



*Facultad de Ciencias*

**ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES EN LAS  
TEMPERATURAS DE LA CUEVA DE  
ALTAMIRA: INFLUENCIA DEL AMBIENTE  
EXTERIOR**

**(Time series analysis of Altamira Cave  
temperatures: influence of external environment)**

Trabajo de Fin de Máster  
para acceder al

**MÁSTER EN FÍSICA, INSTRUMENTACIÓN Y MEDIO  
AMBIENTE**

Autor: Daniel Rábago Gómez

Director: Carlos Sainz Fernández  
Co-Director: Sixto Herrera García

Octubre 2017

## Índice

Resumen.....	2
1. Introducción .....	3
1.1. La conservación de la cueva Altamira.....	6
2. Objetivos .....	10
3. Material y métodos .....	11
3.1. Series históricas de temperatura.....	11
3.1.1. Villar (1980-1981).....	11
3.1.2. CSIC (1997-1998; 2004-2005; 2007-2012).....	12
3.1.3. Universidad de Cantabria (2012-actualidad).....	14
3.2. Modelo predictivo de temperaturas .....	17
4. Resultados .....	23
4.1. Series históricas de temperatura.....	23
4.1.1. Temperatura del aire y del suelo exterior.....	23
4.1.2. Temperatura del aire del interior de la cueva .....	28
▶ Hall.....	28
▶ Cruce .....	29
▶ Sala de Polícromos.....	30
▶ La Hoya y el Pozo.....	33
4.1.3. Resumen y delay de temperaturas del exterior e interior.....	34
4.2. Modelo predictivo de temperaturas .....	37
5. Conclusiones .....	45
6. Referencias.....	47
Anexo I: Código R del modelo predictivo.....	49

## Resumen

Desde los años 80 se vienen realizando diferentes estudios de las condiciones ambientales de la cueva de Altamira enfocados a la conservación de su arte rupestre. Gracias a ello, se dispone de una gran cantidad de información en forma de series temporales de diferentes variables tales como la temperatura del aire interior y exterior, la temperatura de suelos y techos, así como de la concentración en el aire interior de gas radón y CO<sub>2</sub>. En este trabajo, en primer lugar se ha llevado a cabo una revisión histórica de los datos de temperatura en cada una de las salas de la cavidad y del exterior procedentes de estudios previos, haciendo especial hincapié en la metodología de adquisición de datos, así como la instrumentación utilizada. Debido a la regularidad observada en las relaciones temporales existentes entre las temperaturas del aire interior y exterior, se ha implementado un modelo predictivo de la temperatura en el interior de la sala de Polícromos donde se ubican las representaciones pictóricas más notables de la cueva.

**Palabras Clave:** Cueva de Altamira; Arte paleolítico; Modelo predictivo.

## Abstract

Since 80s many different studies have been done in Altamira cave focused on the conservation of its prehistorical rock art. As a consequence, nowadays there is a lot of information about temporal series of air and rock temperature in the interior and exterior of the cave, as well as gases concentration in indoor air such as radon and CO<sub>2</sub>. A complete historical revision of temperature data of the entire cave and exterior has been carried out in this study. Environmental data acquisition and the instrumentation used has been thoroughly studied for every research period. Due to the consistency observed between the outdoor and indoor air temperature behavior, a model to predict temperature in the Polychromes room, where most important paintings of the cave are placed, has been developed.

**Keywords:** Altamira cave; Paleolithic rock art; Predictive modeling.

# 1. Introducción

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).

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. 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).

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, 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.

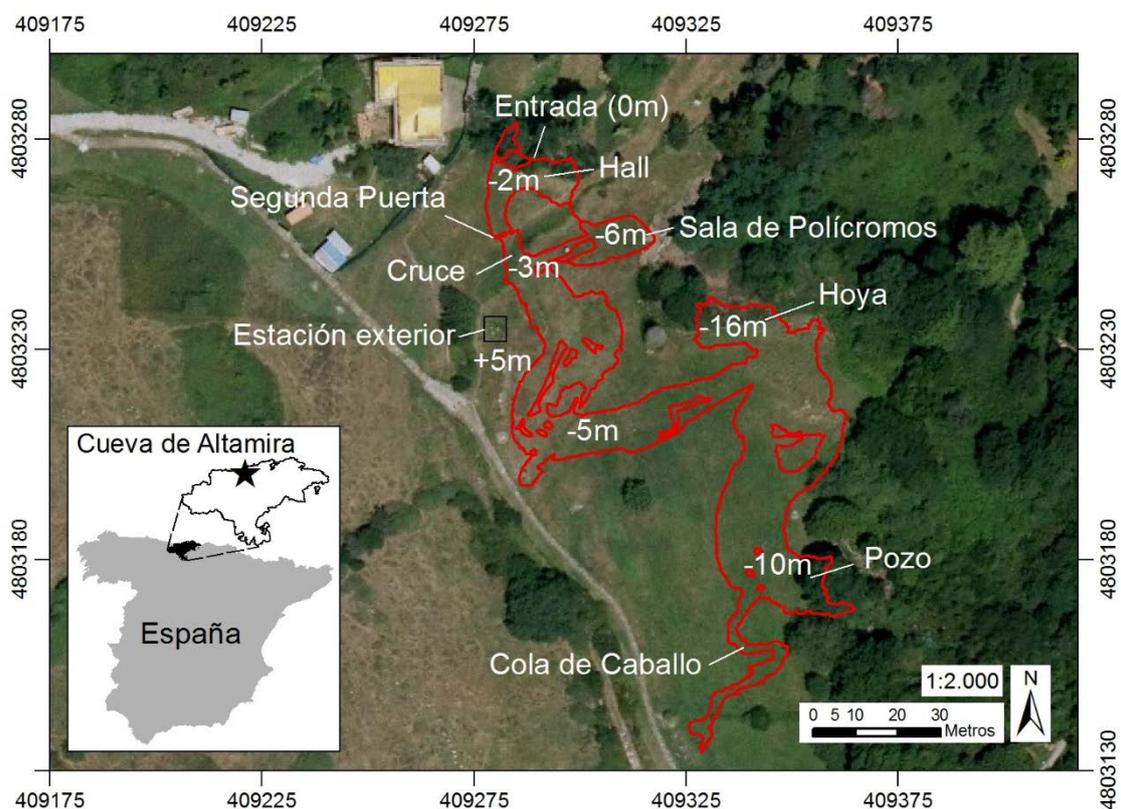
Debido a su extraordinario contenido en representaciones artísticas prehistóricas, en 1985 la cueva de Altamira fue incluida dentro de la Lista de Patrimonio Mundial por la UNESCO (ver N° 310 de dicha lista: <http://whc.unesco.org/es/list/310>).

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 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 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 ha establecido 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 incluye 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 tiene 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).

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).

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).

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).

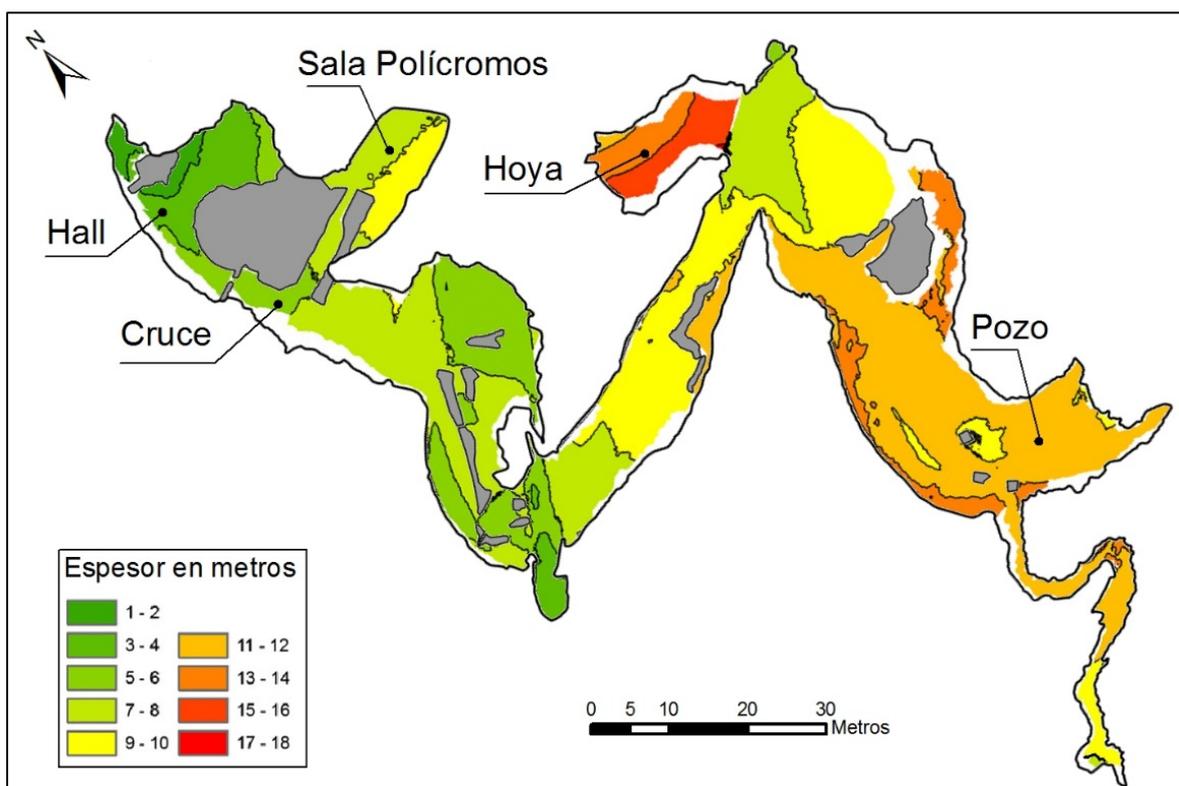


Figura 2. Espesor de roca y suelo entre el techo de la cueva de Altamira y la superficie exterior (modificado de Elez, 2013).

## 1.1. La conservación de la cueva Altamira

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 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).

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, CO<sub>2</sub> y radón, así como al influencia antrópica sobre los mismos (Villar, 1983, 1984). 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, CO<sub>2</sub> y humedad) provocada por el régimen de

visitas establecido por Villar et al., 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 decide cerrar la cueva al público, y en 2003 comienza 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. Datos de gran utilidad para comprobar la respuesta al cierre de 2002 y a las nuevas medidas adoptadas. El estudio confirma que la cavidad presenta menores rangos de oscilación de los parámetros ambientales principales (temperatura, CO<sub>2</sub>, radón y humedad), especialmente durante el verano, lo que implica una mayor estabilidad del sistema subterráneo y su aproximación al estado de equilibrio bajo condiciones naturales (Cuezva, 2008).

El 22 de junio de 2005 se realizó una 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 agua líquida se hace efectivo y podría comenzar su condensación sobre los techos de la sala. La visita incide sobre la temperatura del aire y sobre la concentración de CO<sub>2</sub>. Se remarca 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 concluye 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. Se plantea la instalación de un doble cierre que se hará efectiva en octubre de 2008. Por último se apunta 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 búsqueda 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) indican 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 observado Villar *et al.* en los trabajos previos. Se encuentra un alto grado de aislamiento, elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> y Rn, durante el periodo invernal, mientras que en el verano las concentraciones de ambos gases son 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 cierra la segunda puerta con el fin de detener el intercambio de materia (ventilación) con el exterior. Las oscilaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn se reducen considerablemente y el periodo de gradual desgasificación se retrasa de marzo a junio. La oscilación térmica anual pasa de 1.54 °C en 2004-2005 a 1.39 °C en 2007-2008. Se registra un descenso notable de la velocidad del aire (< 0.02 m/s) en relación con el mismo periodo del año anterior. En conclusión, se destaca 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 Entrada, 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 ha diseñado desde una perspectiva global de estudio, con interrelación de profesionales de distintas disciplinas científicas y pertenecientes a diversas instituciones, entre las que se encuentran 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 mas 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).

A grandes rasgos en el protocolo nº 04 (IPCE, 2014c) 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. Otro de los protocolos relacionados con el estudio de las condiciones climáticas de la cavidad es el nº 03 (IPCE, 2014c), donde se detalla la utilidad de realizar medidas de la concentración de gas radón del aire de la cueva. Por una parte, su carácter trazador informa 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.

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.

Los dispositivos empleados para el seguimiento ambiental en cada uno de los periodos y la metodología empleada, focalizado en las temperaturas de la cavidad, se detallan en el apartado 3.1 Series históricas de temperatura.

Este trabajo se centra en el estudio de las condiciones ambientales de la cueva de Altamira, particularmente en el análisis de las series temporales de temperatura a lo largo de los periodos de estudio de conservación llevados a cabo desde los años 70.

## 2. Objetivos

Tomando como punto de partida tanto las investigaciones llevadas a cabo por Villar y el CSIC cómo la actual por la Universidad de Cantabria, se ha establecido una serie de objetivos para este trabajo:

- a) Recopilar las series históricas de temperatura en las distintas salas de la cueva de Altamira, detallando la metodología empleada para la toma de datos así como la localización y posición en altura de los sensores o toma de muestra puntual.
- b) Explicar el funcionamiento del modelo predictivo de temperaturas aplicado en la actualidad e implementarlo en un lenguaje de programación estudiando su capacidad de generalización y predictiva.

### **3. Material y métodos**

En esta sección se realiza una revisión de la instrumentación utilizada por cada uno de los grupos de investigación citados en la introducción para determinar la temperatura tanto en el interior como en el exterior de la cueva (apartado 3.1). Por otra parte se presenta el modelo predictivo de temperaturas de la sala de Polícromos que se aplica actualmente para establecer el límite de acceso a la cueva a la hora de realizar visitas experimentales (apartado 0).

#### **3.1. Series históricas de temperatura**

En este apartado se va a detallar la metodología empleada para la toma de datos de temperatura llevada a cabo por cada uno de los grupos de investigación que han estudiado las condiciones microclimáticas de la cavidad, así como la referencia del origen de los datos. Las primeras mediciones de temperatura y humedad las realizaron Breuil y Obermaier entre 1931-32 (Breuil, 1984). Fueron mediciones puntuales, tomadas cada 15 días o cada mes y no se tienen más detalles del método de trabajo y del equipamiento utilizado. Para este trabajo los primeros estudios que se tienen en cuenta son los llevados a cabo por el profesor Eugenio Villar y su equipo de la Universidad de Cantabria (UC) (apartado 3.1.1), posteriormente viene el periodo del CSIC (apartado 3.1.2), y por último el seguimiento que están llevando cabo miembros de la UC sobre las condiciones climáticas de la cavidad desde 2012 (apartado 3.1.3).

##### **3.1.1. Villar (1980-1981)**

En el periodo de Villar (Universidad de Cantabria) se determinó la temperatura de las superficies rocosas de suelos y techos, y la temperatura del aire desde mayo de 1980 hasta octubre de 1981. Las medidas se realizaron en el Hall, Post-segunda puerta, Pasillo de la sala de Polícromos, sala de Polícromos, Segundo Ramal, sala de los Muros, Pre-gran sala (solo en roca) y en el exterior (solo temperatura del aire). La localización de los puntos de muestreo se puede observar en la página 71 (figuras 1 y 2) de la referencia Villar (1983) o en la Figura 4 de este documento.

La temperatura en la superficie rocosa de suelos y techos fue determinada mediante un termómetro de radiación con intervalo de medida entre 0 y 40 °C y una precisión de 0.1 °C. El proceso de calibrado fue realizado cuatrimestralmente empleando un baño termostático de agua. Una vez estabilizada la temperatura del baño, determinada con un termómetro patrón de sensibilidad 0.05 °C, se realiza el calibrado en el rango 10-18 °C en intervalos de 0.5 °C enfocando hacia el interior de un cono metálico que se halla sumergido en el baño (Fernández, 1983). La frecuencia media de la toma de datos dentro de la cavidad fue de seis veces al mes durante el periodo anteriormente señalado.

La temperatura del aire de cada una de las salas fue determinada por dos métodos diferentes. Por una parte se utilizaron sondas termométricas de resistencia de platino que proporcionan una

señal eléctrica recogida por un registrador gráfico. Este método proporciona un registro continuo de temperaturas, sin embargo posee una sensibilidad muy baja, una incertidumbre asociada de 0.2 °C. El calibrado de las sondas se ha realizado cada dos meses utilizando resistencias patrón y una tabla estándar resistencia-temperatura. Además, la indicación del registrador ha sido contrastada y verificada con termómetros calibrados. El segundo método de medida de la temperatura fue mediante termómetros de varilla de mercurio con precisión de 0.1 °C, colocados en el seno del aire. La medida de la temperatura fue por lectura directa con una frecuencia de cinco veces al mes. Los termómetros de varilla se calibraron simultáneamente con el termómetro de radiación utilizando el termómetro patrón y el baño termostático anteriormente citado.

Los datos disponibles de temperatura son las medias mensuales tanto para el caso de la superficie rocosa como del aire. Estos valores fueron comparados con los obtenidos teóricamente a partir de la propagación de la onda térmica a través de la roca hacia el interior de cada una de las salas.

### **3.1.2. CSIC (1997-1998; 2004-2005; 2007-2012)**

El estudio del clima subterráneo por parte del CSIC se divide en tres periodos, los dos primeros correspondientes a los convenios de colaboración citados en la introducción y el último abarca el periodo 2007-2012 que une los dos últimos convenios entre los que no se realizaron cambios sustanciales en la forma de obtención de datos microambientales.

A partir de 1996 la cavidad cuenta con un sistema automático de monitorización de parámetros ambientales con 16 canales de medida accesibles mediante conectores individualizados. El sistema consta de una serie de sensores conectados a un *datalogger*, dispositivo electrónico que registra los datos en el tiempo proporcionados por los sensores, y un soporte informático que permite el almacenamiento de datos. Esto permitió realizar un exhaustivo seguimiento ambiental evitando las perturbaciones introducidas por las personas al efectuar las mediciones. Los sensores de temperatura son del tipo Pt-100, sensores metálicos de platino que se basan en la relación lineal entre resistencia y temperatura. Previo a la puesta en marcha del sistema, los sensores se agruparon y fueron intercalibrados para obtener medidas homogéneas. El intervalo de registro para todos los parámetros monitorizados durante este periodo fue cada hora, excepto para los elementos sensores de la sala de Polícromos que fue una medida cada minuto con el fin de caracterizar debidamente el rápido efecto producido por las visitas.

