pueden restringir más el acceso de las visitas públicas, dando lugar a cancelaciones que en realidad no se deberían de haber producido. Por otra parte la ausencia de incertidumbre en el modelo que aplica actualmente no permite asociar una incertidumbre al límite de acceso, lo que limita el poder de decisión a la hora de permitir o restringir la entrada.

Con el objetivo de aumentar la precisión de las predicciones se podrían aplicar técnicas como el filtro de Kalman (Kalman, 1960). Se trata de un algoritmo recursivo que corrige las predicciones en base a los errores cometidos en el pasado. Este tipo de técnicas son muy utilizadas en predicción meteorológica (Cheng, 2007; Lynch, 2014).

Tal y como se ha visto, en la aplicación operativa del modelo eQM la muestra de entrenamiento se actualiza a medida que se incorporan mediciones, dando lugar a un modelo más robusto estadísticamente al albergar más casuística. Del mismo modo, al

aplicar el modelo mes a mes, según se van obteniendo observaciones, para cada mes tendremos las predicciones obtenidas a 4, 3, 2 y 1 meses vista, aportando otras fuentes que se pueden añadir a la incertidumbre de la predicción para ese mes.

En conclusión, la utilización de la aproximación eQM reduce drásticamente el número de parámetros respecto al implementado en Excel. Además permite aumentar el número de predictores, series de temperatura del exterior, suelo y Hall. De esta forma se puede plantear la aplicación del método de predicción por conjuntos “*ensemble prediction*” utilizando las predicciones de los distintos modelos. Un punto clave de este modelo es que proporciona la predicción y su incertidumbre asociada, de tal manera que se dispone de un intervalo de confianza a partir del cual se pueden tomar decisiones respecto a la aplicación de los límites de acceso de visitas públicas.

5. La ventilación natural de la cueva de Altamira

La dinámica ambiental de la cueva y los procesos de intercambio entre las zonas circundantes del sistema kárstico y del exterior determinan el riesgo de colonización bacteriana ya sea por el aporte de nutrientes o por la dispersión de microorganismos (Sánchez-Moral et al., 2014). Además, la transferencia de materia bien sea por las aguas infiltradas desde el exterior a través de los estratos rocosos o del intercambio de masas de aire definen la estabilidad climática de la cueva requerida para la conservación del arte rupestre (Villar et al., 1983; Bourges et al., 2014). Así mismo el conocimiento de dichos procesos establece una base para posteriormente analizar los posibles impactos antrópicos y sus consecuencias.

En este apartado se estudia el intercambio gaseoso de la cavidad con el exterior y se relaciona con los parámetros ambientales con el fin de conocer dicha dinámica. Los gases trazadores utilizados han sido el dióxido de carbono (CO_2) y el radón (^{222}Rn). Con el objetivo de identificar las fuentes de dióxido de carbono y sus patrones estacionales se ha estudiado la relación isotópica del carbono $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 .

El ciclo del carbono del planeta tierra está compuesto por una variedad de procesos que tienen lugar en escalas de tiempo que van desde horas hasta millones de años. Entre los procesos de escala temporal corta se incluye la fotosíntesis, la respiración, el intercambio de dióxido de carbono (CO_2) aire-mar y la acumulación de humus del suelo. En el ciclo a largo plazo se encuentra el intercambio de carbono entre rocas y el sistema superficial, compuesto por el océano, la atmósfera, la biosfera y el suelo (Berner, 2003).

El intercambio de dióxido de carbono entre el suelo y la atmósfera constituye uno de los mayores flujos dentro del ciclo de carbono. El carbono del suelo tiene origen orgánico, principalmente generado en el proceso de la fotosíntesis que realizan las plantas. La materia orgánica que se acumula en el suelo puede liberar CO_2 por procesos de descomposición microbiana o por la denominada respiración del suelo que realizan las raíces y los microorganismos asociados (Ryan & Law, 2005; Sanderman &

Amundson, 2010).

Los procesos por los cuales el CO₂ alcanza el ambiente interior de la cueva puede derivar de múltiples fuentes, incluida la respiración del suelo, el intercambio de masas de aire con la atmósfera externa, la disolución de la roca y las contribuciones del CO₂ hipogénico profundo (Lambert & Aharon, 2011). El CO₂ difunde en el agua del suelo generando H₂CO₃ con la consiguiente disminución del pH, que luego produce karstificación de roca caliza/dolomítica. Con el propósito de identificar las fuentes de dióxido de carbono en la cavidad se utilizó el análisis de la composición isotópica del CO₂, la relación entre los isótopos estables del carbono ¹³C/¹²C, denominada como δ¹³C. La unidad de concentración de CO₂ viene expresada en ppm (partes por millón) que indica el tanto por millón de volumen que ocupa este gas en el volumen de muestra total.

El radón (²²²Rn) es un gas radiactivo de origen natural que proviene de la desintegración del radio (²²⁶Ra), el cual pertenece a la cadena de desintegración del uranio (²³⁸U). El uranio y el radio son elementos que se encuentran presentes en los suelos y rocas de la corteza terrestre, en cantidades variables que dependen de su naturaleza y composición, proporcionando una fuente continua de radón. Debido a su carácter de gas noble, el radón es químicamente inerte y tiene una estructura atómica estable. Por lo tanto, su comportamiento se determina mediante procesos físicos en lugar de químicos. Esta propiedad junto con su periodo de semidesintegración de 3.8 días (Audi et al., 2017) y su carácter gaseoso, le confieren una gran movilidad y la capacidad de migrar por los poros y/o grietas del suelo dando lugar a una acumulación en lugares cerrados tales como cuevas. La unidad de concentración de radón viene expresada en Bq/m³ (bequerelios por metro cúbico) que indica el número de desintegraciones del radón por segundo en un volumen de un metro cúbico.

El gas radón se ha utilizado como trazador de procesos dinámicos en agua y aire en numerosas ocasiones (Fernández et al., 1984; Frisia et al., 2011; Kowalczk y Froelich, 2010; Sainz et al., 2016). El comportamiento fisicoquímico relativamente simple del radón le confiere una ventaja sobre otros gases trazadores, como el CO₂, que generalmente están presentes en altas concentraciones en entornos hipogeos (Batiot-

Guilhe et al., 2007; Nazaroff & Nero Jr, 1988). La generación de gas radón dentro de la cueva puede considerarse prácticamente constante ya que no hay procesos que alteren significativamente la concentración de radio de la roca o la emisión de radón sobre sus superficies. Por esta razón, el incremento en la concentración de radón dentro de una sala de la cavidad solo puede deberse a su mayor aislamiento con respecto a la atmósfera exterior, que generalmente tiene concentraciones de radón muy bajas (Gunning et al., 2014), o al suministro de aire desde salas adyacentes que contienen concentraciones más altas. Del mismo modo, la reducción en la concentración en dicha sala solo puede producirse por desintegración radiactiva o debido a un suministro de aire con una concentración más baja del gas, generalmente desde ubicaciones más superficiales o externas.

5.1. Gases trazadores

La diferencia entre los parámetros ambientales del exterior y el interior de la cavidad tales como la temperatura, la presión y la densidad del aire juegan un papel fundamental en el intercambio gaseoso entre ambas atmósferas. Los gradientes de temperatura del aire y presión dan lugar a variaciones de densidad que, por acción gravitatoria, provocan movimientos advectivos. El estudio del intercambio gaseoso entre la cueva y el exterior se ha evaluado a partir de la diferencia de densidades del aire entre ambas atmósferas. El cálculo de la densidad del aire en cada caso difiere de forma sustancial debido al elevado contenido en humedad y CO₂ de la atmósfera interior tal y como se describe en el apartado 5.1.1.

Para evaluar las tasas de intercambio entre la sala de Policromos, el Hall y el exterior se ha utilizado el modelo simplificado de Wilkening (1976), empleado por Fernández et al. (1986) dentro de los estudios que llevó a cabo la Universidad de Cantabria en el proyecto científico-técnico liderado por Eugenio Villar. La metodología aplicada se describe en el apartado 5.1.2.

En el apartado 5.1.3 se detalla el fundamento teórico de la utilización de la relación isotópica del carbono $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$) y la metodología empleada para identificar el origen y los patrones estacionales del CO₂ en el caso que nos ocupa.

5.1.1. Densidad del aire

El estudio de la dinámica de gases dentro de cuevas superficiales con la misma configuración que la de Altamira, ha revelado que la circulación convectiva de aire está principalmente dominada por la diferencia de densidad del aire entre el interior de la cueva y el exterior. El cálculo de la densidad del aire se puede estimar a partir de la presión, la temperatura, del contenido de vapor de agua y de la concentración de CO₂ de la atmósfera. A continuación se desarrolla el cálculo de la densidad del aire para el exterior y para el ambiente interior de la cueva (Cuezva, 2008). Las características de los dispositivos utilizados para la medida de la temperatura y de la presión atmosférica se especifican en el apartado 2.1.

Para el cálculo de la densidad del aire se asume una mezcla de gases perfectos a los cuales se les puede aplicar la ecuación que rige este tipo de gases por separado. Además según la ley de las presiones parciales de Dalton, la presión total de la mezcla es la suma de la presión parcial ejercida por cada gas. En el caso de la densidad del aire en el exterior se tiene en cuenta la presión ejercida tanto por el aire seco como por el vapor de agua.

La ecuación para obtener la densidad del aire en el exterior es por tanto:

$$\rho_{\text{exterior}} \text{ (g / L)} = \frac{M_d (P - P_v) + M_v \cdot P_v}{R \cdot (T + 273.15)} \quad (9)$$

donde:

$M_d = 28.97$ g/mol: masa molar de aire seco

$M_v = 18.02$ g/mol: masa molar de vapor de agua

P (atm): presión atmosférica

P_v (atm): presión parcial de vapor de agua

T (°C): temperatura de aire

$R = 0.08205746 \text{ atm}\cdot\text{L} / (\text{mol}\cdot\text{K})$: es la constante universal de los gases ideales

En el ambiente de la cueva además de la mezcla de aire seco con vapor de agua se tiene en cuenta el aporte que hace el CO_2 a la densidad del aire debido a sus altas concentraciones y a su elevado peso molecular. La densidad del aire de la cueva teniendo en cuenta la presión parcial de CO_2 P_{CO_2} :

$$\rho_{\text{cueva}} \text{ (g / L)} = \frac{M_d \cdot (P - P_v - P_{\text{CO}_2}) + M_v \cdot P_v + M_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}}{R \cdot (T + 273.15)} \quad (10)$$

siendo

$M_d = 28.95 \text{ g/mol}$: masa molar de aire seco sin CO_2

$M_{\text{CO}_2} = 44.01 \text{ g/mol}$: masa molar de CO_2

$P_{\text{CO}_2} \text{ (atm)}$: presión parcial de CO_2

La presión de vapor P_v se obtiene a partir de la presión de vapor de saturación $P_{v \text{ sat}}$ y de la humedad relativa HR .

$$P_v = P_{v \text{ sat}} \frac{HR(\%)}{100} \quad (11)$$

La presión de vapor de saturación se puede obtener a partir de la ecuación de Magnus-Tetens:

$$P_{v \text{ sat}} \text{ (atm)} = \frac{6.112}{1013.25} \exp\left(\frac{a \cdot T(^{\circ}\text{C})}{b + T(^{\circ}\text{C})}\right) \quad (12)$$

con $a=17.37$ y $b=238.38$ (Buck, 1981).

La presión parcial de CO_2 :

$$P_{\text{CO}_2} \text{ (atm)} = 10^{-6} [\text{CO}_2 \text{ (ppm)}] \cdot (P - P_v) \quad (13)$$

donde $[\text{CO}_2 \text{ (ppm)}]$: concentración de CO_2 en el aire

Para realizar el estudio de la dinámica atmosférica de la cueva se ha considerado la sala de Polícromos por razones evidentes y el Hall por ser la sala más conectada con el exterior tal y como muestra la evolución de su temperatura. Se ha realizado un estudio de correlaciones de la diferencia de densidad, temperatura y presión de ambas salas con el exterior, con el fin de encontrar los parámetros y las condiciones que controlan los movimientos de masas de aire entre la cueva y el exterior.

5.1.2. Evaluación de tasa de ventilación

Con el propósito de evaluar la tasa de intercambio de aire entre la sala de Polícromos y el exterior, se ha utilizado el modelo simplificado de Wilkening & Watkins (1976). Este modelo matemático considera que la variación de la concentración de radón en una estancia varía de acuerdo con la cantidad exhalada por la superficie rocosa, la cantidad que desaparece por desintegración y la variación producida por intercambio de masas de aire con otras salas o con el exterior. Conforme con la descripción anterior, la variación de la concentración de radón en la sala se puede formular como:

$$\frac{dC}{dt} = E \frac{S}{V} - \lambda \cdot C - \frac{Q}{V} (C - C') \quad (14)$$

con:

E ($\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$): tasa de exhalación de radón a través de la superficie rocosa S

S (m^2): superficie de roca

$V = 342 \text{ m}^3$: volumen de la sala de Polícromos

$\lambda = 0.0076 \text{ h}^{-1}$: constante de decaimiento del Rn

Q (m^3/h): tasa de intercambio de aire

C' (Bq m^{-3}): concentración de radón en la sala con la cual intercambia aire

Suponiendo que cuando la concentración en la sala de Polícromos alcanza su valor máximo el intercambio es prácticamente nulo, la tasa de intercambio de obtiene como (Fernández et al., 1986; Sainz et al., 2018):

$$Q = \lambda \cdot V \cdot \frac{(C_{\max} - C)}{(C - C')} \quad (15)$$

donde C_{\max} es la concentración máxima anual en la sala de Polícromos. Para estimar la tasa de intercambio de aire con el exterior se asume que la concentración de radón en el exterior es prácticamente cero, por lo tanto $C' \approx 0$.

Se ha estimado la tasa de ventilación entra la sala de Polícromos y el exterior se ha obtenido a partir del promedio mensual de concentración de radón y el valor máximo absoluto de concentración de radón monitorizado.

5.1.3. Composición isotópica $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2

La relación entre los isótopos estables del carbono $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, comúnmente denominada como $\delta^{13}\text{C}$, se utiliza como trazador de procesos naturales en ambientes kársticos. De este modo la composición isotópica del CO_2 en atmosferas subterráneas aporta información en el sentido de identificar las fuentes de dióxido de carbono y los patrones estacionales que controlan la distribución espaciotemporal en las cuevas (Mandic et al., 2013).

En condiciones naturales, el CO_2 de la atmosfera de la cueva puede provenir de varias fuentes, incluyendo la descomposición de la materia orgánica del suelo junto con las raíces de las plantas, la respiración microbiana, el intercambio de masas de aire con el exterior, la disolución de la roca y las contribuciones hipogénicas profundas (Lambert & Aharon, 2011). Los valores característicos de $\delta^{13}\text{C}$ en las fuentes de CO_2 antes mencionadas permiten rastrear el origen y la dinámica del CO_2 en la cueva (Gázquez et al., 2016).

La señal isotópica $\delta^{13}\text{C}$ se obtiene como:

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{muestra}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{estándar}}} - 1 \right) \cdot 1000 \text{ (‰)} \quad (16)$$

siendo $\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{muestra,estándar}}$ la relación isotópica de la muestra y del estándar internacional respectivamente. El patrón adoptado internacionalmente de la relación

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ se denomina PDB (Pee Dee Belemnite), toma un valor de 0.0112372 y se establece como valor cero (0‰). Está basado en un fósil marino del Cretácico, *Belemnitella americana*, de la Formación Peedee en Carolina del Sur.

En una escala global, el $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 troposférico tiene una media de alrededor de -8‰ (Verburg, 2007) por lo que se puede distinguir fácilmente del CO_2 edáfico, que tiene un $\delta^{13}\text{C}$ más negativo, entre -26‰ y -12.5‰, dependiendo de la cubierta vegetal predominante en el entorno de la cueva, es decir, vegetación tipo C3 frente a vegetación tipo C4. En el proceso de absorción fotosintética de CO_2 de la vegetación terrestre se realiza una discriminación entre cada isótopo del carbono, dando prioridad al ^{12}C frente al ^{13}C . De esta manera el dióxido de carbono proveniente de los vegetales contiene una menor proporción de ^{13}C que el correspondiente al atmosférico.

La toma de muestras para analizar el $\delta^{13}\text{C}$ se ha llevado en 26 localizaciones el aire interior de la cueva, en dos zonas de goteo de agua y en 3 puntos del suelo exterior tal y como se muestra en la Figura 44. El muestreo de aire en el suelo se realizó mediante tres cámaras edáficas de polietileno de baja densidad de 20 cm de altura ($\sim 750 \text{ cm}^3$) con múltiples orificios en la parte inferior para permitir el intercambio de aire con el suelo. La periodicidad del muestreo ha sido cada dos meses entre marzo de 2013 y agosto de 2015. Para la toma de muestra tanto del aire como del agua se han utilizado viales de vidrio de borosilicato (Labco Limited) con una capacidad de 12 ml. En el caso de las muestras de goteo se ha añadido una gota de solución saturada de ZnCl_2 . Las muestras fueron analizadas en la Instalación de Isótopos Estables de la Universidad Davis (California, EE. UU.) dentro de los 15-30 días posteriores al muestreo. Los detalles paso a paso del muestreo en cada caso se especifican en Gázquez et al. (2016).

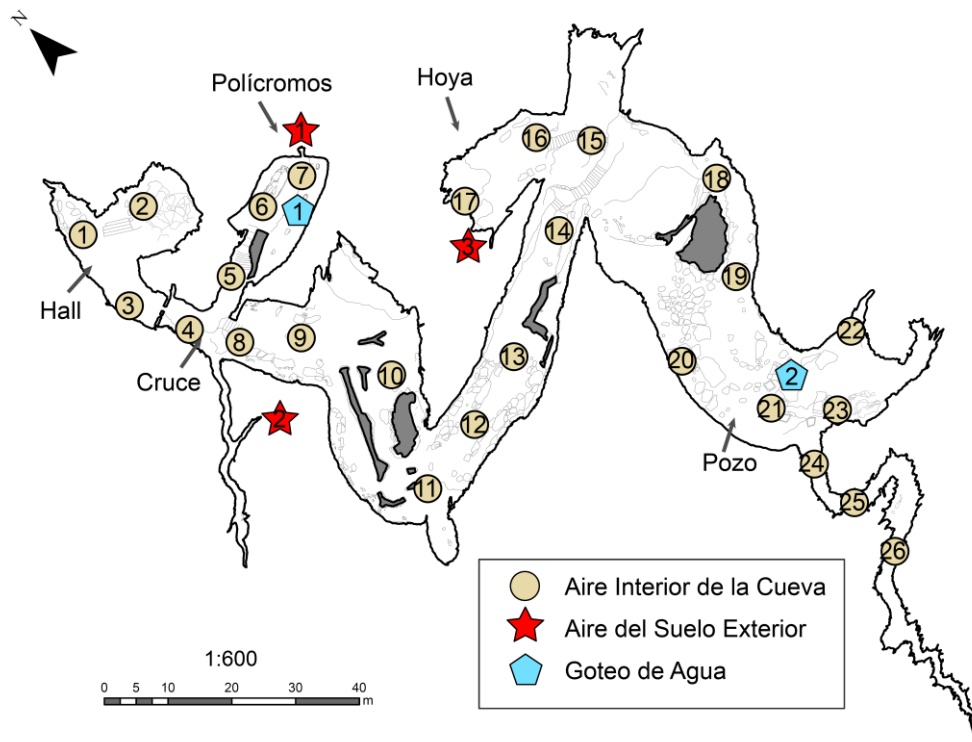


Figura 44. Localización de los puntos de muestreo de aire y goteo en el interior de la cueva y de aire del suelo exterior para analizar la composición isotópica $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 .

5.2. Sistemas de medida de gases

A continuación se describen las características técnicas de los sistemas de medida de CO_2 y radón así como la metodología empleada y localización de los puntos de muestreo.

5.2.1. Sistemas de medida de CO_2

Las medidas de CO_2 tanto en el interior de la cavidad como en exterior se han llevado en continuo a través de las estaciones de monitorización y de forma puntual en cada visita de seguimiento ambiental. Para el registro en continuo se dispone de un sensor de CO_2 (Sensor EE82) en cada una de las estaciones de monitorización. El registro de datos de las estaciones se realiza cada 15 minutos a excepción de la sala de Polícromos en la cual el intervalo de registro es de 1 minuto. En cada entrada a la cueva, el equipo de seguimiento ambiental toman valores puntuales con el equipo manual testo 445 más sonda de CO_2 con una periodicidad de dos semanas.

Las especificaciones de cada uno de los equipos de medida de dióxido de carbono en la cueva que se muestran en la Figura 45 son:

- Sensor EE82: rango de medida de 0 a 10000 ppm. Resolución 0.01 ppm. Precisión $\pm(100 \text{ ppm} + 5\% \text{ del valor medido})$.
- Testo 445 más Sonda CO₂: rango de medida de 0 a 10000 ppm. Resolución 1 ppm. Precisión $\pm(100 \text{ ppm} + 3\% \text{ del valor medido})$.

Ambos dispositivos han sido calibrados por el laboratorio de calibración Instrumentos Testo S.A. (Acreditación N° 124/LC 10.091).

