



Descripción y primeros resultados de la red de control de temperaturas en estructuras geológicas someras en Sierra de las Nieves y Mallorca.

INFORME DE SÍNTESIS

Luis Moreno Merino
Almudena de la Losa Román

Madrid 14/05/2018



EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo ha estado compuesto por 14 personas entre personal científico, técnico y colaboradores:

Luis Moreno Merino
Almudena de la Losa Román
Juan José Durán Valsero
Carolina Guardiola Albert
Pedro Robledo Ardila
Jose Luis Cantón Ávila
José María López García
Javier Heredia Díaz
María Emilia Jiménez
Eulogio Pardo Igúzquiza
Carlos Baquedano Estevez
Nuria Fernández Naranjo
Carmen Serrano Hidalgo
Rogelio Ferrer Martín



INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La evolución temporal y la distribución espacial de la temperatura en ciertas estructuras geológicas, en especial los suelos, las aguas subterráneas someras, y la atmósfera de las cavidades naturales, están íntimamente relacionadas con la evolución de la temperatura atmosférica. Generalmente, las propiedades térmicas de estas estructuras (conductividad y difusividad térmica, calor específico, etc.) son muy diferentes a las de la atmósfera exterior y hacen que funcionen como integradores de las variaciones térmicas de corta frecuencia. Eso trae consigo que la variabilidad estacional, anual e hiper-anual se reflejen en ellas de muy diferente manera a como lo hacen en la atmósfera. En cierto modo, funcionan de forma similar a como lo hacen los océanos, que muestran una notable inercia térmica y capacidad de almacenar calor, y en los cuales los efectos del calentamiento global se hacen presentes con un notable retardo con respecto a la atmósfera, aunque no por ello de forma menos intensa o con menores consecuencias ambientales.

Es posible pues, y se han planteado como hipótesis de trabajo, que los efectos del cambio climático se estén reflejando, en la evolución y distribución de temperaturas en aguas subterráneas, suelos y cavidades kársticas, y que la evolución y dinámica de este cambio pueda ser mejor observado en este tipo de estructuras, en las que el ruido introducido por variaciones rápidas, las debidas a ciclos de corta frecuencia como el día y la noche, o a años estadísticamente anómalos, se muestren integradas gracias a su inercia en la respuesta térmica.

Determinar la existencia esta “marca térmica” en el medio subterráneo es interesante tanto desde el punto de vista del análisis de cambio climático en general, como de sus consecuencias en la calidad y composición de las aguas subterráneas, sobre la dinámica química de las reacciones que sufren las aguas al interactuar con la matriz sólida del terreno, en la variación de la actividad biológica responsable de la degradación de sustancias contaminantes orgánicas, el incremento en la producción de CO₂ debido a la actividad metabólica incrementada debido al calentamiento etc.

Además se sospecha, aunque aún es necesario probarlo con suficientes datos experimentales que la temperatura de las aguas subterráneas, los manantiales, o incluso



de las cavidades, puede servir como proxy de los caudales de surgencias subterráneas, una variable notablemente más complicada de medir de forma continua.

Es en este contexto conceptual que se plantea el presente proyecto cuyas hipótesis de partida se resumen en los siguientes puntos:

- a) El cambio climático está modificando el patrón térmico de las estructuras subterráneas someras (suelos, aguas, cavidades).
- b) Este cambio es medible y monitorizable a largo plazo.
- c) La elevación de la temperatura de estas estructuras puede modificar la composición de las aguas subterráneas al cambiar los equilibrios químicos y la actividad biológica en la zona no saturada y en los acuíferos.
- d) Puede establecerse un sistema de monitorización que permita evaluar cuantitativamente este efecto previsto.

OBJETIVOS

Las consideraciones e hipótesis planteadas en el anterior apartado han permitido establecer como objetivo fundamental del proyecto: *diseñar y equipar una red de control de la evolución de la temperatura en estructura geológicas someras*. Para conseguir este objetivo a su vez se han establecido una serie de objetivos parciales:

- a) Recopilar, ordenar y analizar la información disponible sobre evolución de la Tª de aguas, suelos y cavidades kársticas en Península Ibérica e Islas Baleares.
- b) Representar gráfica y cartográficamente dicha información.
- c) Definir las características técnicas de la red y de la instrumentación necesaria.
- d) Seleccionar al menos dos zonas tipo
- e) Seleccionar un número suficiente de puntos representativos dentro la Península e islas Baleares e instrumentarlos.
- f) Analizar la información obtenida y determinar cuantitativamente el impacto que sobre el medio subterráneo tiene aumento de las temperaturas debidas al cambio climático. Establecer su repercusión sobre la calidad del agua subterránea y el comportamiento de la zona no saturada.



