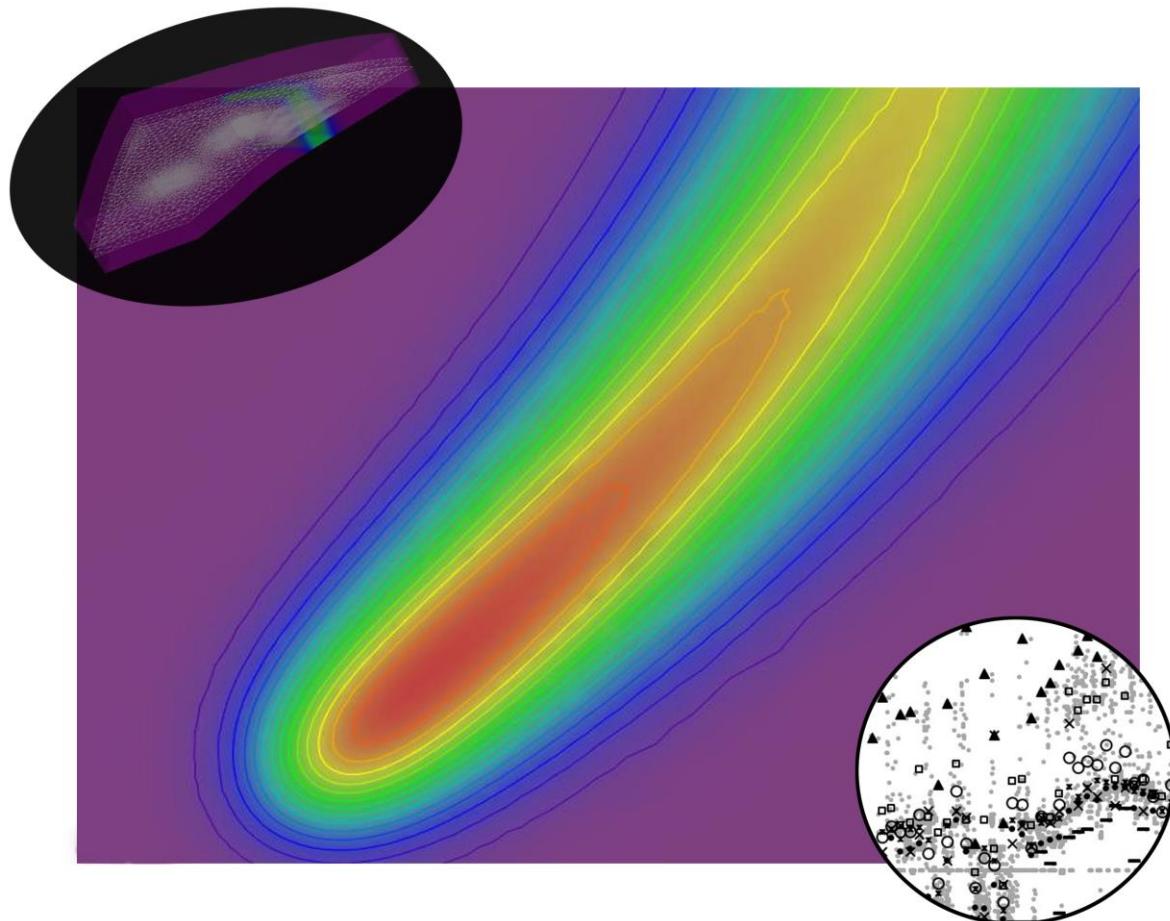


Optimización de la implementación de sistemas geotérmicos someros en modelos hidrogeológicos

Febrero 2016

Trabajo Fin de Grado (Grado en Geología)

Sylvia Muela Maya



Directores:

Jóse Ángel Sánchez Navarro

Alejandro García Gil

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Geológico y Minero de España por darme la oportunidad de trabajar junto a ellos.

A la Confederación Hidrográfica del Ebro y de nuevo al Instituto, por aportar los datos para el desarrollo de la presente investigación.

A José Ángel y Eduardo Garrido por transmitirme su experiencia en la Hidrogeología.

Y a ti, Alejandro García Gil, por todo. Por descubrirme y enseñarme todo lo que sabes y tu eterna paciencia.

ÍNDICE

1. ABSTRACT	1
2. PLANTEAMIENTO	2
3. OBJETIVOS	3
4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA	3
4.1. Situación geográfica	3
4.2. Situación geológica.....	4
5. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO Y GEOTÉRMICO	5
5.1. Contexto hidrogeológico.....	5
5.2. Contexto geotérmico	6
5.2.1. Características de explotación del acuífero aluvial urbano de Zaragoza	6
5.2.2. Descripción de las explotaciones	6
6. METODOLOGÍA.....	8
6.1. Obtención y origen de los datos	8
6.2. Procesado y tratamiento de datos: Depuración, sincronización y homogeneización ..	9
6.3. Aplicación de diferentes aproximaciones de upscaling	9
6.4. Análisis de sensibilidad del proceso de upscaling en función de la resolución de tiempo.....	10
6.5. Modelos numéricos.....	10
6.6. Cálculo del error del proceso de upscaling	12
6.7. Elaboración de la memoria	13
7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	13
7.1. Resultados del régimen de explotación y las técnicas de upscaling	13
7.2. Resultados de las simulaciones en el modelo numérico.....	15
7.3. Resultado del cálculo del error del proceso de upscaling.....	19
7.4. Resultado del cálculo del error del proceso de upscaling según su resolución temporal.....	20
8. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN.....	21
9. CONCLUSIONS	23
10. BIBLIOGRAFÍA	24
11. ANEXO 1. Gráficas del régimen de explotación de las instalaciones analizadas.....	27
12. ANEXO 2. Ampliación de la Fig. 5. Plumas generadas por las instalaciones analizadas....	33

1. ABSTRACT

The management of shallow geothermal systems is currently under development. Although it has been used for a long time, this technology has raised big doubts and concerns in the last years due to the massive implementation.

Shallow geothermal systems are based on obtaining the heat energy contained in the materials of the most superficial layers (<250 m) of the earth's crust and in the water that flowing through them. The heat transfer from the earth core to outer areas of the crust, together with the capacity of the ground to damp the thermal oscillations that happen in the surface, make possible that, from approximately 15 meters deep, a thermal stability exists, whose temperature is approximately the annual average of the region + 1 or 2 ° C. (Parsons, 1970). This terrain characteristic justified the development of these important systems. The operation can be done via close or open systems using geothermal heat pumps (GHP) and heat exchangers. In the first case, the heat pump is connected to a heat exchange circuit located in the ground and composed by pipes through which the energy-bearing fluid flows. In the second system, the heat of the groundwater is directly exploited by passing it through an exchanger located on the surface and returning it back to the aquifer after that.

The demand of this resource is expected to increase in the next years (Jaudin, 2013), so it is necessary to move towards a sustainable management of this technology. The problems associated to its implementation come both from a lack of energy sustainability of the facilities, due to thermal interference events, and from an insufficient legal framework. The latter is being developed by the competent administration and, therefore, generates a great uncertainty for users (García Gil, 2015).

One of the possible ways to address the problem of the management of geothermal systems is to establish effective management strategies using numerical models to simulate the thermal regime of the urban aquifer. Considering the high complexity of these facilities, the heterogeneity of the medium and the temporal variability of their operations, it looks like the best approximations are obtained by using the named numerical models (Banks, 2009). On the other hand, these methods have two limitations derived from the high volume of data and amount of time required to perform them. The existence of adequate control networks makes it possible to obtain the necessary parameters that allow the calibration of the models with real measurements. This allows to validate the simulation of the heat transport processes generated by these geothermal systems and to develop predictive tools to address complex problems in urban environments.

In previous works such as that of Epting et al., (2013), the modeling process was carried out using data from specific measurements which can be considered as non-representative, compared with the actual operation of geothermal systems. This simplification is due to the fact that, until a few years ago, there was a lack of data in reference to how to use such systems. Currently, the Basin Organizations of the different hydrographic demarcations in Spain are requiring continuous registry of low cadence (high temporal frequency) of these facilities in order to conduct a mandatory hydrogeological study prior to the authorization of waste. This continuous monitoring has led to the availability of a large volume of data, which entails a complication for its subsequent treatment and implementation in hydrogeological models at

city level. Therefore, there is a need to achieve a method to obtain, as optimally and efficiently as possible, a subset of data of easily implementable dimensions in models whose representativeness is maximal, that is, to obtain the subset of data whose simulation has a minimum deviation when compared to reality.

2. PLANTEAMIENTO

La explotación de recursos geotérmicos someros se considera en auge en la actualidad, siendo Zaragoza una de las ciudades pioneras en la implantación de este tipo de energía renovable (Garrido *et al.*, 2010). En el Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza se realiza un aprovechamiento geotérmico somero de muy baja entalpía valiéndose de la energía derivada del subsuelo, a menos de 100 m de profundidad y de las aguas subterráneas.

Derivado de la existencia de importantes reservas de agua subterránea en esta zona, la explotación geotérmica se realiza mediante bombas de calor por medio de sistemas abiertos. En estos casos, en régimen natural (condiciones naturales no impactadas), el agua es captada del acuífero a una temperatura entorno a los $17 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$, y es transferida a un intercambiador térmico que modifica la temperatura del agua en función del uso deseado, para posteriormente ser devuelta de nuevo al acuífero. En consecuencia, se produce la renovación del fluido encargado del transporte de la energía de forma constante. El intercambiador no consigue aportar la potencia térmica suficiente por lo que existe también una bomba de calor involucrada en el proceso. Se trata de un dispositivo que permite mejorar la eficiencia de transferencia de temperatura de un cuerpo frío a otro caliente, pudiendo funcionar también en sentido inverso, cediendo calor de un cuerpo más caliente a otro más frío.

Por tanto, los usos más comunes derivados de la geotermia somera son para climatización; calefacción en invierno y refrigeración durante épocas estivales. En el primer caso el calor es extraído del agua subterránea captada, por lo que la temperatura de vertido será inferior a la de captación y dicho proceso se invierte durante la refrigeración, produciéndose un vertido con temperatura superior a la de captación.

Debido al crecimiento de la implantación de este tipo de tecnología se ha observado una variación en la temperatura del acuífero causada tanto por la interferencia térmica entre instalaciones como entre las propias explotaciones (efecto de autointerferencia) (Garrido *et al.*, 2010). Dicha contaminación térmica es la principal afección que sufre el acuífero al tratarse de una explotación de recursos no consuntiva, es decir, donde no se consume recurso hídrico.