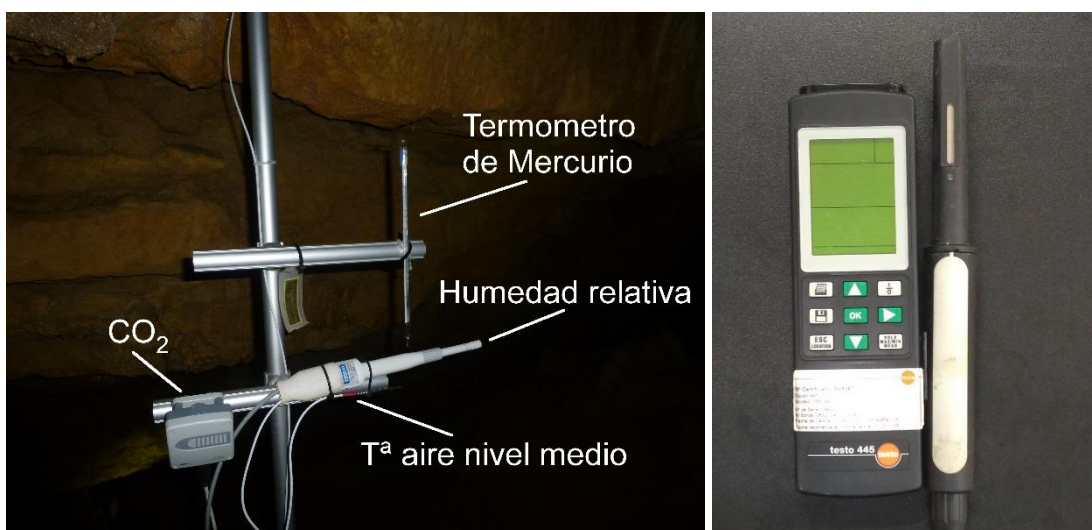


Figura 45. Dispositivos para la medida de la concentración de CO₂ en la cueva de Altamira. Izquierda: Sensor EE82 y sistemas de temperatura y humedad en la estación de monitorización a media altura. Derecha: Sensor Testo 445 utilizado para la toma de muestra puntual.

En la Figura 46 se muestra la localización de las estaciones de monitorización ubicadas dentro de la cueva y en el exterior en las cuales se sitúa el sensor EE82 a media altura. Adicionalmente se pueden observar los puntos de muestreo periódicos realizados in situ cada dos semanas por el equipo de la Universidad de Cantabria con el dispositivo Testo 445.

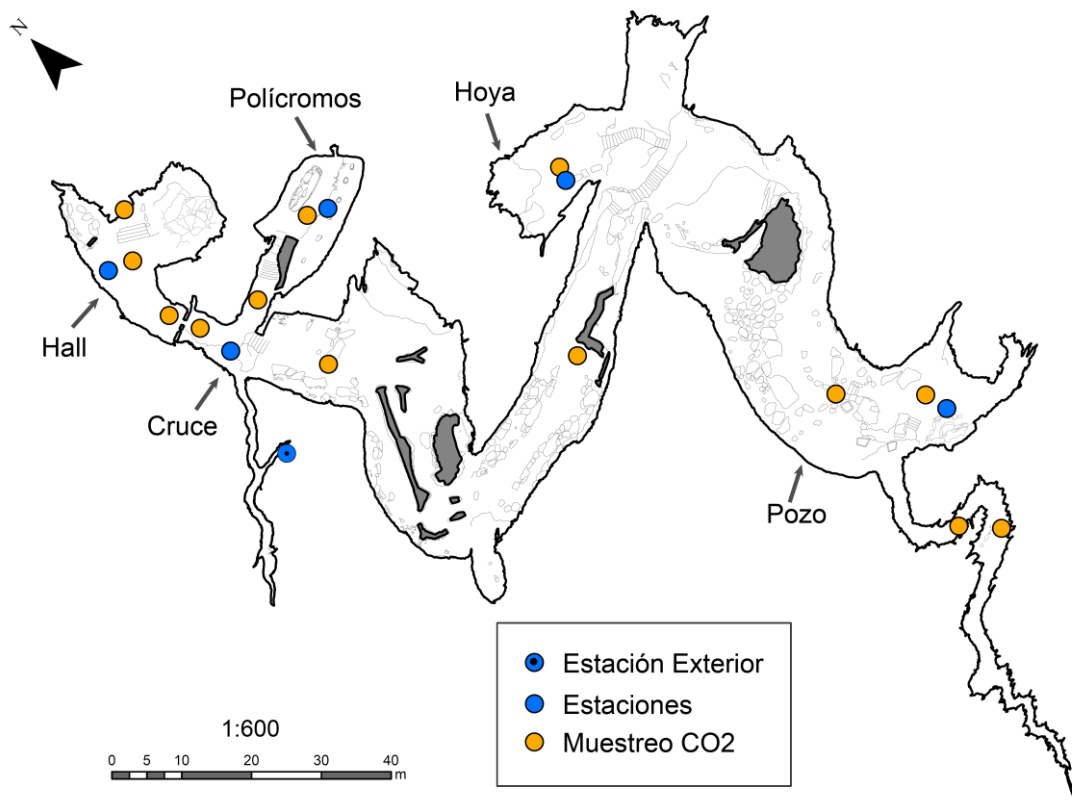


Figura 46. Localización de los sistemas de medida de CO₂ empleados en el interior y exterior de la cueva de Altamira.

El control de calidad de las medidas de concentración de CO₂ se realiza de dos maneras. Por una parte se realiza periódicamente una comparación entre un sensor auxiliar calibrado y el correspondiente al de la estación de monitorización. Por otra parte se realizan verificaciones puntuales en cada una de las visitas de seguimiento ambiental.

El procedimiento de verificación con el sensor auxiliar se describe a continuación. Se toma un sensor de medida de la concentración de CO₂ EE82 calibrado, de las mismas características que el ubicado en la estación, y se sitúa junto a este durante un tiempo aproximado de una semana registrando datos. Se aplican los factores de corrección correspondientes al sensor auxiliar patrón de acuerdo con el certificado de proporcionado por el laboratorio de calibración acreditado y se comparan los resultados de ambos sensores. Este procedimiento se repite para cada una de las estaciones tanto de la cueva como para la del exterior. A partir de ambas series de datos

se puede obtener un factor de corrección para el sensor de la estación el cual se introduce en la correspondiente plantilla mensual.

Como control rutinario, en cada una de las visitas del seguimiento ambiental se realizan medidas de CO₂ con el dispositivo manual Testo 445 en cada uno de los puntos marcados en color naranja en la Figura 46. La verificación de las sondas de la estación se hace a posteriori comparando el valor obtenido in situ con el correspondiente a la descarga de datos vía internet del sensor ubicado en la estación.

5.2.2. Sistemas de medida de radón

En el interior de la cueva de Altamira se realizan dos tipos de medidas de radón. La primera implica monitores en continuo localizados en el Hall, en la sala de Polícromos y en el Pozo, los cuales proporcionan valores de la concentración de radón en intervalos de 1 hora. Además, en todas las salas de la cueva se usan detectores de trazas CR-39 que ofrecen un valor promedio de la concentración de radón durante el periodo de exposición.

El monitor Radon Scout (SARAD GmbH) es un instrumento electrónico que se utiliza para la medida en continuo de la concentración de radón. Las medidas se realizan en intervalos de tiempo de 1 hora que son almacenadas en la memoria que permite la acumulación de datos correspondientes a series temporales de más de 2 meses. Mediante esta técnica se obtiene información detallada de las variaciones de concentración que se producen en el tiempo.

La parte sensible del Radon Scout consta de un detector de silicio dentro de una cámara en cuyo volumen hay un campo eléctrico generado por el alto voltaje aplicado entre el detector y la pared de la cámara. El radón entra en la cámara por difusión, durante su desintegración emite una partícula alfa que provoca que su descendiente el ²¹⁸Po quede ionizado positivamente y posteriormente adherido al detector por efecto del campo eléctrico. La energía cedida por las partículas alfa de los descendientes del radón genera pulsos eléctricos proporcionales a la energía absorbida a partir de las cuales se puede obtener la concentración de radón. El rango de concentraciones que puede medir este dispositivo va desde 0 hasta 10 MBq/m³. La sensibilidad del detector

es de 1.8 cpm a una concentración de 1 kBq/m³. La incertidumbre asociada a la medida varía desde el 20% al 10% en el rango de concentraciones de 100-1000 Bq/m³ respectivamente. El esquema del detector y la fotografía del Radon Scout se pueden ver en la Figura 47.

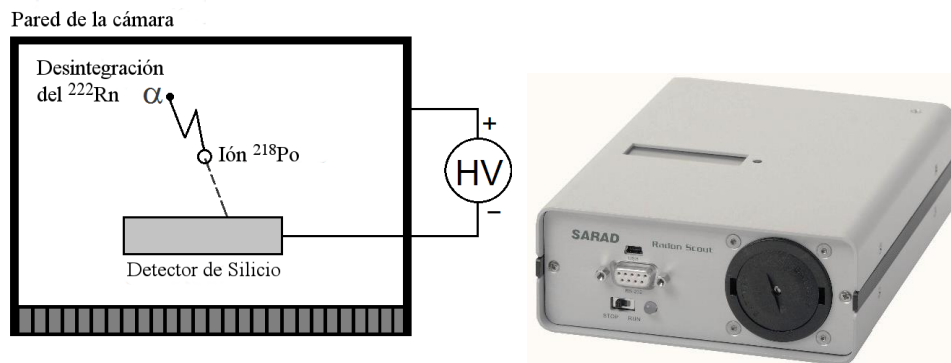


Figura 47. Esquema de detección de radón del dispositivo Radon Scout (modificado de Fuente, 2019) e imagen del mismo.

La principal dificultad que presenta la medida en continuo de la concentración de radón en ambientes subterráneos es la elevada humedad relativa que habitualmente la atmósfera de la cueva presenta de manera continua. Además de los posibles daños en los componentes electrónicos de los monitores, la elevada humedad puede modificar la eficiencia de detección en los sistemas de medida basados en la recolección electrostática de descendientes del radón (George, 1996). Con el fin de minimizar la influencia de la humedad del ambiente en el funcionamiento de los monitores en continuo, éstos se introducen en una bolsa de plástico de baja densidad impermeable al agua, pero que permite el paso de radón a través de su superficie por difusión. Siguiendo el procedimiento descrito en Moreno et al. (2015) se ha comprobado en atmósfera controlada de radón, que la medida realizada en el interior de las bolsas produce un retraso inicial en la respuesta a los cambios de concentración de entre 3 y 6 horas. Por esta razón, se desechan las medidas correspondientes a los 10 primeros registros.

Por otro lado, para la medida de la concentración de radón se han usado detectores de trazas pasivos CR-39 modelo RSKS (Radosys Ltd.). Este sistema está constituido

por un detector de 100 mm², con una superficie efectiva de 51.69 mm², formado por un polímetro, y por un contenedor o cámara de difusión de 29 cm³ de volumen (diámetro 26 mm y altura 55 mm) que solo permite la entrada de radón y no de sus descendientes a su interior (ver Figura 48). La detección de radón con este tipo de detector se basa en el efecto que producen las partículas alfa en el polímero. Este proporciona valores de exposición, es decir, aporta información de la concentración de radón media durante el tiempo en el que ha estado expuesto.

Las partículas alfa del radón y sus descendientes dejan huellas en el detector las cuales son descubiertas mediante un revelado químico con una disolución de agua destilada e hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración 6.25 mol/L y una temperatura de 90 °C durante un tiempo determinado por el fabricante normalmente de 4.5 horas. El conteo de la densidad superficial de trazas (trazas/mm²) se hace de forma automática con un microscopio óptico. Conocido el factor de calibración, que relaciona la densidad de trazas con la exposición de radón (kBq m⁻³ h) y el tiempo de exposición (h), se puede obtener la concentración de radón media en dicho periodo. La sensibilidad típica de este tipo de detector es de 2.0 trazas/cm² para una exposición de 1 kBq m⁻³ h. La incertidumbre es aproximadamente un 10% para el rango de exposiciones de 500-1500 kBq m⁻³ h.

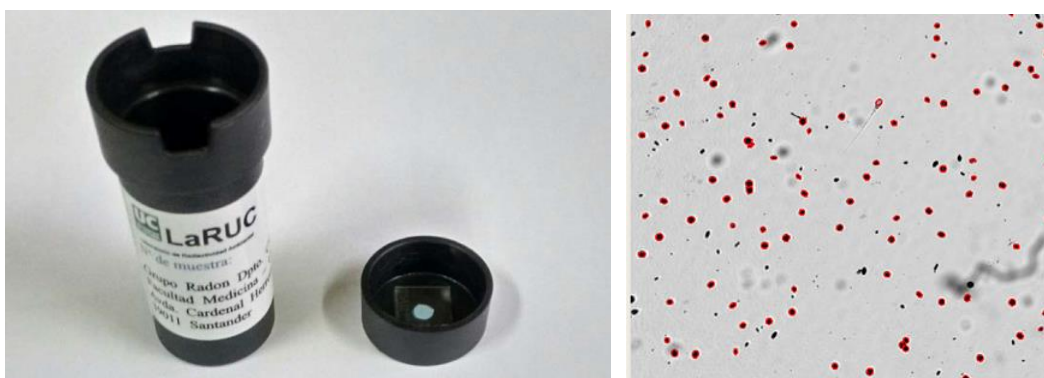


Figura 48. Fotografía del detector CR-39 situado en la tapa de la cámara de difusión e imagen del microscopio en el que se pueden observar las trazas marcada en rojo por el software del microscópico óptico.

Todas las medidas de radón son sometidas a un doble control de calidad de forma continua y periódica. Los monitores Radon Scout se calibran cada seis meses en la

cámara de radón del LaRUC y se realiza una verificación intermedia en el caso de encontrarse algún tipo de anomalía en la medida. El procedimiento de calibración y la evaluación de la respuesta de los monitores de radón se detalla en Fuente et al. (2018) y Núñez (2019). Del mismo modo, el factor de calibración de los detectores CR-39 proporcionado por el fabricante es verificado en la cámara. Además, el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria (LaRUC) está acreditado conforme a la norma ISO 17025 para medidas de radón en aire con detectores pasivos (nº de acreditación 1204/LE2219), lo cual supone un riguroso control de calidad de todo el proceso de medida que incluye, entre otras, la participación periódica en ejercicios internacionales de intercomparación tales como el que se describe en Rabago et al. (2019).

Un elemento indispensable para el control de calidad en la medida del Rn es la cámara de radón, contenedor en el cual se crea una atmosfera controlada de radón de referencia con trazabilidad a patrones internacionales. En el LaRUC se dispone de una cámara de radón cúbica de acero inoxidable de 1 m³ cuyas paredes de espesor 3.25 mm están soldadas entre sí. La cámara está preparada para la exposición simultánea de diversos sistemas de detección de radón, y dispone de conexiones eléctricas con el exterior para alimentar aquellos equipos que así lo precisen. El acceso a la cámara se realiza retirando la tapa superior de la cámara, a la cual también permite acceder mediante tres agujeros de 80 mm de diámetro (Fuente et al., 2018). Con el fin de homogeneizar la concentración interior se dispone de un ventilador. Esta cámara cumple con los requerimientos mínimos de un *System for Test Atmospheres with Radon (STAR)* según la norma IEC 61577-4 (2009)

La concentración de radón interior se genera mediante fuentes de radón cuya tasa de emisión disponible actualmente en el laboratorio va hasta los 1100 Bq/h. El control de la concentración se realiza mediante el intercambio gaseoso con el aire exterior, lo que permite modificar la concentración en función del nivel deseado.

Los equipos de referencia utilizados con trazabilidad al patrón primario de radón de la PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt) (Alemania) son el Atmos12 (Gammadata Instruments AB), calibrado en la cámara de radón de la BfS (Bundesamt

für Strahlenschutz), y el AlphaGUARD (SAPHIMO GmbH) calibrado por el fabricante.

La homogeneidad de la concentración de radón en el interior se consigue con el uso de un pequeño ventilador, garantizando que las diferencias de concentración dentro de la cámara sean inferiores al 3%. La hermeticidad del conjunto se garantiza con el sellado de los cierres usando materiales de bajo coeficiente de difusión para el gas radón, consiguiéndose una tasa de intercambio con el exterior inferior a 10^{-3} h^{-1} (Núñez, 2019).

De manera rutinaria y cada 14 días se sustituyen los detectores CR-39 y los monitores en continuo de cada uno de los puntos de medida situados en la cavidad (ver Figura 49). Los detectores de trazas se sitúan en el Hall, Pasillo, Sala de Polícromos, 2º Ramal, Hoya y Pozo. Para obtener un mayor detalle de la variación de la concentración de radón se han colocado dispositivos Radon Scout junto a los detectores de trazas del Hall, de la sala de Polícromos y del Pozo.

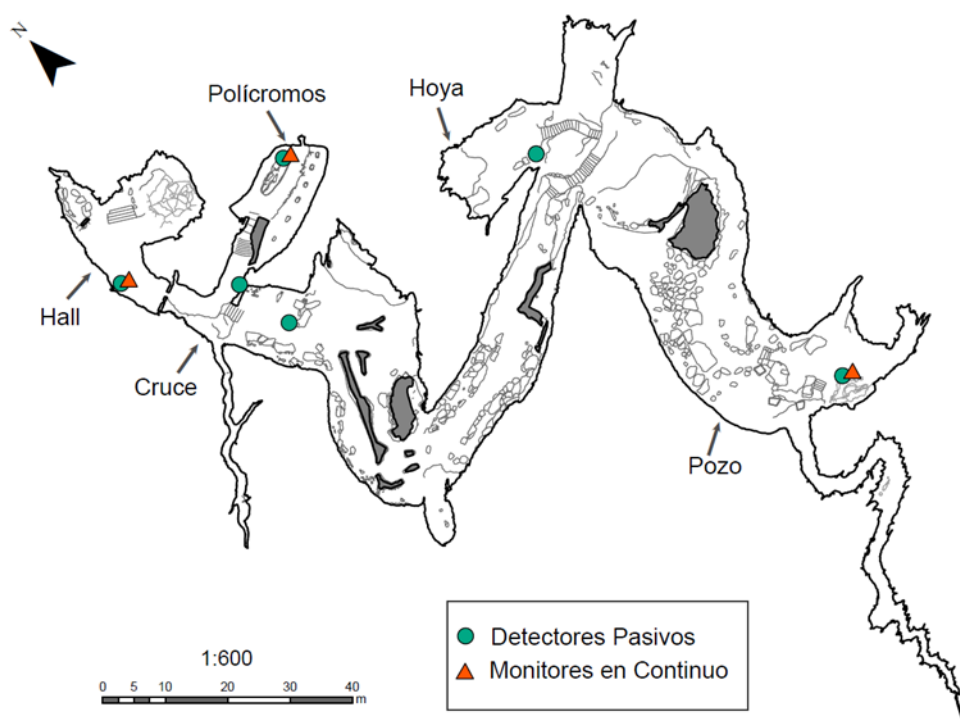


Figura 49. Localización de los sistemas de medida de radón empleados en el interior de la cueva de Altamira.

5.3. Resultados

En este apartado se presentan las series temporales de concentración de CO₂ y radón para el periodo de julio 2013 a agosto 2019 en interior de la cueva de Altamira, apartados 5.3.1 y 5.3.3 respectivamente. La identificación de las fuentes de CO₂ en el ambiente interior se ha llevado a cabo a través del análisis de la relación isotópica del carbono (ver apartado 5.3.2). El estudio de la dinámica de los gases traza empleados se ha realizado en base al estudio de la diferencia de densidad, temperatura y presión entre la atmósfera interior de la cueva y el exterior (ver apartado 5.3.4). La tasa de intercambio de aire entre la sala de Polícromos y el exterior se ha evaluado en base a un modelo matemático, los resultados se muestran en el apartado 5.3.5.

5.3.1. Series temporales de CO₂

La concentración de CO₂ en la cueva de Altamira presenta una media anual aproximada en el rango 2000-3000 ppm durante el periodo de estudio, dependiendo de la zona de la cavidad y del año seleccionado. El comportamiento de este gas tiene un marcado carácter estacional. Hay un predominio del intercambio gaseoso con el exterior en la época estival y un escaso intercambio en invierno. Entre ambas situaciones se encuentran la primavera y el otoño como periodos de transición, donde se inician los procesos de desgasificación y recarga de gases respectivamente.

Los valores medios mensuales máximos se encuentran típicamente en los meses entre noviembre y mayo, con concentraciones superiores a 3000 ppm, mientras que los valores mínimos corresponden a los meses entre de junio y septiembre, con concentraciones inferiores a 1000 ppm. Los meses de mayo-junio y septiembre-octubre juegan un papel de periodos de desgasificación y recarga respectivamente. Conforman la transición entre los periodos de concentración máxima; mínimo intercambio con el exterior, y mínima concentración; máximo intercambio con el exterior.

En la Figura 50 se muestra la medida mensual de la concentración de dióxido de carbono en cada una de las salas monitorizadas para el periodo de estudio cuyos valores numéricos se presentan en la Tabla 17.

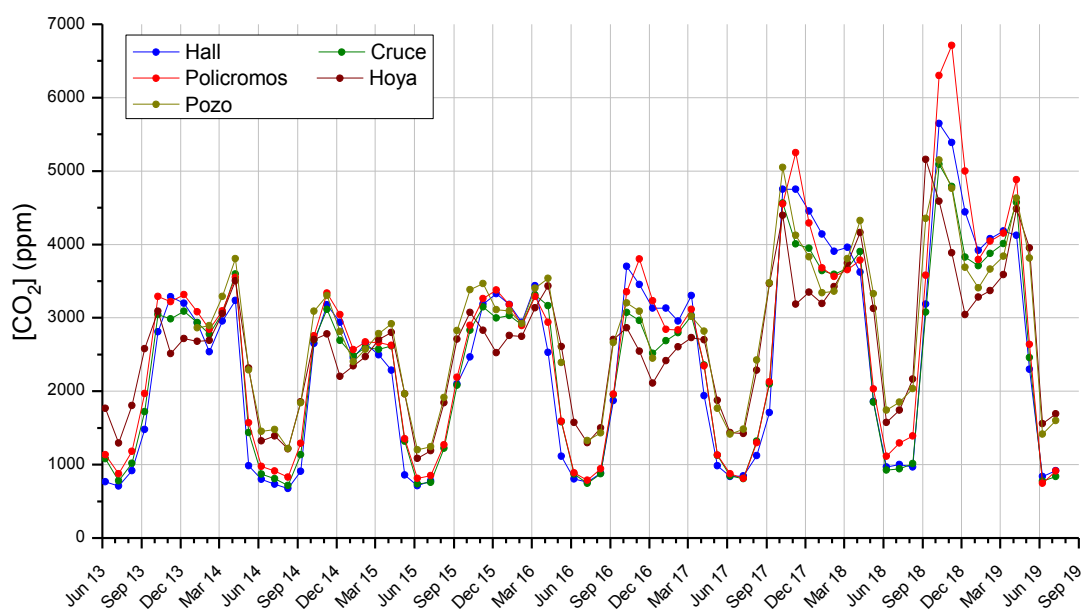


Figura 50. Concentración de CO₂ media mensual en la cada una de las salas de la cueva de Altamira. Valores obtenidos de las estaciones de monitorización en base a los datos registrados cada quince minutos.