En el presente documento se sintetizan los resultados del proyecto, se discute su utilidad y se propone un plan para su continuación en el futuro.

MATERIALES, MÉTODOS Y DESARROLLO DEL PROYECTO

En este apartado se presentan las cuatro etapas principales en el diseño e implantación de la red de control:

- a) Selección del tipo de sensores de temperatura;
- b) Establecimiento de la metodología de instalación de los sensores
- c) Determinación de las zonas de estudio
- d) Selección del número y ubicación de los puntos a monitorizar.

Selección del tipo de sensor

En la actualidad la oferta de sensores de temperatura es muy grande, cubriendo un amplio espectro de características técnicas. No obstante, cuando se imponen ciertos criterios de calidad esta oferta se restringe sustancialmente. A la hora de elegir que sensores instalar se impusieron seis características que se consideraron imprescindibles:

- Debían ser totalmente herméticos y poder mantenerse indefinidamente sumergidos.
- Han de presentar una resolución en la medida de al menos 1/100 °C
- El error absoluto máximo de medición debe ser mejor que +/- 0,1 °C
- Su vida útil debe ser mayor a diez años.
- Debe poder ser calibrado con patrones standard
- Opcionalmente conviene que cada dispositivo pueda tener acoplado un sensor satélite de forma que se puedan realizar dos medidas de forma simultánea.

De entre todas las opciones que en el momento de la elección ofrecía el mercado finalmente se optó por emplear equipos de la casa Madgetech modelo *TCT1000 Data Logger* que cumplen con todos los requisitos incluyendo la opción de montar un sensor satélite conectado mediante un cable. En la figura 1 se muestran imágenes de dos de los sensores instalados en sus ubicaciones definitivas.