Las temperaturas monitorizadas en este periodo (1997-98) fueron en el aire del Hall, Cruce y Polícromos, en la roca de Polícromos, en el aire exterior y en el suelo exterior. La temperatura del aire exterior se midió con un *datalogger* autónomo (HOBO, modelo H08-032-08, con resolución 0.02 °C y precisión de  $\pm 0.2$  °C). Los datos tabulados de temperatura mensual de los

que se dispone corresponden al aire exterior, del Hall y de la sala de Polícromos para el periodo febrero 1997-enero 1998 (Cuezva, 2008).

Posteriormente, en 2003, se procedió a la revisión y modificación del sistema de medida. Se retiraron parte de los equipos instalados a finales de 1996. En julio de 2004 se completa la puesta en marcha del nuevo equipo de medidas, una vez hechos los ajustes y calibraciones pertinentes. El nuevo sistema de adquisición y registro de datos se transforma en un sistema abierto y versátil, con capacidad para 32 sensores, se permite la conexión de nuevos sensores y la modificación o reemplazo de los sensores ya conectados. El mantenimiento y calibrado del sistema de monitorización se llevó a cabo trimestralmente, excepto en las ocasiones en que se produjeron fallos en el suministro eléctrico que se realizó una puesta a punto y recalibrado una vez que el suministro fue reestablecido. El intervalo de registro para todos los parámetros monitorizados durante este periodo fue de 15 minutos.

La monitorización de la temperatura del aire interior de la cavidad se realiza en dos puntos: Cruce y Polícromos Altamira y en la roca interior (Polícromos). En la estación exterior se monitoriza la temperatura del aire. Los datos tabulados de temperatura mensual de los que se dispone corresponden al aire exterior, del Cruce y de la sala de Polícromos para el periodo agosto 2004-julio 2005 (Cuezva, 2008).

En marzo de 2007, como paso previo al inicio de los nuevos estudios microclimáticos correspondiente con el tercer convenio del CSIC en Altamira, se revisa el sistema de adquisición de datos retirando gran parte de los equipos instalados en 2004. Se comienza una nueva instalación de equipos de monitorización en continuo de los parámetros microambientales más significativos. En total se instalarían 6 estaciones de monitorización en el interior de la cueva más una en el exterior (ver Figura 4), en septiembre de 2011 se reducía a tres estaciones: una en la Entrada o Hall, una en el Cruce y una en Polícromos. En cada una de estas estaciones se situaron sondas de temperatura en la zona próxima al suelo, al techo y a altura media (solo en alguna de ellas). En la Tabla 1 se puede observar la altura de cada una de ellas, donde POL-1 está situada a fondo de la sala y POL-2 en un lateral de la misma. Antes de la puesta en marcha, se realizaron las calibraciones pertinentes las cuales se llevaron a cabo bimestralmente a lo largo de todo el período de monitorización (Sánchez-Moral, 2014).

**Tabla 1. Altura respecto al suelo expresada en metros de las sondas de temperatura situadas en las estaciones de cada sala para el periodo 2007-2012.**

	Hall	Cruce	Polícromos	
			POL-1	POL-2
<b>Proximidad Techo</b>	2.49	1.90	1.85	1.55
<b>Altura media</b>	-	1.30	1.17	-
<b>Proximidad Suelo</b>	0.15	0.15	0.18	0.25

Las temperaturas monitorizadas en este periodo (2007-2012) fueron la temperatura del aire de la cueva en perfil vertical, la temperatura de la roca, la temperatura de la atmósfera exterior y la temperatura del suelo exterior en perfil vertical a 5 y 25 cm de profundidad. Las zonas monitorizadas en el interior de la cueva son principalmente la Entrada, el Cruce, la sala de Polícromos, la sala de los Muros, la sala de la Hoya y la sala del Pozo.

Las sondas de temperatura del perfil vertical de suelo a techo instalado en cada una de las estaciones son PT100 de alta resolución (PT100 1/10 DIN, 515-725) con una precisión de 0.03 °C. Las sondas utilizadas para la temperatura de la roca son PT100 flexible (TC Direct 1/10 DIN) con precisión de 0.03 °C. Además en la sala de Muros y en la Hoya se utilizan termómetros digitales con precisión de 0.06 °C.

Los datos tabulados de temperatura mensual del periodo 2007-2012 de los que se dispone corresponden al aire exterior, Entrada, Cruce (solo 2007-2009) y de la sala de Polícromos. (Sánchez-Moral, 2014; García-Antón, 2014). Adicionalmente se tienen los datos en continuo cada 15 minutos para la Entrada y la sala de Polícromos en este periodo.

La ubicación de los sistemas utilizados para el seguimiento de las condiciones ambientales en cada uno de los periodos se pueden observar en la Figura 4

### **3.1.3. Universidad de Cantabria (2012-actualidad)**

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.

El sistema utilizado para el seguimiento de las condiciones ambientales instalado actualmente consta de un conjunto de estaciones conectadas a unos *dataloggers* ubicadas según se indica en la Figura 4. Todos los sensores se han colocado en un soporte auto-portante donde se disponen de manera general como se indica en el esquema de la Figura 3.

En total se cuenta con 5 estaciones de monitorización en el interior de la cueva (Hall, Cruce, Polícromos, Hoya y Pozo) más una en el exterior (ver Figura 4). La temperatura de las estaciones del interior se mide en el perfil vertical: 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. En el exterior se mide la temperatura del aire y la del suelo

correspondiente a 10 cm y 50 cm de profundidad. La altura respecto al suelo (base de la estación) de cada una de las sondas se puede ver en la Tabla 2.

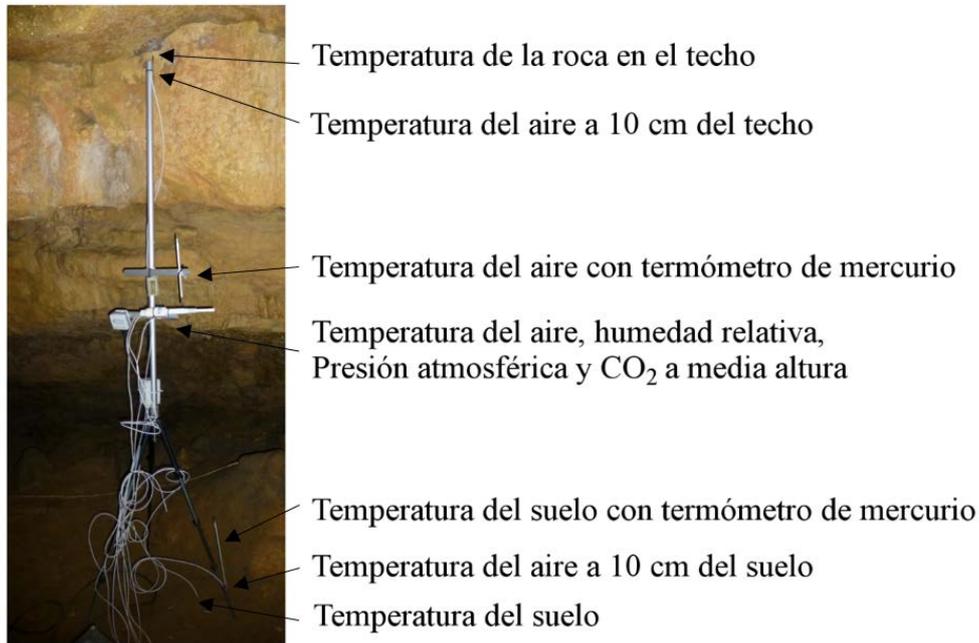


Figura 3. Configuración general de las estaciones de monitorización del periodo 2012-actualidad.

Tabla 2. 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
<b>Proximidad Techo</b>	2.50	1.30	1.20	3.00	1.85
<b>Altura media</b>	1.40	0.70	0.40	1.80	1.00
<b>Proximidad Suelo</b>	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 son:

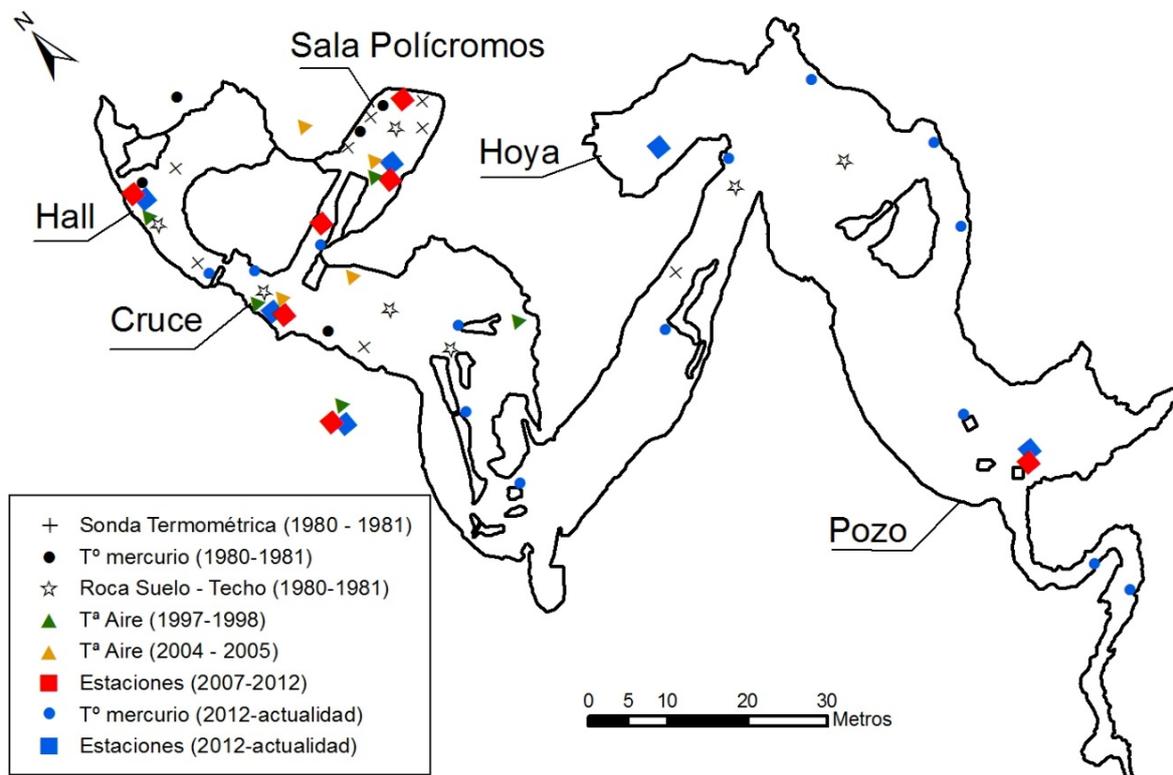
- Temperatura del aire en interior: sondas PT100 de 4 hilos inox AISI 316 con certificación ENAC de 0.06°C y una resolución de 0.01 °C.
- Temperatura de la roca en Polícromos: termómetro infrarrojo CT15:12937,00 con una precisión del 1% y resolución de 0.01 °C.
- Temperatura y humedad relativa en el 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.

Los sensores de temperatura se han calibrado por un laboratorio con certificación ENAC. Las verificaciones y calibraciones en el interior de la cueva se realizan cada 6 meses tomando

como sensor patrón de la temperatura el equipo Vaisala HMP155 ubicado a altura media en la vertical de cada uno de los puntos de medición.

Además de las calibraciones periódicas que se llevan a cabo con las sondas mencionadas, en todas las estaciones hay colocados termómetros de mercurio calibrados que tienen una sensibilidad de 0.05 °C tal y como se muestra en la Figura 3. Estos termómetros son utilizados como verificación continua de los sensores de temperatura anteriormente mencionados. Adicionalmente en otros puntos de la cueva hay colocados termómetros del mismo tipo y características que los anteriores con el fin de obtener una distribución de temperaturas dentro de la cueva lo más amplia posible (ver Figura 4).

La descarga de los datos se realiza de forma programada y automáticamente cada 24 horas, a éstos se tiene acceso de forma remota a través de un 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 excepto para el modo de supervisión, destinado a controlar los parámetros ambientales durante las visitas experimentales, que es de 3 segundos. 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, CO<sub>2</sub> y humedad de la sala provocadas por la influencia antrópica.



**Figura 4. Localización aproximada de los sistemas de medida de la temperatura empleados en los distintos periodos en el interior y exterior de la cueva de Altamira.**

## 3.2. Modelo predictivo de temperaturas

Con el fin de estudiar el impacto antrópico en las condiciones microclimáticas de la sala de Polícromos, y siguiendo el Plan de Conservación Preventiva de la Cueva de Altamira, en la actualidad se están llevando a cabo visitas experimentales periódicas para registrar las variaciones de diferentes parámetros de interés tales como la temperatura  $T$  (°C), la concentración de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  (ppm) ó la humedad específica  $H_e$  (g/kg), entre otros. Dichos registros permiten analizar qué rango de valores de estos parámetros pueden ser considerados admisibles, aceptando como tales los atribuibles a causas naturales, lo que proporcionaría unos límites que justificarían la activación de algún tipo de medida o protocolo correctivo en caso de ser rebasados.

Para cada uno de los tres parámetros ( $T$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $H_e$ ) se establece el límite de accesibilidad que indica el valor por debajo del cual se debe encontrar la sala de Polícromos para poder iniciar la entrada/visita. En el caso de la humedad específica y del  $\text{CO}_2$ , el límite de accesibilidad se calcula sumando a la media mensual del histórico de datos del mes de interés, la oscilación absoluta mensual del ciclo anual anterior. Sin embargo, para la temperatura 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 del ciclo anual inmediatamente anterior. Al valor resultante se le resta  $0.1$  °C como margen de seguridad, este valor se obtiene como valor promedio de los errores sistemáticos cometidos al considerar la temperatura estimada como la real en cada mes.

La denominada temperatura estimada ( $T_e$ ) se obtiene a partir del modelo predictivo desarrollado por el IPCE: “Método predictivo para estimar la temperatura media mensual en el interior de la sala de los Polícromos” (Durán, 2014). Se trata de un modelo matemático que permite estimar la temperatura media mensual en la Sala de Polícromos en función de la temperatura exterior con 3-4 meses de antelación basándose en el desfase temporal existente entre ambas curvas (ver Figura 14).

Como puede verse en la Figura 14, el desarrollo de la temperatura en ambos casos tiene forma sinusoidal, aunque su amplitud es diferente y existe un desfase entre ellas. Es decir, los máximos y mínimos de las ondas están desplazados entre sí un número de meses que en estudios anteriores se han estimado y en este trabajo se han determinado mediante un método matemático que se verá a continuación. Por lo tanto, el modelo pretende estimar con antelación la temperatura media mensual de la sala de Polícromos con el objeto de servir de valor orientativo de la dinámica natural de la cavidad, y de este modo poder estimar y aplicar los límites de riesgo mencionados anteriormente a la hora de realizar las citadas visitas experimentales.

La observación de la serie de temperaturas del exterior y de la sala de Polícromos revela que la sala no es capaz de reproducir las variaciones más rápidas del exterior. El sistema kárstico en el cual se encuentra la cavidad 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, 2011).

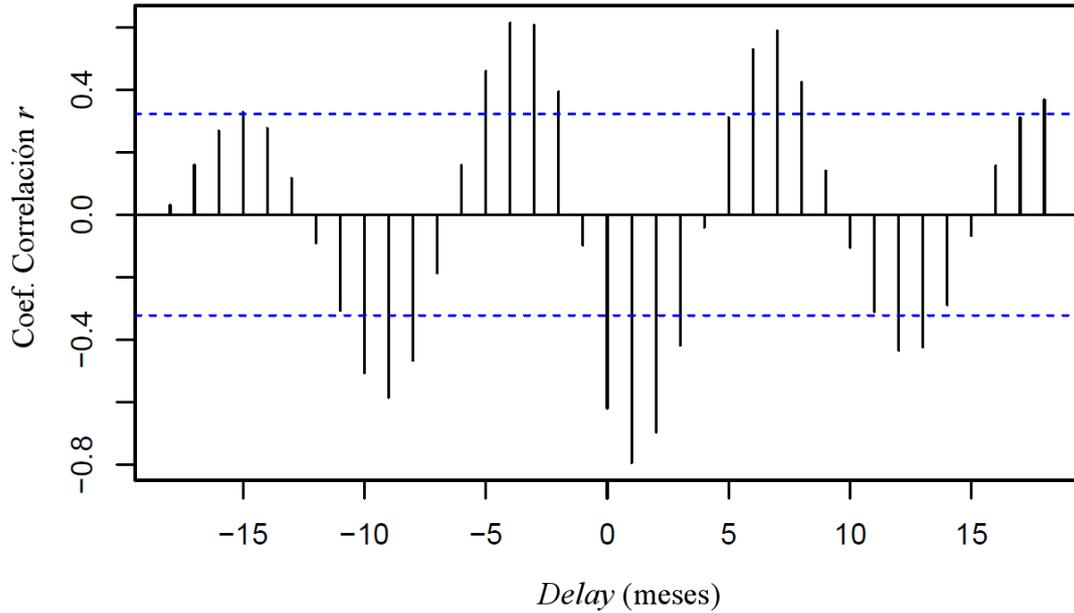
En rasgos generales, la capacidad predictiva del modelo se fundamenta en identificar correctamente el retraso o *delay* y la amortiguación de la serie de Polícromos respecto a la del exterior. Una vez se tiene ese parámetro, el ajuste de Fourier da la transformación de una serie a otra mediante la corrección de las frecuencias identificadas como significativas.

A continuación se van a detallar los pasos seguidos por el modelo:

El primer parámetro que se ha de considerar es el *delay* 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 el modelo implementado por el IPCE se fija un retraso de 4 meses, sin embargo para este trabajo se ha desarrollado un método matemático para determinar el *delay* entre series de temperaturas, ya sea para la sala de Polícromos como para las demás, Hall, Cruce, etc.