En la Figura 50 se intuye como en el Hall normalmente alcanzan valores más bajos en el periodo estival, esto indica que esta sala tiene una mayor conexión con el exterior. En la situación opuesta se encuentran las salas de la Hoya y del Pozo cuyas medias mensuales mínimas se encuentran en torno a 1500 ppm mientras que las del Hall, Cruce y Polícromos son inferiores a 1000 ppm. En los periodos de desgasificación y recarga la concentración de CO₂ en el Hall se sitúa por debajo de las demás, lo cual pone de manifiesto ese mayor intercambio de aire con el exterior. Sin embargo, en el periodo de aislamiento no se encuentra un patrón de la concentración de una salas superiores a las otras como en los otros periodos, excepto para la Hoya que tiene valores máximos mensuales más bajos que las otras salas, esto puede deberse al menor aporte de CO₂ de la cobertera por el mayor espesor de roca de techo ya que la fuente principal de CO₂ en la cueva de Altamira procede a la cobertera edáfica tal y como muestran el análisis de la composición isotópica $\delta^{13}\text{C}$ del apartado 5.3.2.

Se destacan los valores inusualmente altos, respecto al histórico disponible, de la concentración de CO₂ en los periodos de aislamiento entre los meses de noviembre a marzo a partir del periodo de recarga iniciado en septiembre de 2017. De manera

5. La ventilación natural de la cueva de Altamira

general en todas las salas de la cavidad los valores medios mensuales son superiores a los correspondientes de los años 2013-2017. Tomando como referencia la sala de Polícromos, el promedio de CO₂ en el periodo de noviembre 2016-marzo 2017 es de 3200 ppm, en el periodo noviembre 2017- marzo 2018 es de 4300 ppm y en el caso de noviembre 2018- marzo 2019 se tiene una media de 5200 ppm. Por lo tanto se ha incrementado un 34% y un 63% en los periodos de noviembre a marzo en los años correspondientes a 2017-2018 y 2018-2019 respectivamente.

Tabla 17. Concentración de CO₂ media mensual en la cada una de las salas de la cueva de Altamira.

Hall												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013							767	709	915	1479	2809	3288
2014	3197	2932	2538	2954	3237	982	801	731	672	910	2650	3177
2015	2939	2455	2649	2495	2286	858	713	778		2096	2466	3185
2016	3330	3182	2937	3436	2527	1115	804	764	883	1870	3702	3452
2017	3130	3132	2957	3304	1936	984	837	846	1124	1710	4752	4753
2018	4454	4142	3906	3962	3622	1860	968	1002	967	3186	5648	5389
2019	4443	3918	4080	4180	4124	2300	838	915				

Cruce												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013							1080	780	1019	1719	3044	2984
2014	3090	2934	2775	3068	3596	1437	869	806	714	1136	2698	3116
2015	2694	2481	2597	2572	2617	1318	738	757	1221	2082	2829	3148
2016	2996	3033	2907	3312	3166	1582	872	745	874	1951	3074	2963
2017	2515	2686	2797	3029	2358	1127	844	808	1317	2097	4564	4008
2018	3949	3644	3591	3675	3903	1850	927	941	1013	3079	5091	4790
2019	3825	3710	3877	4009	4573	2456	776	837				

Polícromos												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013							1134	873	1180	1966	3289	3220
2014	3317	3080	2844	3092	3552	1568	974	912	828	1289	2755	3335
2015	3043	2566	2669	2661	2624	1354	812	850	1269	2189	2896	3263
2016	3377	3179	2893	3289	2937	1592	887	785	942	1961	3354	3802
2017	3233	2843	2836	3114	2344	1131	876	811	1298	2126	4552	5249
2018	4293	3678	3561	3657	3786	2031	1114	1293	1388	3581	6300	6710
2019	4999	3794	4046	4154	4883	2637	743	912				
Hoya												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013							1767	1293	1806	2579	3091	2512
2014	2718	2678	2690	3058	3504	2315	1323	1388	1216	1855	2706	2778
2015	2202	2345	2469	2705	2802	1962	1086	1187	1842	2707	3074	2830
2016	2524	2761	2748	3137	3435	2610	1576	1296	1498	2704	2865	2545
2017	2109	2415	2603	2730	2701	1876	1435	1423	2285	3467	4395	3187
2018	3348	3195	3423	3741	4161	3129	1576	1742	2165	5158	4589	3887
2019	3044	3283	3369	3588	4486	3950	1559	1689				
Pozo												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013												
2014		2865	2892	3290	3805	2289	1454	1478	1219	1844	3088	3303
2015	2815	2402	2570	2782	2918	1964	1203	1245	1915	2827	3383	3468
2016	3109	3094	2922	3404	3536	2390		1326	1431	2661	3203	3088
2017	2449			3017	2819	1766	1414	1481	2426	3473	5049	4122
2018	3831	3342	3362	3807	4323	3329	1743	1849	2035	4352	5149	4764
2019	3688	3410	3664	3838	4631	3815	1416	1600				

La tendencia general de la concentración de dióxido de carbono en la cueva se ha analizado a partir de la concentración media mensual. Sin embargo en dicha escala temporal no se aprecian variaciones de periodo medio, en el intervalo semanal, y de periodo corto, en el intervalo diario. Este tipo de variaciones de periodo medio y corto se producen en todas las épocas del año y son más acusadas en el Hall.

En los meses típicamente de aislamiento comprendidos entre noviembre y mayo, en los cuales la concentración media mensual es máxima, se observan variaciones en el Hall de periodo corto en tiempo inferior a 12 horas, partiendo de niveles superiores a 3000 ppm hasta niveles por debajo de 1500 ppm tal como muestra la Figura 51. Dichas variaciones tan acusadas no se aprecian en la sala de Polícromos.

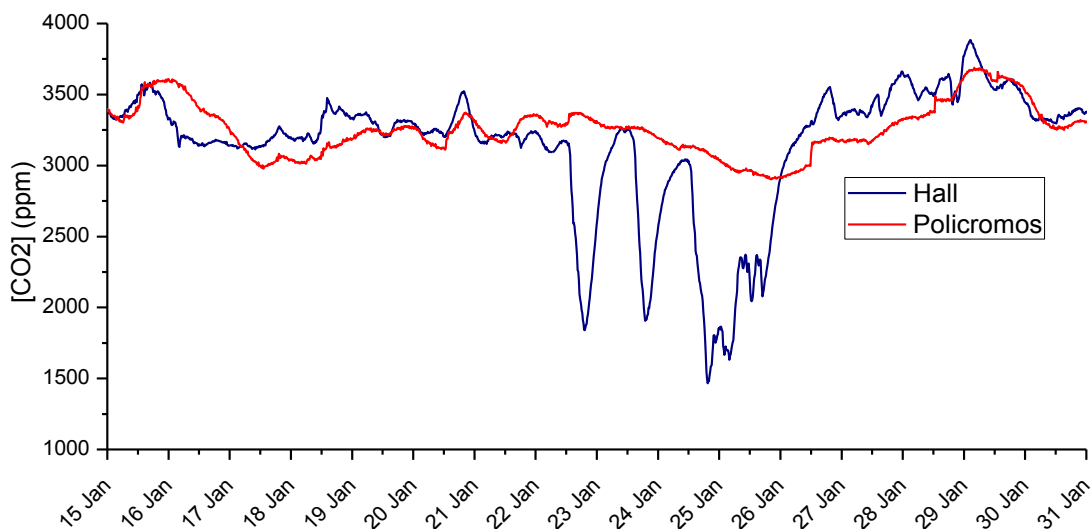


Figura 51. Variación de CO₂ de periodo corto en el Hall durante el periodo típico de aislamiento durante la primera quincena de enero del año 2016.

En el caso de la concentración de CO₂ de la sala de Polícromos los niveles se mantienen muy parejos a los del Hall, sin embargo, la variación absoluta en las desgasificaciones y recargas son mucho menores aunque coincidentes temporalmente con las de la sala citada tal y como ilustra la Figura 52.

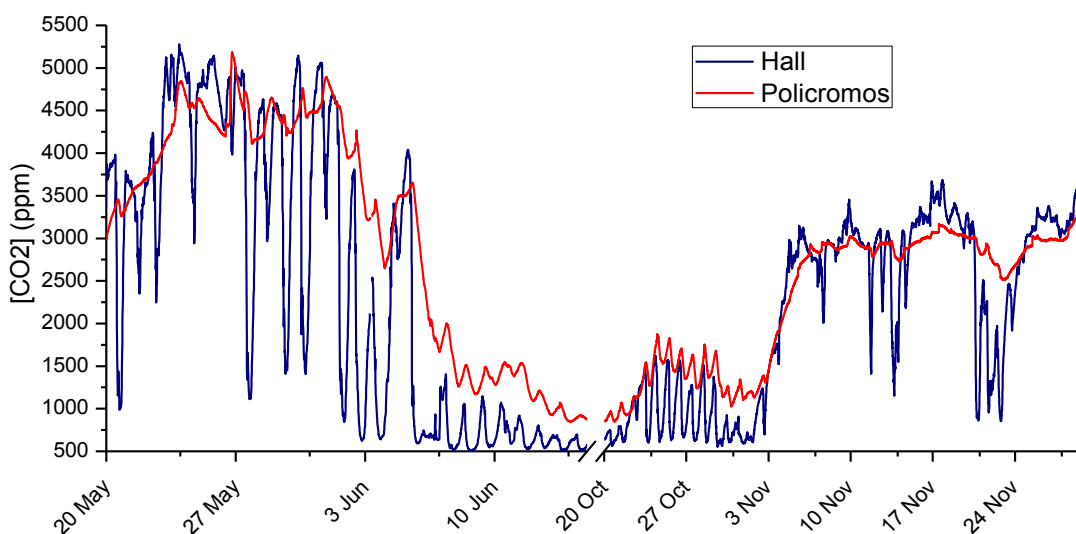


Figura 52. Ejemplo de periodos de desgasificación y recarga de CO₂ en el Hall y en la sala de Polícromos para el año 2014.

Con el objetivo de tener una visión global de la evolución de la concentración de CO₂ en la cueva de Altamira, se ha elaborado un modelo de interpolación espacial tomando como referencia los valores mensuales registrados por las estaciones de monitorización y los datos puntuales obtenidos en las visitas de seguimiento ambiental (ver Figura 53).

Puesto que la variación anual de CO₂ de la cueva tiene periodo de un año, se ha tomado como ejemplo la serie temporal para todos los meses del año 2017. El método de interpolación aplicado en este caso es del tipo difusión Kernel tomando como barrera absoluta el contorno de la cueva (Gribov & Krivoruchko, 2011).

En la Figura 53 se puede observar en carácter estacional general de la cueva. Durante los meses típicamente de verano se alcanzan los mínimos anuales, y durante noviembre y diciembre los máximos. La zona de la cueva desde la Hoya hasta la cola de caballo se posiciona como la más aislada respecto a la dinámica de gases aunque su variación estacional sea grande al igual que el resto de las salas.

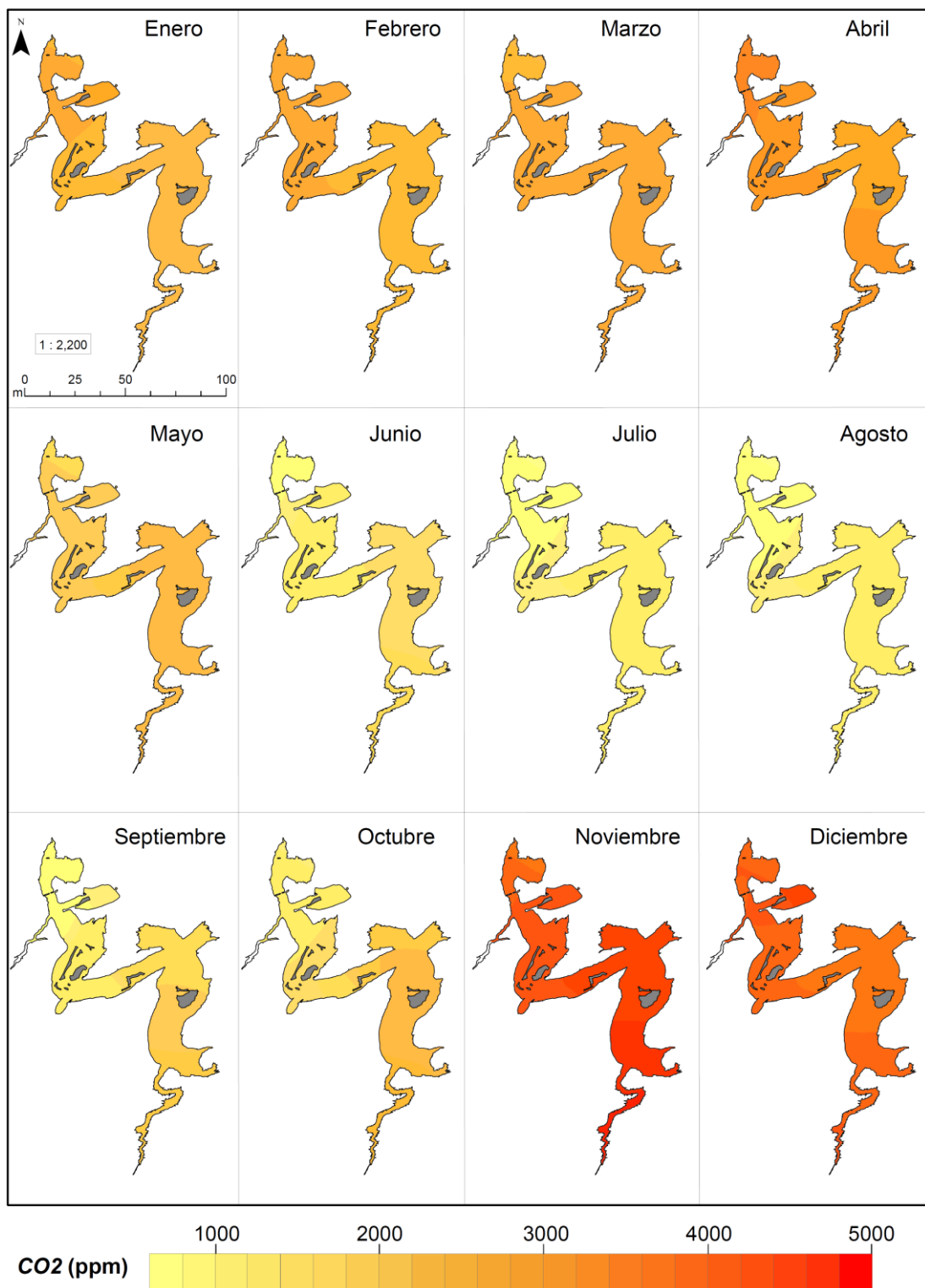


Figura 53. Distribución espacial de la evolución de CO₂ de la cueva de Altamira por meses para el año 2017.

5.3.2. Resultados del estudio de composición isotópica $\delta^{13}\text{C}$

La concentración media de CO_2 medida en la atmosfera exterior ha sido (497 ± 78) ppm, mientras que su $\delta^{13}\text{C}$ fue (-10.5 ± 1.5)‰ sin oscilaciones estacionales identificables. Estos valores están de acuerdo con los estudios previos realizados en la misma localización (García-Antón et al., 2013; García-Antón, 2014).

La concentración media de CO_2 medida en las tres cámaras del suelo durante el periodo de estudio ha sido (1936 ± 1297) ppm y su $\delta^{13}\text{C}$ (-20.0 ± 1.9)‰. No se han encontrado tendencias estacionales aunque si hay una alta correlación entre el $\delta^{13}\text{C}$ y $1/\text{CO}_2$, lo cual indica que las altas concentraciones de CO_2 del suelo coinciden con carbono isotópicamente agotado, es decir, con una baja proporción de ^{13}C .

Durante la duración del estudio, el rango de concentración de CO_2 en la atmósfera subterránea de la cueva Altamira fue de (2774 ± 1008) ppm, mientras que su $\delta^{13}\text{C}$ fue de (-22.4 ± 1.8)‰. La concentración de CO_2 mostró tendencias temporales notorias a lo largo del ciclo anual, que se reprodujo en todas las estaciones de la cueva (ver Figura 54). Los valores de CO_2 fueron más altos entre noviembre y mayo mientras que la concentración de CO_2 fue inferior a 1000 ppm en el periodo estival. Este tipo de comportamiento y sus causas se estudian en apartados posteriores. Asimismo, $\delta^{13}\text{C}$ presentó claras oscilaciones estacionales, mostrando un mayor agotamiento entre noviembre y mayo (por ejemplo, -23.8 ‰ en mayo de 2013 o -24.2 ‰ en enero de 2015) y más isótopos de carbono enriquecidos en verano (p. Ej., Hasta -12 ‰ en julio de 2013 en los niveles superiores de la cueva). La tendencia del $\delta^{13}\text{C}$ coincide con los periodos de ventilación en los cuales hay un intercambio de aire con el exterior, el cual es rico en ^{13}C comparado con el aire interior del periodo invernal, agotado isotópicamente por el origen vegetal del mismo.

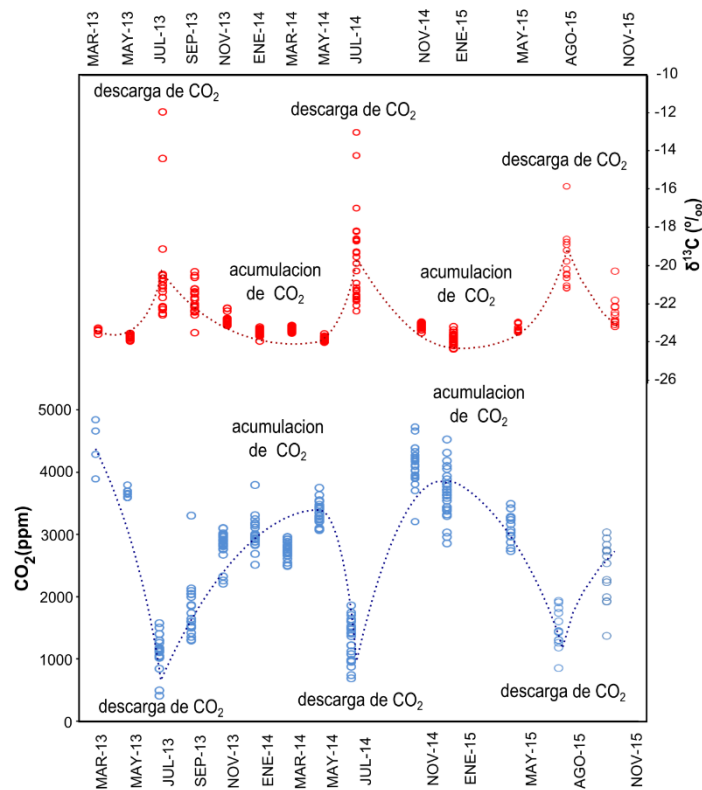


Figura 54. Concentración de CO₂ y de composición isotópica δ¹³C para las muestras puntuales tomadas en el aire de la cueva de Altamira en el periodo marzo 2013-agosto 2015 (extraído de Gázquez et al., 2016).

La concentración del carbono inorgánico disuelto DIC (*dissolved inorganic carbon*) en el agua de goteo varió de 25.1 mg/l a 50.6 mg/l durante el período de estudio. Las concentraciones más bajas se encontraron típicamente en muestras recolectadas durante el verano (de julio a septiembre), mientras que las muestras tomadas en invierno-primavera tuvieron concentraciones más altas en los dos lugares estudiados. El δ¹³C se correlacionó inversamente con la concentración de DIC en todo el conjunto de datos, mostrando enriquecimientos tan altos como -11‰, en septiembre de 2013 en la sala de Polícromos. Por el contrario, los valores isotópicos agotados e inferiores a -15 ‰ corresponden a muestras recogidas en invierno-primavera.

Los resultados de δ¹³C del suelo que cubre la cueva de Altamira (-20.0 ± 1.9 ‰) indican que las plantas de tipo C3 son responsables de la mayor parte del CO₂ edáfico. Tanto la concentración de CO₂ como el δ¹³C-CO₂ fueron bastante variables durante el período de estudio, pero no mostraron ninguna correlación significativa con el patrón

climático anual principal. Muy probablemente, estos valores no reflejan exactamente la producción primaria de CO₂ del suelo, sino que son el resultado de una mezcla de CO₂ atmosférico y edáfico en proporciones variables según los parámetros climáticos y biológicos puntuales, incluida la temperatura, la presión atmosférica, la velocidad del viento, etc. En otras palabras, la concentración de CO₂ en la zona superficial del suelo se controla mediante procesos climáticos y biológicos a corto plazo y el intercambio de gases con la atmósfera, que en algunos casos da como resultado bajas concentraciones de CO₂ y $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ más cercano a los valores de la atmósfera externa.