Por este motivo se debe llevar a cabo un seguimiento que aborde el impacto provocado por el aprovechamiento geotérmico del Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza, mediante la supervisión, catalogación y valoración de la afección en los puntos de agua existentes.

En Zaragoza existe una Red de Control Geotérmico establecida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) en colaboración con otras instituciones, diseñada para la monitorización de los niveles piezométricos, medida de la temperatura, geoquímica del subsuelo y calidad del agua en general. Dicha red está constituida por 46 puntos situados en su mayoría en la margen derecha del río Ebro, donde en cada piezómetro existe colocado un sensor de medición en continuo del nivel de agua, temperatura cuyo registro se produce con una cadencia de 15 minutos (BARO-DIVER Schlumberger datalogger) (García-Gil, 2015).

Además, se dispone de un inventario de aprovechamientos geotérmicos en el cual están incluidos datos hidrogeológicos de las instalaciones, donde cada una de estas dispone de entre 1 y 4 pozos de captación y como mínimo otro de vertido, pudiendo variar dicha cantidad en función de su tamaño y demanda de potencia térmica requerida.

En la actualidad, los citados sistemas geotérmicos están siendo monitorizados en continuo y generando grandes volúmenes de datos. Se necesita, por tanto, una metodología para optimizar el tratamiento de datos masivos con el fin de facilitar su posterior implementación en un modelo numérico a escala de ciudad. En consecuencia, alcanzar este objetivo representa un paso más a la hora de conseguir un modelo que sirva como herramienta científica y permita reproducir el funcionamiento de un sistema natural al variar las condiciones impuestas, con la finalidad de poder estudiar el comportamiento del sistema en respuesta a dichas condiciones consiguiendo una visión global del proceso. Esto permitirá entender los procesos hidrodinámicos y de transporte de calor existentes en el subsuelo de la ciudad contribuyendo a la mejora de la gestión sostenible de los recursos geotérmicos someros en entornos urbanos.

3. OBJETIVOS

El objetivo fundamental del presente trabajo es la identificación de una metodología óptima para el tratamiento de datos brutos reales de explotaciones geotérmicas, para su posterior implementación en un modelo numérico a escala de ciudad de la forma más eficiente posible.

Para ello se utilizarán técnicas denominadas de “*upscaling*” cuya finalidad es la de transformar datos de alta resolución y cadencias bajas, a un conjunto de mayor cadencia, que sea manejable en modelos numéricos complejos. Posteriormente se realizará un análisis de sensibilidad mediante la modelización de diferentes escenarios con el fin de definir cuál es el proceso de *upscaling* más óptimo y fiable.

Se considerará que el tratamiento de datos se ha realizado con éxito, se ha optimizado, cuando la desviación obtenida al enfrentar los datos reales de baja cadencia con los datos de mayor cadencia calculados sea mínima y de utilidad.

4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

4.1. Situación geográfica

El presente trabajo se desarrolla en el Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza, sobre el que se asienta el casco urbano de la ciudad. Zaragoza (**Fig. 1A**) es capital de la Comunidad Autónoma de Aragón y está situada al NE de la Península Ibérica. Se encuentra a una altitud de 217 m.s.n.m., siendo atravesada por el Ebro, como río principal en dirección NW-SE, además de ser el lugar de confluencia de dos de sus afluentes ya que por su margen derecha desemboca el río Huerva y por la izquierda el Gállego.

Dada las características del trabajo es importante señalar que el clima es mediterráneo con una acusada influencia continental responsable de los grandes contrastes térmicos tanto estacionales como diarios. Las precipitaciones son escasas con una media de 325 mm (Moreno *et al.*, 2008), siendo mayo el mes más húmedo y julio el más seco. La temperatura media anual es de 15 °C con inviernos relativamente fríos (valores mínimos diarios inferiores a 5 °C) y un largo

y caluroso verano con temperaturas de hasta 40 °C. Todo ello, condiciona un intenso uso de la climatización (refrigeración-calefacción) para conseguir unas condiciones ambientales óptimas en las edificaciones.

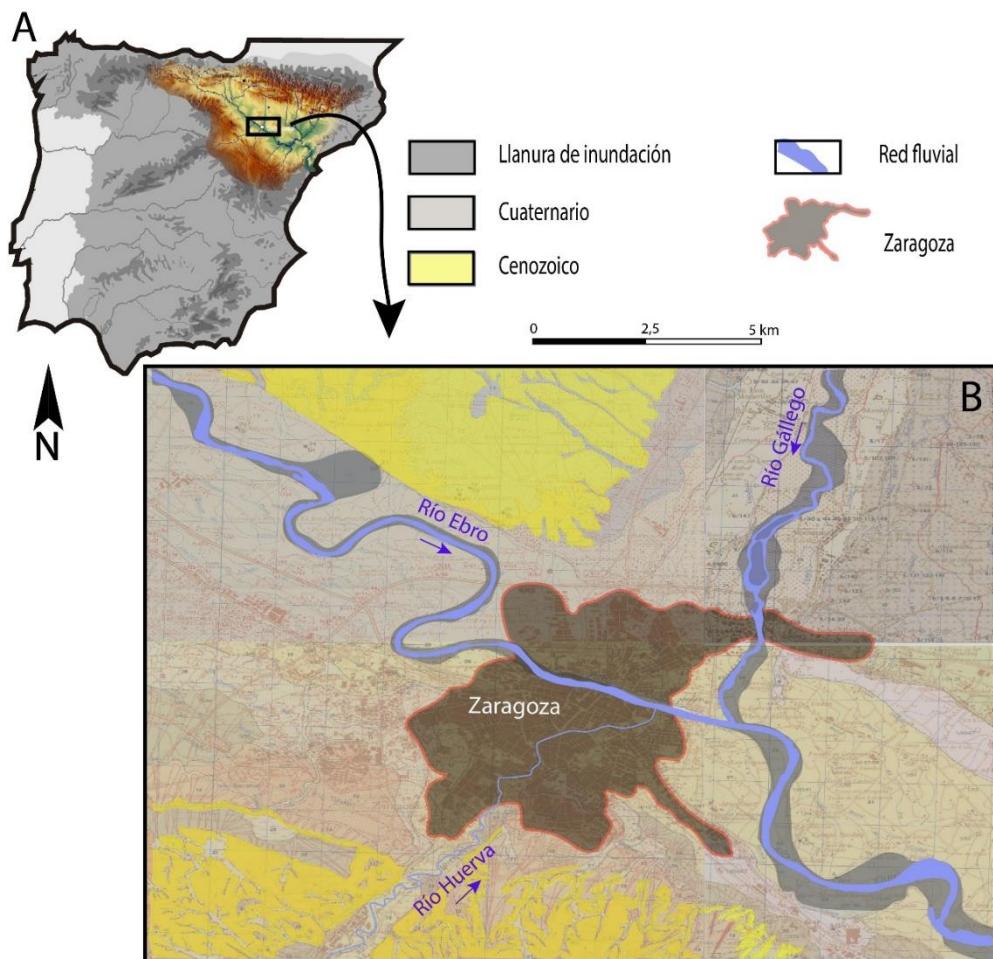


Fig. 1. A) Localización geográfica de Zaragoza al NE de la Península Ibérica. B) Situación geológica de área de estudio y visión general de la red fluvial y el núcleo urbano.

4.2. Situación geológica

Desde un punto de vista geológico la ciudad de Zaragoza (Fig. 1B) se sitúa en el centro de la depresión cenozoica del Ebro, cuenca que corresponde a los últimos estadios de evolución de la cuenca de antepaís meridional del orógeno Pirenaico (Barnolas *et al.*, 1991), limitada al Norte por dicho sistema, al Sur por la Cordillera Ibérica y al NE por la Cordillera Costero Catalana (Moreno *et al.*, 2008).

El sustrato de la cuenca se encuentra constituido por un zócalo paleozoico y una cobertura mesozoica, en cuyo interior se produjo la sedimentación de materiales continentales cenozoicos, conglomerados, lutitas, areniscas, margas, además de carbonatos y evaporitas provenientes de los relieves cercanos, conformando el relleno y situándose los materiales más finos en el centro de la cuenca. Los materiales continentales fueron depositados durante el Paleoceno en el margen meridional de la cuenca, produciéndose un cambio en el Eoceno a una sedimentación de carácter marino debido a una transgresión generalizada, momento en el que

se llenaron las zonas más septentrionales y periodo al final del cual se produjo el cambio a condiciones endorreicas (Barnolas *et al.*, 1991).

Dichas condiciones continuaron hasta el Mioceno favoreciendo la acumulación de importantes espesores de sedimentos evaporíticos, yeso y halita fundamentalmente. Los materiales son de naturaleza margo-yesífera o yesífera con intercalaciones de arcillas y margas de edad Oligoceno-Mioceno, que dan nombre a la Fm. Zaragoza (Quirantes, 1978). En el tránsito Mioceno-Plioceno las condiciones de depósito se vuelven exorreicas transportando el material por una red de drenaje hasta el Mediterráneo que se configura durante el Cuaternario y que tiene al río Ebro como principal colector (Moreno *et al.*, 2008). Dicha red fluvial arrastra material de los relieves cercanos produciendo su depósito y dando lugar a la formación de terrazas fluviales y glacis, este hecho se alterna con etapas de erosión debido a los cambios climáticos que se producen durante el Pleistoceno y que se sucedieron a lo largo del Cuaternario.

Dentro de los depósitos aluviales que conforman el acuífero estudiado se distinguen dos dominios sedimentarios principales, las terrazas aluviales derivadas de la dinámica fluvial de los ríos Ebro y Gállego y una zona de abanico aluvial en relación genética con el río Huerva, ambos cuaternarios. Los depósitos de terraza presentan facies de canal compuestos por gravas grano-soportadas con cantos silíceos y carbonatados, están formados por cuerpos sedimentarios tabulares con estratificación cruzada planar, tienen varios metros de grosor y se pueden extender lateralmente más de 100 m. A nivel local dichos cuerpos pueden presentar estratificación cruzada en surco y/o cuerpos lenticulares arenosos intercalados (Luzón *et al.*, 2010).