El método para determinar el retraso entre dos series temporales  $x_t$  e  $y_t$  se realiza buscando la máxima correlación significativa entre ambas desplazando temporalmente una serie respecto a la otra. En el proceso se obtiene el conjunto de coeficientes de correlación de las series  $x_{t+h}$  con  $h=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \pm n$  e  $y_t$ . El parámetro temporal  $h$  en este caso viene expresado en meses aunque depende del paso elegido de la serie temporal. 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). Para este estudio en concreto interesa la máxima correlación positiva, es decir, que el coeficiente de correlación  $r$  sea positivo ya que una tendencia exterior positiva generaría una respuesta creciente en la temperatura interior, al igual pasaría con la tendencia negativa que genera una pendiente negativa en Polícromos. Además para que la excitación exterior provoque una respuesta en Polícromos, el *delay*  $h$ , debería ser negativo.

En la Figura 5 se muestra la gráfica resultante al aplicar el método implementado para obtener el *delay* entre 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 5.** Gráfica obtenida al realizar correlación entre series desplazándolas entre sí un determinado *delay*. Las líneas de trazos indican el intervalo de confianza del 95 % que determina la significación de la correlación.

Una vez determinado el *delay* entre ambas series, 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 de la señal. Puesto que el modelo original está 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.

En el modelo original, en lugar de trabajar directamente con las series observadas, para realizar el muestreo se toman 37 valores mensuales y se divide cada una de las muestras en 9 partes, realizando un ajuste polinómico de grado 4 a cada una de las mismas. A partir de los ajustes obtenidos se simulan los 64 valores de temperatura de Polícromos y del exterior que serán utilizados en el análisis de Fourier.

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:

$$atenuación_i = \frac{módulo_i(\text{Polícromos})}{módulo_i(\text{exterior})} \quad (1)$$

$$desfase_i = fase_i(\text{Polícromos}) - fase_i(\text{exterior})$$

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 delay 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 delay 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, número complejo: 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.

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. La temperatura media mensual se puede obtener a partir de la media aritmética de los valores que se encuentren dentro de cada intervalo mensual.

La muestra de entrenamiento utilizada para crear el modelo predictivo implementado por el IPCE toma los datos de mayo 2009 a mayo 2012 para el exterior y de septiembre 2009 a septiembre 2012 para Polícromos, puesto que hay que tener en cuenta el desfase entre ambas señales. Las lagunas encontradas en los datos han sido deducidas por estimación. 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.

En este trabajo se ha implementado el modelo predictivo en el lenguaje R, software libre desarrollado para el análisis estadístico y gráfico ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)). En el caso de encontrar lagunas en la serie del exterior o de polícromos, el valor estimado se determina mediante interpolación lineal. 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. El código implementado en el lenguaje R se puede observar en el Anexo I.

Para medir la calidad de las estimaciones, es decir, cuán cerca están los pronósticos o predicciones de los valores reales de temperatura media mensual en la sala de Polícromos se utilizan funciones de error. Para comparar cada predicción individual se puede determinar el valor absoluto de la diferencia entre el valor proporcionado por el modelo y el real. Para caracterizar el modelo en su conjunto se calcula el error absoluto medio *mae* (*mean absolute error*) definido como (Gutiérrez, 2004):

$$mae = \frac{\sum_i |T[\text{Polícromos}] - T[\text{modelo}]|}{n} \quad (2)$$

siendo  $T$  [Polícromos] la temperatura observada de la sala de Polícromos,  $T$  [modelo] la obtenida del modelo y  $n$  el número de predicciones.

En este estudio se han considerado dos 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 ha considerado 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. Sin embargo, debido a la versatilidad que proporciona el lenguaje de programación, se puede seleccionar cualquier otro periodo para entrenar el modelo.

Para cada uno de los modelos, el implementado en Excel y en R, y con cada periodo de entrenamiento en el caso del segundo, se ha obtenido la predicción de la media mensual exclusivamente del primer mes después de la serie del exterior introducida en el paso I expuesto

anteriormente. Por ejemplo, si se introduce la serie del exterior de enero 2010 a enero 2013 se toma el valor de temperatura predicha 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 incertidumbre asociada al modelo se puede estimar considerando toda la serie de predicciones para cada uno de los meses. Como valor más probable se puede tomar la media aritmética y como incertidumbre asociada un estadístico tal como la desviación estándar  $SD$ , el error estándar de la media y/o el rango intercuartílico. Este método para evaluar la incertidumbre se hace posible puesto que al introducir una serie del exterior en el modelo, a parte de la predicción de temperatura de los 3 meses posteriores también se reconstruyen los 33 valores anteriores a estos. En este caso se ha optado por el error estándar de la media  $sem$  (*standard error of the mean*) definido como (Gravetter, 2014; ISO/IEC 98-3, 2008):

$$sem = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

donde  $SD$  es la desviación estándar y  $n$  es el número de datos considerados para calcular la media.

Asumiendo que los datos predichos para cada mes siguen una distribución normal, el  $sem$  se puede utilizar para cuantificar las oscilaciones de la media muestral, en este caso la media aritmética, proporcionando los intervalos de confianza dentro de los cuales caigan un determinado porcentaje de las observaciones (Gorgas, 2011). Por ejemplo, considerando la media  $\pm 3$  veces el  $sem$ , el 99.73 % de las observaciones caerán ese intervalo.

## **4. Resultados**

En esta sección se presentan las series históricas de temperaturas de cada periodo de investigación realizado en la cueva de Altamira (apartado 4.1). Por otra parte en el apartado 4.2 se muestran los resultados obtenidos del modelo predictivo de temperaturas de la sala de Polícromos que se aplica actualmente, y los obtenidos con las modificaciones llevadas a cabo en el presente trabajo.

### **4.1. Series históricas de temperatura**

En este apartado se presentan los datos de temperatura media mensual tanto del interior como del exterior de la cavidad disponibles y las medidas en continuo para el periodo actual 2013-2017. Los ciclos anuales de los que se dispone corresponden con los periodos en los que se han estudiado las condiciones microclimáticas de la cavidad mostrados en el apartado 3.1. Los dispositivos y referencias bibliográficas se han citado anteriormente, sin embargo a continuación se harán anotaciones y nuevamente se referenciarán las fuentes con el fin de aclarar el origen exacto de los datos.

#### **4.1.1. Temperatura del aire y del suelo exterior**

Como se ha señalado anteriormente, la temperatura exterior juega un papel fundamental en las condiciones de la cavidad en su estado natural, 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 media mensual del aire exterior, especificando el origen de los datos en cada caso.

La fuente de los datos de temperatura del aire exterior es diversa, por una parte se dispone de los valores correspondientes a cada periodo de investigación, y por otra parte los extraídos de la base de datos del Instituto Cántabro de Estadística (ICANE, 2016) obtenidos a su vez de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La localización de la toma de datos realizada por cada uno de los grupos de investigación se sitúa bien en la zona externa próxima a la entrada, en el caso del equipo de Villar, o sobre la superficie exterior de la gruta tal y como se muestra en la Figura 4. Los datos de la AEMET se corresponden con la estación meteorológica “Cuevas de Altamira” situada en las proximidades del Museo de Altamira a unos 350 metros de la entrada a la caverna (datos sombreados en la Tabla 3).

Para el periodo de Villar (1980-81) se dispone de la temperatura media mensual en el aire exterior desde mayo de 1980 hasta octubre de 1981, donde los valores de temperatura están tabulados desde junio 1980 a Julio 1981 (Villar, 1984), y los datos fuera de este rango temporal se han obtenido a partir de la representación gráfica de las referencias Villar (1983) y Fernández (1983).

La temperatura del aire exterior correspondiente con los ciclos anuales febrero 1997-enero 1998 y agosto 2004-julio 2005 se encuentran en forma de tabla en la tesis doctoral de S. Cuezva (Cuezva, 2008). Los datos del siguiente periodo de estudio microambiental llevado a cabo por el CSIC, que abarca desde 2007 a 2012, se muestran separados en dos, abril 2007-sept. 2009 y sept. 2011-agosto 2012 (Sánchez-Moral, 2014; García-Antón, 2014). Por último los datos referentes de julio de 2013 hasta la actualidad se han tomado de las plantillas de descarga mensual realizadas dentro de la parte del PCP llevado a cabo por la Universidad de Cantabria.

En la Tabla 3 se muestran los valores medios mensuales correspondientes con las referencias citadas anteriormente, donde los datos sombreados corresponden con la estación meteorológica “Cuevas de Altamira” de la AEMET. En la Figura 6 se representan gráficamente de los datos tabulados.

**Tabla 3. Temperatura media mensual del aire a nivel medio 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.
<b>1980</b>	9.0	11.2	10.8	11.6	14.1	15.8	17.3	19.8	18.4	15.5	10.7	9.3
<b>1981</b>	8.2	8.5	11.3	13.0	14.9	17.2	18.1	20.3	18.7	15.8	13.6	11.6
<b>1997</b>	9.2	12.0	12.8	13.6	16.5	17.4	18.5	20.4	19.8	19.2	13.5	10.5
<b>1998</b>	10.9	11.3	12.2	11.1	14.6	17.8	19.0	20.0	18.9	14.2	11.0	10.0
<b>1999</b>	10.5	8.0	10.4	11.8	15.3	15.5	18.4	20.4	19.9	15.4	10.0	9.4
<b>2000</b>	7.2	10.4	9.9	11.9	15.4	18.2	18.7	19.9	18.6	14.2	10.6	12.2
<b>2001</b>	11.0	9.6	13.6	11.6	14.6	17.6	19.2		17.6		10.3	7.1
<b>2002</b>					14.0	16.2	18.0	18	18.2	16.8	13	12.8
<b>2003</b>	8.1	8.6	14.4	14.6	14.6	19.4	19.8	22.9	20.2	15.0	13.0	10.0
<b>2004</b>	10.5	8.7	9.4	11.6	14.0	18.8	19.2	20.4	18.7	17.5	10.3	9.9
<b>2005</b>	9.2	6.6	11.8	12.5	15.3	19.0	20.7					
<b>2007</b>	9.9	11.5	9.9	12.3	14.3	16.8	17.9	18.3	16.1	14.1	9.2	8.6
<b>2008</b>	10.0	11.2	9.8	11.5	14.3	16.7	18.1	18.6	16.4	13.7	10.0	8.1
<b>2009</b>	8.0	7.4	9.6	10.5	13.8	17.5	18.7	19.1	17.3	16.2	12.8	9.1
<b>2010</b>	7.6	8.0	10.3	12.7	13.5	16.2	18.9	18.9	17.1	14.5	10.3	
<b>2011</b>	8.9	9.6	11.0	14.4	15.2				18.0	15.3	12.9	9.2
<b>2012</b>	8.2	5.6	10.0	9.2	14.4	16.3	17.3	19.1	17.7	15.1	11.1	10.7
<b>2013</b>	9.1	8.0	10.4	11.0	11.5	14.7	20.3	19.2	18.1	16.7	11.0	9.7
<b>2014</b>	10.3	9.6	10.6	13.2	13.5	17.4	18.8	19.1	19.8	17.8	13.3	9.5
<b>2015</b>	8.4	7.1	9.8	13.9	14.7	17.5	19.9	19.6	16.4	15.4	13.5	13.1
<b>2016</b>	10.7	9.4	9.5	11.6	14.8	17.1	19.3	20.0	18.6	15.0	11.0	11.4
<b>2017</b>	7.4	10.5	11.4	11.9	15.9	18.3	18.8	19.1				

A partir de las temperaturas medias mensuales de cada año reflejadas en la Tabla 3 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 4). La temperatura media se encuentra entre 12.7 °C (2011) y 15.3 °C (1997) donde las medias mensuales más altas se encuentran habitualmente en el mes de agosto y las mínimas dependiendo del año se reparten entre los meses de invierno (diciembre, enero y febrero). En el

periodo más actual (2013-2017), la temperatura media aumentó 1.1 °C en el ciclo 2013-2014 para ir disminuyendo consecutivamente 0.3 °C en el 2015 y algo menos de 0.1 °C en el 2016.

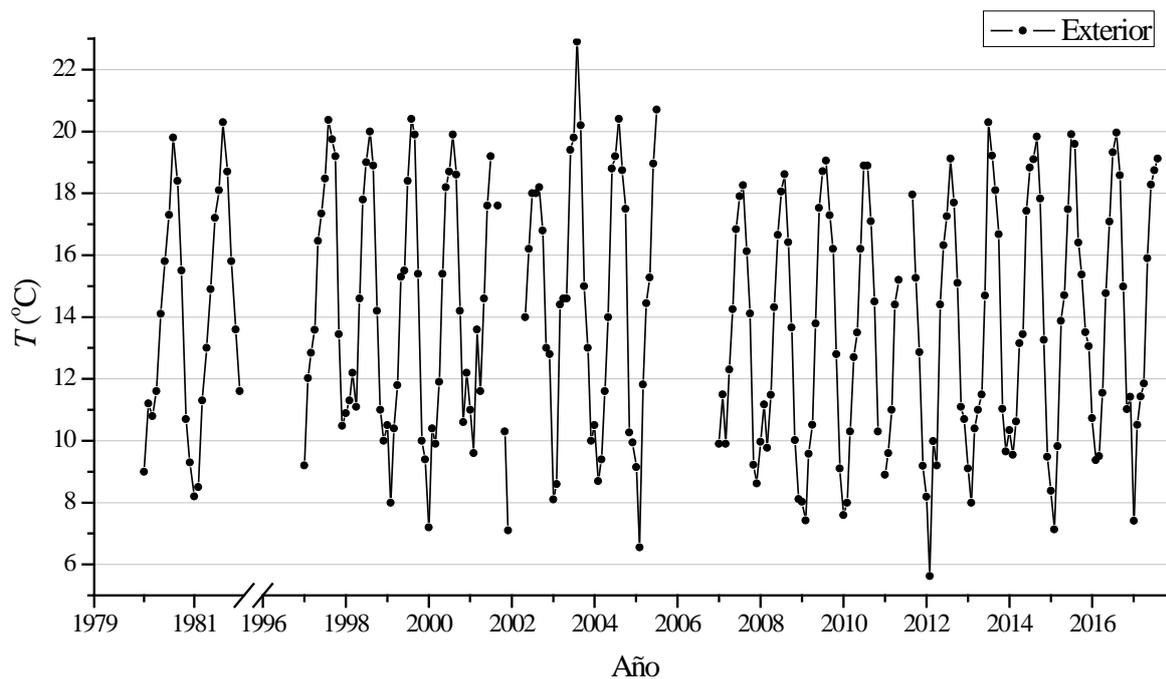


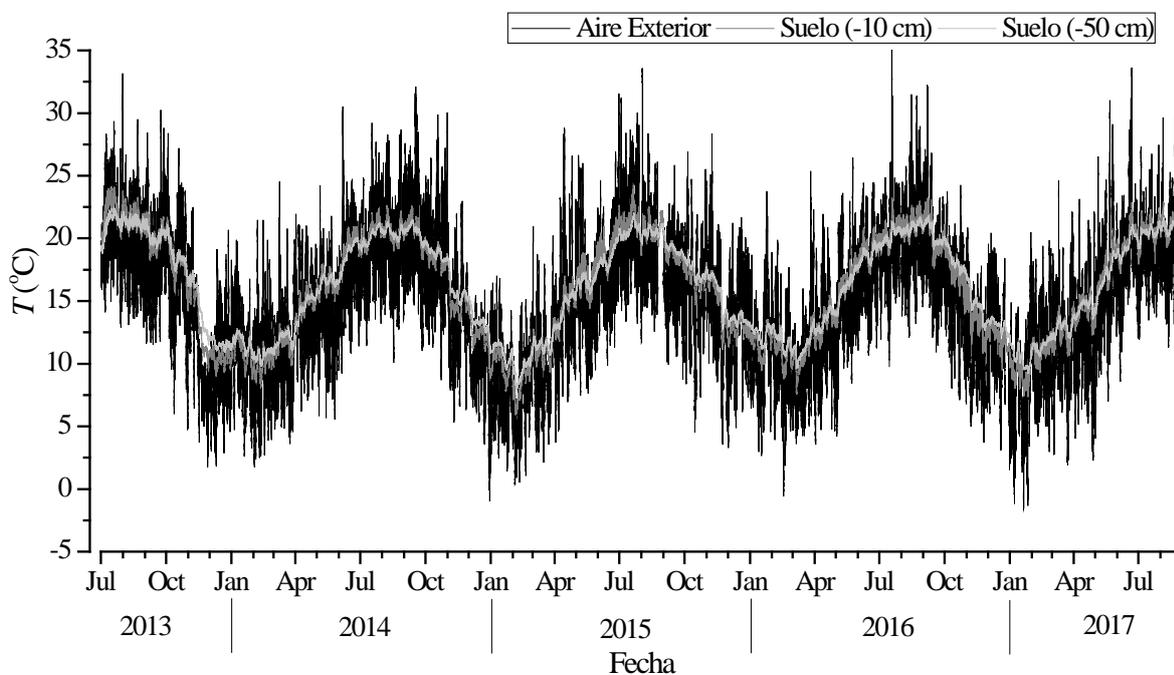
Figura 6. Temperatura media mensual del aire exterior de la cueva de Altamira.

Tabla 4. Estadística descriptiva de la temperatura media mensual del aire exterior realizada por años.