Durante el verano, etapa de descarga, el aire en la cueva muestra concentraciones más bajas de CO₂ y un mayor $\delta^{13}\text{C}$ que sugiere un intenso intercambio de aire con la atmósfera externa (Figura 54). Este intercambio con el exterior se observa especialmente en los sectores de las cuevas más exteriores, pero también en las áreas más profundas. La renovación de aire en la cueva de Altamira está controlada por las diferencias en la temperatura y densidad del aire entre la cueva y la atmósfera externa, tal y como se expone en apartados posteriores.

Durante el resto del año, etapa de recarga, la concentración de CO₂ aumentó de septiembre a mayo, donde los valores más altos se encuentran entre noviembre y marzo. Simultáneamente, el $\delta^{13}\text{C}$ disminuyó en todas las estaciones de muestreo durante esta etapa y su variabilidad fue menor que durante la etapa de descarga en las diversas áreas de la cueva. Esto indica que durante la etapa de recarga, el CO₂ se almacena gradualmente en la cueva debido a las mayores entradas de CO₂ del suelo causadas por una mayor infiltración durante el período más húmedo y un menor intercambio de aire con el exterior.

5.3.3. Series temporales de Radón

La concentración de Rn en la cueva de Altamira presenta una media anual aproximada en el rango 3000-4000 Bq/m³ durante el periodo de estudio, dependiendo de la zona de la cavidad y del año seleccionado. El comportamiento de este gas tiene un marcado carácter estacional. Hay un predominio del intercambio gaseoso con el exterior en la época estival y un escaso intercambio en invierno. Entre ambas

situaciones se encuentran la primavera y el otoño como periodos de transición, donde se inician los procesos de desgasificación y recarga de gases respectivamente.

Los valores medios mensuales máximos se encuentran típicamente en los meses entre noviembre y mayo, con concentraciones superiores a 5000 Bq/m^3 , mientras que los valores mínimos se corresponden con los meses entre de junio y septiembre, con concentraciones inferiores a 1000 Bq/m^3 , para las salas más cercanas a la entrada (Hall, Pasillo y sala de Polícromos). Los meses de mayo-junio y septiembre-octubre juegan un papel de periodos de desgasificación y recarga respectivamente. Conforman la transición entre los periodos de concentración máxima, mínimo intercambio con el exterior, y mínima, máximo intercambio con el exterior.

En la Figura 55 se muestra la medida mensual de la concentración de radón en cada una de las salas para el periodo de estudio cuyos valores numéricos se presentan en la Tabla 18 y Tabla 19. Se puede observar la tendencia general anual descrita. Sin embargo en la escala temporal de medias mensuales no se aprecian las variaciones de periodo corto, semanal e incluso diario que se observan en los datos monitorizados con los dispositivos Radon Scout.

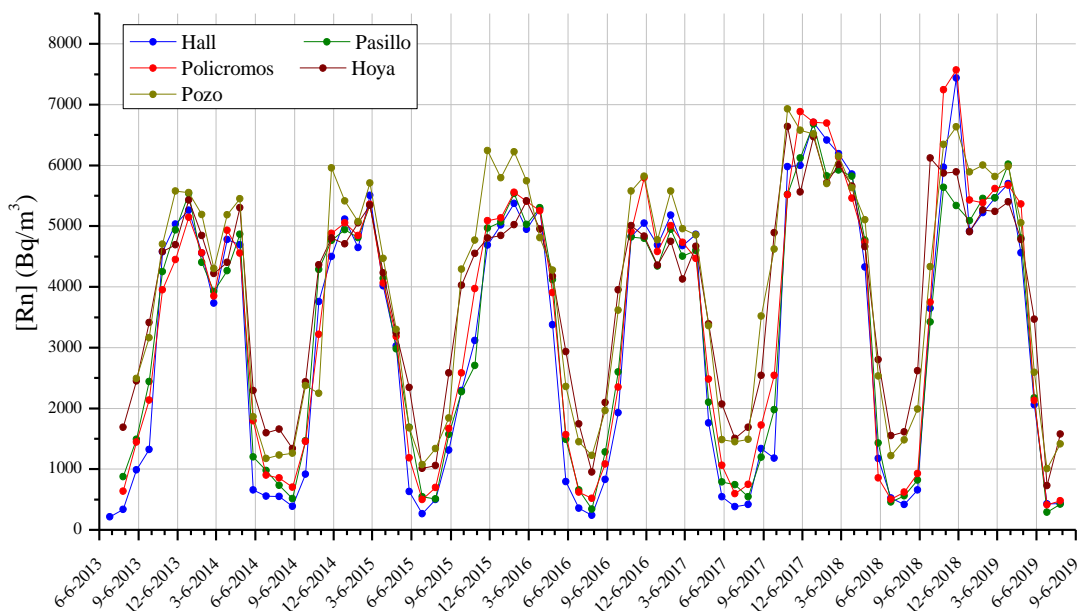


Figura 55. Concentración de Rn media mensual en la cada una de las salas de la cueva de Altamira. Valores obtenidos a partir de los registros con los monitores en continuo (Hall, Polícromos, Pozo) y estimados a partir de las medidas con los detectores pasivos (Pasillo, Hoya).

Se destacan los valores inusualmente altos, respecto al histórico disponible, de la concentración de radón en los periodos de aislamiento entre los meses de noviembre a marzo a partir de la etapa de recarga iniciada en septiembre de 2017. De manera general en todas las salas de la cavidad los valores medios mensuales son superiores a los correspondientes de los años 2013-2017. Tomando como referencia la sala de Polícromos, el promedio de Rn en el periodo de noviembre 2016-marzo 2017 es de 5000 Bq/m³, en el periodo noviembre 2017- marzo 2018 es de 6400 Bq/m³ y en el caso de noviembre 2018- marzo 2019 se tiene una media de 6300 Bq/m³. Por lo tanto se ha incrementado un 28% y un 26% en los periodos de noviembre a marzo en los años correspondientes a 2017-2018 y 2018-2019 respectivamente.

El aumento experimentado en la concentración de los gases trazadores en los periodos de aislamiento se ve influenciado por dos mecanismos. Por una parte se debe a la circulación de gases entre salas y por otra al grado de aislamiento. Sin embargo, el aumento relativo en la concentración de CO₂ es mayor que el correspondiente al del radón. En el periodo noviembre 2018-marzo 2019 el CO₂ aumenta un 65% mientras que el radón un 26% respecto al correspondiente del 2016-2017. El incremento en la producción de CO₂ se puede ver influenciado por diversos factores tales como la lluvia, la torrencialidad, los caudales de infiltración, etc.

La circulación de gases con la sala de Polícromos está directamente relacionada con el Cruce y el Hall. De forma aproximada ambas salas tienen concentraciones tanto de Rn como de CO₂ muy similares o inferiores a esta. Por lo tanto este mecanismo de intercambio tendería a disminuir o mantener la concentración y no a hacer que se experimente el aumento neto observado.

El grado de aislamiento de la cobertera de la cueva parece ser el principal mecanismo responsable del aumento de gases descrito en el periodo invernal. Dicho grado de aislamiento se ve motivado por un lado por el aumento de precipitaciones, las cuales impiden la salida de gases al exterior y por la disminución de temperaturas, que provoca que el gradiente de densidades juegue un papel aislador tal y como se verá en el apartado 5.3.4.

5. La ventilación natural de la cueva de Altamira

En la Tabla 18 se muestran los valores medios mensuales obtenidos a partir del registro en continuo realizado con los monitores Radon Scout.

Tabla 18. Concentración de radón media mensual en la Entrada o Hall, la sala de Polícromos y el Pozo de la cueva de Altamira. Los valores se han obtenido en base a los datos registrados cada hora por los monitores de radón.

Hall												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013							216	335	986	1322	4573	5034
2014	5260	4553	3734	4781	4692	656	556	550	387	917	3759	4500
2015	5112	4647	5507	4017	3025	629	263	499	1310	2293	3115	4685
2016	5020	5373	4944	5282	3376	795	357	239	827	1928	4828	5049
2017	4688	5182	4675	4865	1761	542	383	418	1336	1177	5980	6001
2018	6705	6417	6191	5854	4325	1175	524	419	655	3646	5970	7436
2019	4917	5221	5466	5697	4560	2059	428	430				

Polícromos												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013								636	1443	2137	3949	4450
2014	5146	4561	3849	4933	4554	1795	901	855	701	1452	3217	4878
2015	5051	4844	5357	4060	3184	1185	497	695	1668	2584	3970	5087
2016	5135	5554	5407	5252	3905	1566	618	519	1081	2349	4913	5793
2017	4580	5006	4732	4468	2483	1061	593	749	1725	2543	5515	6884
2018	6711	6694	6137	5460	4734	853	502	621	924	3746	7244	7569
2019	5431	5383	5620	5673	5363	2128	412	477				

Pozo												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013									2491	3162	4701	5576
2014	5551	5192	4299	5184	5450	1863	1172	1232	1261	2374	2247	5958
2015	5415	5075	5709	4467	3298	1679	1074	1339	1841	4293	4768	6244
2016	5794	6224	5743	4808	4274	2358	1449	1224	1960	3614	5577	5822
2017	4776	5575	4959	4854	3358	1485	1449	1489	3520	4621	6929	6578
2018	6517	5701	6149	5635	5102	2531	1222	1480	1987	4332	6344	6636
2019	5894	6002	5818	5984	5051	2592	1006	1413				

A partir de los datos obtenidos con los detectores pasivos CR-39, cuyo periodo de exposición es de dos semanas, se ha elaborado la Tabla 19 que muestra de forma aproximada la concentración de radón media mensual en cada una de las zonas de estudio. Se ha de tener en cuenta que estos valores son aproximados debido a que el periodo de exposición de los detectores no coincide exactamente con el inicio y final de mes.

Tabla 19. Concentración de radón media mensual en el Pasillo de Polícromos, el Segundo ramal y la sala de la Hoya de la cueva de Altamira. Los valores se han estimado a partir de los datos proporcionados por los detectores pasivos CR-39.

Pasillo de Polícromos												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013								874	1491	2440	4250	4934
2014	5534	4405	3925	4265	4867	1201	974	734	512	1466	4283	4764
2015	4942	4807	5347	4136	2980	1687	542	509	1573	2275	2706	4969
2016	5068	5538	5028	5302	4118	1492	656	339	1279	2599	4819	4800
2017	4340	4949	4505	4600	2100	790	740	545	1195	1980	5520	6120
2018	6680	5825	5925	5820	4770	1430	460	560	820	3420	5640	5340
2019	5090	5455	5465	6020	4806	2173	291	423				

5. La ventilación natural de la cueva de Altamira

Segundo ramal												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013								975	1822	2707	4415	4842
2014	5588	4644	3994	4806	4873	1198	1002	978	808	1417	4395	4927
2015	4939	4715	5269	4184	3132	1796	614	754	2182	2580	3518	5095
2016	4759	5559	5432	5068	4244	1676	840	557	1445	2823	4871	4691
2017	4610	4817	4054	4260	2410	905	865	945	1445	2700	5810	5900
2018	6645	5570	5900	5290	4800	1800	730	710	1070	3870	5470	5310
2019	4950	5235	5020	5450	4881	2294	438	758				
Hoya												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2013								1687	2449	3413	4580	4692
2014	5431	4844	4219	4402	5303	2295	1598	1657	1339	2433	4361	4807
2015	4706	5052	5344	4231	3237	2344	1010	1057	2584	4028	4550	4802
2016	4847	5023	5415	4952	4175	2931	1746	949	2095	3953	5010	4835
2017	4355	4749	4127	4665	3390	2070	1505	1690	2540	4890	6640	5560
2018	6470	5715	6015	5660	4660	2800	1550	1610	2620	6120	5870	5890
2019	4905	5265	5240	5400	4777	3468	727	1575				

En la Figura 56 se muestran las medidas de la concentración de radón en continuo en intervalos de una hora en la zona del Hall, de la Sala de Polícromos y del Pozo. La variación de la concentración de radón en estas salas se representa conjuntamente debido a que juegan un papel fundamental en los procesos de intercambio cavidad-exterior. La entrada es la zona de la cueva que está más estrechamente conectada con el exterior y la Sala de Polícromos, debido a su proximidad, se ve directamente afectada por los procesos que suceden en el Hall. Por otra parte la zona del Pozo es una de las zonas más aisladas tal y como se puede observar en la evolución de la concentración de radón, la cual se sitúa de manera general por encima de la correspondiente a las otras dos salas.

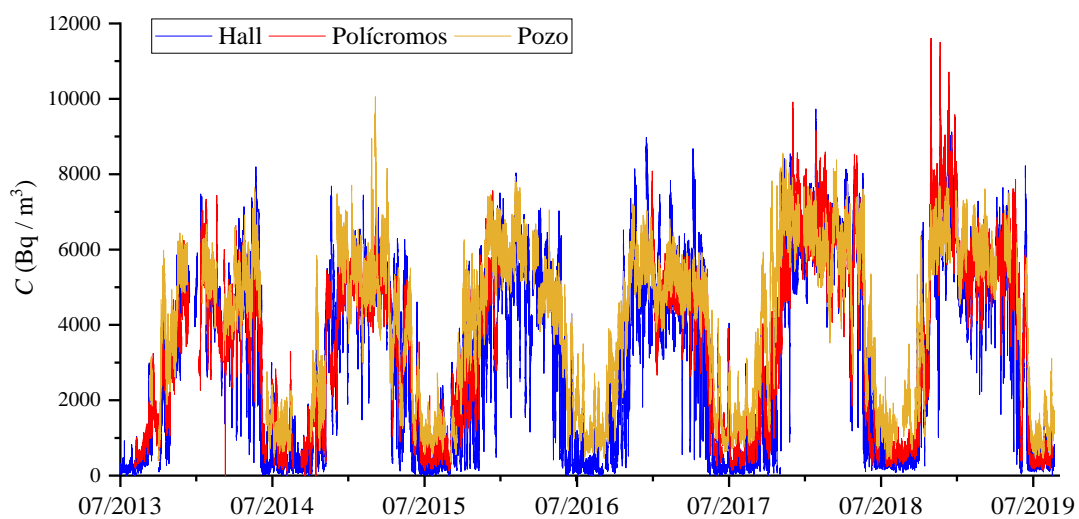


Figura 56. Evolución de la concentración de Rn en el aire del Hall y de la sala de Polícromos y del Pozo. Valores tomados de los monitores de radón en continuo.

A pesar del marcado carácter estacional, en el cual el verano determina la máxima interconexión con el exterior debido a la desgasificación de la cueva, se pueden destacar eventos puntuales en los cuales la concentración de radón disminuye súbitamente para posteriormente recuperar su dinámica general tanto durante el invierno como en los periodos de transición, en este caso en primavera. Esta variabilidad se hace especialmente notable en el Hall debido a su extraordinaria conexión con el exterior. Dichos eventos también son significativos en la Sala de Polícromos, indicando episodios de desgasificación y recarga de periodo corto, que deben ser tenidos en cuenta. La zona del Pozo presenta este tipo de variaciones coincidentes temporalmente pero con una amplitud menor debido a su mayor grado de aislamiento (ver Figura 57).

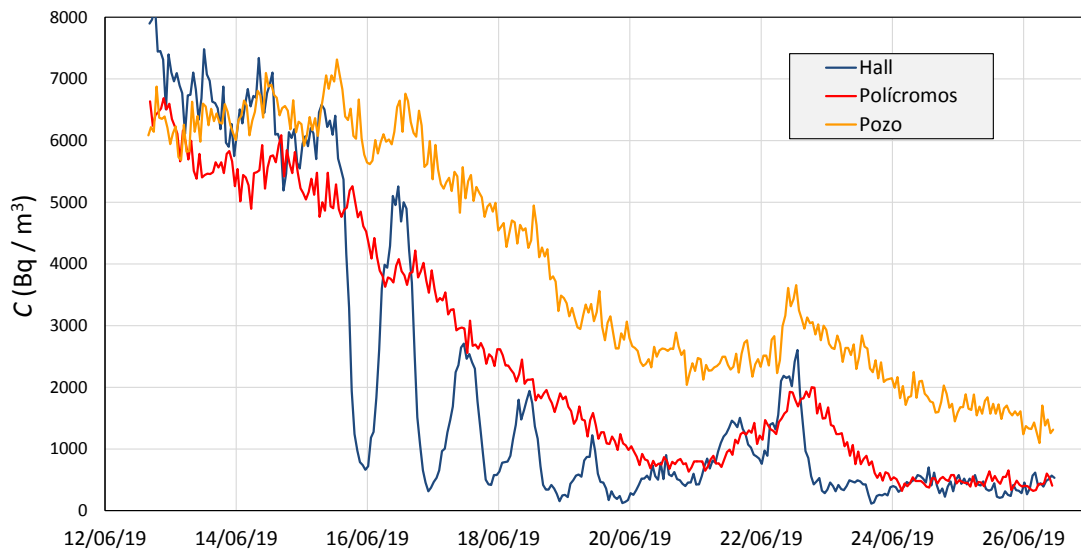


Figura 57. Evolución de la concentración de Rn en el aire del Hall y de la sala de Polícromos y del Pozo del 12 al 26 de junio 2019.

Con el objetivo de tener una visión global de la evolución de la concentración de Rn en la cueva de Altamira, se ha elaborado un modelo espacial tomando como referencia los valores mensuales registrados por los monitores en continuo y los detectores de trazas. Partiendo de los valores medios mensuales que se muestran en la Tabla 18 y Tabla 19 se ha realizado una interpolación espacial con el fin de estimar el radón en las zonas donde no se dispone de medidas (ver Figura 58).

Puesto que la variación anual de Rn de la cueva es periódica se ha tomado como ejemplo la serie temporal para todos los meses del año 2017. El método de interpolación aplicado en este caso es del tipo difusión Kernel con barreras (Gribov & Krivoruchko, 2011). Se ha incluido como barrera absoluta el contorno de la cueva, obligando al modelo a tener en cuenta dicho contorno para calcular las distancias entre puntos.

En la Figura 58 se puede observar en carácter estacional general de la cueva. Durante los meses típicamente de verano se alcanzan los mínimos anuales, y durante noviembre y diciembre los máximos. La zona de la cueva desde la Hoya hasta la cola de caballo se posiciona como la más aislada respecto a la dinámica de gases aunque su variación estacional sea grande al igual que el resto de las salas.

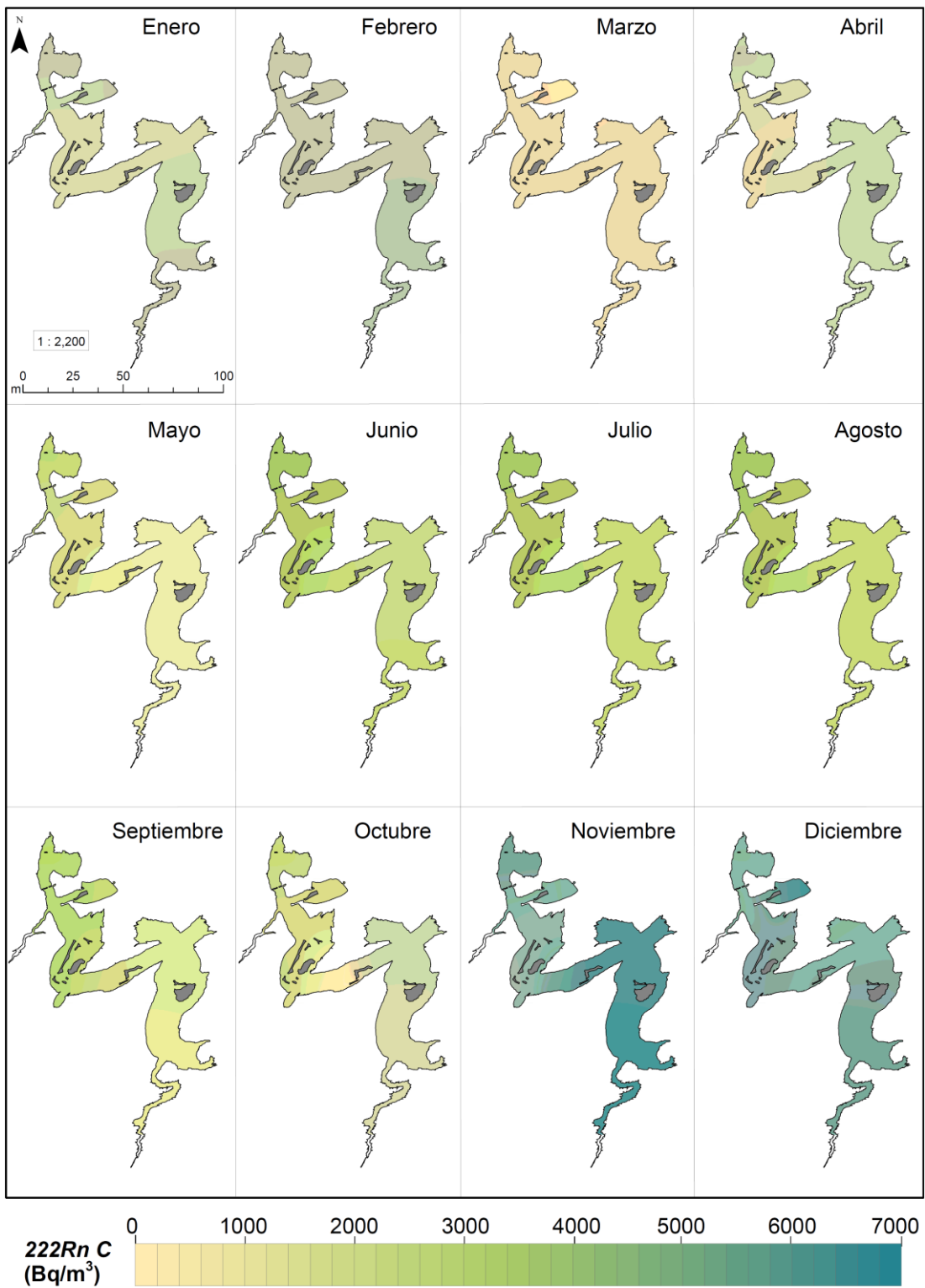


Figura 58. Distribución espacial de la evolución de radón de la cueva de Altamira por meses para el año 2017.