Durante la sedimentación de los materiales cuaternarios se produjeron una serie de fenómenos de subsidencia kárstica que afectaron de forma importante a la geometría de los cuerpos detríticos recientes. Dicha subsidencia y los fenómenos de disolución kársticos continúan hasta la actualidad debido a la existencia de los materiales evaporíticos que llenan los primeros estadios de la cuenca y sobre los que se asientan los depósitos cuaternarios, hecho que provoca la elevada aparición de estos eventos en el entorno de Zaragoza (Simón *et al.*, 2009).

5. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO Y GEOTÉRMICO

5.1. Contexto hidrogeológico

Los cambios en el nivel de base de los ríos durante el Pleistoceno dieron lugar a la formación de terrazas situadas a distintas alturas que conectan lateralmente con sistemas de glacis procedentes de los relieves cercanos, siendo los más extensos los procedentes del SW en el entorno de La Muela de Zaragoza. En continuidad con los relieves cenozoicos aparecen conos de deyección de menor extensión de edad Holoceno, donde se produce también la formación de los valles de fondo plano sobre dichos materiales cenozoicos, actuando de relleno y aportando al sistema acuífero una red de drenaje secundaria.

Existen dos unidades acuíferas diferenciables según la terminología de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000); el aluvial del Ebro por un lado, comprendido entre la desembocadura del Jalón y la localidad de Gelsa y el aluvial del Gállego por otro, donde se distingue la porción de acuífero sobre la que se asienta el núcleo urbano de la ciudad de Zaragoza y que ha sido caracterizada como “Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza” (Garrido *et al.*, 2006; Garrido *et al.*, 2010), cuyo tratamiento especial deriva de las propiedades

hidrogeológicas tan singulares del entorno y del uso de las aguas subterráneas, siendo el aprovechamiento geotérmico uno de los más importantes.

La superficie total del acuífero es de 632 Km² y su espesor es variable debido a los procesos de karstificación desarrollados como consecuencia del sustrato evaporítico presente (Sánchez Navarro *et al.*, 2004), donde cabe destacar la presencia de dos surcos uno al Sur de la ciudad y otro a lo largo del río Gállego, que se encuentran llenos por más de 40 m de sedimento.

Los parámetros hidrogeológicos se consideran elevados ya que se presenta un valor de transmisividad de 2500-3000 m²/día, siendo ocasionalmente mayor en la margen izquierda del río Ebro (21.000 m²/día) donde el acuífero dispone de más espesor y la permeabilidad está estimada entre 10 y 1000 m/día (Moreno *et al.*, 2008).

El espesor saturado medio del acuífero varía entre 5 y 40 m y se alcanza una profundidad del nivel freático de entre 7 y 34 m, cuyo patrón general de flujo de agua subterránea es NO-SE en el sector sureste de la zona, que oscila a una dirección W-E en el noroeste.

5.2. Contexto geotérmico

5.2.1. Características de explotación del acuífero aluvial urbano de Zaragoza

Se tiene constancia de la existencia de 150 puntos de agua (Garrido *et al.*, 2010) correspondientes a diferentes aprovechamientos de agua subterránea que explotan el acuífero estudiado para la obtención de energía geotérmica. A partir de lo cual se realizó un catálogo de aprovechamientos que actualmente cuenta con un registro de 60 instalaciones geotérmicas someras. Dicha cifra se espera que siga aumentando paulatinamente debido al crecimiento de la demanda de este tipo de recurso.

Según la Plataforma Tecnológica Española de Geotermia (Geoplat, 2010) la potencia instalada con bombas de calor en Zaragoza supera los 30 MW, cifra que se puede considerar elevada si se tiene en cuenta que el total en España se encuentra entre 60 y 80 MW.

5.2.2. Descripción de las explotaciones

A continuación, se describen las 5 instalaciones (Sistemas Geotérmicos Someros) (Fig. 2) que han sido objeto de análisis durante la realización del presente trabajo, la información requerida para ello ha sido proporcionada por el IGME y la CHE a través de un registro de las fichas de todos los aprovechamientos geotérmicos que se encuentran inventariados. En todos ellos la explotación se lleva a cabo por medio de sistemas abiertos, donde como mínimo se requiere la existencia de al menos un pozo de captación y otro de vertido.

- Instalación SGS-1

Instalación destinada a la climatización de un hotel en la ciudad de Zaragoza (ver localización figura 2), la fecha de inicio de esta explotación fue en el año 2010 y se encuentra en servicio en la actualidad. Está formada por un total de 3 pozos, de los cuales dos se encuentran destinados a la captación de agua subterránea, con una profundidad de 27 m y uno de ellos a su vertido cuya profundidad es algo menor alcanzando los 25,5 m. Dichos pozos se encuentran separados por una distancia de 19,1 m y no se tiene constancia de que exista interferencia térmica entre estos. Se produce una circulación de 17,62 l/s de caudal medio que resultan un total de 555.664 m³/año. Se cuenta con un sistema de climatización utilizado tanto para la generación de frío como de calor cuya potencia es de 962 kW y 1.022 kW respectivamente.

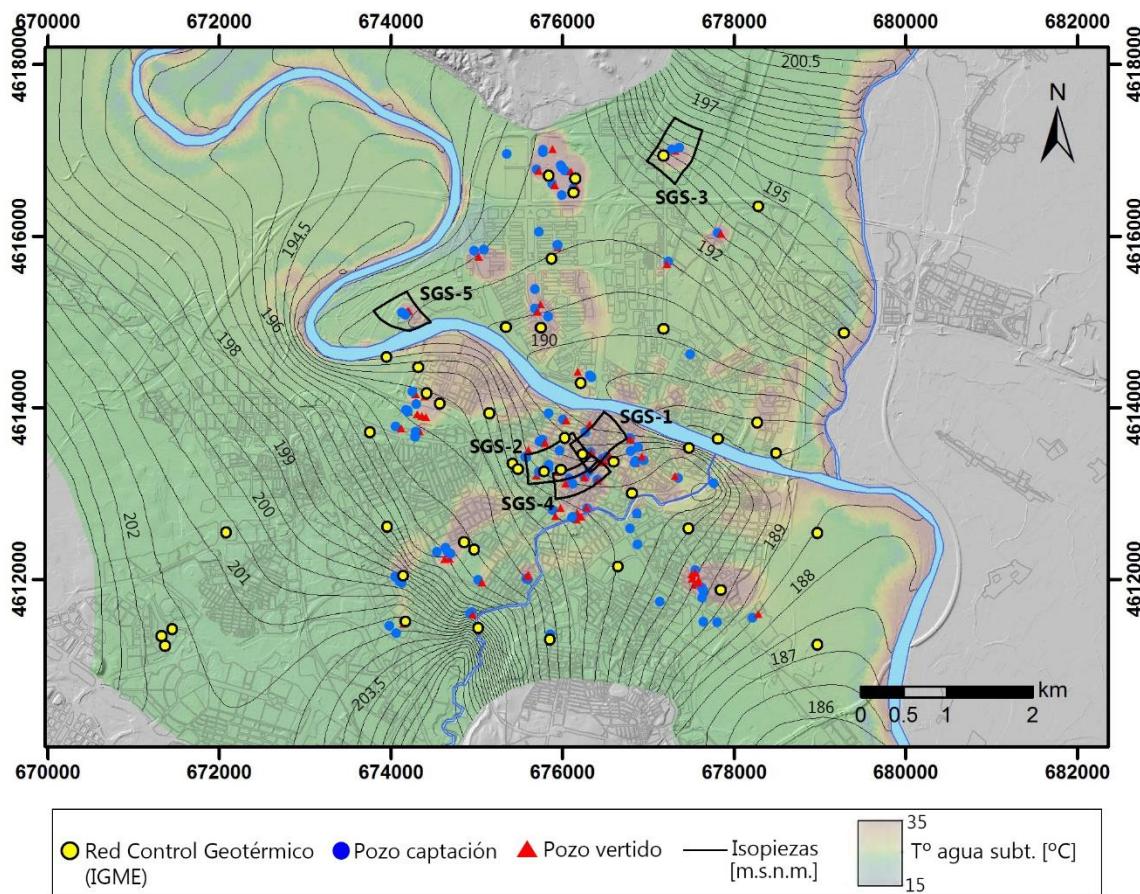


Fig. 2. Situación de las instalaciones geotérmicas analizadas en el estudio con los pozos involucrados en su explotación, tanto de captación como de vertido y la afección térmica provocada. También se observa la Red de Control piezométrico del IGME. (Modificado de García Gil, 2015)

- Instalación SGS-2

Se trata de una instalación cuyo fin es la climatización de un museo (**ver localización figura 2**), su puesta en funcionamiento tuvo lugar en el año 2010 y actualmente se encuentra activa. Tiene un total de 3 pozos, de los cuales dos de ellos están destinados a captación de agua subterránea con una profundidad máxima de 46,18 m y el restante a vertido cuya profundidad alcanza los 31,52m. Dichos pozos se encuentran separados por una distancia de 54 m con la finalidad de que no se produzcan interferencias, hecho del que no se tiene constancia. Por ellos circula un caudal medio de 11,4 l/s que producen un total de 359.510 m³/año de agua que es empleada en los sistemas de climatización. Dicha instalación requiere una generación tanto de frío como de calor disponiendo de una potencia de 1.042 kW.

- Instalación SGS-3

La instalación pertenece a un hospital (**ver localización figura 2**), se encuentra en funcionamiento actualmente desde su puesta en marcha en el año 2001. Dispone de un total de 3 pozos, dos de ellos utilizados para captación cuya profundidad máxima es de 48 m y uno para inyección que tiene una profundidad de 40 m. La distancia que separa ambas zonas es de 50,5 m. la cual podría ser insuficiente debido al hecho de que existe interferencia térmica entre la captación y el vertido producida por la propia instalación. El caudal medio que circula por dichos

pozos es de 16,6 l/s equivalentes a un total de 523.497 m³/año. El sistema de climatización del que dispone es únicamente para la generación de frío durante los meses estivales, cuya potencia total es de 1.985,4 kW.