	Temperatura del aire (°C)					
	Media	Máxima	(mes)	Mínima	(mes)	SD
<b>1980</b>	13.63	19.8	(Ago.)	9.0	(Ene.)	3.69
<b>1981</b>	14.27	20.3	(Ago.)	8.2	(Ene.)	3.93
<b>1997</b>	15.27	20.37	(Ago.)	9.2	(Ene.)	3.81
<b>1998</b>	14.25	20.0	(Ago.)	10.0	(Dic.)	3.73
<b>1999</b>	13.75	20.4	(Ago.)	8.0	(Feb.)	4.30
<b>2000</b>	13.93	19.9	(Ago.)	7.2	(Ene.)	4.19
<b>2001</b>	13.22	19.2	(Jul.)	7.1	(Dic.)	3.98
<b>2002</b>	15.88	18.2	(Sept.)	12.8	(Dic.)	2.29
<b>2003</b>	15.05	22.9	(Ago.)	8.1	(Ene.)	4.77
<b>2004</b>	14.09	20.40	(Ago.)	8.7	(Feb.)	4.51
<b>2005</b>	13.56	20.71	(Jul.)	6.55	(Feb.)	5.10
<b>2007</b>	13.25	18.26	(Ago.)	8.62	(Dic.)	3.49
<b>2008</b>	13.19	18.62	(Ago.)	8.11	(Dic.)	3.59
<b>2009</b>	13.34	19.06	(Ago.)	7.42	(Feb.)	4.33
<b>2010</b>	13.45	18.9	(Ago.)	7.6	(Ene.)	4.07
<b>2011</b>	12.71	17.96	(Sept.)	8.9	(Ene.)	3.22
<b>2012</b>	12.89	19.12	(Ago.)	5.63	(Feb.)	4.31
<b>2013</b>	13.31	20.30	(Ago.)	8.0	(Feb.)	4.28
<b>2014</b>	14.41	19.83	(Sept.)	9.48	(Dic.)	3.98
<b>2015</b>	14.11	19.91	(Jul.)	7.13	(Feb.)	4.09
<b>2016</b>	14.03	19.96	(Ago.)	9.37	(Feb.)	3.93
<b>2017</b>	14.16	19.12	(Ago.)	7.42	(Ene.)	4.42

Al igual que en el último periodo de estudio llevado a cabo por el CSIC (2007-2012), en la actualidad se monitoriza la temperatura exterior y la del suelo en dos puntos en perfil vertical a una profundidad de 10 cm y 50 cm. En la Figura 7 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 2017. En la Tabla 5 se muestra la estadística descriptiva correspondiente a los datos de la Figura 7 por años, 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. Se ha de tener que cuenta que los años 2013 y 2017 están incompletos.

En la Figura 7 se observa que la temperatura del aire exterior tiene una variación más amplia comparada con las temperaturas en profundidad. Es reseñable que el suelo atenúa las variaciones de periodo más corto disminuyendo el rango de oscilación térmica anual. A partir de la estadística anual que se muestra en la Tabla 5 se destaca que a medida que se aumenta en profundidad las temperaturas medias aumentan, siendo éstas superiores a la correspondiente del aire exterior. La dispersión de los datos en el caso de la temperatura del suelo es inferior a la del aire tal y como corrobora la desviación estándar en cada caso. Por lo tanto 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. La desviación estándar del aire exterior es mayor que las otras dos.



**Figura 7. Registro de la temperatura del aire y del suelo a 10 y 50 cm de profundidad en la zona exterior para el periodo julio 2013-agosto2017.**

**Tabla 5. Estadística descriptiva de la temperatura del aire y del suelo para el periodo julio 2013-agosto 2017 correspondiente a las medidas quinceminutales que se muestran en la Figura 7.**

		Temperatura (°C)			
		Media	Máxima	Mínima	SD
<b>2013</b>	<b>Aire</b>	15.83	33.16	1.74	5.40
	<b>- 10 cm</b>	17.70	24.10	8.99	4.49
	<b>- 50 cm</b>	17.89	22.50	10.90	3.70
<b>2014</b>	<b>Aire</b>	14.41	32.10	-0.96	5.06
	<b>- 10 cm</b>	15.90	22.62	8.06	3.90
	<b>- 50 cm</b>	16.14	21.48	9.77	3.52
<b>2015</b>	<b>Aire</b>	14.11	33.58	0.36	5.23
	<b>- 10 cm</b>	15.56	24.25	5.90	4.31
	<b>- 50 cm</b>	15.76	22.03	7.96	3.66
<b>2016</b>	<b>Aire</b>	14.03	37.86	-0.59	5.00
	<b>- 10 cm</b>	15.64	23.30	7.53	3.94
	<b>- 50 cm</b>	15.96	21.80	9.62	3.51
<b>2017</b>	<b>Aire</b>	14.20	33.62	-1.71	5.46
	<b>- 10 cm</b>	15.80	22.91	7.34	4.39
	<b>- 50 cm</b>	15.94	21.69	9.24	3.95

Se han analizado las distribuciones de datos tanto del aire exterior como del suelo comparando sus distribuciones y sus medias a partir de los test estadísticos Kolmogorov-Smirnov y Welch respectivamente. Se ha llegado a la conclusión que no se sigue la misma distribución de los datos en el caso del aire y del suelo. En el caso del aire exterior se sigue una distribución que se asemeja a la normal, mientras que los datos del suelo siguen un comportamiento bimodal centrado en los máximos y mínimos de la onda pseudo-sinusoidal que observa en la Figura 7. El análisis de las temperaturas medias del aire y del suelo indica que son significativamente mayores las correspondientes al suelo, concretamente 1.6 °C y 1.8 °C mayor a -10 cm y a -50 cm respectivamente.

Pese a las diferencias tanto de distribución de datos como de media anual de las temperaturas del suelo y del aire exterior, se ha determinado el delay entre series con el método de la máxima correlación, desplazando una serie respecto a la otra, y se ha obtenido un coeficiente de correlación de Pearson máximo de 0.99 y 0.98 para las series de -10 cm y -50 cm respecto al aire exterior para un delay 0, es decir, de las series originales sin desplazar. Esta correlación lineal positiva tan alta indica que la tendencia de las series de temperatura del suelo es igual que la del exterior. Por lo tanto las series del perfil vertical 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 puntual de la temperatura exterior.

#### 4.1.2. Temperatura del aire del interior de la cueva

A continuación se va a presentar y analizar la temperatura de cada una de las salas de la cueva de Altamira, especificando sus características y referencias bibliográficas. Se indica el delay expresado en meses respecto a la temperatura del exterior. El fundamento matemático para obtener el retraso entre las series temporales de temperatura se detalla en el apartado 0.

##### ► Hall

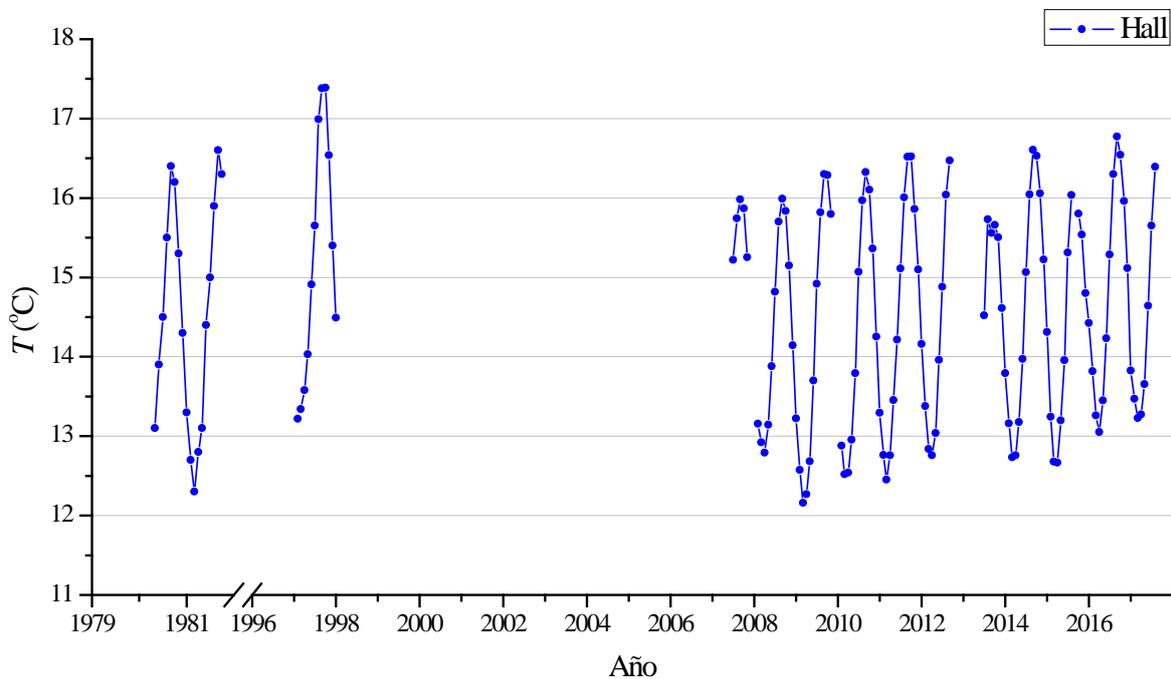
La temperatura del aire a altura media en la zona del Hall se presenta en la Tabla 6 y Figura 8 para todos los periodos de investigación excepto para ciclo anual 2004-2005 que no se dispone de medidas de temperatura en la zona de la Entrada. Para el periodo 2007-2012 (Sánchez-Moral, 2014) la temperatura a media altura se obtiene como resultado de promediar las temperaturas medidas en la zona próxima al techo (2.49 m de altura) y en la zona próxima al suelo (a 15 cm del suelo). La evolución de las dos temperaturas citadas sigue un comportamiento del tal manera que la temperatura en la zona del techo se mantiene casi permanentemente por encima de la temperatura en la zona del suelo, con una amplia diferencia sobre todo en los meses de verano, en cambio en el intervalo de diciembre a mayo se aproximan mucho e incluso llegan a igualarse (ver Figura 3.21 en Sánchez-Moral (2014)). A partir del 2013 se mide la temperatura en perfil vertical (proximidad al suelo, altura media, proximidad al techo) donde el sensor a media altura se encuentra a 1.40 metros.

**Tabla 6. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del Hall.**

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>1980</b>					13.1	13.9	14.5	15.5	16.4	16.2	15.3	14.3
<b>1981</b>	13.3	12.7	12.3	12.8	13.1	14.4	15.0	15.9	16.6	16.3		
<b>1997</b>		13.22	13.34	13.58	14.03	14.91	15.65	16.99	17.38	17.39	16.54	15.40
<b>1998</b>	14.49											
<b>2007</b>							15.22	15.75	15.98	15.87	15.26	
<b>2008</b>		13.16	12.92	12.79	13.15	13.88	14.82	15.70	15.99	15.84	15.15	14.15
<b>2009</b>	13.23	12.58	12.16	12.27	12.69	13.70	14.92	15.82	16.30	16.29	15.80	
<b>2010</b>		12.88	12.52	12.54	12.96	13.79	15.07	15.97	16.32	16.10	15.36	14.25
<b>2011</b>	13.29	12.76	12.45	12.76	13.45	14.22	15.11	16.01	16.52	16.52	15.86	15.10
<b>2012</b>	14.16	13.38	12.84	12.76	13.04	13.96	14.88	16.04	16.47			
<b>2013</b>							14.52	15.73	15.56	15.66	15.51	14.61
<b>2014</b>	13.79	13.16	12.73	12.76	13.18	13.97	15.07	16.05	16.61	16.53	16.06	15.22
<b>2015</b>	14.31	13.24	12.68	12.67	13.20	13.95	15.31	16.03		15.80	15.54	14.80
<b>2016</b>	14.42	13.82	13.26	13.05	13.45	14.23	15.29	16.30	16.78	16.55	15.96	15.11
<b>2017</b>	13.83	13.47	13.23	13.28	13.66	14.64	15.65	16.39				

La variación de la temperatura del Hall a media altura se encuentra en el rango desde 12.16 °C a 17.39 °C para el periodo completo, sin embargo el rango anual es normalmente inferior a 4 °C. El máximo anual de temperatura en la sala del Hall se alcanza en el mes de septiembre,

un mes de retraso respecto al máximo de temperatura de agosto del aire/suelo exterior tal y como se observa en la Tabla 3 y Figura 6. El delay se ha obtenido con el método de la máxima correlación aplicado para las temperaturas del exterior y del perfil vertical del suelo.



**Figura 8. 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 7. Únicamente se dispone de los datos del ciclo anual agosto 2004-julio 2005 (Cuezva, 2008), del periodo comprendido entre los años 2007 a 2009 (Sánchez-Moral, 2014) y de la etapa actual julio 2013-agosto 2017. La altura de la sonda de temperatura del 2007-2009 es de 1.30 m respecto del suelo (cota aprox. 151.05 m) y en la actualidad la altura respecto del suelo es de 0.70 m, no se dispone de la cota de dicho termómetro. Esta posible diferencia tanto de localización de las estaciones como de la cota a que se encuentra añade un término de incertidumbre al considerar cada uno de los sensores como representante de la temperatura del Cruce. Sin embargo en el perfil vertical medido actualmente no se observan diferencias superiores a 0.2 °C.

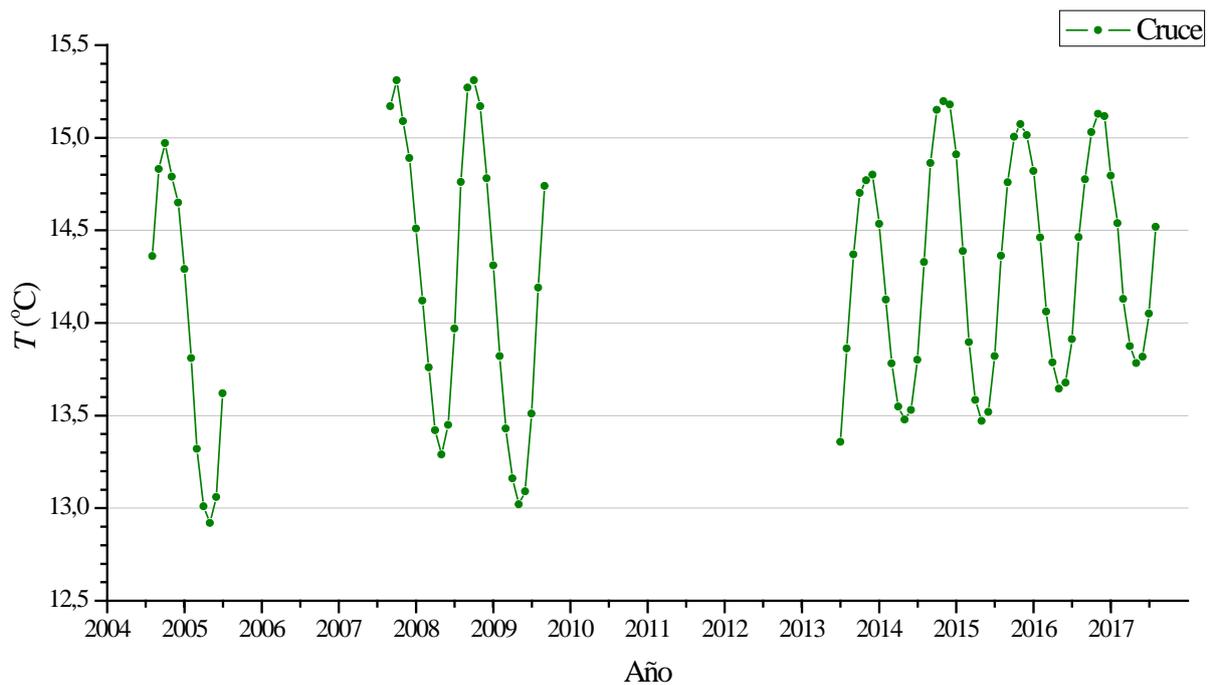
En la Figura 9 se muestra la evolución temporal desde el año 2004 hasta la actualidad de la temperatura media mensual en la zona del Cruce a nivel medio. El rango de variación en el ciclo 2004-2005 es de 2 °C al igual que el año 2008, en el caso de los ciclos anuales completos 2014 y 2015 el rango de oscilación es de 1.7 y 1.6 °C respectivamente. Esta disminución en el rango de oscilación de la temperatura del Cruce puede venir suscitada por el cierre de la segunda

puerta (ver localización en Figura 1) provocando un mayor aislamiento de las zonas posteriores a la misma, disminuyendo de este modo la conexión con el Hall. 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.

**Tabla 7. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del Cruce.**

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>2004</b>								14.36	14.83	14.97	14.79	14.65
<b>2005</b>	14.29	13.81	13.32	13.01	12.92	13.06	13.62					
<b>2007</b>									15.17	15.31	15.09	14.89
<b>2008</b>	14.51	14.12	13.76	13.42	13.29	13.45	13.97	14.76	15.27	15.31	15.17	14.78
<b>2009</b>	14.31	13.82	13.43	13.16	13.02	13.09	13.51	14.19	14.74			
<b>2013</b>							13.36	13.86	14.37	14.70	14.77	14.80
<b>2014</b>	14.53	14.13	13.78	13.55	13.48	13.53	13.80	14.33	14.86	15.15	15.20	15.18
<b>2015</b>	14.91	14.39	13.90	13.58	13.47	13.52	13.82	14.36	14.76	15.00	15.07	15.01
<b>2016</b>	14.82	14.46	14.06	13.79	13.65	13.68	13.91	14.46	14.78	15.03*	15.13	15.12
<b>2017</b>	14.79	14.54	14.13	13.88	13.78	13.82	14.05*	14.52*				

\*Tomado como promedio de la temperatura media mensual de los niveles superior e inferior



**Figura 9. 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 8. Debido a que es la sala en la que se encuentran la gran mayoría de las representaciones artísticas de la cavidad, el control ambiental en la misma ha sido más amplio y por tanto se dispone de datos de temperatura en todos los periodos de investigación. Para el periodo de Villar (1980-

81) se midió la temperatura media mensual de la sala de Polícromos desde mayo de 1980 hasta octubre de 1981, donde los valores de temperatura están tabulados desde junio 1980 a Julio 1981 (Villar, 1984), y los datos fuera de este rango temporal se han obtenido a partir de la representación gráfica de las referencias Villar (1983) y Fernández (1983). Los estudios llevados a cabo por el CSIC desde el año 1997 hasta el 2012, englobados en las fases que se han comentado anteriormente se pueden ver en las referencias Cuezva (2008), Sánchez-Moral (2014) y García-Antón (2014). Los datos a partir del 2013 se toman de las plantillas de descarga mensual realizadas dentro de la parte del PCP llevado a cabo por la Universidad de Cantabria.