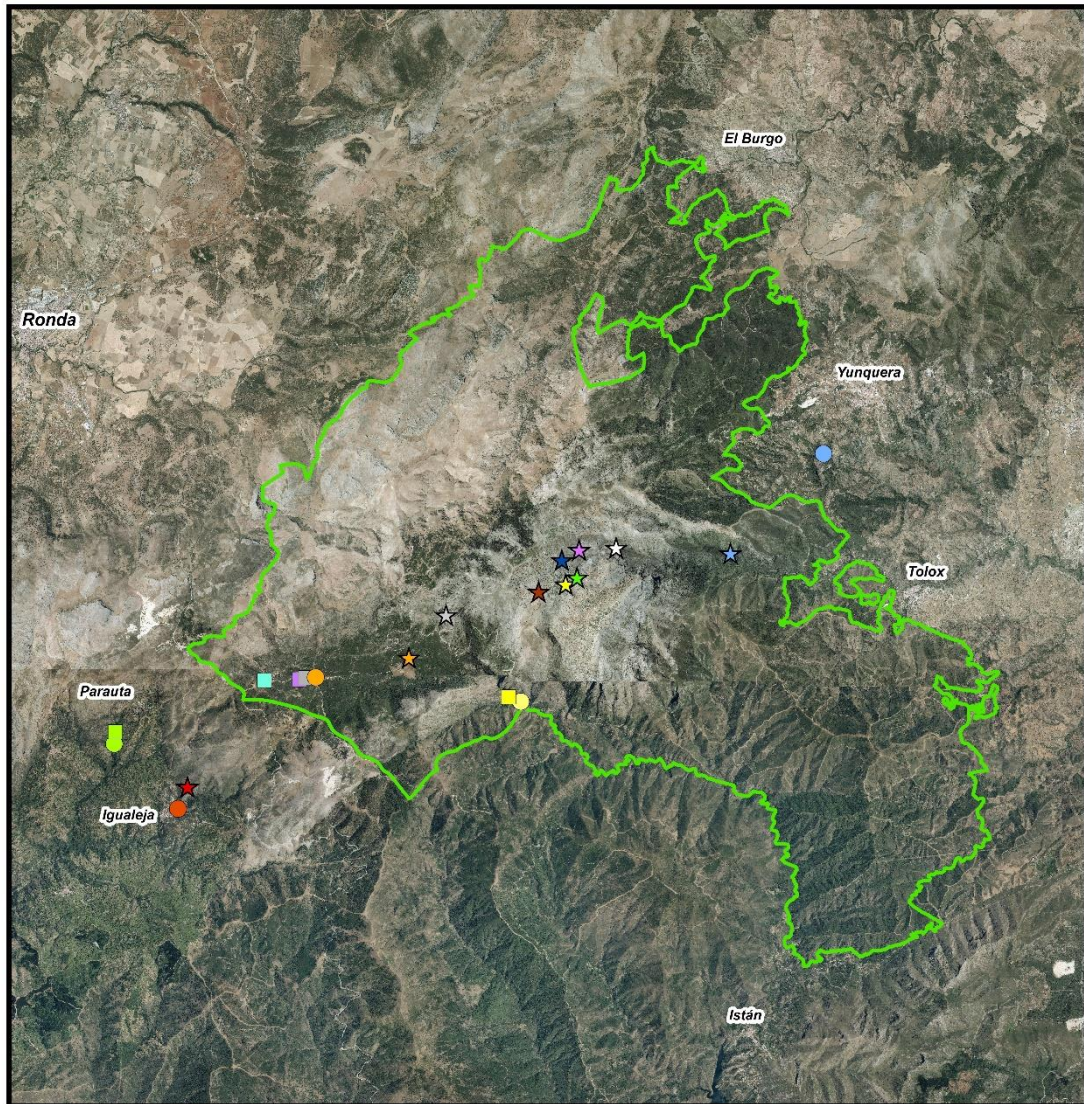


Figura 1. A la izquierda sensor instalado en el manantial de Zarzalones, sensor principal midiendo temperatura del aire y sensor secundario sumergido. A la derecha, sensor de temperatura ambiente en Son Mir (Mallorca)

A pesar de su comodidad, se descartó la posibilidad de que los sensores estuvieran dotados de algún tipo de conexión inalámbrica de datos, los motivos pueden resumirse en dos: la batería en este tipo de instrumentos tiene una duración ciertamente limitada y su elevado precio hubiera impedido disponer de un número suficiente de sensores para monitorizar adecuadamente los dos sistemas kársticos seleccionados.

Ubicación y número de sensores

Una vez seleccionados los dos sistemas a monitorizar, Sierra de las Nieves en la Provincia de Málaga y el sistema kárstico de la isla de Mallorca, se decidió instrumentar todas las cavidades relevantes y puntos singulares. En los Anexos I y II se describen en detalle cada uno de los puntos instrumentados. Se han instalado sensores en tres emplazamientos diferentes: cavidades kársticas, manantiales y suelos, en total se trata de 53 sensores, 35 en 16 puntos de la Sierra de las Nieves y 18 en 6 puntos en la Isla de Mallorca. En la figura 2 y 3 se ha representado la situación de estos sensores sobre sendos mapas.



Legenda

Parque Natural Sierra de las Nieves

Dolina Águila

Dolina Conejeras

Dolina de los Bloques

Arroyo Sima de la Nava

Manantial Algoma

Nacimiento Río Genal

Nacimiento Río Grande o Zarzalones

Nacimiento Río Verde

Trop Plein Hinojal

Trop Plein La Minilla Algoma

Sima Gesm

Sima Prestá

Sima del Aire

Sima Tinaja

Sima de la Nava

Cueva excéntrica

Sima Calabaza

Sima Campamento

Sima Escondida

Sima Raja Helada



Escala 1:130.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 30 N

Figura 2. Mapa en el que se muestra la situación de los sensores instalados en la zona de Sierra de las Nieves, Málaga.