El carácter trazador del radón ha sido utilizado para determinar los periodos en los cuales hay más intercambio de materia y energía entre la cavidad y el exterior. La zona del Hall es la más afectada por las condiciones exteriores y la Hoya y el Pozo las que menos. Sin embargo todas las partes de la cavidad, en mayor o menor medida, presentan unas marcadas variaciones de carácter estacional.

La conexión cavidad-exterior en la fase gaseosa muestra su mayor magnitud durante el verano, en este momento se favorece el flujo de materia entre el exterior y el interior de la cueva. Por el contrario en el periodo invernal se produce el cese casi total de la interconexión con el exterior en fase gaseosa. Sin embargo durante el invierno hay eventos de periodo corto que interconectan la cavidad y el exterior propiciados por las condiciones ambientales exteriores, tales como aumento repentino de temperatura, disminución de las precipitaciones, etc. Los periodos de transición entre ambas situaciones extremas, en este caso la primavera, se tiene que tener en cuenta ya que se mezclan los dos comportamientos, altas concentraciones de radón, aislamiento de la cavidad, con repentinas bajadas de la concentración, alta conexión con el exterior.

5.3.4. Densidad del aire

El estudio de la dinámica general y los episodios de intercambio de gases entre la cueva y el exterior, se han evaluado para las salas del Hall y de Polícromos. Los gradientes de temperatura, presión y densidad del aire entre el exterior y las dos salas estudiadas se representan en la Figura 59, junto con la variación de las concentraciones de los gases trazadores, CO₂ y Rn. En esta gráfica se pone de manifiesto la similitud en el comportamiento de ambos gases de manera general. La correlación entre la concentración de gases y la diferencia temperatura ΔT , presión ΔP y densidad $\Delta \rho$ del aire entre el exterior y las salas de la cueva se muestran en la Tabla 20. Dichos coeficientes se han obtenido para un intervalo de confianza del 95%. Hay una baja correlación negativa ($r = -0.3$) y media ($r = -0.5$) entre la presión del aire y la concentración de gases en la sala de Hall y de Polícromos, respectivamente. Por otro lado, hay una alta correlación negativa con la temperatura (r alrededor de -0.8), y una alta correlación positiva con la densidad del aire (r alrededor de 0.8), ambas más altas en la sala de Polícromos. Esto indica que la temperatura del aire y los gradientes de

densidad dominan el comportamiento de los gases dentro de la cavidad.

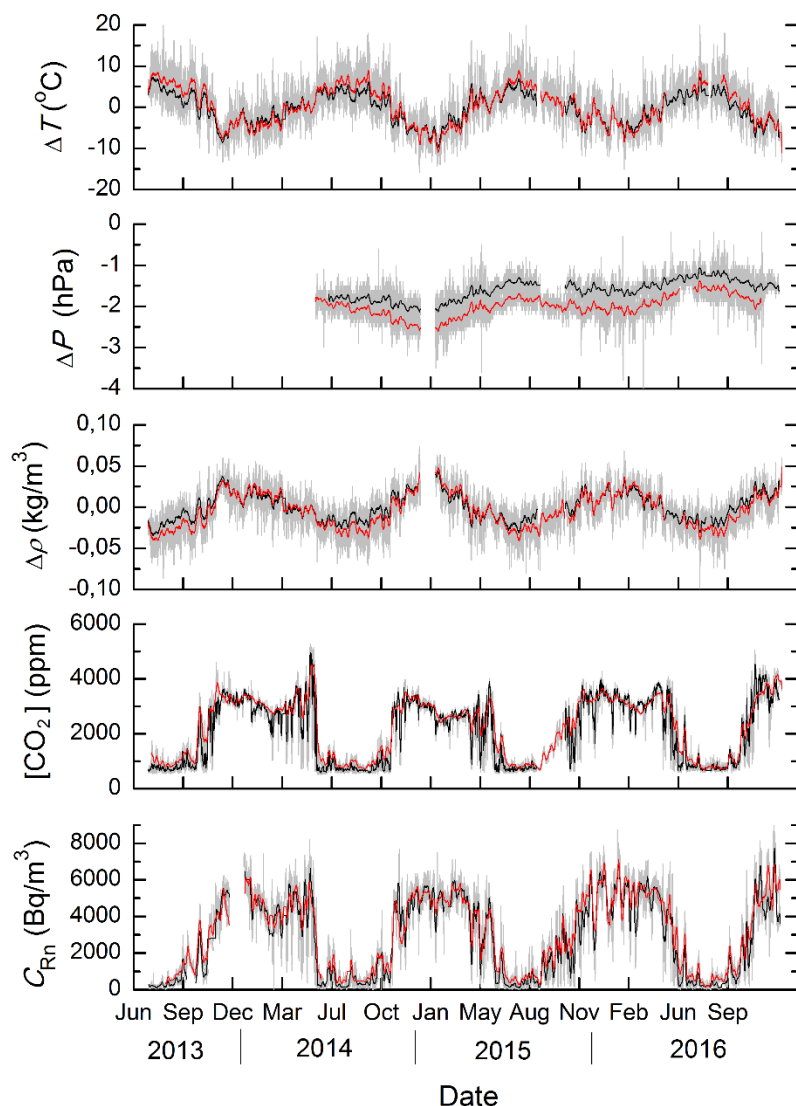


Figura 59. Diferencias en temperatura, presión y densidad del aire entre el exterior y el Hall (línea negra) y el exterior y la Sala de Policromos (línea roja). Concentración de CO₂ y Rn en el Hall (negro) y Policromos (rojo). Los gráficos se construyeron utilizando datos semanales suavizados.

La desgasificación de la cueva ocurre cuando el gradiente de densidad del aire es negativo, es decir, la densidad del aire exterior es menor que la densidad del aire interior ($\rho_{\text{ext}} < \rho_{\text{cueva}}$). Esto sucede de manera general en la época de verano cuando la temperatura promedio del aire interior es mucho más baja que en el exterior. Si la desgasificación se produjera exclusivamente a través de la entrada de la cueva, el aire más frío y denso del resto las salas, las cuales se encuentran en cotas inferiores, no

podría ascender y producirse el intercambio con el exterior. Por lo tanto, el aire más denso dentro de la cueva tiende a descender a niveles inferiores a través de los poros y grietas del karst. Por el contrario, las concentraciones de gases alcanzan su punto máximo en invierno cuando la matriz kárstica se vuelve impermeable a través del efecto combinado de la humedad acumulada en las grietas y fisuras, y la mayor densidad del aire exterior que ejerce un efecto tapón sobre la cueva. Estas observaciones concuerdan con la dinámica general del aire descrita por otros autores (García-Anton et al., 2014; Cuezva, 2008).

Tabla 20. Coeficiente de correlación lineal entre la diferencia de presión, densidad y temperatura del aire entre el exterior y la cueva (Hall y sala de Polícromos) con la concentración de gases, CO₂ y Rn. El intervalo que se muestra corresponde con una confianza del 95%.

	[CO ₂] (ppm)	C _{Rn} (Bq/m ³)
ΔP (exterior - Hall)	-0.28 (-0.34 to -0.21)	-0.34 (-0.40 to -0.27)
$\Delta\rho$ (exterior - Hall)	0.77 (0.75 to 0.80)	0.75 (0.72 to 0.77)
ΔT (exterior - Hall)	-0.79 (-0.80 to -0.76)	-0.76 (-0.78 to -0.73)
ΔP (exterior - Polícromos)	-0.53 (-0.57 to -0.48)	-0.51 (-0.56 to -0.46)
ΔP (exterior - Polícromos)	0.80 (0.78 to 0.82)	0.82 (0.78 to 0.84)
ΔP (exterior - Polícromos)	-0.81 (-0.83 to -0.79)	-0.82 (-0.84 to -0.80)

Habiéndose demostrado la capacidad de la monitorización en continuo del radón para describir el movimiento de las masas de aire dentro de la cueva y los intercambios de aire con el aire exterior de manera general, se procede al análisis de eventos de desgasificación y recarga evidentes durante períodos más cortos. Durante estas etapas, se pueden observar variaciones abruptas en las concentraciones de gas en un solo día o incluso en unas pocas horas, lo que puede estar relacionado con la variación de la temperatura diaria del exterior. De manera ilustrativa, en la Figura 60 se muestra la diferencia en la presión, la temperatura y la densidad del entre la atmósfera exterior, la sala de policromos y el Hall para el período del 20 de mayo al 10 de junio de 2015.

Las concentraciones de radón en ambas salas disminuyeron desde 5000 Bq/m³ a

menos de 1000 Bq/m^3 . En esta época del año, la temperatura de estas dos salas es prácticamente la misma, con una diferencia en sus temperaturas promedio durante este período de menos de $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Sin embargo el alto grado de conexión del Hall con el exterior hace que una vez que el gradiente de densidad del aire es negativo, se reproduzcan sus variaciones en la concentración de radón, en el caso de Polícromos se produce una disminución paulatina pero no se observan las variaciones diarias como en el Hall.

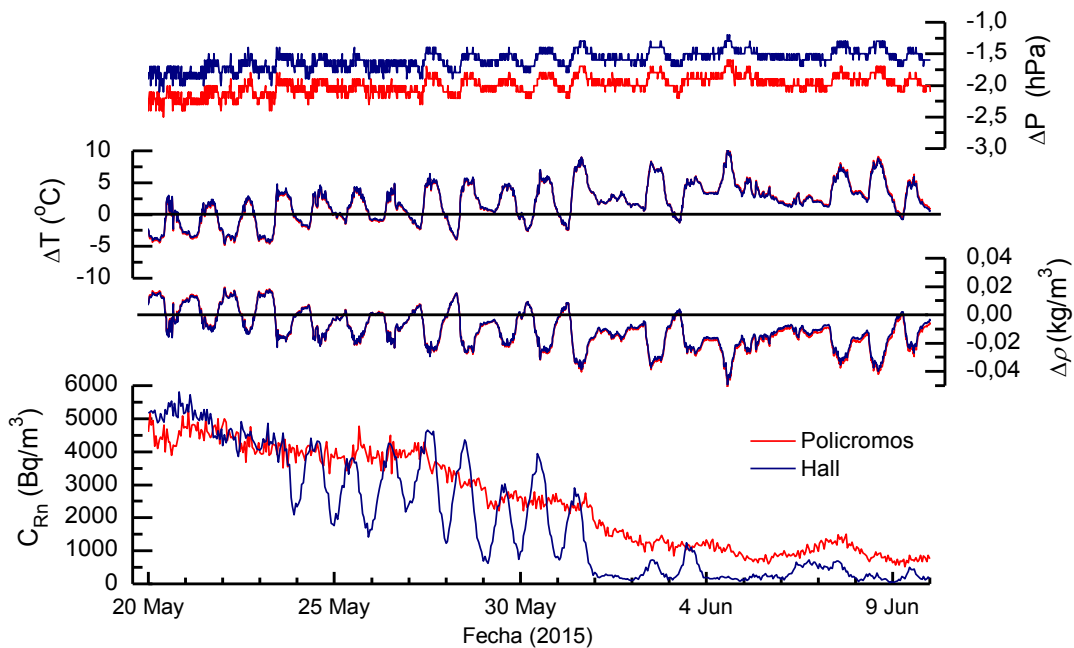


Figura 60. Diferencias en temperatura, presión y densidad del aire entre la atmósfera exterior y la sala de Polícromos (línea roja) y el Hall (línea azul) para el periodo del 20 de mayo al 10 de junio de 2015. Se muestra la variación de radón en cada sala también.

Tabla 21. Coeficiente de correlación lineal entre la diferencia de presión, densidad y temperatura del aire entre el exterior y la cueva (Hall o sala de Polícromos) con la concentración de radón para el evento que se muestra en la Figura 60. El intervalo que se muestra corresponde con una confianza del 95%.

	C_{Rn} [Hall] (Bq/m^3)	C_{Rn} [Polícromos] (Bq/m^3)
ΔP (exterior - Sala)	-0.08 (-0.17 to -0.01)	-0.11 (-0.19 to -0.01)
$\Delta \rho$ (exterior - Sala)	0.48 (0.40 to 0.54)	0.59 (0.53 to 0.64)
ΔT (exterior - Sala)	-0.48 (-0.54 to -0.41)	-0.59 (-0.53 to -0.64)

5.3.5. Tasa de ventilación

La tasa de ventilación entre la sala de policromos y el exterior se ha estimado a partir de la ecuación (15) y los valores medios mensuales de la concentración de radón se resumen en la Tabla 18. La tasa de ventilación Q y la concentración máxima de radón C_{\max} se muestran en la Tabla 22, el volumen de la sala de Polícromos es 342 m^3 y se ha supuesto que la concentración de radón desde el exterior C' es cero. La Q ha sido calculada para los años 1983 (Fernández et al., 1986), 2008 (Sánchez-Moral et al., 2009) y para algunos del periodo de investigación actual tal y como muestra la Figura 61.

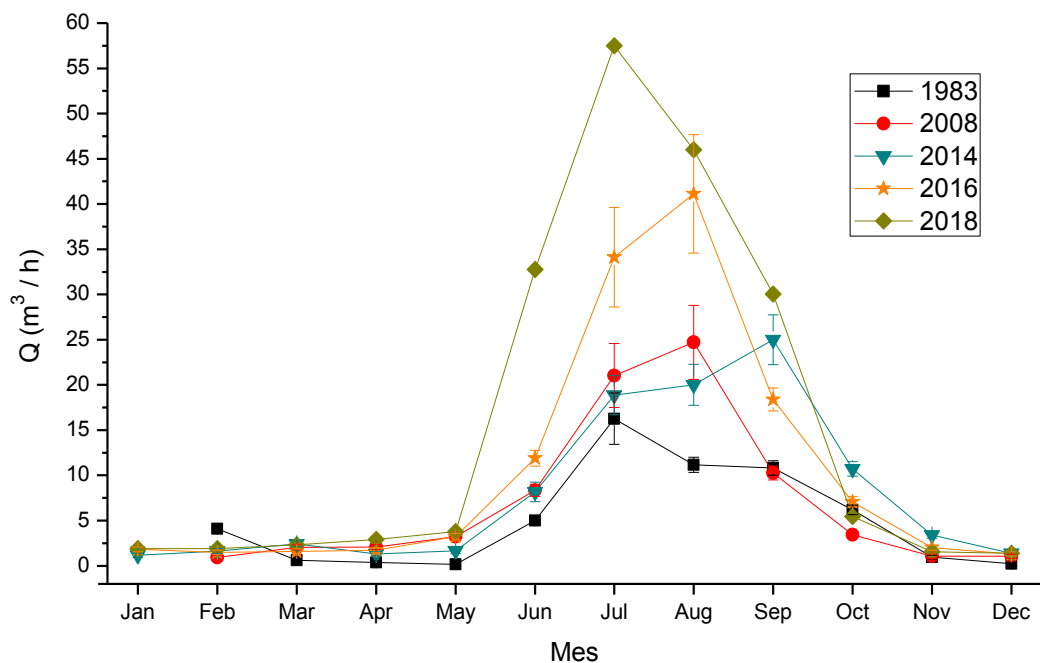


Figura 61. Tasa de ventilación Q (m^3/h) entre la sala de Polícromos y el exterior para distintos años.

El aumento extraordinario en la tasa de ventilación durante los meses de verano de los últimos años podría explicarse por la temperatura promedio significativamente más alta durante este período. La mayor diferencia en la densidad del aire en los últimos años podría haber provocado una mayor desgasificación y una mejor conexión de la cámara con el aire exterior. Esta explicación deberá validarse mediante la recopilación de datos adicionales sobre ciclos anuales.

Tabla 22. Tasa de ventilación Q (m^3/h) entre la sala de Polícromos y el exterior para distintos años. Se indica la concentración de radón máxima C_{max} para cada año expresada en Bq/m

Mes	1983	2008	2014	2016	2018
Ene.			1.1 ± 0.2	1.8 ± 0.3	1.9 ± 0.2
Feb.	4.1 ± 0.4	0.9 ± 0.2	1.6 ± 0.3	1.5 ± 0.3	1.9 ± 0.2
Mar.	0.6 ± 0.2	2.0 ± 0.3	2.2 ± 0.3	1.6 ± 0.3	2.3 ± 0.2
Abr.	0.4 ± 0.2	2.1 ± 0.3	1.3 ± 0.2	1.7 ± 0.3	2.9 ± 0.3
May.	0.2 ± 0.2	3.2 ± 0.4	1.7 ± 0.3	3.2 ± 0.4	3.8 ± 0.3
Jun.	5.0 ± 0.5	8.3 ± 0.7	8 ± 1	11.9 ± 0.9	33 ± 2
Jul.	16 ± 3	21 ± 4	19 ± 2	34 ± 6	58 ± 7
Ago.	11.2 ± 0.8	25 ± 4	20 ± 2	41 ± 7	46 ± 6
Sept.	10.8 ± 0.8	10 ± 1	25 ± 3	18 ± 1	30 ± 2
Oct.	6.2 ± 0.5	3.4 ± 0.4	10.7 ± 0.8	7.1 ± 0.6	5.5 ± 0.4
Nov.	1.0 ± 0.2	1.1 ± 0.2	3.4 ± 0.4	2.0 ± 0.3	1.6 ± 0.2
Dic.	0.2 ± 0.2	1.1 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.2
C_{max}	7250 ± 440	7250 ± 430	7440 ± 450	8730 ± 520	11600 ± 1200

5.4. Protección radiológica frente a la exposición al radón

El radón constituye es la segunda causa de cáncer de pulmón tras el tabaco de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC). La inhalación continuada de aire con radón supone un riesgo para la salud científicamente contrastado, que depende principalmente de los niveles a los que se está expuesto y de la duración del periodo de exposición. Los principales aspectos de la problemática del radón a nivel mundial se pueden ver en la publicación de la OMS “*WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*” (World Health Organization, 2009), la cual surgió de la colaboración de más de un centenar de científicos y expertos en radón.

El radón del ambiente se transforma, por desintegración radiactiva alfa, en descendientes sólidos de vidas medias cortas, del orden de minutos. El comportamiento de los descendientes es complejo, por una parte se pueden depositar en superficies macroscópicas del entorno o, por el contrario, pueden permanecer en el aire. De la fracción de descendientes que no se han depositado y han permanecido en el aire, una parte se vincula a aerosoles y se denomina fracción ligada, con un espectro dimensional amplio desde pocos nanómetros, hasta más de una micra (Butterweck-Dempewolf et al., 1997; Reineking et al., 1988), y por otra parte se pueden encontrar descendientes del radón no vinculados a aerosoles, la denominada fracción libre (f_p).

Cuando se respira una mezcla de gas radón y descendientes, el carácter de gas noble del primero hace que tan solo una fracción insignificante quede retenida en el aparato respiratorio. Sin embargo, el carácter sólido de los descendientes provoca que estos queden fijados en diferentes regiones del tracto respiratorio en función de su tamaño (Reineking & Porstendörfer, 1988). Teniendo en cuenta el carácter de emisores alfa de algunos de estos descendientes, se entiende perfectamente que son los descendientes y no el radón los principales responsables de la irradiación de los pulmones (ICRP, 2017). Por este motivo, cuando se pretende realizar una estimación adecuada de la dosis recibida por inhalación de radón y descendientes, resulta indispensable conocer tanto el factor de equilibrio F , definido como el ratio entre la concentración equivalente de radón en equilibrio EEC , evaluada a partir de las concentraciones de los descendientes del radón, y la concentración de gas radón C , como la fracción libre f_p .

La primera publicación de la International Commission on Radiological Protection (ICRP) dedicada exclusivamente a la protección frente a la exposición al radón fue la ICRP 65 que apareció en el año 1993 (ICRP, 1993). Ya entonces se estableció la distinción entre viviendas y puestos de trabajo como situaciones de exposición con características claramente diferenciables. Esta clasificación se ha mantenido en sucesivas publicaciones acerca del radón, llegándose a la más reciente ICRP 137 de 2017 (ICRP, 2017), donde se presenta un abanico mayor de escenarios de exposición. Desde 1993 se han venido utilizando los conceptos de “*Dose Conversion Factor*” o “*Dose Coefficient*” necesarios para transformar los niveles de exposición a radón y

descendientes (expresados en WLM o $\text{Bq m}^{-3} \text{ h}$) en valores de dosis equivalente (expresada en mSv), y por lo tanto de riesgo de cáncer de pulmón derivado de dicha exposición. Estos factores pueden ser estimados a partir de dos vías independientes. Por un lado está la llamada Dosimetric Approach basada en modelos biocinéticos y dosimétricos del tracto respiratorio humano siguiendo la inhalación de descendientes del radón (Marsh et al., 2017), que ha sido la recomendada por la ICRP para todos los elementos radiactivos que dan lugar a irradiación interna, excepto para el radón. Para este último, y hasta finales del año 2017, la ICRP ha recomendado la aproximación epidemiológica basada en la llamada “*Dose Conversion Conventions*” que, de manera simplificada, supone un análisis comparativo entre el riesgo de cáncer de pulmón en poblaciones expuestas al radón, y el riesgo total de cáncer en supervivientes de las bombas atómicas expuestos en gran medida a radiación gamma. Las discrepancias entre los factores proporcionados por ambas aproximaciones se han reducido drásticamente con la revisión de los nuevos coeficientes de riesgo presentados en la ICRP 115 en 2010 (ICRP, 2010; Vaillant & Bataille, 2012). Por esta razón, la publicación 137 de la ICRP recomienda por primera vez en la historia el uso de coeficientes de dosis derivados de la aproximación dosimétrica, incluyendo así al radón y sus descendientes dentro del conjunto de elementos radiactivos que se depositan en el organismo internamente.