**Tabla 8. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos.**

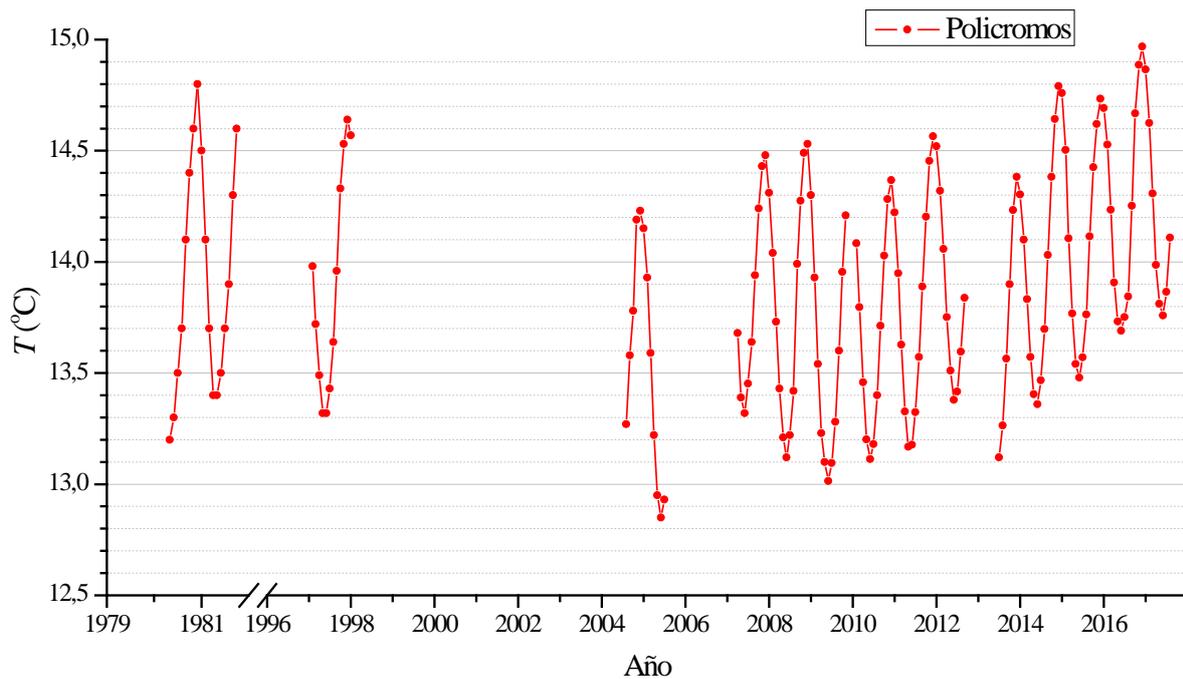
	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sept.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>
<b>1980</b>					13.2	13.4	13.5	13.7	14.1	14.4	14.6	14.8
<b>1981</b>	14.5	14.1	13.7	13.4	13.4	13.5	13.7	13.9	14.3	14.6		
<b>1997</b>		13.98	13.72	13.49	13.32	13.32	13.43	13.64	13.96	14.33	14.53	14.64
<b>1998</b>	14.57											
<b>2004</b>								13.27	13.58	13.78	14.19	14.23
<b>2005</b>	14.15	13.93	13.59	13.22	12.95	12.85	12.93					
<b>2007</b>				13.68	13.39	13.32	13.45	13.64	13.94	14.24	14.43	14.48
<b>2008</b>	14.31	14.04	13.73	13.43	13.21	13.12	13.22	13.42	13.99	14.28	14.49	14.53
<b>2009</b>	14.30	13.93	13.54	13.23	13.10	13.02	13.10	13.28	13.60	13.95	14.21	
<b>2010</b>		14.08	13.80	13.46	13.20	13.11	13.18	13.40	13.71	14.03	14.28	14.37
<b>2011</b>	14.23	13.95	13.63	13.33	13.17	13.18	13.32	13.57	13.89	14.20	14.45	14.56
<b>2012</b>	14.52	14.32	14.06	13.75	13.51	13.38	13.42	13.60	13.84			
<b>2013</b>							13.12	13.26	13.56	13.90	14.23	14.38
<b>2014</b>	14.30	14.10	13.83	13.57	13.40	13.36	13.47	13.70	14.03	14.38	14.64	14.79
<b>2015</b>	14.76	14.50	14.11	13.77	13.54	13.48	13.57	13.76	14.11	14.43	14.62	14.73
<b>2016</b>	14.69	14.53	14.24	13.91	13.73	13.69	13.75	13.84	14.25	14.67	14.89	14.97
<b>2017</b>	14.87	14.62	14.31	13.99	13.81	13.76	13.86	14.11				

La temperatura media mensual en la sala de Polícromos para el periodo 2007-2012 se toma de la estación POL-1 situada al fondo de la sala. En el intervalo 2007-2009 la temperatura se toma de la sonda colocada a altura media (1.17 m desde el suelo). En los casos en los que no se dispone de datos se rellena con los datos de la estación POL-2 situada en un lateral de la sala tomando como valor a media altura el promedio de las sondas superior (altura 1.55 m) y próxima al suelo (altura 0.25 cm) (Sánchez-Moral, 2014). En el periodo 2010-2012 se utilizan los valores dados que se corresponden a la media de las temperaturas registradas a 1.85 m y 18 cm del suelo de la estación POL-1 situada en el fondo de la sala de Polícromos, parte de estos datos se pueden observar tabulados en García-Antón (2014).

Cabe resaltar que las temperaturas medias mensuales de las estaciones POL-1 y POL-2 difieren en todos los casos menos de una décima de grado Celsius, considerando la altura media del POL-1 (a 1.17 m del suelo) o la media de las dos sondas de POL-2 (a 1.55 m y 25 cm del

suelo) lo que indica que se puede utilizar indistintamente una u otra estación para caracterizar la temperatura de la sala.

La estación actual se encuentra en la parte derecha de la sala al igual que la POL-2 (ver Figura 4), en este caso se dispone de una sonda de temperatura a media altura, 0.40 m respecto de la base de la estación y aproximadamente 1 metro del suelo. De este modo se introduce una pequeña incertidumbre respecto a los datos recogidos por el equipo del CSIC, aunque como ya se observó en el periodo del CSIC las diferencias entre los puntos monitorizados son pequeñas.



**Figura 10. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos.**

En la Figura 10 se recogen las medias mensuales de temperatura a nivel medio de la sala de Polícromos. Se observa que la variación anual se encuentra en el rango 1.3-1.4 °C, unas décimas menos que el caso del cruce y unos grados menos que el Hall. En los dos primeros periodos (1980-81; 1997-98) se alcanzan máximos anuales de 14.8 y 14.64 °C respectivamente, no es hasta diciembre de 2015 cuando se supera el valor de 14.6 °C. El delay de la temperatura de Polícromos respecto al exterior es de 4 meses.

Debido a la aparente tendencia creciente que se visualiza en la temperatura media mensual más acusada en los mínimos anuales de los periodos 2009-2012 y del actual 2013-2017, se han analizado las tendencias a partir de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. Efectivamente se obtienen tendencias significativas al 95 % de confianza para el periodo junio 2009-2012 y para julio 2013-agosto 2017 con una pendiente de 0.011 °C/mes en ambos casos. Por lo tanto cada año desde el 2009 la temperatura se estaría incrementando 0.13 °C/año de media. Este resultado motiva el análisis tanto de las causas externas de la cueva como el efecto que tiene sobre la temperatura la segunda puerta instalada en octubre de 2008.

## ► La Hoya y el Pozo

A continuación se presenta las temperaturas medias mensuales de las salas que se encuentran más aisladas de la cueva. En la sala de la Hoya se encuentra la cota más baja, 16 metros por debajo del nivel de la entrada, con un espesor de roca en el techo de unos 15-16 metros. La sala del Pozo es la más alejada de la puerta aunque menos profunda, 10 metros respecto de la entrada. Este grado de aislamiento hace que la variación anual de la temperatura sea aproximadamente 0.2 °C en la Hoya y 0.4 °C en el Pozo.

Los datos disponibles son los correspondientes a partir del año 2013 tal y como se puede observar en la Tabla 9, Tabla 10 y en la representación gráfica de la Figura 11. Debido a la falta de datos 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.

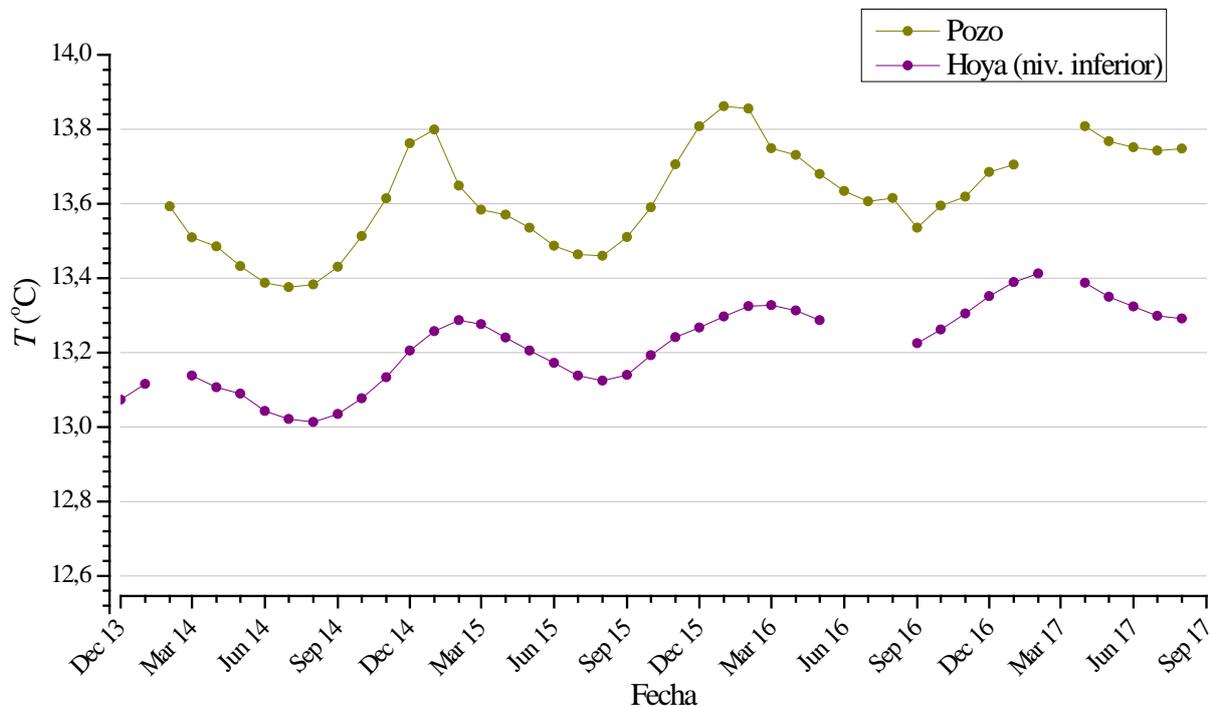


Figura 11. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala del Pozo y del nivel inferior en la sala de la Hoya.

Tabla 9. Temperatura media mensual del aire a nivel inferior de la sala de la Hoya.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>2013</b>												13.07
<b>2014</b>	13.12		13.14	13.11	13.09	13.04	13.02	13.01	13.03	13.08	13.13	13.20
<b>2015</b>	13.26	13.29	13.28	13.24	13.21	13.17	13.14	13.12	13.14	13.19	13.24	13.27
<b>2016</b>	13.30	13.32	13.33	13.31	13.29				13.22	13.26	13.30	13.35
<b>2017</b>	13.39	13.41		13.39	13.35	13.32	13.30	13.29				

**Tabla 10. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala del Pozo.**

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>2014</b>		13.59	13.51	13.49	13.43	13.39	13.38	13.38	13.43	13.51	13.61	13.76
<b>2015</b>	13.80	13.65	13.58	13.57	13.54	13.49	13.46	13.46	13.51	13.59	13.71	13.81
<b>2016</b>	13.86	13.86	13.75	13.73	13.68	13.63	13.61	13.61	13.53*	13.59*	13.62*	13.69*
<b>2017</b>	13.70*			13.81	13.77	13.75	13.74	13.75				

\*Tomado como promedio de la temperatura media mensual de los niveles superior e inferior

#### **4.1.3. Resumen y delay de temperaturas del exterior e interior**

Como se ha visto en el apartado 4.1.1, 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 7) 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.

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. 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 tal y como se puede observar en los datos de cada una de las salas analizadas en el apartado 4.1.2.

Para estudiar el retraso entre la temperatura exterior e interior de la cueva se ha seguido el procedimiento descrito en el apartado 0. Se toman el par de series de las cuales se quiere obtener el desfase temporal, se varían sus posiciones relativas y se realiza el estudio de correlación lineal de Pearson para cada desfase aplicado. El desfase que proporcione un coeficiente de correlación más alto determina el delay entre series. En este caso se toman las temperaturas medias mensuales y diarias de la serie temporal del exterior y cada una de las series de las salas de la cueva para el intervalo temporal 2013-2017. El delay obtenido viene expresado por tanto en meses y en días respectivamente. A continuación en la Tabla 11 se muestra el delay y su correspondiente coeficiente de correlación de Pearson máximo.

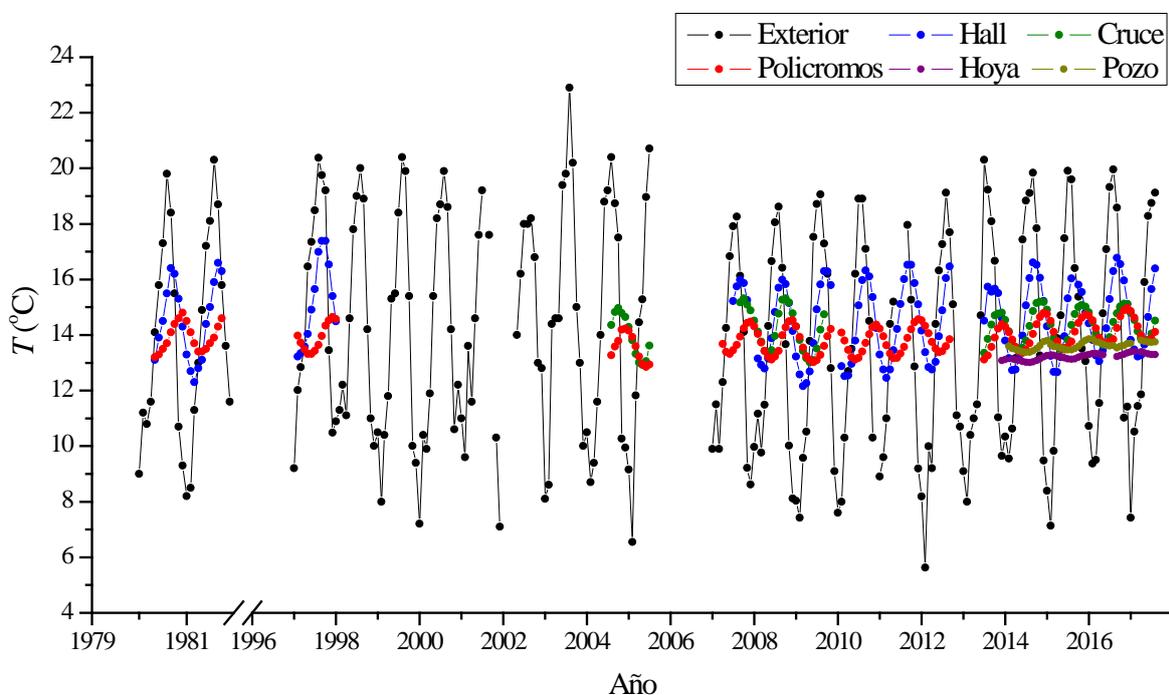
Se observa que el retraso obtenido de las series del perfil vertical del exterior, profundidades del suelo de 10 y 50 cm, es de 0 meses o 1 día desde el punto de vista de la escala temporal mensual y diaria respectivamente. De este modo se podrían utilizar cualquiera de estas series para encontrar el delay entre las salas de la cueva y el exterior, teniendo en cuenta que se estaría cometiendo un error de 1 día en la escala temporal diaria. 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 delay.