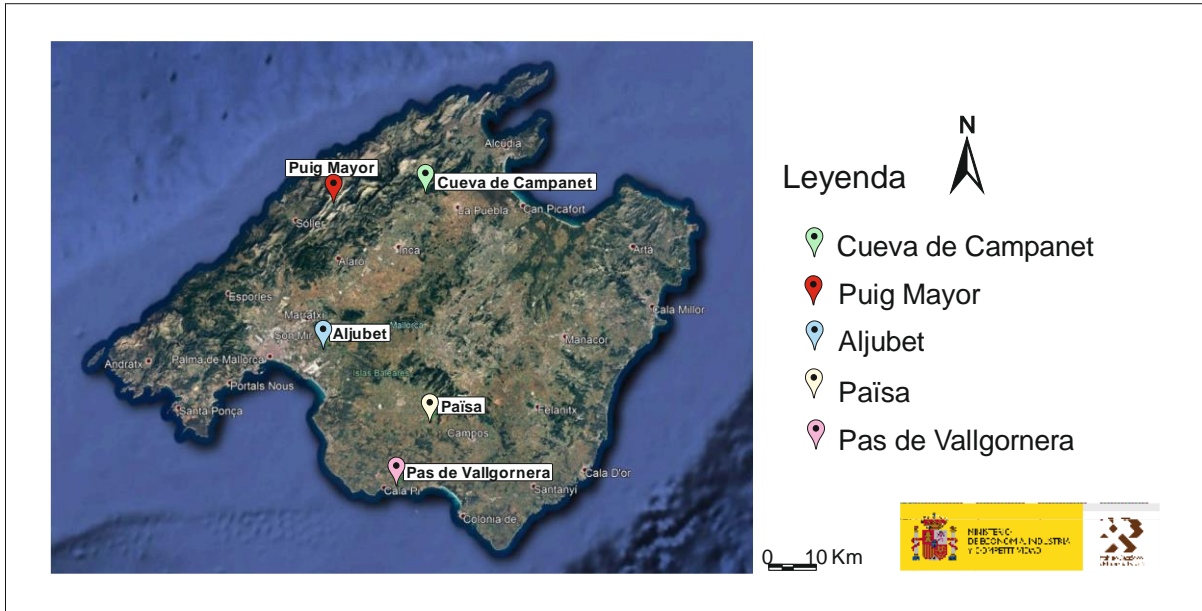


Figura 3. Mapa de situación de los sensores instalados en la isla de Mallorca.

Descripción de las zonas de estudio.

Se han monitorizado dos sistemas kársticos, la Sierra de las Nieves en la provincia de Málaga y la isla de Mallorca. Aunque ambos emplazamientos comparten su situación mediterránea, en la Sierra de las Nieves se observa una clara influencia de los frentes atlánticos, mientras que en las sierras Mallorquinas esta es inexistente. Será de gran interés observar cómo estas particularidades climáticas se trasladan al suelo y las aguas subterráneas, una vez que estos elementos hayan integrado las variaciones térmicas de corta duración.

Sierra de las Nieves (Málaga)

La Sierra de las Nieves se localiza en la comarca natural de la Serranía de Ronda, en la provincia de Málaga, forma parte del extremo occidental de las Cordilleras Béticas. Constituye un Parque Natural y espacio protegido (declarado por la UNESCO como Reserva de la Biosfera en 1995). Se pueden diferenciar dos unidades de relieve y paisaje principales: las sierras calizas blancas que albergan las cavidades kársticas subterráneas



o simas más profundas de la región (Simas GESM y del Aire) y las sierras pardas peridotíticas.

Este macizo rocoso constituye un enclave de gran relevancia geomorfológica e hidrogeológica a escala regional y nacional (Karst de la Sierra de las Nieves). Estas características, unidas a otras condiciones como el gradiente altitudinal, temperatura, humedad, precipitaciones y circulación de masas de aire, hacen de esta zona un lugar idóneo para el estudio de la evolución climática influida por el calentamiento global. El relieve introduce además importantes diferencias térmicas a escala local, ya que actúa como pantalla, bien frente a los vientos fríos del norte (en el caso de zonas con influencia más costera), o por el contrario, frente al efecto suavizante del mar (en zonas más de interior), [Liñan, C. \(2005\)](#).

La Sierra de las Nieves constituye un sistema acuífero con una superficie de 109 km² y un volumen de recarga estimado en 71 hm³/año. Los manantiales más caudalosos de la masa (Genal, Verde y Grande) dan origen a importantes ríos de la provincia de Málaga ([GOSN, 2011](#)). Es precisamente en estos manantiales (nacimiento de los ríos Verde, Genal, y Grande o Zarzalones, y los manantiales de Algoma y Arroyo de la Sima), donde se han instalado los sensores de temperatura. Muchas de las simas anteriormente mencionadas, actúan como zonas de recarga del acuífero descargando hacia algunos de los principales puntos de muestreo como el nacimiento del río Genal, Río Verde, etc. Otras estructuras en las que se han instalado sensores han sido las dolinas, en concreto en los suelos que las cubren, así como manantiales asociados a estructuras “Trop Plein”.