Es bien conocido que el caso de la exposición a radón en cuevas turísticas constituye un escenario particular dadas las características de su aire interior. Normalmente, la concentración promedio de partículas (Z) en la atmósfera interior de una cueva es muy inferior a la que se encuentra en el aire exterior, lo cual da lugar a la ocurrencia de fracciones libres de descendientes mayores que las que pueden encontrarse en otros lugares de trabajo o en viviendas (Sainz et al., 2007). Además, la relación superficie/volumen suele tener un valor típicamente bajo, disminuyendo la deposición en superficies, principal mecanismo de reducción de descendientes en el aire, y aumentando por tanto el factor de equilibrio F . Aunque habitualmente la relación entre el F y f_p es inversa (Vargas et al., 2000), el factor de conversión a dosis derivado de esta última puede ser muy elevado, debido a la gran carga dosimétrica que poseen los descendientes de radón no vinculados, de tamaño entre 1 y 10 nm

(Porstendörfer, 2002).

5.4.1. Estimación de la dosis

Para estimar la dosis derivada de la inhalación de descendientes de radón es necesario evaluar la exposición a los descendientes del radón, para lo cual es necesario conocer la concentración equivalente de equilibrio (*EEC*). Esta magnitud, expresada en Working Level (WL), corresponde a la misma energía potencial alfa que una mezcla en equilibrio con una concentración de radón de 3700 Bq m⁻³, y se relaciona con la concentración de gas radón *C* (Bq m⁻³) a través del factor de equilibrio *F*:

$$EEC = \frac{C \cdot F}{3700} \quad (17)$$

A partir de la *EEC* puede evaluarse su valor integral para un periodo de tiempo dado, es decir, la exposición equivalente de equilibrio (*E_{eq}*), que expresada en Working Level Month (WLM) es:

$$E_{eq} = \frac{EEC \cdot \Delta t}{170} \quad (18)$$

donde Δt (h) es el tiempo de exposición considerado.

La dosis efectiva *H* (mSv) recibida durante el periodo de exposición puede calcularse a través de la siguiente expresión:

$$H = E_{eq} \cdot DCF \quad (19)$$

siendo *DCF* (mSv/WLM) el factor de conversión a dosis. Combinando las ecuaciones (17) y (18), esta expresión puede desarrollarse como:

$$H(\text{mSv}) = 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot C(\text{Bq/m}^3) \cdot DCF(\text{mSv/WLM}) \cdot F \cdot \Delta t \quad (20)$$

Evaluando la *H* a partir de valores promedio de la concentración *C* de radón, y asumiendo $\Delta t = 1$ h, se obtiene valores de tasa media de dosis (mSv h⁻¹) para los diferentes periodos considerados (mensual y anual). Teniendo en cuenta que la

concentración de radón puede ser medida con bastante precisión, las mayores fuentes de incertidumbre en esta evaluación son DCF y F . Para la adecuada determinación del factor de equilibrio, además de la medida de la actividad de gas radón, es necesaria la determinación de las actividades de cada uno de sus descendientes, lo cual requiere un equipamiento costoso que no siempre está disponible. Por ese motivo, es habitual utilizar valores representativos procedentes de la literatura. En el caso de cuevas, algunos estudios de revisión muestran valores frecuentes de F entre 0.2 y 0.9 (Cigna, 2004).

Es importante reseñar que los factores de conversión a dosis actualmente vigentes en la legislación española se basan en la publicación de la ICRP 65, donde el $DCF=5$ mSv WLM⁻¹ y factor de equilibrio $F=0.4$. En este estudio se va a considerar además el valor de $F=0.7$ con el fin de establecer un rango de dosis debido a la posible variabilidad de este parámetro dentro de la cueva (BOE, 2010).

5.4.2. Resultados

A pesar de que el patrón de evolución temporal de la concentración de radón es semejante en todas las salas, los valores mensuales difieren entre sí dependiendo del nivel de intercambio de cada estancia con las contiguas y, fundamentalmente, del grado de conexión de cada estancia con el exterior. Como primera aproximación se puede considerar a la cueva en su conjunto, asociando como valor medio mensual de radón el correspondiente al valor promedio de todas las salas en ese mes.

Tabla 23. Tasa de dosis expresada en mSv/h obtenida de la ecuación (20) teniendo en cuenta el $DCF=5$ mSv/WLM y los factores de equilibrio 0.4 y 0.7. Los valores mensuales de radón que se han tenido en cuenta han sido el promedio correspondiente a todas las salas.

F	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
0.4	0.017	0.017	0.016	0.015	0.011	0.005	0.003	0.003	0.006	0.010	0.016	0.017
0.7	0.030	0.029	0.028	0.027	0.020	0.008	0.005	0.006	0.010	0.017	0.028	0.031

A partir de la Ec. (20) se ha estimado la tasa de dosis mensual para los factores de equilibrio 0.4 y 0.7 para un factor de conversión de dosis de 5 mSv/WLM. En la Tabla 23 se muestran los resultados y en la Figura 62 la representación gráfica.

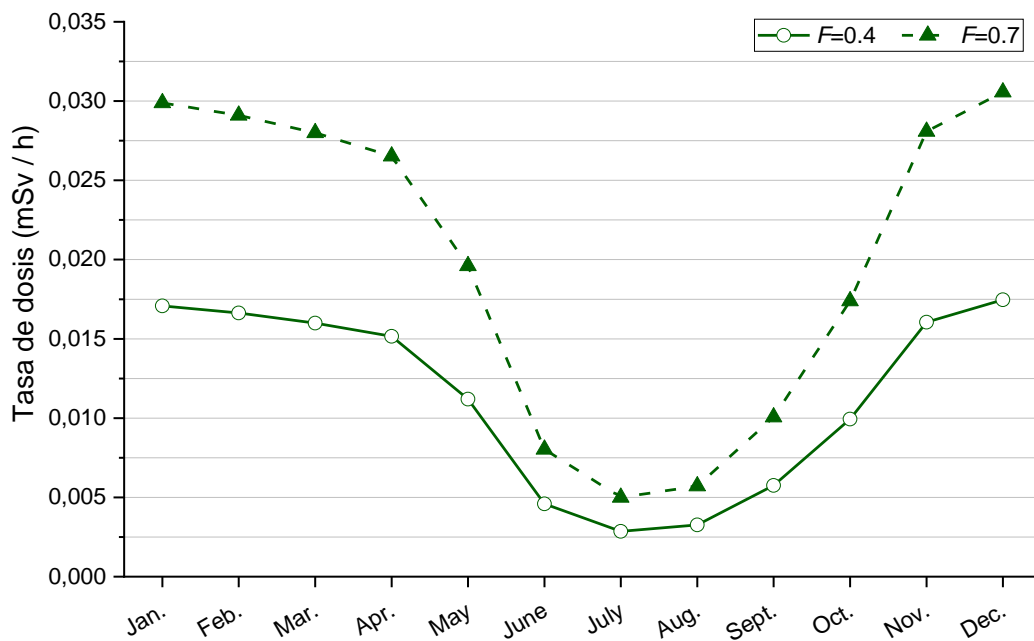


Figura 62. Tasa de dosis expresada en mSv/h para los factores de equilibrio de 0.4 y 0.7.

Todas estas características particulares de Altamira, y generales de una gran mayoría de cuevas turísticas, hacen necesario el desarrollo de metodologías de evaluación de dosimetría personal que permitan regular los tiempos de exposición con la mayor eficacia posible.

El cumplimiento de la legislación española vigente (Consejo de Seguridad Nuclear, 2012), hace que sea necesario aplicar una limitación al tiempo de permanencia anual total de los trabajadores dentro de la Cueva para cumplir con los criterios de protección radiológica establecidos en dicha Instrucción. La Instrucción indica la posibilidad de alcanzarse hasta 6 mSv/año, valor por encima del cual se requeriría la realización de medidas de protección radiológica de mayor complejidad técnica y administrativa. Dicha tasa de dosis se alcanzaría en la cueva de Altamira con permanencias anuales que oscilarían entre unas 530 h si se considera la aproximación basada en ICRP 65 con $F = 0.4$, y de unas 300 h si se considera un $F = 0.7$.

6. La influencia de las visitas públicas sobre el microambiente de la sala de Polícromos

Desde el descubrimiento de la cueva de Altamira en 1868 la afluencia de visitantes ha sido constante y extraordinariamente alta en sus inicios. En la década de los 70 el número medio de personas superaba los 150,000 visitantes al año. Debido a la observación de decoloración de las pinturas, y a la formación de velos de calcita sobre algunas de ellas a finales de los años 60 y principios de los 70, en 1977 se decide cerrar la cueva al público.

En 1979 se inicia el proyecto científico-técnico para la conservación de las pinturas de la cueva de Altamira coordinado por el profesor Eugenio Villar de la Universidad de Cantabria. En base al estudio de las condiciones climáticas de la cavidad, se propuso un régimen de visitas. El fundamento de dicho régimen fue que la variación de los parámetros ambientales debidos a la presencia humana no influyera en los procesos de deterioro, y que dichas modificaciones no fuesen acumulativas, es decir, que se respetasen los tiempos de recuperación para reestablecer las condiciones previas a la visita (IPCE, 2014b).

Tabla 24. Número de grupos de 5 visitantes más guía permitidos al día según el régimen de visitas propuesto por Villar (Villar et al., 1984).

	Ene-Abr	May	Jun	Jul-Sept	Oct	Nov	Dic
Grupos/día	5	2	8	7	8	4	6

Cada grupo de visitantes dentro del régimen de acceso establecido por Villar constaba de 5 personas del público más un guía turístico en todos los casos. Sin embargo, dependiendo de la época del año se permitían más o menos grupos de personas al día, hasta un máximo de 11,300 personas al año incluyendo a los guías. En la Tabla 24 se detalla el número de grupos permitidos al día para cada mes del año. El tiempo máximo de permanencia en la cueva era de unos 20 minutos, mientras que para la sala de Polícromos se fijó un máximo de 10 minutos. Este sistema de entradas se

mantuvo desde 1982 hasta 2002 (Villar et al., 1984).

En el año 2002 se produjo el segundo cierre de la cueva de Altamira debido a la presencia de organismos fotosintéticos. Después de tres años de cierre al público, en junio de 2005 se realizó una visita experimental de características similares a las llevadas a cabo en el periodo 1982-2002. En dicha visita experimental de 5 personas más guía durante un tiempo de permanencia en Polícromos de 10 minutos la temperatura se incrementó 0.16 °C y la concentración de CO₂ en 138 ppm. El tiempo de recuperación calculado para la temperatura fue de 7 horas, mientras que en el caso del CO₂ no se llega a ninguna conclusión debido a la gran variabilidad que este gas experimenta durante el mes de junio. En base a esta única visita experimental fueron que para establecer un régimen de visitas óptimo es necesario conocer las características del grupo de visitantes (peso, edad, tiempo transcurrido en la cueva antes de entrar en Polícromos, etc.), y que el control de los parámetros ambientales debe ser extendido en el perfil vertical con el objetivo de conocer la distribución espacial de los mismos.

Tras la finalización de los trabajos del CSIC, el Patronato de la Cueva de Altamira encomienda al Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) iniciar una fase de estudios: “El Programa de Investigación para la Conservación Preventiva y Régimen de Acceso de la Cueva de Altamira” (2012-2014). A raíz de este proyecto se volvió a abrir la cueva al público en forma de visitas experimentales normalizadas en las que se controlan las variaciones de los principales parámetros ambientales, temperatura, concentración de CO₂ y humedad.

6.1. Régimen de visitas públicas

Tras un periodo de visitas experimentales, el 26 de marzo de 2015 el Patronato del Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira decidió mantener el régimen de acceso público, controlado y limitado, a la cueva de Altamira que se inició en el marco del Programa de investigación para la conservación preventiva y accesibilidad en 2014.

6. La influencia de las visitas públicas sobre el microambiente de la sala de Polícromos

La visita pública se realiza de forma sistemática en número de visitantes, horario, tiempos de permanencia en cada sala, etc. El estándar de visita que se sigue en la actualidad según la información proporcionada por Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira (MNCIA) se detalla a continuación. El control de la ocupación de la cueva se lleva a cabo a partir de la denominada carga de trabajo calculada como el número de personas multiplicado por el tiempo de estancia en minutos.

La visita se realiza mediante un sorteo que se celebra los viernes a las 10:40. Pueden participar en el procedimiento de selección de los cinco participantes todas las personas mayores de 16 años que se encuentren visitando el museo entre las 9:30 y las 10:30 de ese mismo día. A su llegada se les facilita el boletín de solicitud así como las condiciones de visita que han de ser aceptadas expresamente.



Figura 63. Fotografía del equipo de Seguimiento Ambiental antes de la entrada a la cueva donde se puede observar el equipamiento individual utilizado.

Así pues, cada semana, y siempre que se cumplan los criterios de accesibilidad que se detallan en el apartado 6.2, se realiza una visita pública para 5 personas acompañadas por 2 guías con un estricto control de indumentaria, iluminación y tiempo de permanencia en el interior. Los visitantes deben utilizar un vestuario específico que incluye traje desechable de polipropileno, calzado esterilizado,

maskarilla y guantes (ver Figura 63). Dado que el interior carece de instalación luminosa, cada persona lleva una luz frontal de led y el guía acompaña al grupo con una linterna de mayor potencia.

Una vez equipados, se inicia el camino hacia la cueva circulando por una pasarela de tramex sobreelevada para evitar el contacto con hierbas o partículas existentes en el suelo. No obstante, antes de acceder a la cueva se realiza la limpieza de la suela de los zapatos en una solución de peróxido de hidrógeno diluido al 25% para eliminar cualquier residuo contaminante. La entrada a la cueva se realiza cuando las personas están completamente preparadas para minimizar el tiempo de apertura de la puerta exterior.

Una vez en el interior, el grupo realiza un itinerario prediseñado y pautado en cuanto a los tiempos de parada en cada punto del circuito con una duración máxima de 37 minutos. La visita se inicia en el Hall donde uno de los guías explica las ocupaciones humanas y la geología de la cueva. Todo el grupo permanece aquí 5 minutos pero a continuación, una vez traspasada la segunda puerta, se divide en dos.

El primer grupo, integrado por tres visitantes y un guía, se dirige hacia el fondo de la cueva, hasta la sala de la Hoya, realizando 5 paradas en el trayecto e invirtiendo en ello unos 24 minutos.

El segundo grupo, formado por dos visitantes y un guía, se dirige directamente a la sala de Policromos donde permanece 8 minutos. Transcurrido este tiempo, el segundo grupo inicia el descenso hacia la Hoya, cruzándose en el trayecto con el primer grupo que está de retorno y se dirige hacia Policromos.

Los dos grupos se vuelven a reunir en el vestíbulo de la cueva y salen al mismo tiempo, de manera que la puerta se abrirá una sola vez evitando así una parte del intercambio con el exterior.

Hasta febrero de 2017 la entrada en la sala de Polícromos durante la visita pública se realizaba conjuntamente los 5 miembros del público más los dos guías. A partir de dicha fecha, con el fin de reducir el impacto en los parámetros ambientales, se realiza

la visita según el protocolo descrito anteriormente. La modificación en el protocolo de entrada a la sala de Polícromos se basó en la comparación de forma estadística de las visitas del año 2016 (5 visitantes más 2 guías) con las realizadas durante febrero de 2017 (3 visitantes más 1 guía, tiempo de espera, 2 visitantes más 1 guía). El tiempo de espera de espera entre grupos se ha ido variando con el fin de observar cambios en el incremento de los parámetros ambientales monitorizados.

En resumen, separar el grupo de visitantes en dos tiene menos impacto sobre el incremento de temperatura que el producido por un solo grupo. En el caso del incremento de CO₂ no se han encontrado diferencias significativas entre ambos protocolos.

6.2. Definición de límites de accesibilidad y alarma

El impacto antrópico sobre las condiciones microclimáticas de la sala de Polícromos se ha estudiado a partir de la variación de la temperatura, de la concentración de CO₂ y de la humedad específica, debida a las visitas públicas. En el PCP se establece un límite de accesibilidad para cada uno de los parámetros estudiados para cada mes, de modo que antes de iniciar la entrada/visita su valor ha de estar por debajo de su correspondiente límite de acceso. Además, se establecen límites de alarma que establecen la variación máxima permitida para cada parámetro una vez iniciada la visita.

En el caso de la temperatura del aire, el límite de acceso se establece para cada mes en base a la temperatura estimada a partir del modelo predictivo, el máximo y el mínimo de temperatura del mismo mes para el ciclo anual anterior. El límite de acceso y de alarma para la temperatura (°C) se define como:

$$\begin{aligned} \text{Limite Acceso } (T) &= T_e + (T_{\max} - T_{\min}) - 0.1 \\ \text{Limite Alarma } (T) &= T_i + 0.4 \end{aligned} \tag{21}$$

siendo:

T_e : Temperatura estimada obtenida del modelo predictivo.

T_{\max} : Temperatura máxima del mismo mes del año anterior.

T_{\min} : Temperatura mínima del mismo mes del año anterior.

T_i : Temperatura antes del inicio de la visita pública.

El límite de acceso y de alarma para la concentración de CO₂ (ppm) se define en base al promedio histórico y al máximo y mínimo del ciclo anual anterior para ese mes como:

$$\begin{aligned} \text{Limite Acceso } ([\text{CO}_2]) &= [\text{CO}_2]_{\text{media}} + ([\text{CO}_2]_{\text{max}} - [\text{CO}_2]_{\text{min}}) \\ \text{Limite Alarma } ([\text{CO}_2]) &= [\text{CO}_2]_i + 400 \end{aligned} \quad (22)$$

donde:

$[\text{CO}_2]_{\text{media}}$: Concentración de CO₂ media del histórico del mismo mes.

$[\text{CO}_2]_{\text{max}}$: Concentración de CO₂ máxima del mismo mes del año anterior.

$[\text{CO}_2]_{\text{min}}$: Concentración de CO₂ mínima del mismo mes del año anterior.

$[\text{CO}_2]_{\text{min}}$: Concentración de CO₂ antes del inicio de la visita pública.

El límite de acceso y de alarma para la humedad específica (g/kg) se basa en el histórico, máximo y mínimo de humedad relativa del ciclo anual anterior y del límite de acceso para la temperatura como:

$$\begin{aligned} \text{Limite Acceso } (H_e) &= \left(\frac{37.95}{1013.25} \right) \cdot (HR_{\text{media}} + HR_{\text{max}} - HR_{\text{min}}) \cdot 10^{\left(\frac{7.5 \cdot \text{Lim. Acceso}(T)}{237.7 + \text{Lim. Acceso}(T)} \right)} \\ \text{Limite Alarma } (H_e) &= H_{e,i} + 0.2 \end{aligned} \quad (23)$$

con:

HR_{media} : Humedad relativa media del histórico del mismo mes.

HR_{max} : Humedad relativa máxima del mismo mes del año anterior.

HR_{min} : Humedad relativa mínima del mismo mes del año anterior.

HR_i : Humedad relativa antes del inicio de la visita pública.

Si se supera el límite de acceso antes del inicio de la visita, ésta no se podrá realizar, se deberá comunicar al técnico encargado de acceso a la cueva, así como al Coordinador de la Comisión de Seguimiento. Si durante alguna visita se superara el nivel de alarma, una vez descartados problemas técnicos, será necesario informar al técnico encargado de acceso a la cueva y al Coordinador de la Comisión de Seguimiento, quienes deberán tomar una decisión acerca del bloqueo de las actividades que se estén llevando a cabo en la cueva.

6.3. Histórico del control de ocupación de la cueva

El control de la ocupación de la cueva se lleva a cabo a partir de la denominada carga de trabajo, calculada como el número de personas multiplicado por el tiempo de estancia en minutos. Este seguimiento tiene en cuenta la carga de trabajo en la cueva en su conjunto y de manera específica la correspondiente a la sala de Polícromos. Del mismo modo se divide la carga correspondiente a las visitas públicas y a los investigadores. En la Figura 64 se muestra el histórico de ocupación desde el 2013 en comparación con la carga de trabajo propuesta por Villar.

La carga originada por las visitas públicas durante 37 minutos es de 259 personas \times minutos, de los cuales 56 personas \times minutos corresponden al tiempo de permanencia en el interior de la sala de Polícromos.

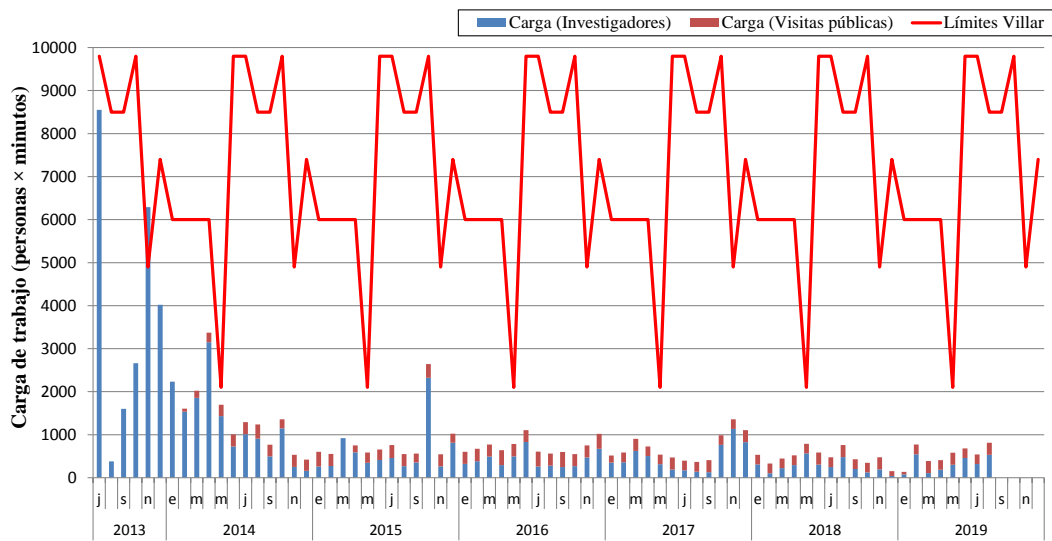


Figura 64. Histórico de la carga de trabajo en la sala de Polícromos provocada por investigadores y visitas públicas en comparación con la propuesta por Villar.