- Instalación SGS-4

Se trata de la instalación de un hotel (**ver localización figura 2**) que comenzó su explotación en el año 1999 y continua en funcionamiento hasta la actualidad. Dispone de un total de 3 pozos, de los cuales dos de ellos están encargados de la captación de agua subterránea, cuya profundidad máxima es de 37 m y el restante dedicado al vertido con una profundidad que alcanza tan solo los 12,3 m. La distancia que separa ambos dominios es de 73,97 m a pesar de lo cual se tiene constancia de la existencia de interferencias térmicas entre la propia explotación. Se produce la circulación de 19,16 l/s de caudal medio equivalentes a un total de 604.229 m³/año. El sistema de climatización es empleado tanto para la generación de frío como de calor disponiendo de una potencia de 2.775 kW y de 890 kW respectivamente.

- Instalación SGS-5

La instalación pertenece a un hotel (**ver localización figura 2**), cuyo inicio de explotación tuvo lugar en el año 2008 continuando con su actividad hasta la actualidad. Se cuenta con un total de 7 pozos, de los cuales cuatro se encuentran destinados a la captación de agua subterránea con una profundidad máxima de 32,5 m y los otros tres utilizados para su vertido cuya profundidad alcanza los 35 m. Ambas zonas distan entre sí 53,15 m y no se tiene registro de que se esté produciendo interferencia térmica dentro de la propia explotación. El caudal medio que circula a través de dichos pozos es de 50 l/s equivalente a un total de 1.642.500 m³/año. Se dispone de un sistema de climatización destinado tanto a la generación de frío como de calor mediante una potencia total de 2.408 kW y 2.710 kW respectivamente.

6. METODOLOGÍA

El presente estudio ha tenido lugar siguiendo una serie de pautas que parten inicialmente de una revisión bibliográfica tanto del entorno geológico e hidrogeológico de la Cuenca del Ebro como del Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza. Incluyendo además, la revisión de bibliografía sobre el aprovechamiento geotérmico somero en la zona de estudio y otras áreas, la medición en continuo de parámetros hidrogeológicos en dichos sistemas y el tratamiento posterior de los datos obtenidos previo a su simulación numérica.

6.1. Obtención y origen de los datos

Se ha procedido a la visita *in situ* de dos explotaciones geotérmicas de la ciudad, donde se han realizado mediciones de los parámetros hidrogeológicos básicos y se ha llevado a cabo un reconocimiento del funcionamiento de las instalaciones.

La obtención de los datos en bruto de las citadas explotaciones de aprovechamiento geotérmico, se realiza por los propios propietarios a petición de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Posteriormente los datos son transferidos al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para su tratamiento, utilización en trabajos de investigación y apoyo técnico para realización de expedientes de autorización de vertido. El registro de datos, consistente en la medición en continuo de caudales [L·s⁻¹] y temperaturas [°C] tanto de captación como de vertido, se produce con una cadencia aproximada de 15 minutos. No obstante, existe una variabilidad en los datos

donde estos intervalos de tiempo varían según la instalación debido al uso de diferentes sistemas de registro.

6.2. Procesado y tratamiento de datos: Depuración, sincronización y homogeneización

Debido a la citada variabilidad en el sistema de registro de los datos, el proceso de preparación de estos será el punto de partida del análisis. Dicho tratamiento se realiza mediante la hoja de cálculo *Microsoft Excel 2016*, donde se ha procedido a su filtrado con el fin de eliminar los errores provocados en su descarga o durante el periodo de medida, a la vez que se ha sincronizado conforme a una guía de referencia con una cadencia de 15 minutos con el objetivo de obtener una serie de datos continua y homogénea. Otra corrección realizada es la depuración de datos de medida de la temperatura en los momentos en los que no existe circulación de caudal de agua, ya que dicha temperatura pertenece a la de la conducción (o a la sala de máquinas) y por lo tanto no representa la realidad, reemplazando dicho valor por una temperatura de referencia.

6.3. Aplicación de diferentes aproximaciones de *upscaleing*

Entendiendo el método de *upscaleing* aplicado al caso que se trata en este trabajo como es el proceso de obtención de datos de cadencia diaria, considerados representativos del régimen de explotación y capaces de reproducir el funcionamiento real, se ha decidido proponer diferentes aproximaciones para lograrlo.

Se procede a la elección de una serie de parámetros estadísticos descriptivos básicos que resultan prácticos en hidrogeología, cuya finalidad es cubrir un amplio rango de valores del dato analizado, permitiendo observar además los valores extremos.

Los métodos de *upscaleing* o aproximaciones que se han considerado han sido los siguientes:

- Intercuartiles (Q_1, Q_2, Q_3), caracterizados como medidas de posición, permiten el cálculo del valor de la variable que ocupa una cierta posición relativa respecto al conjunto total. El orden x del percentil indica el valor de la variable que deja por debajo de dicho valor el $x\%$ del total de las observaciones, por tanto, se estudian los percentiles 25, 50 y 75 correspondientes a los cuartiles Q_1, Q_2 y Q_3 respectivamente.
- Media geométrica (\bar{x}_G), se trata de una medida de centralización que promedia los crecimientos geométricos de una variable, dando menos importancia a los valores extremadamente grandes que en el caso de la media aritmética y calculada a través de la siguiente fórmula: $\bar{x}_G = \sqrt[N]{X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_N}$
- Máximo y mínimo, considerados estadísticos descriptivos devuelven el valor más alto y más bajo respectivamente dentro de un conjunto de valores.

Inicialmente se entendió que la aproximación más loable sería la integración de la energía disipada en un día por cada instalación, mediante el cálculo de la potencia [J/s] por medio de la siguiente fórmula:

$$H = Q c_w \rho_w (T_V - T_C)$$

Donde H es el potencial calorífico transferido, [W] Q corresponde al valor del caudal de vertido [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] de la instalación considerada, c_w es la capacidad calorífica del agua [kJ/kg·K], ρ_w la

densidad del agua [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] y la diferencia de temperatura [K] entre el valor de la temperatura de vertido T_V y la de captación T_C .

Mediante el uso de una serie de filtros en la hoja de cálculo se consigue obtener un valor de dicha potencia acumulada o diaria [J/día] que, junto con el caudal de vertido acumulado [$\text{m}^3/\text{día}$] permite despejar de la fórmula de la potencia una nueva temperatura de vertido [K] con una periodicidad diaria a la que se le llamará temperatura de vertido calculada T_{vc} .

El nuevo parámetro obtenido, T_{vc} , será una de las series de datos objeto de simulación posterior en el modelo numérico con la intención de que dicho valor al ser calculado se ajuste lo máximo posible a la situación real.

6.4. Análisis de sensibilidad del proceso de upscaling en función de la resolución de tiempo

Considerando el método de *upscaleing* de la temperatura calculada, citado anteriormente, se decide variar su resolución temporal de salida. De esta forma, se han obtenido tres nuevas series, de cadencia medio-diaria, 2-diaria y 5-diaria con el fin de comprobar la evolución de la desviación en cada uno de los casos. Al mismo tiempo, este análisis permite estudiar las posibilidades de trabajar con cadencias altas para reproducir adecuadamente los regímenes de explotación de las instalaciones y comprobar cuantitativamente la plausible mejora de las distintas alternativas propuestas.

6.5. Modelos numéricos

Uno de los códigos de simulación más utilizados en el campo de la hidrogeología, el cual ha sido usado para el desarrollo del presente trabajo, es FEFLOW creado por el Instituto para la Planificación de los Recursos del Agua e Investigación de Sistemas (WASY GmbH) (Diersch, 2009), actualmente perteneciente al Grupo DHI (Trefry y Muffels, 2007) encargado de comercializar la versión del código FEFLOW 6.0.

En FEFLOW se realiza una discretización espacial bidimensional mediante la creación de láminas compuestas por elementos triangulares con nodos en sus vértices, método que permite adaptar los mallados a zonas con características de contorno complejas. A partir de dicho mallado bidimensional se consigue, por extrusión de una lámina inicial, el modelo tridimensional, con la capacidad de adaptarse con gran precisión a superficies irregulares reproduciendo su topografía (Díaz *et al.*, 2012). Además, tiene la posibilidad de refinar sectores concretos de la malla que puedan ser de mayor interés por poseer características complejas o relevantes para el estudio, como es el área donde se ubican los pozos de vertido de cada una de las explotaciones analizadas. Característica importante para dominios que ocupan una superficie considerable, como es el caso del Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza.

La elaboración de los modelos hidrogeológicos analizados consiste en modelos locales basados en un modelo de flujo y transporte de calor regional de la ciudad de Zaragoza (García Gil, 2015) que se encuentra calibrado y validado previamente.

Se ha modelado (**Fig. 3**) cada uno de los dominios analizados mediante un tubo de flujo de agua subterránea, donde se han añadido 10 m de terreno tanto en la parte inferior como en la parte superior del acuífero, correspondientes al basamento Mioceno y a la zona no saturada respectivamente. Las características del dominio de cada una de las instalaciones (**Tabla 1**) varían en cuanto a dimensiones y componentes de la malla, presentando distinto número de

elementos finitos (prismas triangulares) y nodos que se encuentran distribuidos en determinadas capas.

Instalación	Dimensiones (m)	Prismas triang.	Nodos	Capas	Periodo (días)
SGS-1	710,4 x 658,2 x 30	29.052	16.341	12	273
SGS-2	847,7 x 592,9 x 30	859.392	467.116	12	241
SGS-3	772,6 x 647,8 x 30	88.928	48.315	14	264
SGS-4	672,7 x 513,9 x 30	45.192	24.885	14	310
SGS-5	663,3 x 469,2 x 30	56.994	31.200	14	212

Tabla 1. Características del dominio modelado en cada una de las instalaciones estudiadas donde se observan las dimensiones [m], los parámetros establecidos en el código de simulación y el periodo [días] registrado en cada análisis.

Las simulaciones son realizadas en régimen transitorio cuyo periodo varía en función de la instalación, con un paso de tiempo que lo controla de forma automática el código de simulación mediante una discretización temporal de un día como máximo.

En primer lugar, se han importado las series de datos de cada una de las instalaciones y a continuación se ha procedido a definir las condiciones de contorno de los pozos involucrados concretamente en cada uno de los casos, esto implica la asignación del caudal tanto de captación como de vertido que circula a través de estos. De la misma forma se procede a asignar las condiciones de contorno de la temperatura, valor que se va modificando en función del escenario que se desee simular en cada caso. Para las condiciones de contorno de flujo de calor se ha establecido una temperatura inicial de 17 °C que coincide aproximadamente con la media anual de la región y a la que se considera que se encontraría el acuífero en condiciones naturales (**Fig. 3**).