Isla de Mallorca

En la Isla de Mallorca se distinguen a grandes rasgos tres unidades geomorfológicas y estructurales: La Sierra Norte o de Tramuntana, el Llano Central y las Sierras de Levante. La Sierra Norte constituye una escarpada región montañosa, alineada de NE a SW, presentando las mayores elevaciones de Baleares (1400 m). Están constituidos por calizas y dolomías mesozoicas, formaciones continentales paleógenas y depósitos Mioceno inferior. Las Sierras de Levante presentan altitudes menores que la Sierra Norte que descienden hacia el E y SW, [Pomar, L. et al. \(1983\)](#). El Llano Central se dispone al pie



de los relieves de la Sierra de Tramuntana y Sierras de Levante, representado por las cuencas terciarias y plataformas carbonáticas, con alturas que no superan los 100 m. La sierra de Tramuntana es considerada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en la categoría de Paisaje Cultural.

El clima es de tipo mediterráneo caracterizado por un régimen de precipitaciones irregular con intensos periodos de sequias. Por otra parte, la insularidad de los puntos situados en la Isla de Mallorca confiere a este sistema un gran interés, sobre todo en un análisis comparativo con los puntos situados en la Sierra de las Nieves. La hidrología e hidrogeología de esta región está determinada además por las características de los materiales que favorecen la infiltración de las aguas pluviales y la ausencia de cursos permanentes. Ante la ausencia de cursos de agua superficial, las aguas subterráneas constituyen el principal recurso hídrico de la región. La Isla de Mallorca además presenta un sustrato geológico muy permeable, dado la abundancia de rocas carbonatadas (calizas y dolomías) y sedimentos detríticos granulares, favoreciendo así un desarrollo importante de morfologías de tipo kárstico en materiales carbonaticos ([IGME 2006](#)).

Metodología de instalación de los sensores

La instalación de los sensores debe garantizar que se monitoriza adecuadamente el proceso que se quiere estudiar, en este caso la evolución de la temperatura. Por otro lado, hay que evitar que la acción de desaprensivos termine con el experimento al romper o sustraer el equipo, lo que es muy fácil en material que se deja abandonado en el campo durante periodos de tiempo muy prolongados. Afortunadamente, tras casi cinco años de trabajo únicamente cuatro de los 56 sensores han sido inutilizados, y repuesto, por este motivo.

Para instalar los sensores de monitorización de cavidades kársticas y su área de influencia se han seguido las indicaciones de [Judson et al. \(2000\)](#) que recomienda instalar al menos tres sensores:

- Uno en sus inmediaciones de la cavidad, pero suficientemente separado de la entrada para no verse influido por la misma. Según este autor, 50 metros parece



- una distancia mínima razonable, aunque dependiendo de la morfología del terreno circundante esta distancia puede variar notablemente.
- Otro sensor debe ser instalado en el interior de la cueva, lo más próximo posible a la entrada aunque fuera de la acción directa de la lluvia o del sol.
 - El tercer sensor se debe instalar en el interior de la cueva en una zona que se considere de temperatura estable. Tal como los propios autores señalan en este tercer caso no es posible dar recomendaciones generales y ha de ser la visita y análisis de cada cavidad en concreto la que oriente sobre la mejor localización.

Por su parte, los sensores de suelos se enterraron a una profundidad de 30 cm (Sensor A) sin más precaución que la de situarlos en posición horizontal y restaurar los horizontes excavados a una situación lo más próxima posible a la original. Cuando el tipo de material y su pedregosidad lo han permitido el sensor satélite (sensor B) se han introducido a una profundidad de entre 70 y 100 cm haciendo previamente un alojamiento mediante una barra de hierro.

Los sensores de monitorización de manantiales se han instalado en la situación más próxima posible al punto de surgencia intentando garantizar que se encuentren sumergidos siempre que el manantial mantenga flujo de agua (Sensor A), el segundo de los sensores se ha instalado de forma que monitorice la temperatura atmosférica. En alguno de los puntos (cuando no existe una estación meteorológica suficientemente cercana) también se han instalado sensores atmosféricos.

En total se cuenta con información de 53 sensores, 35 repartidos en los 16 puntos monitorizados en la Sierra de las Nieves (Provincia de Málaga) y 18 repartidos en los 6 puntos monitorizados en la Isla de Mallorca.