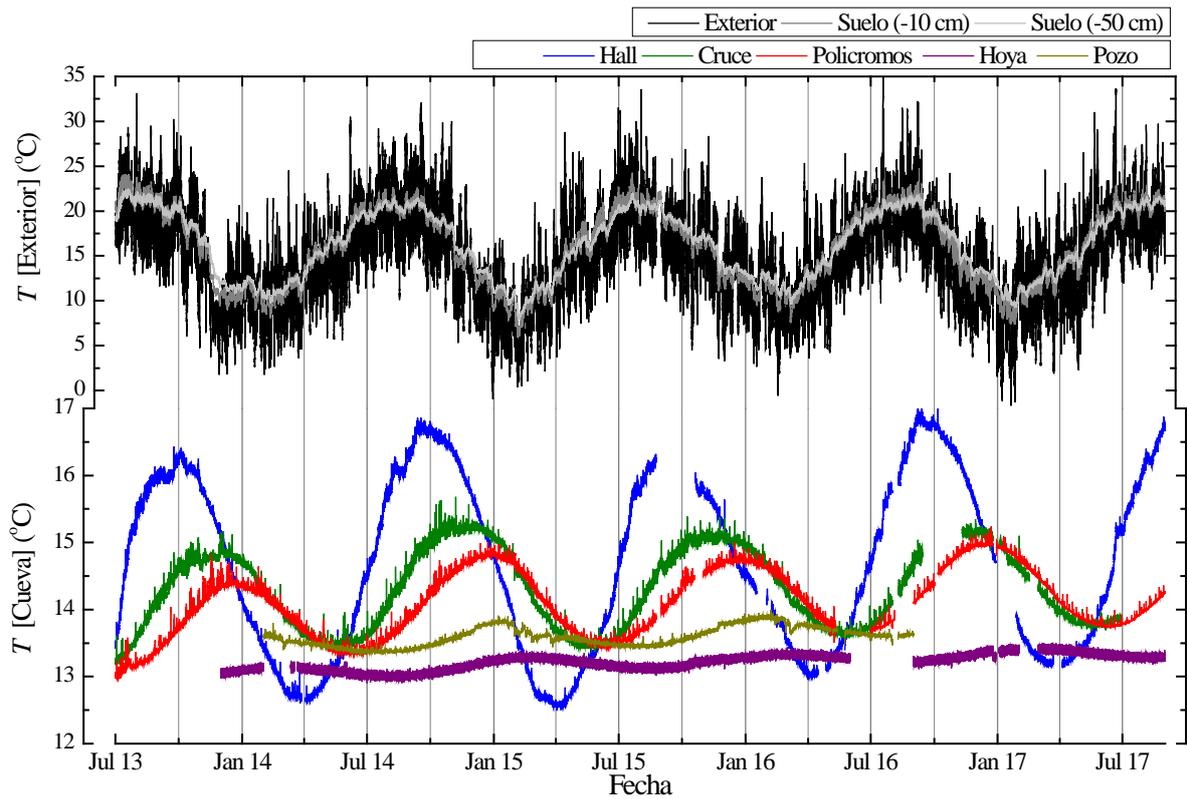
**Tabla 11. Delay de las temperaturas del perfil vertical del suelo y de las salas de la cueva de Altamira respecto a la temperatura del exterior utilizando las temperaturas medias mensuales y diarias. Se indica el coeficiente de correlación máximo  $r$  obtenido.**

	Suelo -10 cm	Suelo -50 cm	Hall	Cruce	Polícromos	Hoya	Pozo
Delay (meses)	0	0	-1	-3	-4	-6	-5
$r$	0.99	0.98	0.86	0.86	0.79	0.53	0.61
Delay (días)	0	0	-42	-86	-117	-161	-139
$r$	0.93	0.91	0.77	0.71	0.66	0.44	0.55

En la Figura 12 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 4.1.1 y 4.1.2. Se observa la continua disminución de la amplitud de la onda descrita según aumenta el grado de aislamiento de cada una de las salas respecto del exterior. Así mismo se intuye el retraso que se muestra en la Tabla 11. En la Figura 13 se muestra el registro en continuo, cada 15 minutos, de la temperatura del exterior e interior de la cueva. Se puede ver con mayor claridad la atenuación que sufre la onda térmica, siendo el Hall la sala con mayor conexión con el exterior y la Hoya la que menor. Se ve claramente como a medida que la sala está más aislada el delay aumenta desde 1 mes en el Hall, 3 meses para el Cruce, 4 meses para la sala de Polícromos, 5 para el Pozo hasta 6 meses en el caso de la Hoya.



**Figura 12. 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).**

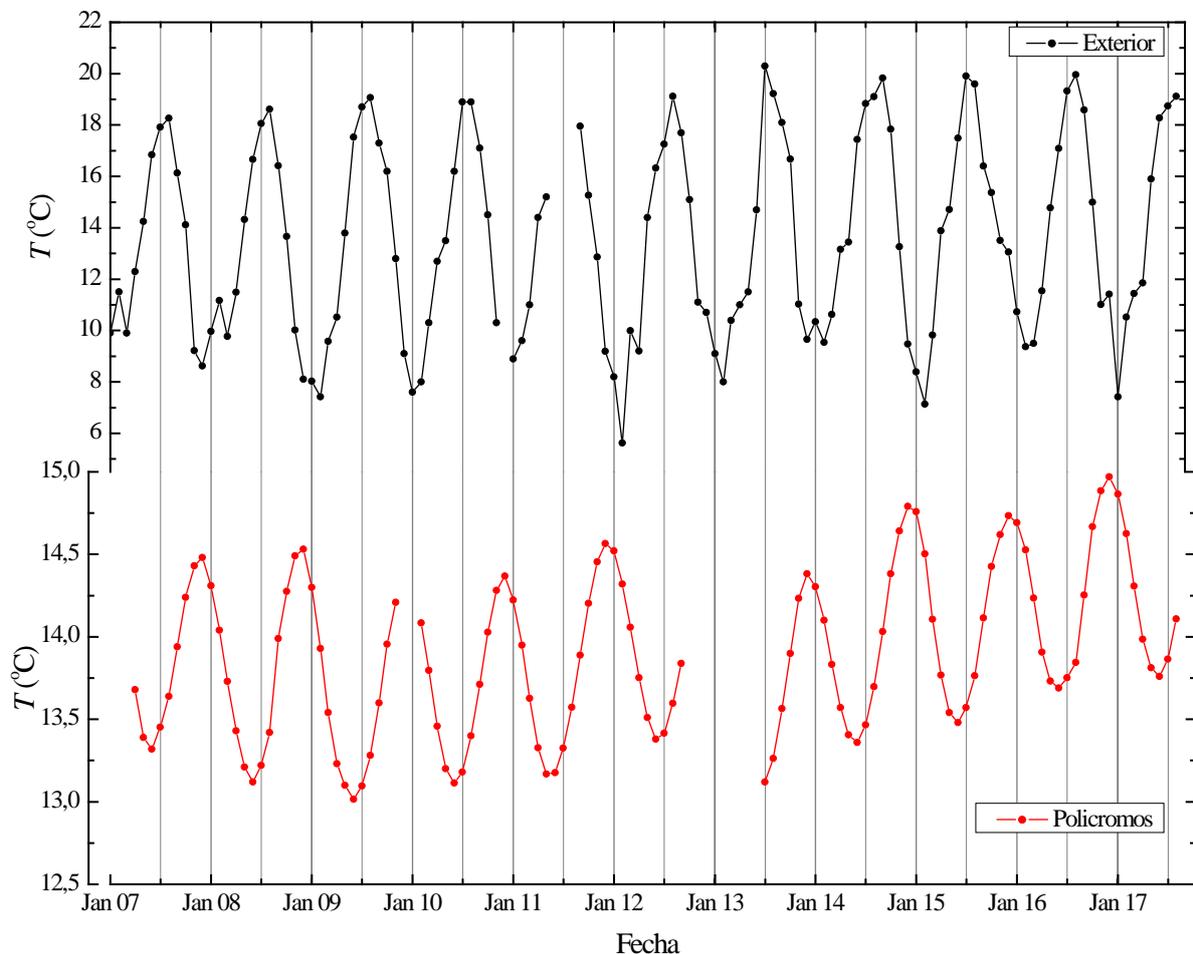


**Figura 13. Registro de la temperatura exterior (aire a nivel medio y perfil vertical del suelo a -10 y -50 cm) e interior de la cueva de Altamira a nivel medio en las salas del Hall, Cruce, Polícromos, Hoya (nivel inferior) y Pozo.**

## 4.2. Modelo predictivo de temperaturas

Como se ha expuesto en el apartado 0, la onda descrita por las temperaturas medias mensuales del exterior y de la sala de Polícromos es similar. La diferencia reside en que la onda de Polícromos está amortiguada y desfasada respecto a la del exterior. La amplitud de oscilación anual en la sala es del orden de  $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  mientras que en el exterior se superan los  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por otra parte, la influencia del exterior no se transmite instantáneamente hacia el interior de la cavidad sino que tarda un cierto tiempo dependiendo de la sala tal y como se muestra en la Tabla 11. En el caso de la sala de Polícromos el retraso es de 4 meses.

En la Figura 14 se muestra la temperatura media mensual del exterior y de la sala de Polícromos, se observa claramente la similitud de las ondas, la amortiguación y retraso de la correspondiente a la sala respecto a la de afuera. El origen de los datos se especifica en los apartados 4.1.1 y 4.1.2.



**Figura 14. Temperatura media mensual del aire a nivel medio del exterior y de la sala de Polícromos.**

Partiendo de las observaciones anteriores, lo que el modelo predictivo pretende es convertir una señal (exterior) en otra (Polícromos) tal y como se ha explicado en el apartado 0. Para entrenar el modelo se han seguido los pasos **a** hasta **e**. Para predecir la temperatura media

mensual de la sala de Polícromos se aplican los pasos **I** a **V**. De este modo se genera una serie de 36 valores mensuales de temperatura correspondiente a la predicción de la sala de Polícromos donde los 3 últimos valores corresponden a los 3 meses posteriores al último mes del exterior introducido.

El modelo predictivo original implementado en Excel por el IPCE utilizó para entrenar el modelo y obtener los coeficientes en el espacio de Fourier, 37 valores de la temperatura media mensual del exterior y sus correspondientes de la sala de Polícromos, teniendo en cuenta el desfase de 4 meses existente entre ambas señales, de mayo 2009 a mayo 2012 para el exterior y de septiembre 2009 a septiembre 2012 para Polícromos.

La réplica del modelo original, desarrollado en este trabajo, se ha implementado en R, lo que permite seleccionar cualquier periodo de entrenamiento. Con el fin de comparar los resultados del modelo del IPCE realizado en Excel con el implementado en R, se ha seleccionado el mismo periodo de entrenamiento en este último. Los resultados de la temperatura media mensual de la sala de Polícromos para cada modelo se muestran en la Figura 15. Las predicciones hasta junio de 2012, 1 mes más que la serie del exterior introducida, corresponden con la primera serie predicha, a partir de este mes se toma exclusivamente la predicción correspondiente al mes posterior al de la serie del exterior.

A la vista de los resultados mostrados en la Figura 15, se observa que la predicción obtenida con los modelos implementados en el Excel (IPCE) y R (Rábago [2009-2012]) no proporcionan exactamente los mismos resultados numéricos con la precisión utilizada. Para determinar si las diferencias encontradas en la temperatura predicha con cada modelo son estadísticamente distintas con un nivel de confianza dado, se va a aplicar el test de Kolmogorov-Smirnov. Este test tiene en cuenta ambas distribuciones en su conjunto y determina si ambas series provienen de una misma distribución, no se tiene en cuenta la componente temporal. La validación temporal viene dada por la significación de la correlación, en este caso la correlación de Pearson.

Con un nivel de confianza del 95 % el test de Kolmogorov-Smirnov indica que no se puede afirmar que las distribuciones pertenezcan a distribuciones distintas, la función densidad de probabilidad, que describe la probabilidad relativa de las series de tomar un determinado valor, se puede observar en la Figura 16 (izda.). El coeficiente de correlación de Pearson obtenido entre las series es de  $r=0.965$ , lo que indica que hay una muy alta correlación entre las mismas teniendo en cuenta la componente temporal (ver Figura 16 (dcha.)). Por lo tanto, los resultados del modelo predictivo implementado tanto en Excel como en R no son significativamente diferentes utilizando el mismo periodo de entrenamiento, siendo las diferencias numéricas fruto de la forma de trabajar de los distintos software.

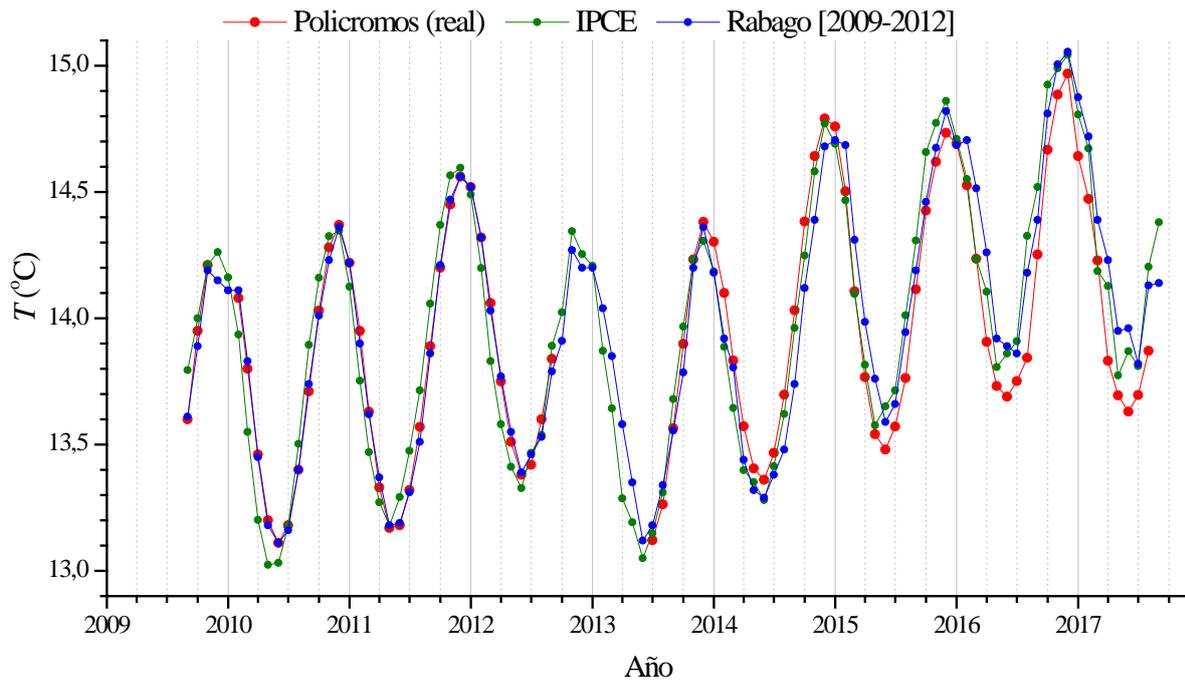


Figura 15. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos (rojo) y las predicciones obtenidas a partir del programa implementado en Excel (verde) y en R (azul) entrenando el modelo con los datos de mayo 2009 a mayo 2012 para el exterior y de septiembre 2009 a septiembre 2012 para Polícromos.

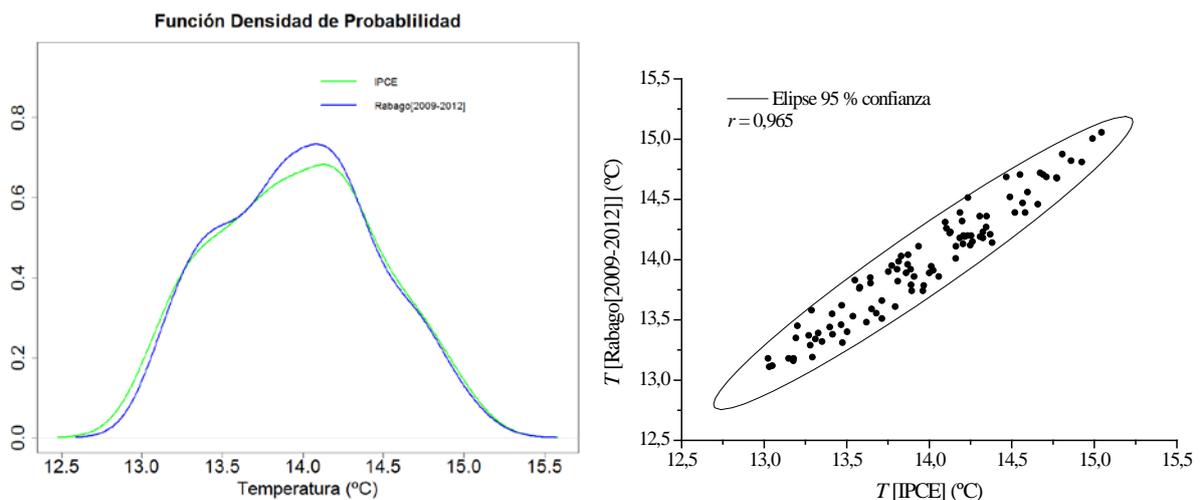
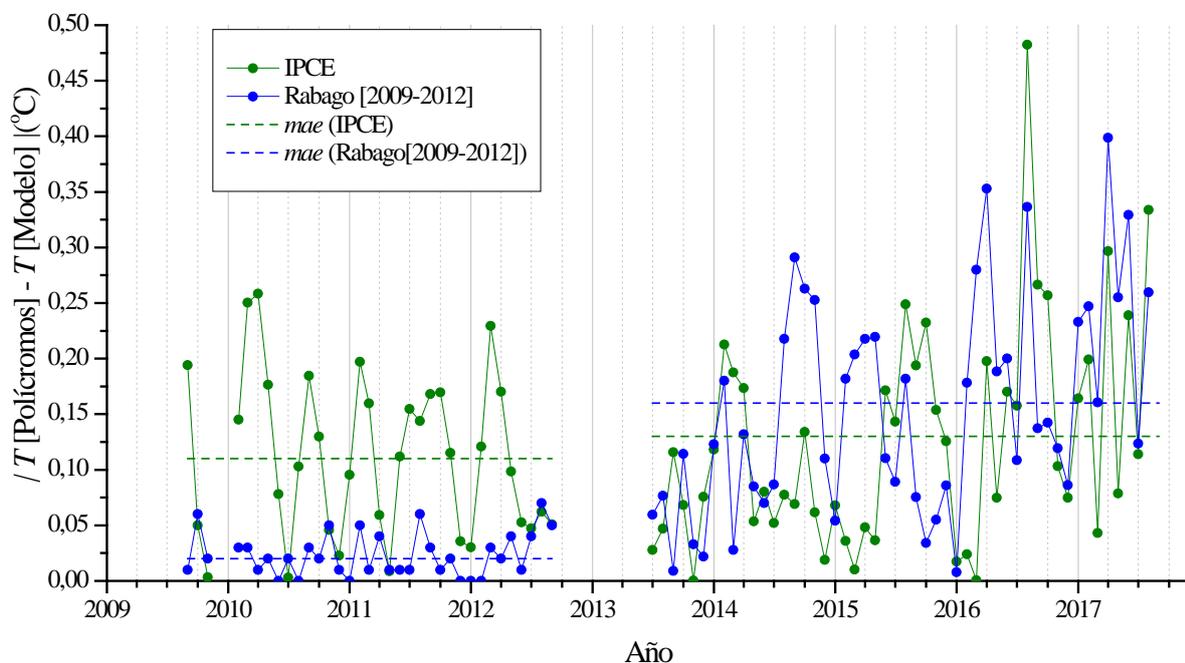


Figura 16. Función densidad de probabilidad de las predicciones obtenidas del modelo predictivo implementado en Excel (verde) y en R (azul) entrenado con los datos del periodo 2009-2012 (izda.). Representación de una serie frente a otra donde se indica el coeficiente de correlación de Pearson  $r$  y la elipse de confianza al 95 % (dcha.).