Además, con la finalidad de analizar la evolución de la afección térmica en cada uno de los casos, se han establecido una serie de puntos de observación a diferentes distancias (1 m, 3 m, 5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 100 m y 200 m) que tienen su origen desde el pozo de vertido, considerado el punto crítico del sistema. Estas distancias permiten registrar la evolución de las temperaturas como variable de estado del transporte de calor para cada uno de los escenarios de optimización. En definitiva, permiten estudiar la respuesta del acuífero a la inyección de calor e identificar cuál de las simulaciones diarias se asemeja más al escenario real 15-minutal.

El resultado final de la simulación consta de una serie de datos guardados mediante la extensión **.pow**, los cuales son importados con la ayuda de la hoja de cálculo y que serán objeto nuevamente de tratamiento. Dicho proceso consiste en ordenar los nuevos datos a partir de una guía de referencia con la finalidad de eliminar los errores de cálculo provocados por el código de simulación. En cada uno de los escenarios analizados se obtiene una serie de valores distribuidos a lo largo de los puntos de observación que se han impuesto al modelo.

Una vez que se tengan todos los escenarios de forma homogénea conforme a la guía de referencia y ordenados en función de los días de los que consta cada registro, el siguiente paso será el cálculo de la desviación provocada en cada uno de los escenarios frente al escenario real.

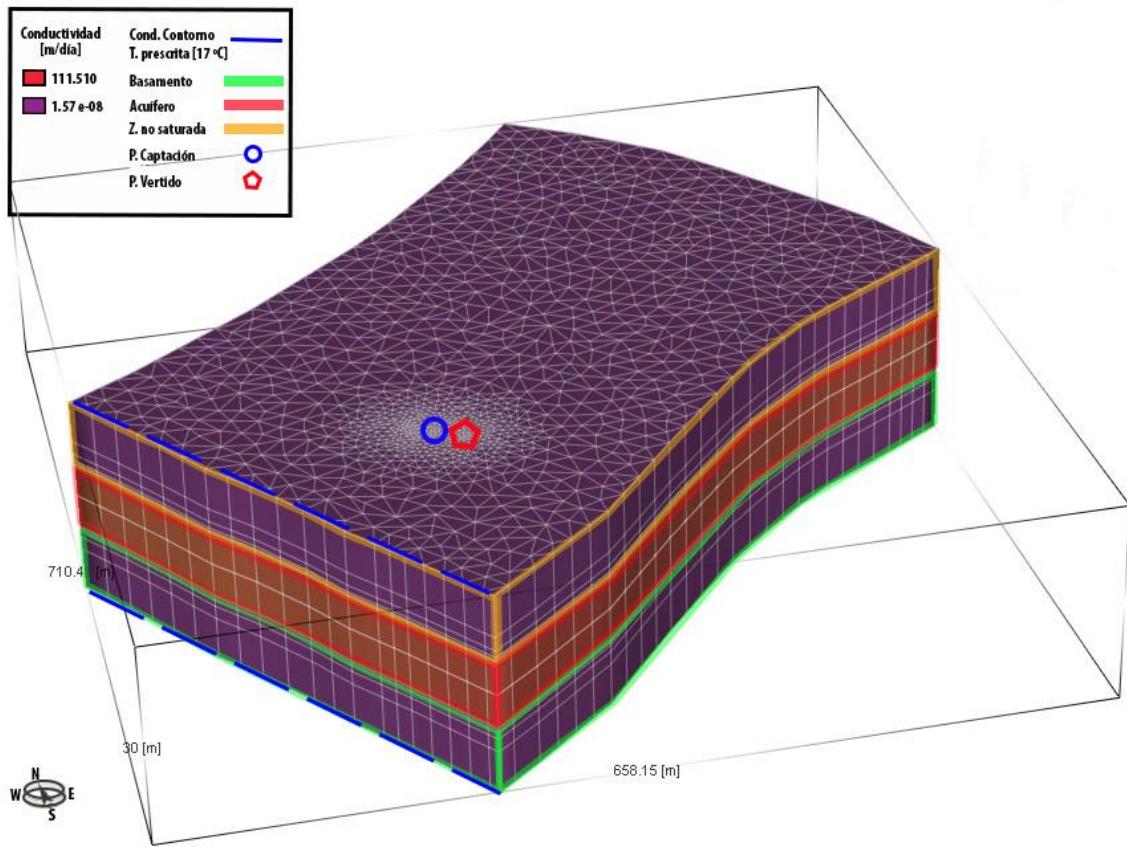


Fig. 3. Modelo 3D del tubo de flujo de agua subterránea limitado por el basamento y la zona no saturada. Ejemplo de la situación de los pozos involucrados en una explotación geotérmica y parámetros hidrogeológicos iniciales de referencia.

6.6. Cálculo del error del proceso de upscaling

A partir de la simulación de escenarios utilizando modelos numéricos se procede a la estimación de la desviación de cada uno de los métodos de *upscaling* utilizados. Dicha estimación se realiza mediante la comparación del escenario real o de referencia (15-minutal), donde se simula el funcionamiento de la explotación geotérmica, frente a los escenarios impactados teóricos o aproximaciones calculadas.

Restando a cada uno de los escenarios de optimización el escenario real o de referencia, se obtiene la diferencia de temperatura [°C] entre ambos a partir de la cual se calculará la desviación provocada por cada una de las aproximaciones realizadas. Dicha desviación se calcula a través del **error cuadrático medio** (RMSE), parámetro utilizado para la estimación del rendimiento de las predicciones espaciales que deriva de la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

Donde d es la diferencia entre los valores del escenario de optimización y el real, y n es el número total valores que existen en cada uno de los conjuntos de datos considerados en el estudio. En general el RMSE cuantifica la diferencia observada entre los valores reales y los que han sido optimizados a frecuencia diaria, por lo que un valor próximo a cero de dicho parámetro

conllevará un alto grado de optimización del proceso en ese momento. Valores elevados, en cambio, indicarán la falta de idoneidad del proceso de *upscaling* adoptado en el respectivo escenario de optimización.

6.7. Elaboración de la memoria

La redacción de la memoria ha sido realizada mediante el procesador de texto *Microsoft Word 2016* y la edición de las imágenes con el software *Adobe Photoshop CS6*.

7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

7.1. Resultados del régimen de explotación y las técnicas de *upscaling*

Se presentan a continuación las series temporales correspondientes a las técnicas de *upscaling* utilizadas en cada una de las instalaciones, las cuales se encuentran formadas por los mismos métodos de aproximación, pero varían en cuanto a su resolución temporal.

A modo de ejemplo se muestra el análisis realizado para la instalación SGS-1, donde se ha representado la serie de la temperatura de vertido con una cadencia de 15 minutos (**Fig. 4**) que representa el régimen real de explotación y es tomada como referencia. Se dispone de un periodo de registro de 273 días, encontrándose en funcionamiento continuo, con un caudal medio de 661 m³/día (anexo 1A), a excepción de pequeños intervalos de tiempo en los que aparece la temperatura de vertido tomada como referencia (17°C), donde se observa que la distribución de temperaturas varía en función de la climatización requerida en cada momento. Se deduce por tanto, que un 55% del tiempo ha sido destinado a refrigeración, provocando un vertido con temperaturas elevadas (>25°C) y el resto a calefacción que por el contrario produce la inyección de agua más fría (<15°C).

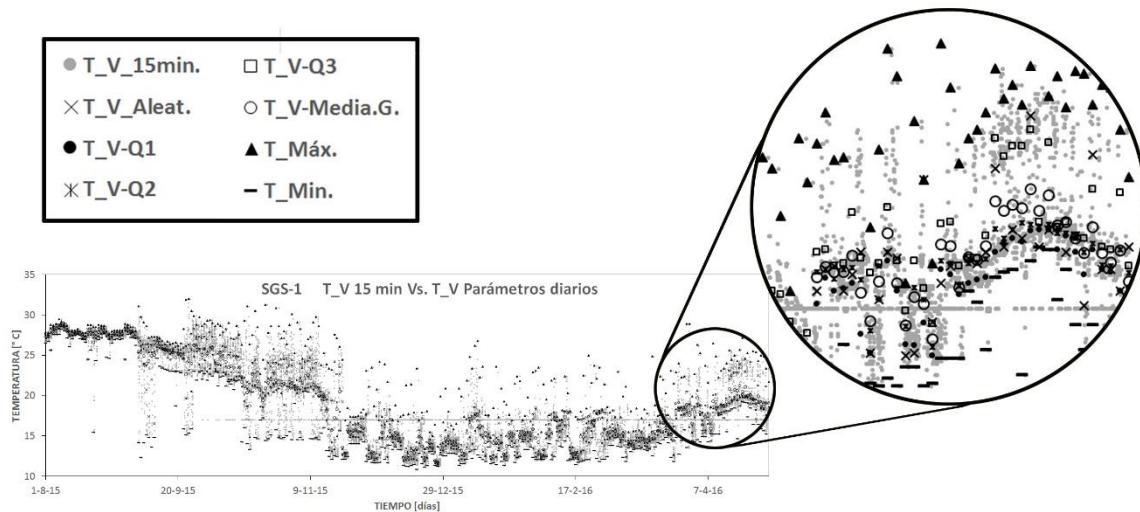


Fig. 4. Representación gráfica de la serie de la temperatura de vertido 15-minutal (instalación SGS-1) y la distribución de los parámetros calculados por *upscaling* de cadencia diaria, previos a su implementación en el modelo numérico.

Las series calculadas mediante *upscaling* de dicha temperatura (media geométrica, Q₁, Q₂, Q₃, máximo, mínimo) además de un valor aleatorio de la misma, tienen una cadencia diaria. Se

puede observar (**Fig. 4**) que la distribución de dichos parámetros se sitúa en torno a los datos reales de temperatura, de forma que los valores máximos y mínimos se encuentran en la parte superior e inferior del gráfico respectivamente. Estos indicadores limitan el rango donde se sitúan la media geométrica y los cuartiles. Mediante el uso de dichas técnicas de *upscaling* se consigue abarcar el rango total de variabilidad existente entre los datos reales.

Por otro lado, se ha obtenido una serie correspondiente al valor de la temperatura de vertido teórica, calculada a partir de la potencia diaria disipada por cada una de las explotaciones. A partir de ésta aproximación se han realizado 3 series de datos en función de su resolución temporal, para las instalaciones SGS-1 y SGS-2, con cadencia de medio día, 2 días y 5 días, con el fin de analizar la evolución de la desviación en cada una de las situaciones.