Sensores instalados en la Sierra de las Nieves

En la Sierra de las Nieves, se han instrumentado 16 puntos representativos de cavidades kársticas, aguas subterráneas y suelos: 11 puntos característicos de las más importantes estructuras kársticas de la zona (Cuevas, Dolinas, Simas y Trop Pleins), los 5 puntos



restantes constituyen el nacimiento de los manantiales más caudalosos de toda la masa de agua de la Sierra de las Nieves (río Genal, río Verde, río Zarzalones o Grande, Manantial Algoma y Arroyo Sima de la Nava). En la tabla 1 se resumen de los puntos citados.

Tabla 1. Localización de los puntos de control instalados en la Sierra de las Nieves

Nº	PUNTO	Tipo	Término Municipal	Altitud (m)	Nº Sensores instalados
1	Dolina del Águila	Estructura kárstica y suelo	Parauta	1047	3
2	Dolina Conejeras	Estructura kárstica y suelo	Parauta	1053	3
3	Dolina de los Bloques	Estructura kárstica y suelo	Parauta	1069	3
4	Arroyo Sima de la Nava	Estructura kárstica y suelo	Parauta	1051	1
5	Sima de la Nava	Estructura kárstica y suelo	Parauta	1053	3
6	Manantial Algoma	Manantial	Parauta	649	1
7	Trop Plein La Minilla	Estructura kárstica y suelo	Parauta	684	1
8	Nacimiento del Río Verde	Manantial	Tolox	673	1
9	Trop Plein Hinojal	Estructura kárstica y suelo	Tolox	707	1
10	Nacimiento Río Genal	Manantial	Igualeja	711	2
11	Cueva Excéntrica	Estructura kárstica y suelo	Igualeja	887	2
12	Nacimiento Río Grande o Zarzalones	Manantial	Yunquera	460	4
13	Sima Prestá	Estructura kárstica y suelo	Tolox	1734	2
14	Sima del Aire	Estructura kárstica y suelo	Tolox	1428	2
15	Sima Gesm	Estructura kárstica y suelo	Tolox	1711	3
16	Sima Tinaja	Estructura kárstica y suelo	Tolox	752	3

Las dolinas tienen especial interés al actuar como zonas de recarga preferentes de los acuíferos subyacentes. Otras de las estructuras instrumentadas han sido diversas cavidades o simas, especialmente las de trazado vertical como Sima GESM que presenta un desarrollo de unos 3000 m (explorados hasta el momento), constituyendo la cavidad más profunda de Andalucía y una de las más importantes del mundo. También se han monitorizado manantiales ligados a sistemas Trop Plein.



Figura 4. Vista general de algunos de los puntos instrumentados en la Sierra de las Nieves

Isla de Mallorca

En la isla de Mallorca se han instalado sensores en 6 puntos, que proporcionan información tanto de la vertiente Norte como de la vertiente Sur de la Isla (figura 3). El procedimiento de instalación ha sido el mismo que en la seguido en la Sierra de las Nieves. Las cavidades kársticas seleccionadas para el estudio han sido la Cueva de Campanet (Sierra de Tramuntana) y la Cueva del Pas de Vallgormera (Llucmajor). El resto de puntos han sido seleccionados y sea porque presentan alguna anomalía térmica o peculiaridad de funcionamiento que les hace interesantes para el estudio considerado. Como caso particular, en el Puig Mayor, que representa la localización de mayor cota de toda la isla, también se han instalado tres dispositivos. En la tabla 2 se describe la localización de estos puntos.



Tabla 2. Localización de los puntos de control instalados en la Isla de Mallorca.

Nº	PUNTO	Tipo	Municipio	Altitud (m)	Nº Sensores instalados
1	Aljubet	Estructura kárstica y suelo	Palma	98	3
2	Cueva de Pas de Vallgornera	Estructura kárstica y suelo	Llucmajor	30	3
3	Cuevas de Campanet	Estructura kárstica y suelo	Campanet	68	3
4	Païsa	Pozo	Llucmajor	98	3
5	Son Mir	Manantial	Llucmajor	51	3
6	Puig Mayor	Suelo	Escorça	1300	3