En el historico de la carga de trabajo en la sala de Polícromos que se muestra en la Figura 64 se observa que la presencia de investigadores en la primera etapa del PCP (2013-2014) fue importante, siempre inferior a la carga propuesta por Villar, a excepción de noviembre de 2013 debido a la realización de estudios adicionales que no se habían previsto en el programa inicial. Cabe destacar que durante los años 2018 y 2019 la carga total cada mes se mantiene por debajo de los 1000 personas \times minutos.

6.4. Influencia antrópica sobre la temperatura, CO₂ y humedad

La influencia antrópica de las visitas públicas en la sala de Polícromos sobre los parámetros anteriormente mencionados se analiza a partir de la variación de los mismos. De manera ilustrativa se ha tomado la visita pública realizada el día 20 de abril de 2018, en la Figura 65 se muestra la variación de la temperatura, en la Figura 66 la variación de la concentración de CO₂ y por último en la Figura 67 se puede ver la variación de la humedad específica. La resolución temporal de toma de datos de los sensores es de 1 minuto. En la Tabla 25 se resume la variación absoluta de cada uno de los parámetros durante dicha visita así como el límite de acceso que se fijó para ese mes. Este análisis se realiza para todas y cada una de las visitas públicas cuyos resultados se incluyen en el informe de seguimiento mensual. Hasta la fecha se han

analizado 274 visitas.

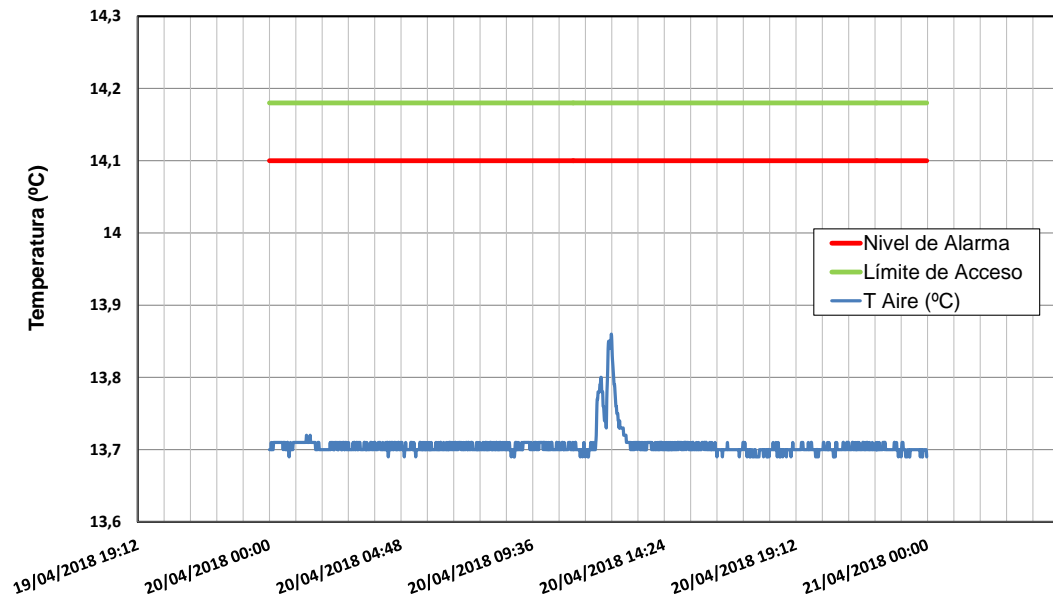


Figura 65. Variación de la temperatura en la sala de Polícromos durante la visita experimental del 20 de abril de 2018.

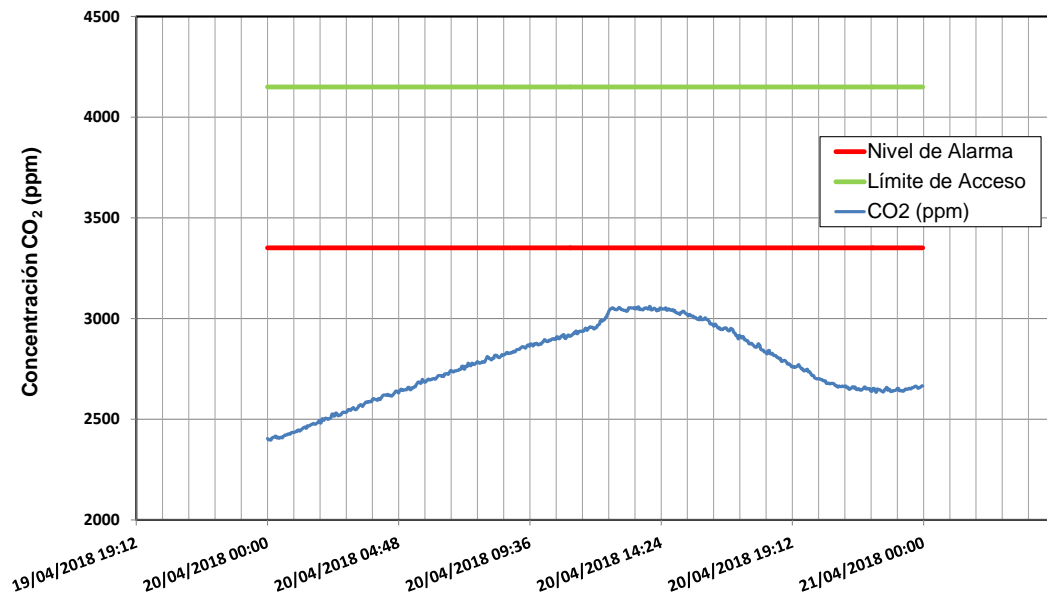


Figura 66. Variación de la concentración de CO₂ del aire en la sala de Polícromos durante la visita experimental del 20 de abril de 2018.

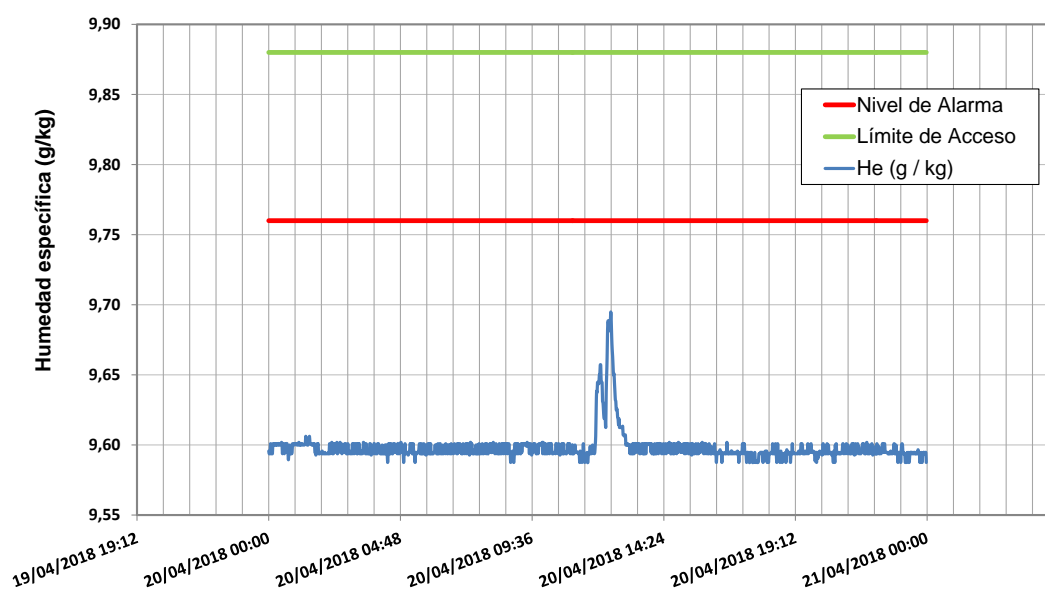


Figura 67. Variación de la humedad específica en la sala de Polícromos durante la visita experimental del 20 de abril de 2018.

Tabla 25. Variación de los parámetros ambientales monitorizados en la visita del 20 de abril de 2018. Se incluye el límite de acceso para ese mes.

	Inicial	Límite de Acceso	Variación
T (°C)	13.70	14.18	0.15
[CO ₂] (ppm)	2951	4150	98
H_e (g/kg)	9.56	9.88	0.13

A continuación compara el impacto provocado por el protocolo que se realizaba hasta febrero de 2017, en el cual entraban los 5 visitantes más dos guías en un único grupo, con el correspondiente al protocolo actual, en el que entran 3 visitantes más el guía, tiempo de espera de 12 minutos y entrada del segundo grupo de 2 visitantes más el guía. La escala de tiempo en este caso viene dada en minutos, fijando como cero el inicio de la visita con el fin de calcular el tiempo de recuperación en cada caso. En la Figura 68 se muestra la variación de temperatura y en la Figura 69 la variación de la humedad específica para cada una de las visitas. La variación de la concentración de CO₂ no es comparable debido a la gran variabilidad que tiene este gas dentro de la cavidad. La influencia antrópica sobre este parámetro tiene una fuerte dependencia con

la variación natural. Por estos motivos no se ha analizado el tiempo de recuperación a niveles iniciales.

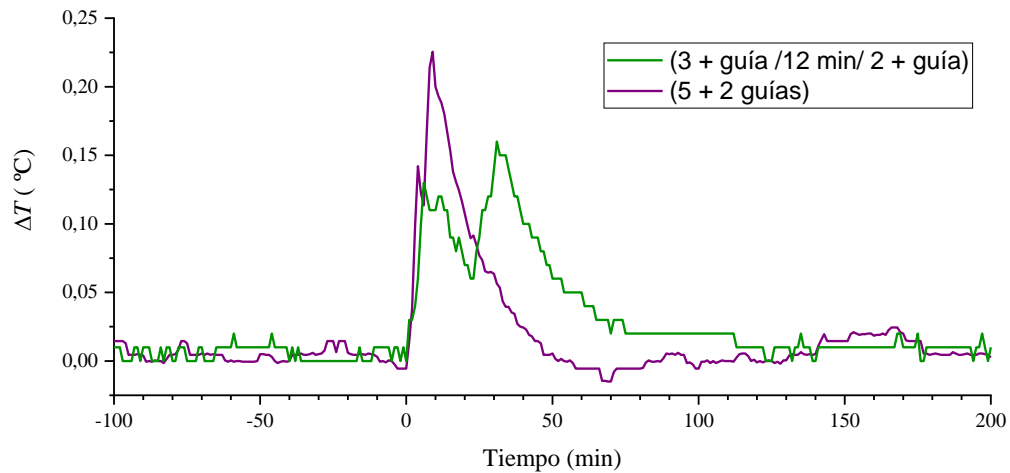


Figura 68. Variación de la temperatura del aire en la sala de Polícromos durante la visita del 26/08/2016 (5 + 2 guías) y del 30/08/2019 (3 + guía, espera de 12 minutos, 2 + guía).

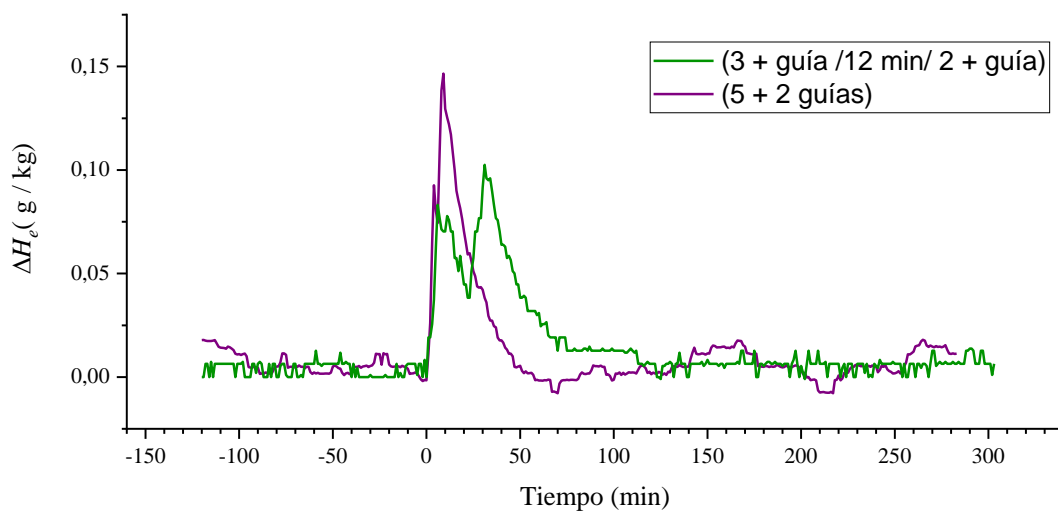


Figura 69. Variación de la humedad específica del aire en la sala de Polícromos durante la visita del 26/08/2016 (5 + 2 guías) y del 30/08/2019 (3 + guía, espera de 12 minutos, 2 + guía).

La variación absoluta en la temperatura en el caso de la visita siguiendo el protocolo antiguo es de 0.23 °C en comparación con los 0.16 °C del protocolo actual. En el caso de la humedad, en la visita correspondiente al 2016 varía 0.15 g/kg y en la del 2019 se modifica en 0.10 g/kg. El tiempo que tarda la temperatura y humedad en recuperar los valores iniciales antes de la visita, denominado tiempo de recuperación, es de 50

minutos en el caso del protocolo antiguo y de 110 minutos en el actual. Se destaca por tanto que aunque la variación absoluta en el protocolo seguido en la actualidad es menor, el tiempo de recuperación se incrementa.

Del mismo modo, se han comparado estadísticamente los dos protocolos a partir de la variación de temperatura y CO₂ durante las visitas en los 2016 y del 2017. Se ha aplicado el test de Welch, que tiene en cuenta la variación media de cada parámetro con su desviación estándar, se ha llegado a la conclusión de que la disminución aparente de temperatura del nuevo protocolo comparado con el anterior es significativa con el 95% de confianza. Por otra parte la variación media del CO₂ del año 2016, protocolo de un solo grupo, comparado con el llevado a cabo en 2017, dos grupos, no son significativamente diferentes con un 95% de confianza.

A modo de resumen, en la Tabla 26 se incluye del promedio de la variación absoluta de cada uno de los parámetros y su desviación estándar del histórico de visitas públicas realizadas. Se observa que el impacto es muy similar para todos los años, durante el 2017 se observa una disminución en la variación absoluta en la temperatura. En el caso de la variación de la humedad y el CO₂ no se observan cambios apreciables para los diferentes años.

Tabla 26. Variación promedio para cada año de los parámetros ambientales monitorizados (temperatura, concentración de CO₂ y humedad) debido a las visitas públicas.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ΔT (°C)	0.16 ± 0.03	0.18 ± 0.05	0.18 ± 0.04	0.13 ± 0.03	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.02
Δ [CO ₂] (ppm)	76 ± 15	80 ± 22	80 ± 29	80 ± 27	75 ± 21	78 ± 27
ΔH_e (g/kg)	0.10 ± 0.08	0.11 ± 0.07	0.10 ± 0.09	0.10 ± 0.09	0.11 ± 0.02	0.10 ± 0.01

Las distribuciones de la variación de temperatura y CO₂ de todo el histórico de visitas se muestran en la Figura 70. La media y desviación estándar de la variación de temperatura es 0.17±0.04 °C mientras que pasa la variación de CO₂ es 79±23 ppm. Se ha realizado el test de normalidad Saphiro-Wilk llegando a la conclusión que no hay evidencias suficientes para decir que los datos no siguen una distribución normal.

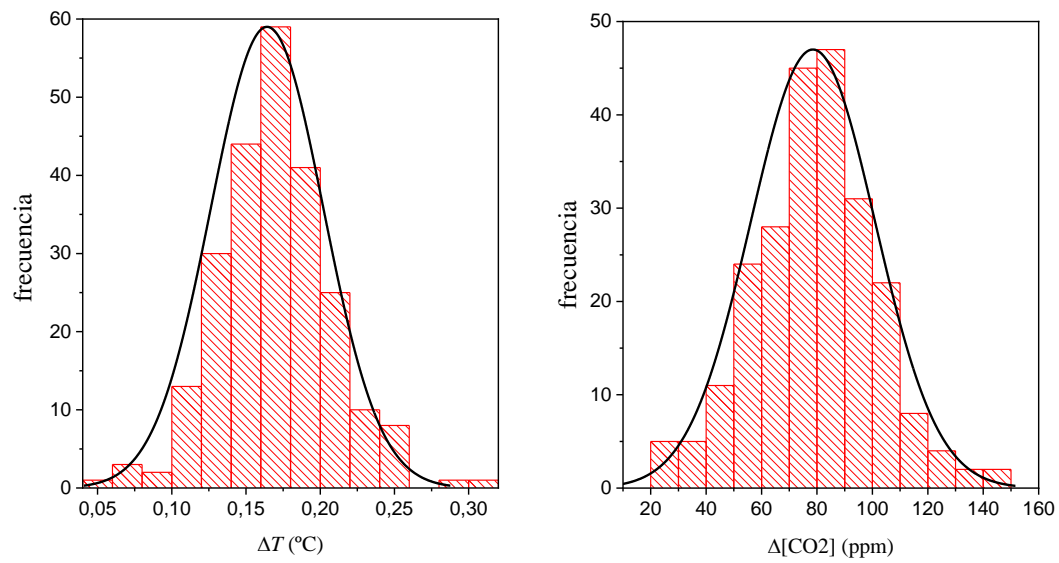


Figura 70. Histograma de la variación absoluta de temperatura y CO₂ de las 274 visitas analizadas en el periodo 2014-2019.

7. Conclusiones

El estudio de los procesos físicos y de las condiciones climáticas de la cueva de Altamira es un aspecto básico dentro de la estrategia global de conservación del arte rupestre. A falta de un conocimiento preciso de las condiciones ambientales optimas de conservación, el seguimiento sistemático proporciona una base sólida sobre la que evaluar tanto la influencia de la meteorología y clima exteriores, como del impacto de la presencia humana en el interior de la cueva.

Este estudio se enmarca en la etapa de implantación del Plan de Conservación Preventiva de la Cueva de Altamira y su desarrollo posterior. La obtención y análisis sistemáticos de las series temporales de variables ambientales que se presentan en esta tesis han mostrado su utilidad para la actualización y mejora continua de distintos protocolos y valores de referencia de dicho Plan.

Para llevar a cabo el estudio de las condiciones climáticas de la cavidad es necesario que las características de la instrumentación utilizada se adapten al ambiente subterráneo, especialmente en lo relativo a la elevada humedad interior, que puede introducir alteraciones y derivas temporales en la exactitud y precisión de las lecturas proporcionadas por las sondas de medida que deben ser continuamente vigiladas y controladas.

El control de calidad del funcionamiento de los sistemas de medida en continuo y de los datos proporcionados es esencial para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados obtenidos. En este trabajo se han realizado sistemáticamente verificaciones y calibraciones de las sondas de medida tanto en condiciones de laboratorio como en las condiciones reales de humedad del ambiente estudiado. Se han actualizado las series temporales que describen el campo de temperaturas de la cueva de Altamira. La temperatura del aire de cada una de las salas viene esencialmente determinada por la onda térmica que se propaga a través de la roca desde el exterior. Se han obtenido cuantitativamente para cada una de las salas tanto el desfase temporal como la amortiguación de la oscilación que se produce en la transmisión hacia el

interior de la cueva de dicha onda.

El gradiente térmico entre las distintas zonas de la cavidad es un factor determinante en el intercambio de materia y energía entre las mismas. La circulación termoconvectiva del aire entre salas se ve propiciada a favor de un gradiente de densidad, que pone de manifiesto el grado de conexión y provoca el intercambio gaseoso entre la sala de Polícromos, el resto de salas adyacentes y la atmosfera exterior. El mayor grado de conexión de la sala de Polícromos con las demás zonas, Cruce y Hall, se produce entre los meses de febrero a mayo. En esta época, el aire más frío y denso del Cruce se mueve hacia cotas más bajas de la cavidad, entre las que se encuentra la sala de Polícromos, mientras que el aire más caliente y menos denso de Polícromos asciende por la parte superior del pasillo produciéndose así el intercambio termoconvectivo entre ambas salas. Una vez se revierte este gradiente, en el periodo de mayo-junio a febrero, la sala de Polícromos se encuentra en un estado de relativo aislamiento respecto a las zonas contiguas del interior de la cueva en lo que a intercambio de aire se refiere.

Se ha estudiado el efecto térmico sobre el aire de la Sala de Polícromos de la apertura del segundo cierre interior. El análisis de las variaciones temporales de la temperatura del aire de la sala durante un año y medio muestra que la climatología exterior tiene un papel predominante, tanto a través de la onda térmica como por la magnitud de la circulación convectiva de aire desde la entrada hasta la sala durante la primera mitad del año.