En el anexo 1 se presentan las gráficas pertenecientes al resto de instalaciones estudiadas; en el caso de la instalación SGS-2 (anexo 1B) se dispone de un registro de 241 días, donde se observa que no se encuentra en funcionamiento continuo a lo largo del periodo analizado ya que durante dos meses no se produce la inyección de agua, cuyo caudal medio es de 457 m³/día. El uso principal que se le da a la climatización es para refrigeración, ya que se ha calculado que un 54% del tiempo el vertido se realiza a temperaturas elevadas (>25°C), aunque se observa también el uso del sistema de calefacción durante los meses de invierno produciendo un vertido a menor temperatura (<15°C).

En la instalación SGS-3 (anexo 1C) se puede observar que su funcionamiento es prácticamente continuo a lo largo de los 264 días de los que consta su registro, con un caudal medio de 865 m³/día, a excepción de pequeños intervalos de tiempo en los que no se produce inyección de agua. Se deduce que la climatización ha sido destinada a refrigeración, produciéndose un vertido a altas temperaturas (>25°C) durante los primeros 70 días, coincidiendo con el periodo estival. El resto del tiempo dicha inyección de agua disminuye su temperatura (20°C), manteniéndose estable a lo largo del tiempo analizado.

El régimen de explotación observado (anexo 1D) de la instalación SGS-4 es muy variable con un caudal medio de 265 m³/día, encontrándose apagada durante periodos prolongados donde no se produce la inyección de agua. Se dispone de un registro de 310 días, a lo largo de los cuales se aprecian cuatro picos de vertido a altas temperaturas (>25°C) que componen un 10% del periodo analizado.

La instalación SGS-5 (anexo 1E) consta de un registro de 212 días, donde se observa que su funcionamiento se produce de forma continuada, cuyo caudal medio es de 892 m³/día, con pequeños intervalos de tiempo en los que no se realiza vertido de agua. En los primeros tiempos de registro se produce la inyección de agua a temperaturas elevadas (>25°C), hecho que se invierte a continuación produciéndose un vertido de agua fría (<15°C) coincidente con los meses de invierno y por tanto con el uso del sistema de calefacción.

Mediante la transformación por *upscaling* de las series de datos reales a las series diarias, se ha disminuido considerablemente el número de datos (**Tabla 2**) en cada una de las instalaciones, consiguiendo una reducción del 98,9%.

Instalación	15-min. (nº datos)	Diario (nº datos)	Reducción (%)
SGS-1	26.302	273	
SGS-2	23.178	241	
SGS-3	25.439	264	
SGS-4	29.855	310	
SGS-5	20.442	212	

Tabla 2. Porcentaje total de la reducción de datos mediante la aproximación por *upscaling* de cadencia diaria en referencia con la serie real de la temperatura de vertido.

7.2. Resultados de las simulaciones en el modelo numérico

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de los escenarios reales (**Fig. 5**), donde se ha implementado cada una de las series temporales con cadencia de 15 minutos correspondientes a las instalaciones analizadas en el estudio. Mediante la observación de las plumas de calor generadas en el último tiempo de cálculo, se puede deducir el alcance de estas y su interacción con los puntos de observación establecidos.

En la **Fig. 5A** se encuentra la pluma de calor generada por la instalación SGS-1 que tiene un alcance de 60 m para un incremento de temperatura de 1,75 °C respecto a la situación inicial (isoterma 18,75 °C). A partir de dicha distancia no existe afección térmica significativa. La **Fig. 5B** se trata de la instalación SGS-2 que causa una pluma de mayores dimensiones que en el caso anterior donde se puede observar que a 100 m existe un incremento de temperatura de 3,84 °C (isoterma 20,84 °C), distancia a partir de la cual la influencia de dicha temperatura disminuye. La **Fig. 5C** permite analizar la instalación SGS-3 que genera una pluma de grandes dimensiones donde se observa que en el punto más distante, 200 m, la temperatura ha sufrido un incremento de 3,65 °C (isoterma 20,65 °C), afección que comienza a estabilizarse a partir de dicha distancia. En la **Fig. 5D** se observa la instalación SGS-4 que genera una pluma cuya temperatura experimenta un incremento de 3,55°C a los 40 m (isoterma 20,55 °C), disminuyendo hasta 0,82°C (isoterma 17,82 °C) en el punto de 100 m, distancia a partir de la cual la afección deja de existir. En la **Fig. 5E** se observa la instalación SGS-5 que crea una pluma de pequeñas dimensiones, donde se observa que a los 40 m la temperatura ha sufrido un incremento de 0,43°C (isoterma 17,43 °C), manteniéndose constante a partir de dicho punto.

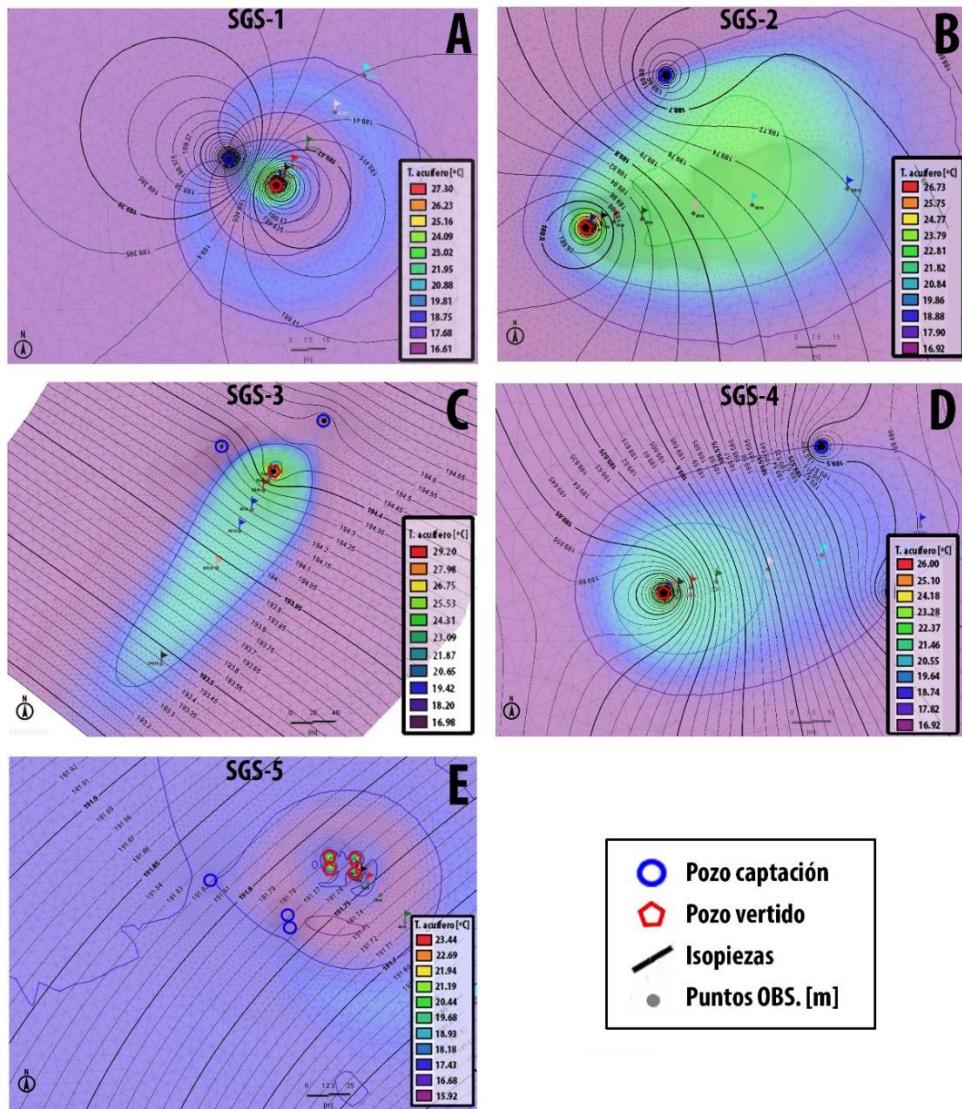


Fig. 5. Mapa de isopiezas donde se observan las plumas térmicas generadas por cada instalación en el último tiempo de cálculo. Se sitúan también los pozos de captación, vertido y los puntos de observación [m] establecidos en el modelo. A) SGS-1. B) SGS-2. C) SGS-3. D) SGS-4. E) SGS-5. (Ampliación en Anexo 2).

Además, se han realizado los termogramas (Fig. 6) correspondientes a las simulaciones de los escenarios reales que posteriormente servirán de referencia para el análisis de las desviaciones provocadas por los distintos métodos de aproximación propuestos. En ellos aparece reflejada la evolución de la temperatura de vertido real a lo largo de los puntos de observación establecidos en el modelado de cada instalación. Se puede observar que las temperaturas más elevadas se dan a distancias cercanas al pozo de vertido (1, 3 y 5 m) en los momentos en los que se inyecta calor, afección que va disminuyendo conforme se alejan los puntos de observación. De la misma forma, en los momentos en los que el vertido se realiza a temperaturas más bajas, los puntos más cercanos son los que registran las temperaturas más frías, disminuyendo su efecto conforme se aumenta la distancia al foco de emisión.