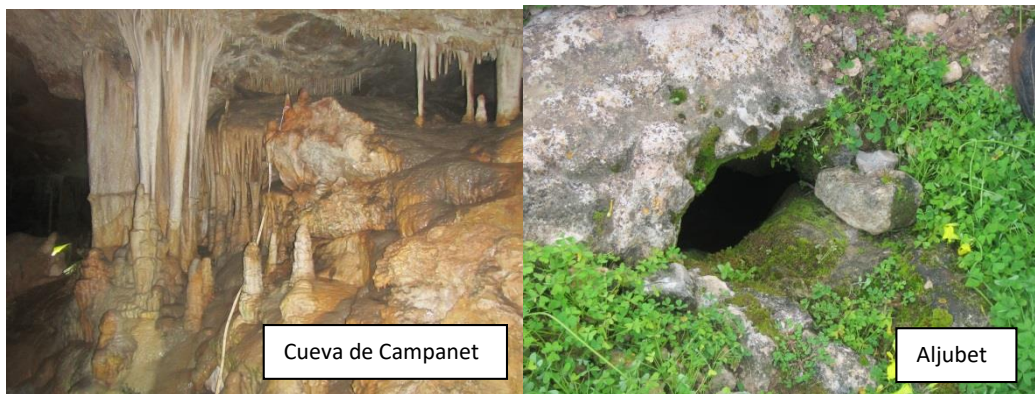


Figura 5. Ejemplos de puntos de muestreo en la Isla de Mallorca.

En el Anexo III se presenta una tabla extensa con las situación y características generales de todos los sensores instalados.

Una vez diseñada e implementada la red quedaba por completar el proceso de optimización. Finalmente, tras los numerosos retrasos que hubo debido a incidentes en el suministro de los sensores, la primera descarga de datos se programó para el otoño de 2016 y la segunda descarga para el verano de 2018. Un análisis previo de la información recopilada en la primera descarga ha mostrado que no va a ser posible tener una optimización adecuada hasta no contar con los datos de 2018, proceso en el cual se está trabajando en el momento de escribir este informe.

Procedimiento para la recuperación de los sensores.

Dado el pequeño tamaño de los sensores, y la necesidad de enterrarlos alejados de elementos que pudieran servir para su localización posterior, como árboles o grandes rocas, que pueden perturbar su correcto funcionamiento, resultaba un reto notable diseñar un método de trabajo que permitiese recuperarlos con seguridad uno, dos o hasta tres años después de su instalación, incluso por personal distinto al que lo instaló.

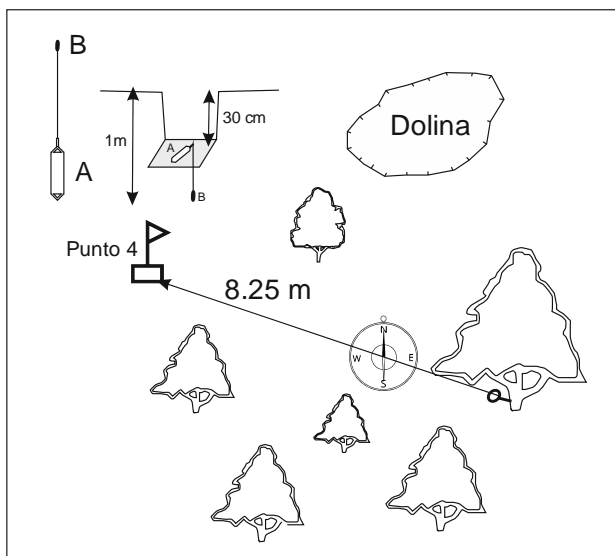


Figura 6. Esquema de la metodología empleada para la localización de los sensores enterrados.



Finalmente se optó por un método relativamente sencillo que se ha demostrado muy eficaz. Básicamente consiste en localizar un elemento que se presume que va a permanecer inmóvil a lo largo del tiempo, tal como una roca grande, un árbol, una pared de piedra, etc. En este elemento se instala una argolla metálica de acero inoxidable. La argolla ha de estar en una posición fácilmente visible. Se tiende una cuerda desde la argolla hasta el punto de instalación del sensor. Se mide su longitud, con lo que ya se conoce la distancia del sensor a la argolla. Con una brújula se determina el rumbo exacto de la cuerda. De esta forma, se conoce la dirección en la que hay que tender la cuerda cuando se quiera localizar el sensor años después. En la figura 6 se muestra un esquema que aclara el método y una fotografía en la que se muestra el proceso en campo.



En las fichas recogidas en el Anexo I y II figuran los datos identificativos y de localización de todos los sensores instalados en las dos campañas realizadas hasta la fecha.