Para medir cuanto se asemejan las predicciones a los valores reales de temperatura media mensual en la sala de Polícromos se determina el valor absoluto de la diferencia entre el valor observado y el proporcionado por el modelo. Los resultados de estas diferencias se pueden ver en la Figura 17. Para caracterizar el modelo en su conjunto se calcula el error medio absoluto  $mae$  (ver Ec. (2)) por una parte para los datos de entrenamiento, valores de temperatura de

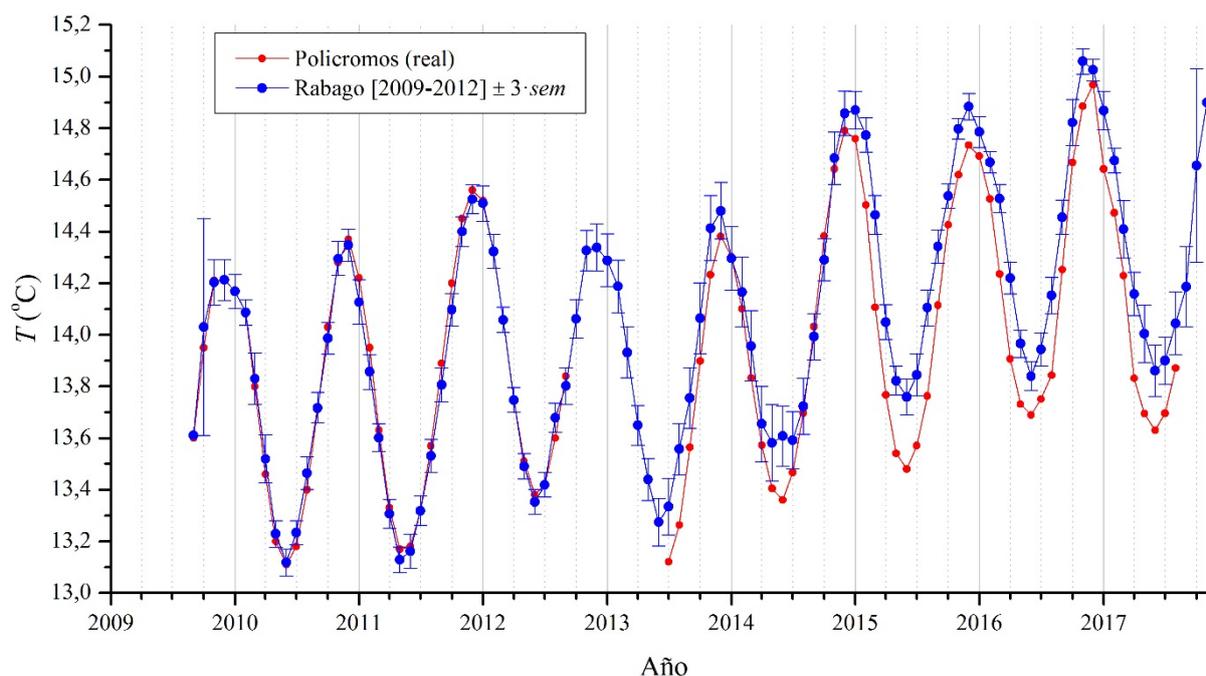
Polícromos conocidos y utilizados, y por otra parte las predicciones como tal, en las que solo se utiliza la temperatura exterior para predecir la de la sala.

Se observa que para los periodos de entrenamiento, hay un buen ajuste de los modelos a los datos experimentales, con un *mae* de 0.02 °C para el programa de R (Rábago [2009-2012]) y de 0.11 °C para el de Excel (IPCE). En el periodo en el que se testea el programa, a partir de septiembre de 2012, el error absoluto medio se incrementa en ambos casos, hasta 0.16 °C para el programa R y 0.13 °C para el Excel. La pequeña diferencia entre los datos de entrenamiento y los reales, sobretodo en el caso del modelo implementado en R, hace que el *mae* se incremente al testear los modelos con nuevos datos que no forman parte de la muestra de entrenamiento. De este modo se pierde capacidad de generalización, dando lugar a lo que se denomina modelo sobreajustado a la muestra de entrenamiento.



**Figura 17.** Diferencia entre la temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos y las predicciones obtenidas a partir del programa implementado en Excel (verde) y en R (azul) entrenando el modelo con los datos del periodo 2009-2012.

Los resultados que se muestran en la Figura 15 y Figura 17 tienen en cuenta exclusivamente el primer valor de temperatura predicho posterior al último mes de la serie del exterior introducida en cada caso, excepto para la muestra que coincide con la de entrenamiento que se toma completa. Para determinar la incertidumbre asociada al modelo implementado en R se toma el conjunto de todas las series de predicción realizadas, 36 valores mensuales por cada una. Asignando como valor central la media aritmética y como incertidumbre asociada 3 veces el error estándar de la media *sem* (ver Ec. (3)), que indicaría que el 99.73 % de las observaciones de encuentran en ese intervalo. La media de las predicciones y su incertidumbre en comparación con la serie observada de Polícromos se muestran en la Figura 18.



**Figura 18. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos (rojo) y la media de las predicciones obtenidas en R (azul) entrenado el modelo con los datos del periodo 2009-2012. La incertidumbre asociada a la predicción media de cada mes es 3 veces el error estándar de la media  $sem$ .**

Los resultados de la media de las predicciones y su incertidumbre muestran de nuevo que hay un buen ajuste para la muestra de entrenamiento, sin embargo a la hora de predecir datos nuevos, en una gran cantidad de casos el valor observado de temperatura media mensual de la sala de Polícromos se encuentra fuera del intervalo de confianza al 99.73 % delimitado por la incertidumbre considerada en el modelo.

Con el fin de comprobar cómo se modifican las predicciones del modelo implementado en R cambiando el periodo de entrenamiento, se ha entrenado con la primera serie de valores de temperatura del periodo de investigación actual. Para el exterior se ha tomado la temperatura media mensual de marzo 2013 a marzo 2016 y para la sala de Polícromos, teniendo en cuenta el desfase temporal de 4 meses, se ha tomado de julio 2013 a julio 2016.

Al igual que en el caso anterior, por una parte se predice la temperatura media mensual de Polícromos del mes posterior a cada una de las series de 37 valores del exterior introducida en el programa (ver Figura 19). Por otra parte se consideran todas las series de predicción obtenidas y se calcula su media y se estima su incertidumbre (ver Figura 20).

En la Figura 19 y Figura 20 se observa que tanto tomando exclusivamente la primera serie predicha como la media de toda la serie de predicciones para cada mes, hay un muy buen ajuste a los datos de entrenamiento. El modelo es capaz de reproducir con mucha precisión la temperatura de la sala de Polícromos, en el primer caso se obtiene un *mae* de 0.02 °C y 0.07 °C en el segundo. Sin embargo a partir de julio de 2016, periodo donde no se han utilizado datos de temperatura de la sala de Polícromos, la diferencia entre los datos reales y los predichos

aumenta, hasta un *mae* de 0.20 °C para los datos predichos de la Figura 19 y 0.17 °C para los correspondientes de la Figura 20.

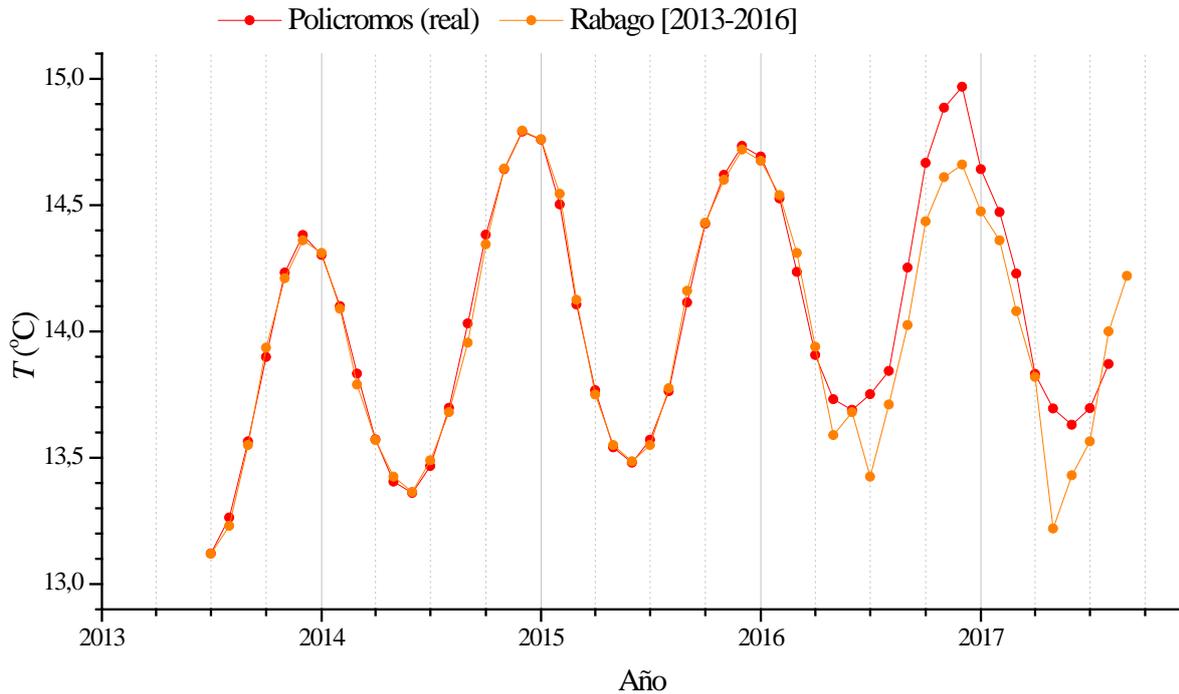


Figura 19. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos (rojo) y las predicciones obtenidas a partir del programa implementado en R (naranja) entrenado el modelo con los datos de marzo 2013 a marzo 2016 para el exterior y de julio 2013 a julio 2016 para Polícromos.

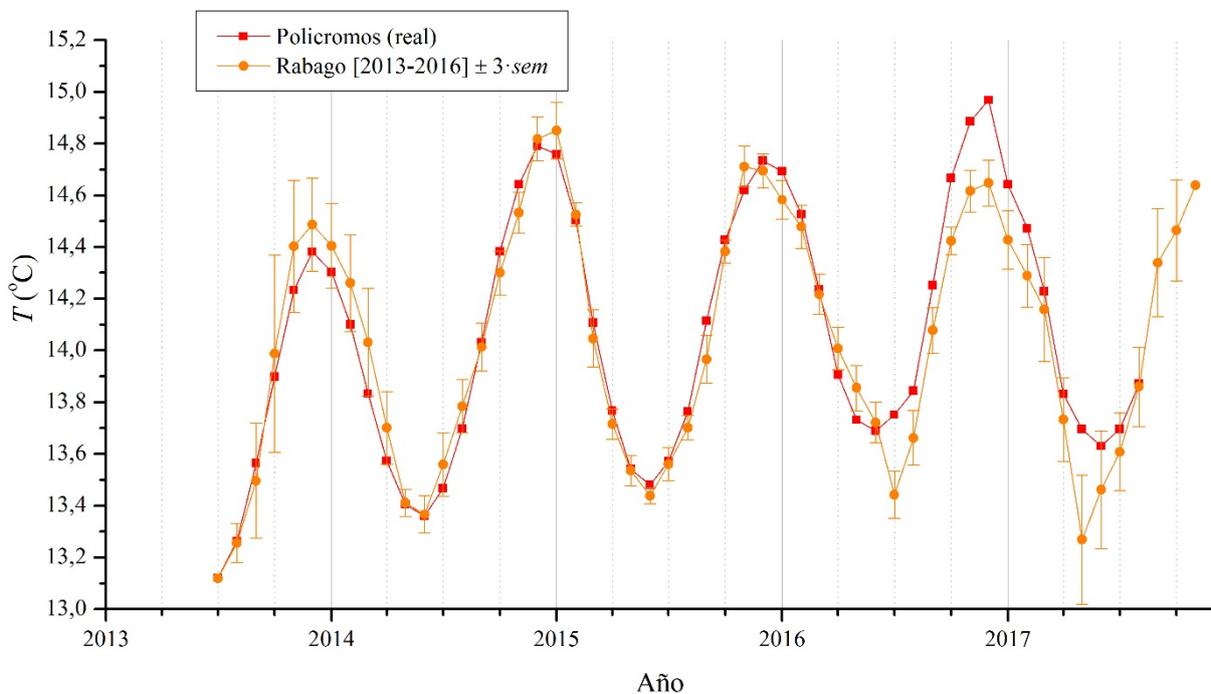


Figura 20. Temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polícromos (rojo) y la media de las predicciones obtenidas en R (naranja) entrenando el modelo con los datos del periodo 2013-2016. La incertidumbre asociada a la predicción media de cada mes es 3 veces el error estándar de la media *sem*.

Así mismo, se han comparado las predicciones obtenidas con el modelo implementado en Excel y R, utilizando los dos periodos de entrenamiento mencionados anteriormente. Se ha acotado el periodo de predicción desde agosto 2016 hasta agosto 2017 ya que en ningún caso se incluyen estos datos de temperatura de la serie de Polícromos para entrenar el modelo. En la Figura 21 se muestra el valor absoluto de la diferencia entre el valor predicho obtenido con cada variante del modelo y la temperatura real obtenida experimentalmente para cada mes. No se observa que haya una mejoría de uno respecto de los demás tal y como indica el error absoluto medio *mae* (línea horizontal de la Figura 21) que es similar en los tres casos. Los resultados numéricos de las predicciones, la diferencia en valor absoluto y el *mae* se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12. Resultados de la temperatura media mensual (°C) predicha para la sala de Polícromos obtenidos de los modelos implementados en Excel (IPCE) y R (Rábago [2009-2012] y Rábago [2013-2016]) y valor absoluto de la diferencia. Se indica el error absoluto medio *mae* en cada caso.**

Mes-Año	Polícromos (real)	IPCE		Rábago [2009-2012]		Rábago [2013-2016]	
		Predicción	Diferencia	Predicción	Diferencia	Predicción	Diferencia
Ago-16	13.84	14.33	0.48	14.18	0.34	13.71	0.13
Sept-16	14.25	14.52	0.27	14.39	0.14	14.03	0.23
Oct-16	14.67	14.92	0.26	14.81	0.14	14.44	0.23
Nov-16	14.89	14.99	0.10	15.01	0.12	14.61	0.28
Dic-16	14.97	15.04	0.07	15.06	0.09	14.66	0.31
Ene-17	14.64	14.81	0.16	14.88	0.23	14.48	0.17
Feb-17	14.47	14.67	0.20	14.72	0.25	14.36	0.11
Mar-17	14.23	14.19	0.04	14.39	0.16	14.08	0.15
Abr-17	13.83	14.13	0.30	14.23	0.40	13.82	0.01
May-17	13.70	13.77	0.08	13.95	0.25	13.22	0.48
Jun-17	13.63	13.87	0.24	13.96	0.33	13.43	0.20
Jul-17	13.70	13.81	0.11	13.82	0.12	13.57	0.13
Ago-17	13.87	14.20	0.33	14.13	0.26	14.00	0.13
<i>mae</i>			0.20		0.22		0.20

Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos en este apartado, se puede decir que por una parte el modelo reproduce muy bien la muestra de entrenamiento, mientras que al introducir una serie nueva del exterior la diferencia con los datos observados se puede alejar hasta 0.5 °C, aunque de media las tres predicciones tienen un error absoluto medio se encuentra sobre 0.2 °C en todos los casos, dependiendo del periodo que se prediga. Por otra parte no se ha encontrado que cambiar el periodo de entrenamiento, a uno más cercano a los datos predichos, aporte resultados sustancialmente mejores, es decir, más cercanos a la observación, tal y como se puede observar en la Figura 21 y Tabla 12.

Por consiguiente, los posibles defectos que puede tener el modelo están directamente relacionados con la cantidad de parámetros que se manejan, hay una hiperparametrización que

lleva al sobreajuste a la muestra de entrenamiento, limitando su capacidad predictiva y de generalización por culpa del sobreentrenamiento u *overfitting* (Gutjahr, 2013).

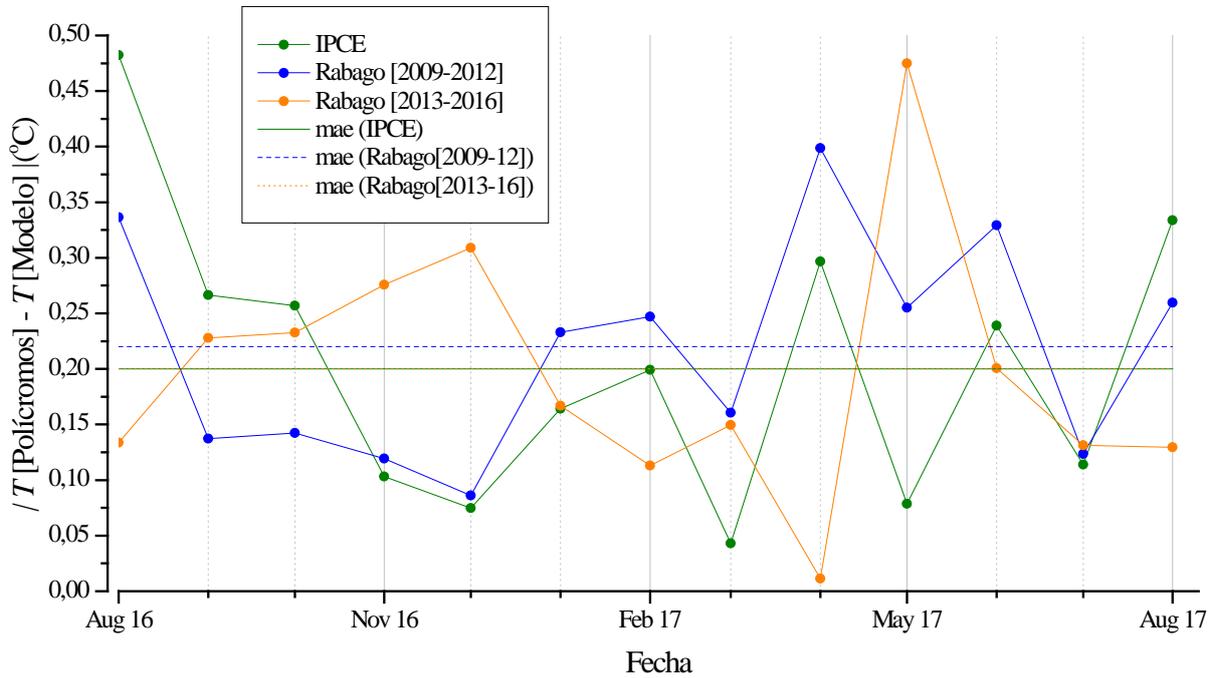


Figura 21. Diferencia entre la temperatura media mensual del aire a nivel medio de la sala de Polí cromos y las predicciones obtenidas a partir del programa implementado en Excel (IPCE) y en R (Rábago [2009-2012] y Rábago [2013-2016]).