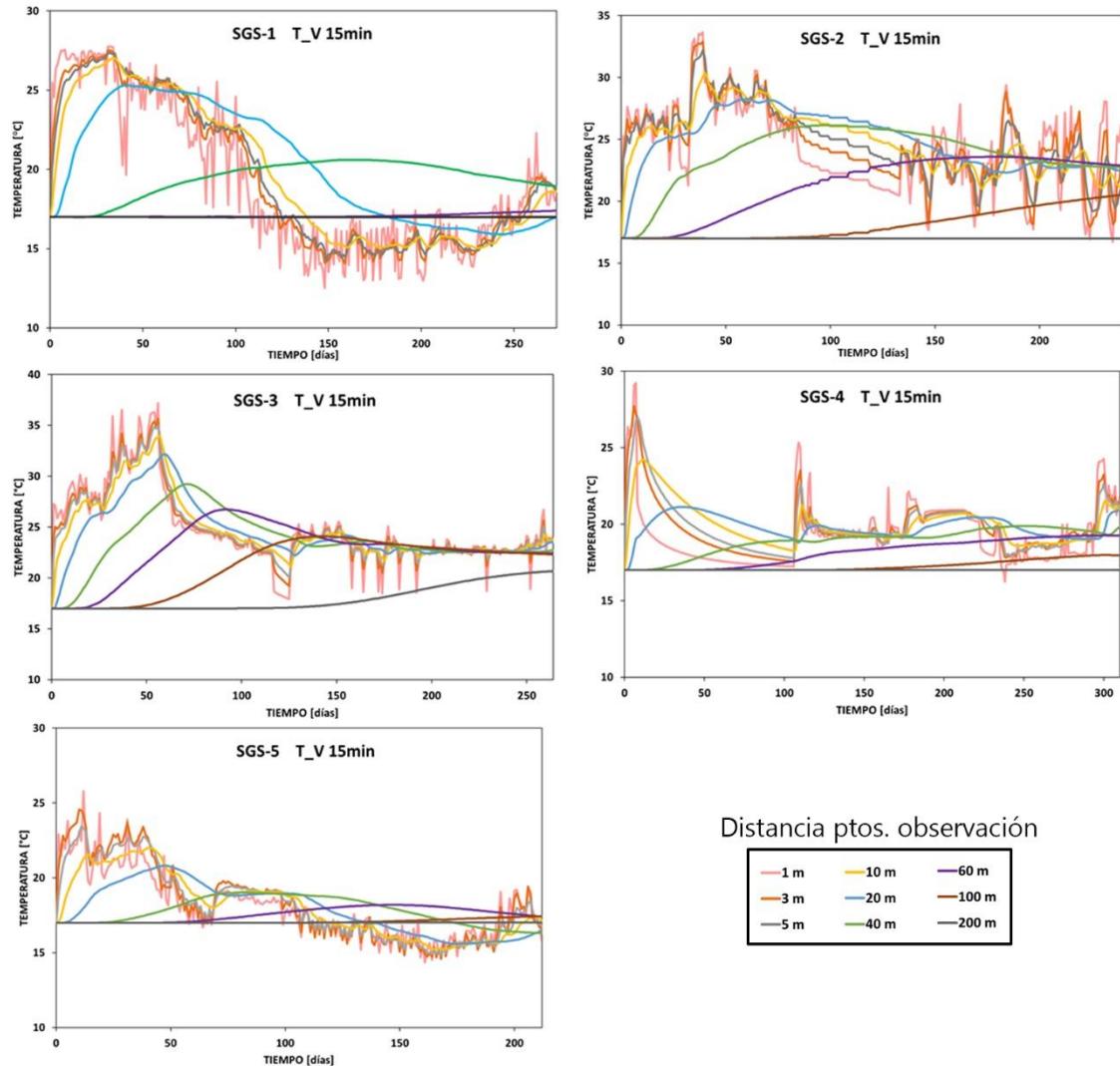


Fig. 6. Termogramas realizados a partir de las simulaciones de las series 15-minutales de la temperatura de vertido, distribuidas a lo largo de los puntos de observación, utilizados como referencia del régimen de explotación real en cada caso.

A continuación, se ha realizado la simulación de las series con cadencia diaria de cada una de las técnicas de *upsampling* citadas, siendo comunes para la totalidad de las explotaciones analizadas. En determinadas instalaciones de forma aleatoria se han calculado nuevas series pertenecientes a la temperatura calculada donde se ha variado su resolución temporal.

El tiempo de simulación de dichas series (**Tabla 3**) varía en función de cada instalación y el método analizado. Se puede observar que la duración media de la simulación del escenario real es de 10,5 h a diferencia de los escenarios realizados mediante *upsampling* cuya duración media es de 5 minutos, por lo que se consigue un ahorro de tiempo significativo.

Instalación	15-minutal (h)	Diario (min)	M-d, 2-d, 5-d (min)
SGS-1	10	3	3
SGS-2	16	6	6
SGS-3	11	6	-
SGS-4	8	3	-
SGS-5	8	3	-

Tabla 3. Ahorro de tiempo en la simulación de las series con menor resolución temporal realizadas mediante *upscaling*, frente a los datos reales de la temperatura de vertido.

Las temperaturas generadas quedan registradas mediante la simulación, distribuidas a lo largo de los puntos de observación impuestos previamente. Por lo que se dispondrá de una serie de datos derivada del escenario real y otras pertenecientes a los métodos de *upscaling* utilizados para la temperatura de vertido en cada uno de los análisis.

Con la finalidad de obtener una mejor visualización de las diferencias entre las técnicas de *upscaling* seleccionadas, se ha realizado la representación gráfica (**Fig. 7**) de las aproximaciones calculadas de la temperatura de vertido (mínimo, Q_1 , Q_2 , media geométrica, Q_3 , máximo, aleatoria y calculada) frente a la temperatura de la serie real (15-minutal). Para ello se han tenido en cuenta todos los puntos de observación establecidos y se ha elegido la distancia de 20 m. Distancia que es considerada representativa, ya que se ve la oscilación completa de la pluma provocada por el vertido de cada una de las instalaciones, además de ser la distancia a la que se encuentran aproximadamente los puntos de control de la red piezométrica por lo general. En los citados termogramas (**Fig. 7**) se observa la evolución de las temperaturas para cada una de las técnicas de *upscaling* calculadas y su diferencia respecto a los valores de temperatura "reales". Las aproximaciones realizadas mediante el máximo y mínimo, se deduce que son las que mayor desviación provocarán ya que se mantienen en todas las instalaciones en una posición superior e inferior (promedio ± 3 °C) a la serie real respectivamente. Sigue lo mismo con el cuartil Q_3 y el cuartil Q_1 que, aunque la desviación es inferior (promedio $\pm 1,8$ °C) no se ajustan al régimen real en ninguno de los casos. Por el contrario, se observa que las series correspondientes a la media geométrica, cuartil Q_2 y el dato aleatorio de temperatura de vertido, producen una menor desviación de la realidad (promedio ± 1 °C), manteniéndose en un rango cercano a la serie 15-minutal en todas las instalaciones analizadas.

La serie de la temperatura calculada produce un ajuste prácticamente perfecto ($\pm 0,1$ °C) en todas las instalaciones, donde se observa que sigue el trazado de la serie real a lo largo de los períodos analizados.

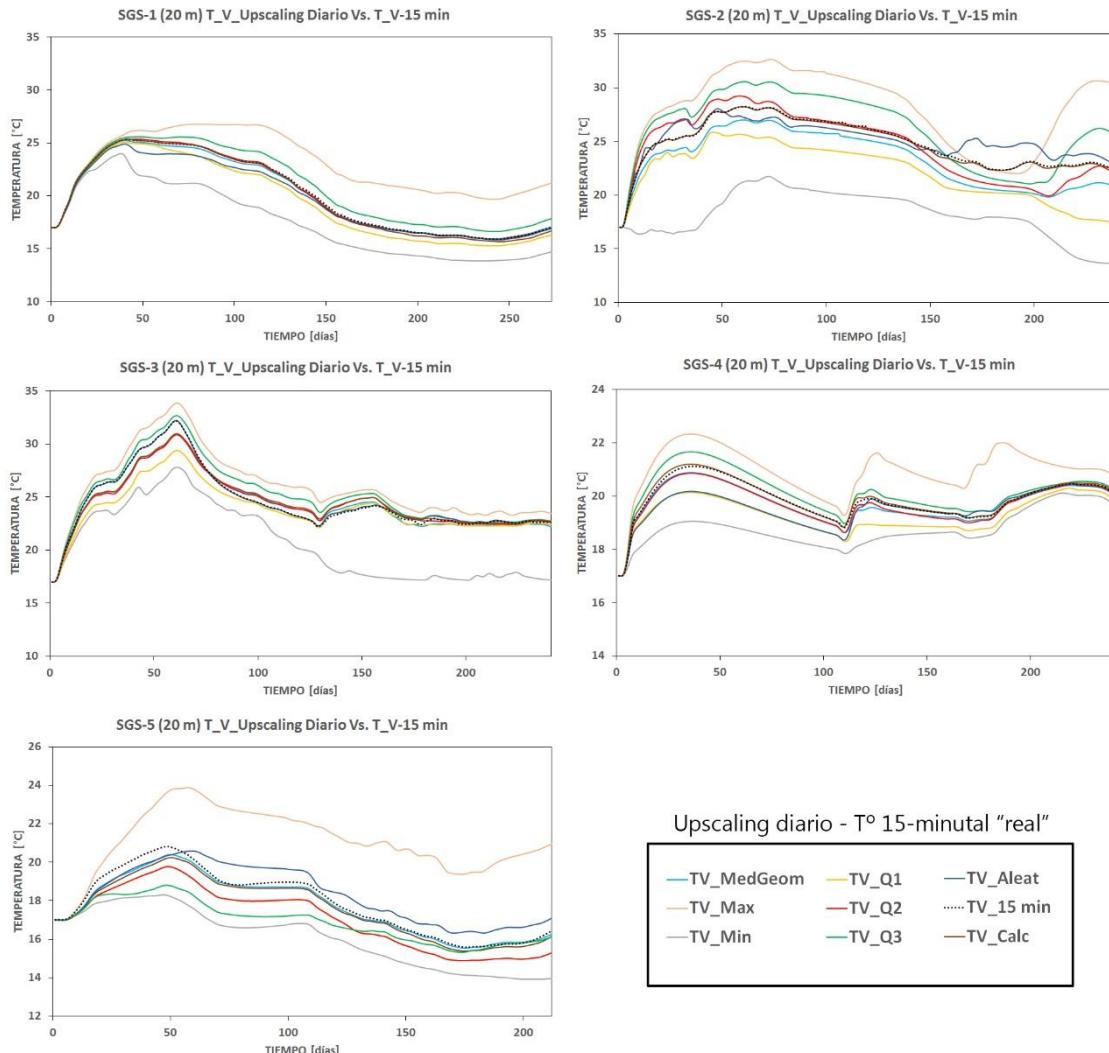


Fig. 7. Termogramas realizados representando la serie 15-minutal de la temperatura de vertido frente a las aproximaciones diarias calculadas por *upscaling*, en cada una de las instalaciones, teniendo en cuenta únicamente el punto de observación situado a 20 m.