RESULTADOS

El principal resultado, que permite cumplir con el objetivo principal de este proyecto, ha sido el diseño y establecimiento de una red de monitorización de temperatura de cavidades, suelos y surgencias en puntos seleccionados de la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga) e Isla de Mallorca, con objeto de obtener información aplicable en el estudio de la evolución de las temperaturas a medio plazo. En el Anexo I se recogen las gráficas de evolución de los sensores durante el primer ciclo de monitorización. Una vez instalada y operativa la red, hay que tener en cuenta que se trata una red con vocación de permanecer un largo periodo de tiempo operativa, que es al fin y al cabo la característica que dará valor a los datos que proporcione. De este modo, se está procediendo a su optimización y posterior rediseño.

En la figura 7 se muestra un ejemplo de las gráficas de evolución disponibles en el Anexo I y II para cada uno de los puntos monitorizados.

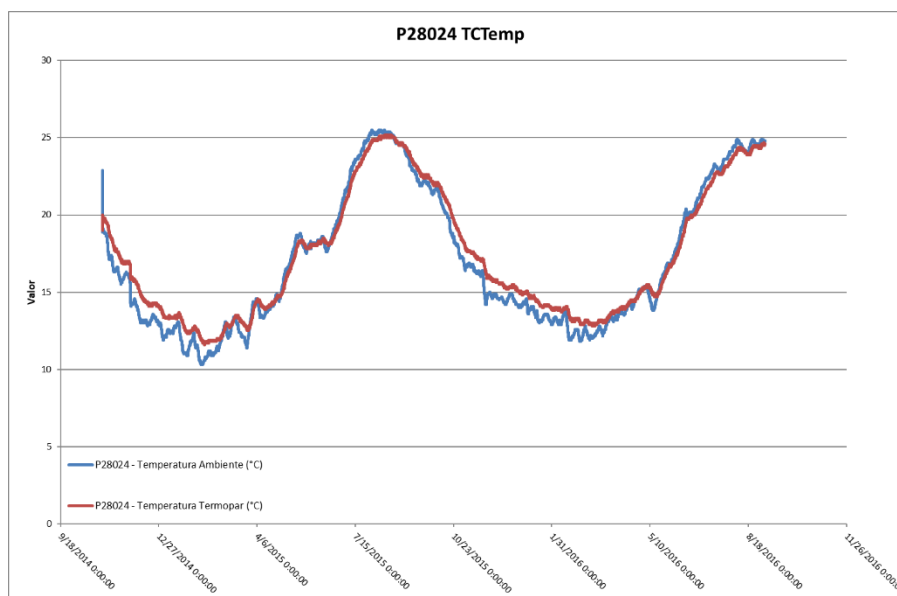


Figura 7. Ejemplo de las gráficas de evolución de temperatura disponible para cada uno de los puntos monitorizados, en este caso el sensor 28024 -Sima Tinaja en la población de Tolox.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

En el momento de escribir este informe la red está totalmente operativa y se encuentra en funcionamiento. A lo largo del mes de mayo de 2018, se procederá a la segunda descarga de datos. El siguiente paso a dar será la optimización estadística de los puntos monitorizados con el objeto de eliminar aquellos que puedan ser redundantes y de esta manera aprovechar los sensores que queden libres para instrumentar nuevos puntos. Hay que tener en cuenta que por su propia naturaleza, se trata de series cortas que apenas abarcan cuatro años hidrológicos, los datos obtenidos en las dos primeras descargas tienen una utilidad limitada. No será hasta que haya pasado un tiempo suficiente que se puedan obtener resultados de evolución y pronóstico. Es de esperar que a partir de finales de 2018, con la red optimizada de la información obtenida, se comiencen a obtener datos de aplicación en el estudio de la evolución a medio plazo de las temperaturas.

No obstante, ya se está trabajando en dos líneas muy prometedoras. Por una parte, se está analizando la posibilidad de emplear los datos de evolución térmica de cavidades y manantiales como proxy de los caudales de estos últimos. La segunda línea de trabajo es el empleo de algoritmos basados en redes neuronales para la optimización de este tipo de redes.

ANEXOS

Se adjuntan tres anexos. El Anexo I y II contienen, en formato pdf, las fichas de campo, datos de situación, y gráficos de evolución de temperatura en el primer periodo de monitorización. El Anexo III una tabla en formato Excel recoge los datos de localización y características principales de todos los sensores instalados.