El modelo predictivo de temperaturas de la sala de Polícromos desarrollado en este estudio se ha basado en el método estadístico de corrección de sesgo quantil mapping empírico. Este modelo disminuye la complejidad del original desarrollado por el ICPE, tanto desde el punto de vista de su implementación, como en el número de parámetros necesarios para desarrollarlo. Así, el nuevo modelo es capaz de adaptarse de manera más flexible a los posibles cambios en el régimen de temperaturas de la cavidad derivados del cambio climático. Del mismo modo, la aproximación propuesta permite aumentar el número de predictores, utilizar otras series de temperatura registradas (exterior, suelo y Hall, etc.) o caracterizar adecuadamente la incertidumbre del modelo.

De esta forma, el modelo propuesto posibilita el desarrollo de conjuntos de predicciones, sin más que considerar las diferentes series de temperatura registradas, y así caracterizar las diferentes fuentes de incertidumbre asociadas a la predicción de la temperatura interior de la sala de Polícromos. Este es un punto clave del modelo, de tal manera que se dispone de un intervalo de confianza a partir del cual se pueden tomar decisiones respecto a la aplicación de los límites de acceso de visitas públicas.

La aplicación de modelos de transporte basados en el análisis de las variaciones de concentración de gas radón ha permitido cuantificar tasas de ventilación y describir los ciclos de intercambio gaseoso de la sala de Polícromos con el exterior, tanto a una escala temporal estacional como en periodos mensuales e incluso diarios. La comparación entre las series temporales de concentración de radón y CO₂ ha permitido validar una explicación de los intercambios basados en gradientes térmicos y en el diferente grado de permeabilidad que el sistema kárstico exhibe durante diferentes periodos del año. Todas las zonas interiores de la cavidad, en mayor o menor medida, presentan unas marcadas variaciones de carácter estacional. La conexión cavidad-exterior en la fase gaseosa muestra su mayor magnitud durante el verano, cuando el gradiente de densidad del aire es negativo, es decir, la densidad del aire exterior es menor que la densidad del aire interior ($\rho_{\text{ext}} < \rho_{\text{cueva}}$). De manera general esto sucede cuando la temperatura promedio del aire interior es mucho más baja que en el exterior. Por el contrario, las concentraciones de gases alcanzan su punto máximo en invierno cuando la matriz kárstica se vuelve impermeable a través del efecto combinado de la humedad acumulada en las grietas y fisuras, y la mayor densidad del aire exterior que ejerce un efecto de contención sobre la atmosfera interior de la cueva. Sin embargo, durante el invierno hay eventos de periodo corto que interconectan la cavidad y el exterior propiciados por las condiciones ambientales exteriores, tales como el aumento repentino de temperatura y la disminución de las precipitaciones. La monitorización de radón es esencial para cumplir con la legislación española vigente en cuanto a los criterios de protección radiológica establecidos. Se han considerado varios escenarios para estimar la dosis recibida por las personas que acceden a la cueva. Sin embargo, las características particulares de Altamira, hacen necesario el desarrollo de metodologías de evaluación de dosimetría personal que permitan regular los tiempos

de exposición con la mayor eficacia posible.

La monitorización de las variables ambientales, ha permitido analizar el impacto antrópico sobre las condiciones microclimáticas de la sala de Polícromos a partir de la variación de la temperatura, la concentración de CO₂ y la humedad específica, debida a las visitas públicas. De este modo, se han analizado 274 visitas públicas concluyendo que las visitas son reproducibles y los impactos que producen las variables ambientales estudiadas se distribuyen normalmente. En el marco de este análisis, se concluye que en base al análisis del impacto de las visitas públicas sobre los parámetros mencionados y sus respectivos tiempos de recuperación se realizó una optimización del protocolo de entrada en la sala de Polícromos que ha reducido la variación absoluta tanto de la temperatura del aire como de su humedad específica.

La continuación en el seguimiento ambiental de la cueva de Altamira es esencial para corroborar las conclusiones expuestas en esta investigación. La validación del nuevo modelo predictivo propuesto se debe sustentar en la obtención de nuevos datos que permitan su evaluación al añadir más estadística a su desarrollo. Para aumentar su precisión se pueden corregir las predicciones en base a los errores cometidos en el pasado tal y como se describe en técnicas como el filtro de Kalman.

Referencias

- Aguirre, E. (1996). "El hombre fósil," 80 años después: volumen conmemorativo del 50 aniversario de la muerte de Hugo Obermaier (Vol. 36), pp 250. Ed. Universidad de Cantabria.
- Audi, G., Kondev, F. G., Wang, M., Huang, W. J., & Naimi, S. (2017). The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties. *Chinese physics C*, 41(3), 030001.
- Batiot-Guilhe, C., Seidel, J. L., Jourde, H., Hébrard, O., & Bailly-Comte, V. (2007). Seasonal variations of CO₂ and ²²²Rn in a Mediterranean sinkhole-spring (Causse d'Aumelas, SE France). *International Journal of Speleology*, 36(1), 5.
- Berner, R. A. (2003). The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 426(6964), 323.
- BOE (2010). Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio.
- Bourges, F., Genthon, P., Genty, D., Lorblanchet, M., Mauduit, E., & D'Hulst, D. (2014). Conservation of prehistoric caves and stability of their inner climate: lessons from Chauvet and other French caves. *Science of the Total Environment*, 493, 79-91.
- Breuil, H., & Obermaier, H. (1984). La cueva de Altamira en Santillana del Mar. Madrid: Tipog. Archivos, 59.
- Broughton, S. A., & Bryan, K. M. (2011). *Discrete Fourier analysis and wavelets: applications to signal and image processing*. John Wiley & Sons.
- Buck, A. L. (1981). New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of applied meteorology*, 20(12), 1527-1532.
- Butterweck-Dempewolf, G., Shuler, C., & Vezzu, G. (1997, June). Size distribution of the unattached fraction of radon progeny. In *European Conference on Protection against Radon at Home and at Work*. Praha, Czech Republic.

-
- Cheng, W. Y., & Steenburgh, W. J. (2007). Strengths and weaknesses of MOS, running-mean bias removal, and Kalman filter techniques for improving model forecasts over the western United States. *Weather and Forecasting*, 22(6), 1304-1318.
- Cigna, A. A. (2004). The distribution of radon concentration in caves. *International Journal of Speleology*, 32(1), 8.
- Consejo de Seguridad Nuclear (2012). Instrucción IS-33, Sobre Criterios Radiológicos Para la Protección Frente a la Exposición a la Radiación Natural. Boletín Oficial del Estado (BOE), Spain, p. 22.
- Cuezva, S. (2008). *Dinámica microambiental de un medio kárstico somero (Cueva de Altamira, Cantabria): microclima, geomicrobiología y mecanismos de interacción cavidad-exterior* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- De Freitas, C. R., Littljohn, R. N., Clarkson, T. S., & Kristament, I. S. (1982). Cave climate: assessment of airflow and ventilation. *International Journal of Climatology*, 2(4), 383-397.
- De Freitas, C. R., & Schmekal, A. (2006). Studies of condensation/evaporation processes in the Glowworm Cave, New Zealand. *International Journal of Speleology*, 35(2), 3
- Déchelette, J. (1908). *Manuel d'archéologie préhistorique celtique et gallo-romaine. Archéologie préhistorique*. Paris (France) A Picard et fils.
- Déqué, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1-2), 16-26.
- Derrick, T. R., & Thomas, J. M. (2004). Chapter 7 Time-Series Analysis: The cross-correlation function. In: *Innovative Analyses of Human Movement*, (pp. 189-205), Stergiou, N. (ed). Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois, 189-205.
- Dietterich, T. G. (1998). Approximate statistical tests for comparing supervised classification learning algorithms. *Neural computation*, 10(7), 1895-1923.

- Domínguez-Villar, D., Fairchild, I. J., Baker, A., Carrasco, R. M., & Pedraza, J. (2013). Reconstruction of cave air temperature based on surface atmosphere temperature and vegetation changes: implications for speleothem palaeoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, 369, 158-168.
- Durán Romero, D. (2014). *Método predictivo para estimar la temperatura media mensual en el interior de la sala de los polícromos*. Informe del Archivo General del Instituto del Patrimonio Cultural de España, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Madrid.
- Elez, J., Cuezva, S., Fernandez-Cortes, A., Garcia-Anton, E., Benavente, D., Cañaveras, J. C., & Sanchez-Moral, S. (2013). A GIS-based methodology to quantitatively define an Adjacent Protected Area in a shallow karst cavity: The case of Altamira cave. *Journal of environmental management*, 118, 122-134.
- Feigenwinter I, Kotlarski S, Casanueva A, Fischer AM, Schwierz C, Liniger MA, 2018: Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland, *Technical Re-port MeteoSwiss*, 270, 44 pp.
- Fernández Navarro P. L. (1983). *Estudio de las características microclimáticas y cromáticas de la sala de policromos de la cueva de Altamira, como ecosistema natural*. (Tesis Doctoral). Universidad Cantabria, Cantabria, España.
- Fernández, P. L., Quindós, L. S., Soto, J., & Villar, E. (1984). Radiation exposure levels in Altamira Cave. *Health physics*, 46(2), 445-447.
- Fernández, P. L., Gutierrez, I., Quindós, L. S., Soto, J., & Villar, E. (1986). Natural ventilation of the paintings room in the Altamira cave. *Nature*, 321(6070), 586.
- Frias, M. D., Zorita, E., Fernández, J., & Rodríguez-Puebla, C. (2006). Testing statistical downscaling methods in simulated climates. *Geophysical Research Letters*, 33(19).
- Frisia, S., Fairchild, I. J., Fohlmeister, J., Miorandi, R., Spötl, C., & Borsato, A. (2011). Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(2), 380-400.
- Fuente, M., Rabago, D., Herrera, S., Quindos, L., Fuente, I., Foley, M., & Sainz, C. (2018). Performance of radon monitors in a purpose-built radon chamber. *Journal of Radiological Protection*, 38(3), 1111.

-
- Fuente, M. (2019). Investigation of radon prevention and mitigation: from radon measurements to specification for soil depressurisation systems. (PhD Thesis). National University of Ireland Galway. Galway. Ireland.
- Garcia-Anton, E., Cuezva, S., Jurado, V., Porca, E., Miller, A. Z., Fernandez-Cortes, A., ... & Sanchez-Moral, S. (2013). Combining stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$) of trace gases and aerobiological data to monitor the entry and dispersion of microorganisms in caves. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(1), 473-484.
- García-Antón, E. (2014). *Aplicación de la señal isotópica $\delta^{13}\text{CO}_2$ para la caracterización de mecanismos de transporte de CO_2 -gas entre atmósfera y subsuelo en sistemas kársticos someros (Cueva de Altamira, Cantabria)* (Tesis Doctoral). Universidad de Alicante, Alicante, España.
- Gázquez, F., Quindós-Poncela, L., Sainz-Fernández, C., Fernández-Villar, A., Fuente-Merino, I., & Celaya-Gonzalez, S. (2016). Spatiotemporal distribution of $\delta^{13}\text{CCO}_2$ in a shallow cave and its potential use as indicator of anthropic pressure. *Journal of environmental management*, 180, 421-432.
- George, A. C. (1996). State-of-the-art instruments for measuring radon/thoron and their progeny in dwellings--a review. *Health Physics*, 70(4), 451-463.
- Gillieson, D. (2009). *Caves: processes, development and management*. John Wiley & Sons.
- Gribov, A., & Krivoruchko, K. (2011). Local polynomials for data detrending and interpolation in the presence of barriers. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 25(8), 1057-1063.
- Gunning, G. A., Pollard, D., & Finch, E. C. (2014). An outdoor radon survey and minimizing the uncertainties in low level measurements using CR-39 detectors. *Journal of Radiological Protection*, 34(2), 457.
- Gutiérrez, J. R., Cano, A., Cofiño y Sordo C. (2004). *Redes probabilísticas y neurales en las ciencias atmosféricas*. Universidad de Cantabria. Cantabria, España.
- Gutiérrez, J. M., San-Martín, D., Brands, S., Manzanar, R., & Herrera, S. (2013). Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions. *Journal of Climate*, 26(1), 171-188.

- Gutiérrez, J. M., Maraun, D., Widmann, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, R., ... & San Martín, D. (2018). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International journal of climatology*.
- Gutjahr, O., & Heinemann, G. (2013). Comparing precipitation bias correction methods for high-resolution regional climate simulations using COSMO-CLM. *Theoretical and applied climatology*, 114(3-4), 511-529.
- Herrera & Iturbide (2017). Empirical Quantile Mapping method for bias correction (biasCorrection.R). *Santander Meteorology Group*. [<http://www.meteo.unican.es>]
- Hillel, D. (1982). *Introduction to Soil Physics. Chapter 9: Soil temperature and heat flow*. 155-175. Academic Press. New York.
- Hoyos Gómez, M. (1993). Procesos de alteración de soporte y pintura en diferentes cuevas con arte rupestre del norte de España: Santimamiñe, Arenaza, Altamira y Llonín. *La protección y conservación del arte rupestre paleolítico: mesa redonda hispano-francesa, Colombres (Asturias), 2 al 6 de junio de 1991* (pp. 51-74). Consejería de educación, cultura, deportes y juventud.
- ICRP (2010). Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1).
- IEC 61577-4. (2009). Radiation protection instrumentation - Radon and radon decay product measuring instruments - Part 4: equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products (STAR). International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- IPCE (2014a). Informes del programa de investigación para la conservación preventiva y régimen de acceso de la cueva de Altamira (2012-2014). Vol. I Informe Final.
- IPCE (2014b). Informes del programa de investigación para la conservación preventiva y régimen de acceso de la cueva de Altamira (2012-2014). Vol. II Historia de la conservación de la cueva de Altamira (1868-2012).

-
- IPCE (2014c). Informes del programa de investigación para la conservación preventiva y régimen de acceso de la cueva de Altamira (2012-2014). Vol. IV Plan de Conservación Preventiva.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D): 35-45
- Kim, J. H. (2009). Estimating classification error rate: Repeated cross-validation, repeated hold-out and bootstrap. *Computational Statistics & Data Analysis*, 53(11), 3735-3745.
- Kowalczk, A. J., & Froelich, P. N. (2010). Cave air ventilation and CO₂ outgassing by radon-222 modeling: how fast do caves breathe?. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(1-2), 209-219.
- Lambert, W. J., & Aharon, P. (2011). Controls on dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in cave waters from DeSoto Caverns: Implications for speleothem $\delta^{13}\text{C}$ assessments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(3), 753-768.
- Lynch, C., OMahony, M. J., & Scully, T. (2014). Simplified method to derive the Kalman Filter covariance matrices to predict wind speeds from a NWP model. *Energy procedia*, 62, 676-685.
- Mandic, M., Mihevc, A., Leis, A., Krajcar Broni_c, I., (2013). Concentration and stable carbon isotopic composition of CO₂ in cave air of Postojnska jama, Slovenia. *Int. J. Speleol.* 42, 279e287.
- Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J. M., Kotlarski, S., Chandler, R. E., Hertig, E., ... & Wilcke, R. A. (2015). VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, 3(1), 1-14.
- Maraun, D. (2016). Bias correcting climate change simulations-a critical review. *Current Climate Change Reports*, 2(4), 211-220.
- Monteith, J. & Unsworth, M. (2013). *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*. Academic Press. 4th Ed.

- Moreno, V., Font, L., Baixeras, C., Garcia-Orellana, J., Bach, J., Grossi, C., & Vargas, A. (2015). Effectiveness analysis of filters used with radon detectors under extreme environmental conditions for long-term exposures. *Physics Procedia*, 80, 113-116.
- Moure, A., y González-Sainz, C. (2000). «Cronología del arte paleolítico cantábrico: últimas aportaciones y estado actual de la cuestión». En 3º Congreso de Arqueología Peninsular vol. 2, Paleolítico da península ibérica. Oporto: ADECAP, pp. 461-473.
- Nazaroff, W. W., & Nero, A. V. (1988). Radon and its decay products in indoor air.
- Nave, Carl R. (2017). *Hyperphysics: Thermodynamics*. Georgia State University (Georgia).
- Núñez Gómez, M. (2019). Homogeneidad de la concentración de gas radón en el interior de una cámara de referencia. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Cantabria. Cantabria (España).
- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-resources investigations report*, 99(4259), 312.
- Piani, C., Haerter, J. O., & Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1-2), 187-192.
- Pielke Sr, R. A. (2013). *Mesoscale meteorological modeling* (Vol. 98). Academic press.
- Pollack, H. N., & Huang, S. (2000). Climate reconstruction from subsurface temperatures. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1), 339-365.
- Porstendörfer, J. (2002, February). Influence of physical parameters on doses from radon exposures. In *International Congress Series* (Vol. 1225, pp. 149-160). Elsevier.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [<http://www.R-project.org/>]

-
- Rábago Gómez, D. (2017). *Análisis de series temporales en las temperaturas de la Cueva de Altamira: influencia del ambiente exterior* (Trabajo Fin de Master). Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Rabago, D., Quindós, L.S., Quindós, J., Fernández, E., Fernández, A., Quindós, L., Celaya, S., Fuente, I., Sainz, C. (2019). Intercomparison of indoor radon and geogenic radon measurements under field conditions. *MetroRADON Report*. [Intercomparison of indoor radon and geogenic radon measurements under field conditions](#)
- Reineking, A., & Porstendörfer, J. (1988). Activity size distributions of the shortlived radon decay products and their influence on the deposition probability in the human lung. *Journal of Aerosol Science*, 19(7), 1331-1337.
- Ryan, M. G., & Law, B. E. (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73(1), 3-27.
- Sainz, C., Rábago, D., Fuente, I., Celaya, S., & Quindós, L. S. (2016). Description of the behavior of an aquifer by using continuous radon monitoring in a thermal spa. *Science of The Total Environment*, 543, 460-466.
- Sainz, C., Rábago, D., Celaya, S., Fernández, E., Quindós, J., Quindós, L., ... & Quindós, L. S. (2018). Continuous monitoring of radon gas as a tool to understand air dynamics in the cave of Altamira (Cantabria, Spain). *Science of The Total Environment*, 624, 416-423.
- Sánchez-Moral, S., Soler, V., Cañaveras, J. C., Sanz-Rubio, E., Van Grieken, R., & Gysels, K. (1999). Inorganic deterioration affecting the Altamira Cave, N Spain: quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors. *Science of the Total Environment*, 243, 67-84.
- Sánchez-Moral, S., Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., Janices, I., Benavente, D., Cañaveras, J. C., ... & Portillo, M. C. (2014). *Estudio integral del estado de conservación de la Cueva de Altamira y sus representaciones artísticas paleolíticas. Perspectivas futuras de conservación*. Monografías del Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira, N°24.

- Sanderman, J., & Amundson, R. (2010). Soil carbon dioxide production and climatic sensitivity in contrasting California ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 74(4), 1356-1366.
- Sanz de Sautuola, M. (1880). *Breves apuntes sobre algunos objetos prehistóricos de la provincia de Santander*. Santander (España), Imp. Y lit de Telesforo Martínez.
- Schmith, T. (2008). Stationarity of regression relationships: Application to empirical downscaling. *Journal of Climate*, 21(17), 4529-4537.
- Schneider, J., & Moore, A. W. (2000). *A locally weighted learning tutorial using vizier 1.0*. Carnegie Mellon University, the Robotics Institute.
- [<https://www.cs.cmu.edu/~schneide/tut5/tut5.html>]
- Stauffer, D. R., & Seaman, N. L. (1990). Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Monthly Weather Review*, 118(6), 1250-1277.
- Stevens, M. B., González-Rouco, J. F., & Beltrami, H. (2008). North American climate of the last millennium: Underground temperatures and model comparison. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F1).
- Themessl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), 449-468.
- Vaillant, L., & Bataille, C. (2012). Management of radon: a review of ICRP recommendations. *Journal of radiological protection*, 32(3), R1.
- Valladas, H., & Cachier, H. (1992). Direct radiocarbon dates for prehistoric paintings at the Altamira, El Castillo and Niaux caves. *Nature*, 357(6373), 68.
- Vargas, A., Ortega, X., & Porta, M. (2000). Dose conversion factor for radon concentration in indoor environments using a new equation for the F-fp correlation. *Health physics*, 78(1), 80-85.

-
- Venables, W. N. and Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition* (pp. 389-391). Springer-Verlag.
- Verburg, P. (2007). The need to correct for the Suess effect in the application of $\delta^{13}\text{C}$ in sediment of autotrophic Lake Tanganyika, as a productivity proxy in the Anthropocene. *Journal of Paleolimnology*, 37(4), 591-602.
- Villar, E. (1981). *Proyecto científico-técnico elaborado para la conservación de las pinturas de la cueva de Altamira*. Monografías del Centro de Investigación y Museo de Altamira, N°5.
- Villar, E. et al. (1983). *Estudios físico-químicos sobre la cueva de Altamira*. Monografías del Centro de Investigación y Museo de Altamira, N°9.
- Villar, E. et al. (1984). *Estudios físico-químicos de la sala de Polícromos. Influencia de la presencia humana y criterios de conservación*. Monografías del Centro de Investigación y Museo de Altamira, N°11.
- Villar, E. (1993). La conservación del arte rupestre: Altamira. Exmo. Concello de Xinzo de Limia (Ed.), *Arqueología y conservación*, pp. 131-154. Xinzo de Limia: Gráficas Cars.
- Vrac, M., Stein, M. L., Hayhoe, K., & Liang, X. Z. (2007). A general method for validating statistical downscaling methods under future climate change. *Geophysical Research Letters*, 34(18).
- Wilkening, M. H., & Watkins, D. E. (1976). Air exchange and ^{222}Rn concentrations in the Carlsbad Caverns. *Health Physics*, 31(2), 139-145.
- World Health Organization. (2009). *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. World Health Organization.