## 5. Conclusiones

A la vista del estudio realizado en este trabajo se pueden extraer una serie de conclusiones que se pueden estructurar en dos grupos estrechamente relacionados. Por un lado todo lo referente al estudio ambiental llevado a cabo dentro de la cueva de Altamira, diferencias entre periodos de investigación, sistemas de adquisición de datos, calibración y metrología de los dispositivos, etc. Por otro lado se tiene el modelo predictivo de temperaturas de la sala de Polícromos, en el que partiendo del modelo original del IPCE se ha implementado en el lenguaje de R y se han hecho pequeñas modificaciones con el fin de contrastar sus resultados.

Los estudios llevados a cabo en la cueva de Altamira desde los años 80 han proporcionado mucha información del estado de la misma, siendo la temperatura uno de los parámetros determinantes en el estado de conservación de su arte rupestre. Esto se debe a la influencia que tiene esta sobre las características climáticas en su estado natural, que establece de algún modo la dinámica general de los flujos de materia y energía en la cavidad. El especial énfasis que se da a la medida de temperatura en cada uno de los periodos de investigación confirma las afirmaciones anteriores.

La línea que se comenzó en los años 80 con la medida de la temperatura en continuo, y que se continuó en 1996 con el CSIC, instalando un sistema autónomo de adquisición de datos microambientales es la que se sigue hoy en día. Este tipo de sistemas permiten la medición en continuo y un mayor control de los procesos que se dan en la cueva. Las modificaciones actuales como la conexión a través de internet del sistema han expandido las posibilidades del mismo, por ejemplo, proporcionando capacidad de controlar en tiempo real la temperatura, humedad y CO<sub>2</sub> durante las visitas experimentales que se llevan a cabo.

Uno de los ámbitos en los que todos los grupos hacen hincapié es en la importancia de mantener la calidad metrológica de las medidas realizadas, es decir, mantener los dispositivos de medida debidamente calibrados garantizando su trazabilidad. Este punto es muy importante y especialmente en las condiciones de ecosistemas subterráneos donde los parámetros como la alta humedad, con valores cercanos al 100 % de humedad relativa, pueden provocar la deriva o continuos errores tanto de los sensores como del sistema de adquisición de datos.

Por lo tanto, este trabajo permite establecer una base de estudio del campo de temperaturas en la cueva de Altamira, aportando la recopilación de los datos de temperatura de todas las salas de la cueva con precisión mensual con las respectivas fuentes bibliográficas de donde provienen.

Respecto al modelo predictivo de temperaturas de la sala de Polícromos, se disponía de un modelo implementado en Excel, sencillo de manejar, pero que no permite realizar modificaciones sustanciales en la manera de operar. La implementación en R del mismo, cuyos resultados son compatibles con el original, proporciona un amplio espectro de posibilidades de

modificación. En este caso se ha cambiado el periodo de entrenamiento, del 2009-2012, al actual 2013-2016 y los resultados no han sido significativamente mejores. Con las pruebas realizadas en este estudio, se sugiere que cambiando el periodo de entrenamiento a una situación más próxima temporalmente a los datos predichos, no se mejoran los resultados con las pruebas realizadas.

El factor determinante en los resultados del modelo es la gran cantidad de parámetros que se manejan, provocando que se reproduzca muy bien la muestra de entrenamiento pero falle en el caso del introducir una nueva serie de temperatura exterior. El error absoluto medio se encuentra alrededor 0.2 °C para los resultados obtenidos con los dos programas utilizados. La técnica para corroborar el sobreajuste a los datos de entrenamiento se denomina validación cruzada, donde se separa la muestra en dos grupos disjuntos, uno de entrenamiento y otro de test, permitiendo analizar tanto el error muestral como la capacidad de generalización del modelo aprendido en la fase de entrenamiento a través del conjunto de test. Partiendo de la implementación en R del modelo se pueden hacer pruebas de este estilo para confirmar la afirmación anterior.

Entre las posibilidades que ofrece la implementación del modelo en el lenguaje R se encuentra en la modificación del input de entrada, no mantener fijas las 37 temperaturas medias mensuales. De esta misma manera se pueden cambiar los periodos de entrenamiento al igual que se ha realizado en este trabajo. Uno de los análisis que se realizaron en los estudios llevados por Villar *et al.*, fue la estimación teórica de la temperatura de las superficies rocosas a través de la caracterización de la onda térmica que se propaga por la masa de suelo y roca que separa la cavidad del exterior. Una forma similar de operar podría simplificar el número de parámetros utilizados en el modelo y mejorar sus predicciones. Por último, y considerando la serie de temperaturas más amplia disponible, se podrían obtener frecuencias de varios periodos anuales que actualmente con los análisis realizados no se han observado.

Las pruebas e implementación realizada del modelo predictivo en lenguaje R sirven nuevamente como punto de partida para estudios posteriores donde se pueden aplicar modificaciones al modelo con el fin de mejorarlo.

## 6. 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.
- 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.
- 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.
- Déchelette, J. (1908). *Manuel d'archéologie préhistorique celtique et gallo-romaine. Archeologie préhistorique*. Paris (France) A Picard et fils.
- Durán Romero, D. (2014). *Método predictivo para estimar la temperatura media mensual en el interior de la sala de los policromos*. 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.
- 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.
- García-Antón, E. (2014). *Aplicación de la señal isotópica  $\delta^{13}C_{CO_2}$  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.
- Gorgas J., Cardiel n. & Zamorano J. (2011). Estadística básica para estudiantes de ciencias. Madrid, España.
- Gravetter, F.J., Wallnau, L.B. (2014). *Essentials of Statistics for the Behavioral Sciences*, 8th edn. Wadsworth, Belmont.
- Gutiérrez, J. R., Cano, A., Cofiño y Sordo C. (2004). *Redes probabilísticas y neurales en las ciencias atmosféricas*. Universidad de Cantabria. Cantabria, España.
- 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.
- 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.
- ICANE (2016). A partir de explotación de microdatos de Climatología. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España (AEMET). [<http://www.icane.es/territory-environment/environment>]

- 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.
- ISO/IEC 98-3 (2008). Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. Geneva: ISO, 2008. Revision of ISO/IEC 98: 1995. Evaluación de Datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. JCGM 100:2008 GUM 1995 con ligeras correcciones. Versión en Español.
- 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.
- Pike, A. W., Hoffmann, D. L., Garcia-Diez, M., Pettitt, P. B., Alcolea, J., De Balbin, R., ... & Zilhao, J. (2012). U-series dating of Paleolithic art in 11 caves in Spain. *Science*, 336(6087), 1409-1413.
- 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, Nº24.
- Sanz de Sautuola, M. (1880). *Breves apuntes sobre algunos objetos prehistóricos de la provincia de Santander*. Santander (España), Imp. Y lit de Telesforo Martínez.
- Valladas, H., & Cachier, H. (1992). Direct radiocarbon dates for prehistoric paintings at the Altamira, El Castillo and Niaux caves. *Nature*, 357(6373), 68.
- Venables, W. N. and Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition* (pp. 389-391). Springer-Verlag.
- 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, Nº5.
- Villar, E. et al. (1983). *Estudios físico-químicos sobre la cueva de Altamira*. Monografías del Centro de Investigación y Museo de Altamira, Nº9.
- Villar, E. et al. (1984). *Cueva de Altamira. 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, Nº11.
- 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.

## Anexo I: Código R del modelo predictivo

En este Anexo se recoge el código implementado en el lenguaje R para el modelo predictivo de temperaturas de la sala de Polícromos.

```
#Borra todas las variables
rm(list=ls())
library(stats)
library(Matrix)
library(readxl)
setwd("~/Altamira/1.Campo de Temperaturas/0. AnalisisDatos R/Modelo predictivo")
#Carga del archivo
altamira<- read_excel("AltamiraMensual1.xlsx",col_names = T)
altamira<-round(altamira,2)
monthlyDates <- altamira[,1:2]
monthlyData <- altamira[,3:4]
#Se toman los datos de poli y exterior con el delay de 4 meses
#Si hay algun NA se interpola el valor con el funcion approx
X <- seq(from = 0.5, to = 36.5, by = 1)
#37 primeros meses de policromos (quitando los 4 primeros)
Yp <- monthlyData[5:(length(X)+4),2]
if (length(which(is.na(Yp)))>0){
  indNA <- which(is.na(Yp))
  indNoNA <- which(!is.na(Yp))
  aux <- approx(X[indNoNA], y = Yp[indNoNA], X[indNA], method = "linear", rule = 2)
  Yp[indNA] <- aux$y
}
#37 primeros meses de exterior
#Se hace coincidir el ultimo mes de polícromos con el correspondiente de la onda térmica del exterior
Ye <- monthlyData[1:length(X),1]
if (length(which(is.na(Ye)))>0){
  indNA <- which(is.na(Ye))
  indNoNA <- which(!is.na(Ye))
  aux <- approx(X[indNoNA], y = Ye[indNoNA], X[indNA], method = "linear", rule = 2)
  Ye[indNA] <- aux$y
}
X1 <- seq(from = 0.5, to = 36.5, by = (length(X)-1)/64)
```

```

Y1 <- matrix(data = NA, nrow = length(X1), ncol = 2)
#Matriz donde se guardan los 4*9 coeficientes de los ajustes polinom. de grado 4
coefReg <- matrix(data = NA, nrow = 36/4, ncol = 5)
#Ajuste polinomial de grado 4 a los datos mensuales del exterior
#Divide los datos de ext. en 9 partes
for (i in 1:dim(coefReg)[1]) {
  ind <- seq(from = 4*(i-1)+1, to = 4*i+1, by = 1)
  regresores <- matrix(data = NA, nrow = length(ind), ncol = 4)
  regresores[,1] <- X[ind]
  regresores[,2] <- X[ind]^2
  regresores[,3] <- X[ind]^3
  regresores[,4] <- X[ind]^4
  c <- lm(Ye[ind] ~ regresores)#Linear model
  coefReg[i,] <- as.numeric(c$coefficients)
}
aux <- matrix(coefReg[1,], nrow = 8, ncol = dim(coefReg)[2], byrow = TRUE)
for (i in 2:dim(coefReg)[1]) {
  aux1 <- matrix(coefReg[i,], nrow = 7, ncol = dim(coefReg)[2], byrow = TRUE)
  aux <- rbind(aux,aux1)
}
#Ajuste polinomico del exterior (columna 2)
Y1[1:dim(aux)[1],2] <- apply(cbind(matrix(data = 1, nrow = dim(aux)[1], ncol = 1), X1[1:dim(aux)[1]],
X1[1:dim(aux)[1]]^2, X1[1:dim(aux)[1]]^3, X1[1:dim(aux)[1]]^4)*aux, MARGIN = 1, FUN = sum, na.rm =
TRUE)
#Ajuste polinomial de grado 4 a los datos mensuales de policromos
#Divide los datos de poli. en 9 partes
#coeficientes del ajuste de poli.
coefReg1 <- matrix(data = NA, nrow = 36/4, ncol = 5)
for (i in 1:dim(coefReg1)[1]) {
  ind <- seq(from = 4*(i-1)+1, to = 4*i+1, by = 1)
  regresores <- matrix(data = NA, nrow = length(ind), ncol = 4)
  regresores[,1] <- X[ind]
  regresores[,2] <- X[ind]^2
  regresores[,3] <- X[ind]^3
  regresores[,4] <- X[ind]^4
  c <- lm(Yp[ind] ~ regresores)
  coefReg1[i,] <- as.numeric(c$coefficients)
}

```

```

}
aux <- matrix(coefReg1[1,], nrow = 8, ncol = dim(coefReg1)[2], byrow = TRUE)
for (i in 2:dim(coefReg1)[1]) {
  aux1 <- matrix(coefReg1[i,], nrow = 7, ncol = dim(coefReg1)[2], byrow = TRUE)
  aux <- rbind(aux,aux1)
}
#Ajuste polinomico de polícromos (columna 1)
Y1[1:dim(aux)[1],1] <- apply(cbind(matrix(data = 1, nrow = dim(aux)[1], ncol = 1), X1[1:dim(aux)[1]],
X1[1:dim(aux)[1]]^2, X1[1:dim(aux)[1]]^3, X1[1:dim(aux)[1]]^4)*aux, MARGIN = 1, FUN = sum, na.rm =
TRUE)
#Transformada de Fourier rápida
fCoefs <- cbind(fft(Y1[1:dim(aux)[1],1]),fft(Y1[1:dim(aux)[1],2]))
fMod <- Mod(fCoefs)
fFreq <- seq(from = 0, to = 1.75, length.out = 64)
fMag <- fMod*2/64
fFase <- Arg(fCoefs)
desFase <- fFase[,1]-fFase[,2]# Desfase=fase(poli)-fase(ext)
atenuacion <- fMod[,1]/fMod[,2]# Atenuacion=modulo(poli)/modulo(ext)
#Una vez obtenida la atenuacion y del desfase se toma una nueva serie del exterior
Yobs <- monthlyData[,1]
pred <- matrix(NA, nrow = 64+length(Yobs)-37+1, ncol = length(Yobs)-37+1)
predCoefs <- matrix(NA, nrow = 64, ncol = length(Yobs)-37+1)
for (i in 37:length(Yobs)){
  X <- seq(from = 0.5, to = 36.5, by = 1)
  Ye <- Yobs[(i-37+1):i]
  if (length(which(is.na(Ye)))>0){
    indNA <- which(is.na(Ye))
    indNoNA <- which(!is.na(Ye))
    aux <- approx(X[indNoNA], y = Ye[indNoNA], X[indNA], method = "linear", rule = 2)
    Ye[indNA] <- aux$y
  }
  X1 <- seq(from = 0.5, to = 36.5, by = (length(X)-1)/64)
  Y1 <- matrix(data = NA, nrow = length(X1), ncol = 1)
  coefReg <- matrix(data = NA, nrow = 36/4, ncol = 5)
  for (k in 1:dim(coefReg)[1]) {
    ind <- seq(from = 4*(k-1)+1, to = 4*k+1, by = 1)
    regresores <- matrix(data = NA, nrow = length(ind), ncol = 4)

```

```

regresores[,1] <- X[ind]
regresores[,2] <- X[ind]^2
regresores[,3] <- X[ind]^3
regresores[,4] <- X[ind]^4
c <- lm(Ye[ind] ~ regresores)
coefReg[k,] <- as.numeric(c$coefficients)
}
aux <- matrix(coefReg[1,], nrow = 8, ncol = dim(coefReg)[2], byrow = TRUE)
for (k in 2:dim(coefReg)[1]) {
  aux1 <- matrix(coefReg[k,], nrow = 7, ncol = dim(coefReg)[2], byrow = TRUE)
  aux <- rbind(aux,aux1)
}
Y1[1:dim(aux)[1],1] <- apply(cbind(matrix(data = 1, nrow = dim(aux)[1], ncol = 1), X1[1:dim(aux)[1]],
X1[1:dim(aux)[1]]^2, X1[1:dim(aux)[1]]^3, X1[1:dim(aux)[1]]^4)*aux, MARGIN = 1, FUN = sum, na.rm =
TRUE)
fCoefsPred <- fft(Y1[1:dim(aux)[1],1])
fPredCoefs <- complex(real = atenuacion*cos(desFase), imaginary = atenuacion*sin(desFase))
#Transf. Fourier inversa
pred[(i-36):(i-36+63),(i-36)] <- Mod(fft(fCoefsPred*fPredCoefs, inverse =
TRUE)/length(fCoefsPred*fPredCoefs))
}
time <- seq(from = 4.5, to = 39.9375, by = 36/64) #tiempo de la predicción
mesTime <- seq(from = 0.5, to = 41.5, by = 1) #Remuestreo del tiempo real
indNoNA <- which(!is.na(monthlyData[,2]))
aux <- approx(mesTime[indNoNA], y = monthlyData[indNoNA,2], time, method = "linear", rule = 2)
#Cálculo de las medias mensuales de temperatura
medias<-data.frame()
a<-c(1,8,17,24,33,40,49,56)
j=1
for (w in 1:length(pred[1,])){
  for (i in w:(62+w)) {
    if ( (j<9)&(i==a[j])){
      medias[i,w]<-pred[i,w]
      j=j+1
    } else{
      medias[i,w]<-mean(c(pred[i,w],pred[i+1,w])
    }
  }
}

```

```

}
}
medias<-round(medias,2)
monthlyDatesPred<-monthlyDates
monthlyDatesPred<-monthlyDatesPred[-c(1:4),]#Eliminamos las 4 primeras filas donde no hay predicción
#Añadimos las predicciones futuras
l<-nrow(monthlyDatesPred)#numero de meses iniciales
monthlyDatesPred[l+3,]<- c(rep(NA, 1)) #Añadimos 3 meses al final
#índices donde están las medias mensuales de cada columna del df medias
b<-c(1,2,4,6,8,9,11,13,15,17,18,20,22,24,25,27,29,31,33,34,36,38,40,41,43,45,47,49,50,52,54,56,57,59,61,63)
for (i in 1:length(medias[1,])){
  prueba<-medias[b+i-1,i]
  #monthlyDatesPred[,i+2]<- c(prueba, rep(NA, nrow(monthlyDatesPred)-length(prueba)))
  monthlyDatesPred[,i+2]<- c(rep(NA, i-1),prueba, rep(NA, nrow(monthlyDatesPred)-length(prueba)-i+1))
}
write.table(monthlyDatesPred, "~/Altamira/1.Campo de Temperaturas/0. AnalisisDatos R/Modelo
predictivo/prediccionMensualRabago1.txt", sep="\t")

```