7.3. Resultado del cálculo del error del proceso de *upscaling*

A continuación, las series simuladas que han sido calculadas previamente por medio de *upscaling* (mínimo, Q_1 , Q_2 , media geométrica, Q_3 , máximo, aleatoria y calculada) cuya cadencia es diaria, se comparan con la serie de cadencia 15-minutal con el fin de observar la desviación de la realidad que se provoca en cada uno de los casos mediante el análisis en conjunto de todas las instalaciones.

Para ello se ha calculado el error cuadrático medio (RMSE) de cada técnica citada, a lo largo de los puntos de observación establecidos en el modelo en todas las instalaciones. El dato con el que se ha trabajado ha sido el promedio del error derivado de dichos puntos o distancias en cada uno de los análisis, el cual ha sido representado gráficamente (**Fig. 8A**). Donde se puede observar la distribución de las instalaciones estudiadas en torno al error producido por cada método de *upscaling*.

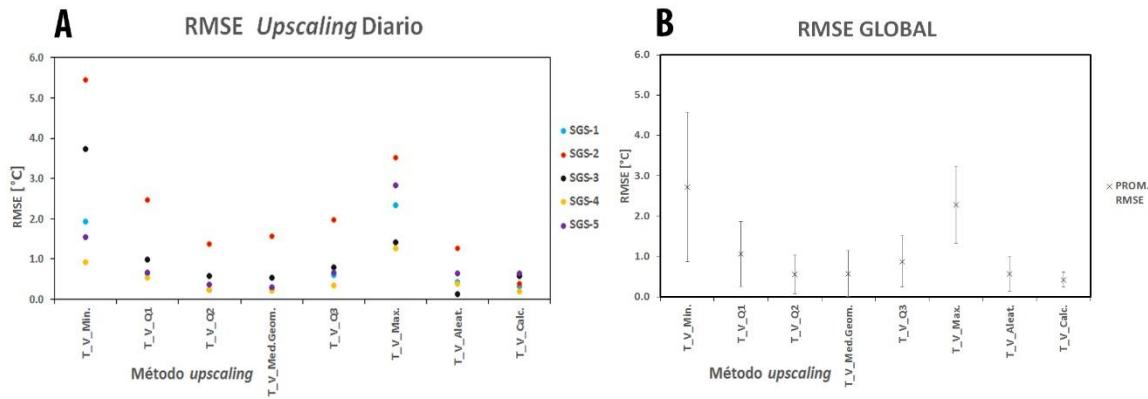


Fig. 8. A) Gráfica correspondiente al error cuadrático medio (RMSE) provocado por cada uno de los métodos de aproximación planteados en todas las instalaciones estudiadas. **B)** Gráfica donde se ha calculado el valor promedio de todas las instalaciones analizadas del RMSE derivado de cada técnica de *upscaling* junto con su desviación estándar.

El rango de error más amplio se da mediante el uso del valor mínimo que se encuentra comprendido entre 1 y 5,5 °C, seguido del máximo con una desviación de entre 1,2 y 3,5 °C y del cuartil Q_1 y cuartil Q_3 que producen un rango medio de error de 2 °C. A continuación, se sitúan el cuartil Q_2 , la media geométrica y el dato aleatorio de temperatura de vertido cuya desviación se considera similar situándose en un rango en torno a 1,5 °C. La temperatura calculada se observa que es el único método de *upscaling* en el que la desviación, de todas las instalaciones analizadas, se sitúa por debajo de 1 °C y ocupa un rango de valores mínimo comprendido entre 0,1 y 0,8 °C.

A continuación, se ha calculado el error cuadrático promedio (**Fig. 8B**) de todo el conjunto de instalaciones estudiadas para cada una de las técnicas de *upscaling* realizadas, representando mediante las barras de error el rango de la desviación estándar causada en cada uno de los casos. Se observa que el valor mínimo produce el rango de error más amplio (0,8 – 4,6 °C), seguido del máximo (1,2 – 3,2 °C) y que por el contrario la temperatura calculada (0,3 – 0,5 °C) tiene el más limitado. Los valores situados entre los parámetros limitantes citados, corresponden al resto de aproximaciones cuyo promedio de desviación global es de 0,73 °C.

7.4. Resultado del cálculo del error del proceso de *upscaling* según su resolución temporal

A partir de las series de la temperatura calculada, realizadas en dos de las instalaciones estudiadas (SGS-1 y SGS-2) con distinta frecuencia temporal (medio-diario, 2-diario y 5-diario), se ha calculado el error provocado en cada uno de los casos (**Fig. 9**) a lo largo de los puntos de observación. Por un lado, se han representado (**Fig. 9A**) los valores del error cuadrático medio (RMSE) que causa la técnica de *upscaling* citada, en cada una de las aproximaciones temporales, teniendo en cuenta todos los puntos de observación. Se observa un alto grado de desviación en la serie de 5 días en ambas instalaciones, alcanzando una desviación de 2,1 y 2,5 °C en el punto más cercano al pozo de vertido (1 m) respectivamente. La serie 2-diario provoca una desviación, que en el caso de la instalación SGS-1, es similar a la creada por la serie diario, alcanzando un valor de 1,6 °C y algo superior para el caso de la SGS-2 (1,9 °C). Las series diario y medio-diario crean una desviación similar en ambos casos, situándose a intervalos en valores algo inferiores la serie medio-diario, alcanzando una desviación media de 1,5 °C.

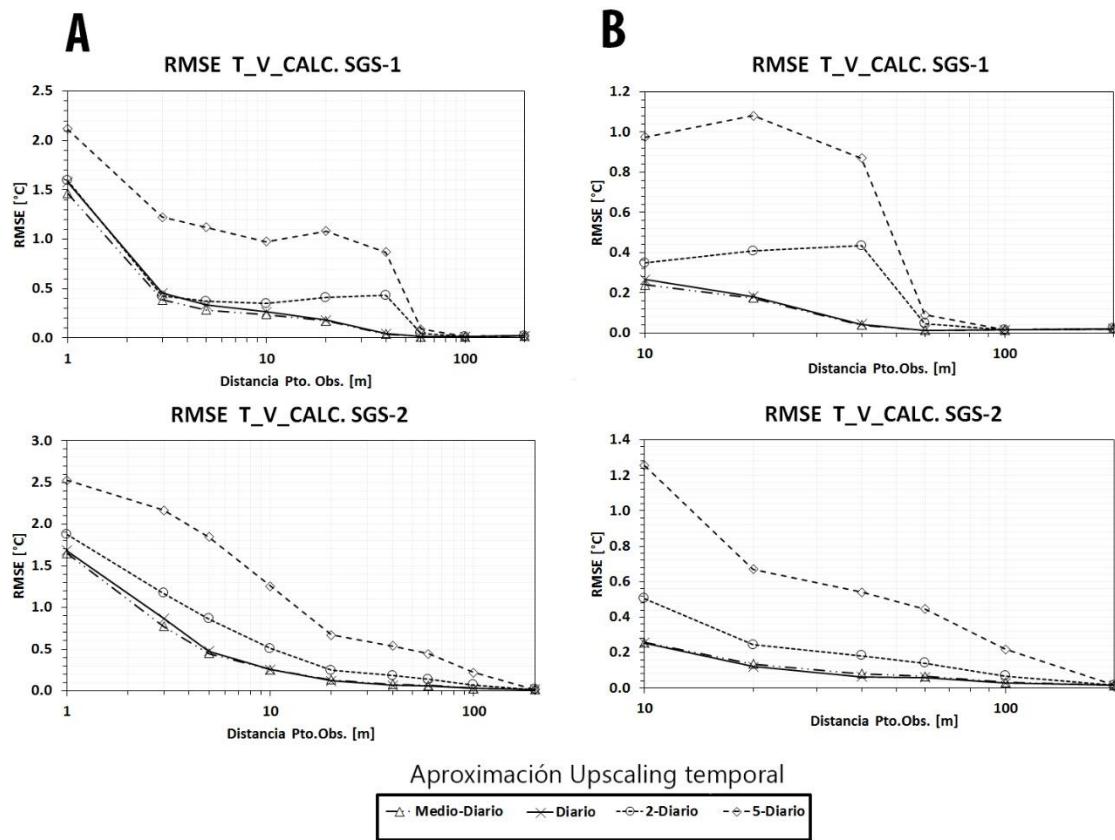


Fig. 9. Cálculo del RMSE variando la resolución temporal de la temperatura calculada en dos instalaciones (SGS-1 y SGS-2). A) Cálculo del error teniendo en cuenta todos los puntos de observación. B) Visualización gráfica de la evolución del error mediante la supresión de los puntos de observación cercanos al foco de emisión.

A continuación, se han suprimido los puntos de observación situados a distancias cercanas al pozo de vertido (1, 3 y 5 m), por considerarse demasiado influenciados por la variabilidad del régimen de explotación y por tanto no ser representativos. Mediante su representación gráfica (Fig. 9B), se puede observar que el rango de la desviación provocada en ambas instalaciones, por cada una de las aproximaciones temporales, ha disminuido del orden de 1 °C aproximadamente. En el caso de las series diario y medio-diario se ha conseguido una desviación que tiene su valor máximo en el primer punto de observación (10 m) y alcanza un valor de 0,25 °C.

8. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN

El análisis llevado a cabo en el presente trabajo ha puesto de manifiesto la complejidad del tratamiento que es necesario llevar a cabo a la hora de estudiar el régimen de explotación de las instalaciones geotérmicas.

Mediante las aproximaciones diarias, calculadas por medio de *upscaling*, de la temperatura de vertido, se ha conseguido una reducción del número de datos con los que trabajar de un 98,9%, esto hace posible que su implementación en modelos hidrogeológicos sea más eficiente, de

forma que se produce un ahorro de tiempo considerablemente alto en su simulación, pasando de una duración media de 10 h a 4 minutos. Las series calculadas con parámetros estadísticos descriptivos (media geométrica, Q_1 , Q_2 , Q_3 , máximo y mínimo) junto con el dato aleatorio, permiten obtener una aproximación global del rango de variabilidad de dicha temperatura además de comprobar el grado de desviación en cada caso. La temperatura calculada por medio de la potencia diaria disipada por la instalación se considera el dato con mayor índice de fiabilidad, puesto que deriva de la integración del régimen de funcionamiento real en cada uno de los casos. A partir de dicho valor se ha variado su resolución temporal (medio-diario, 2-diario y 5-diario) en dos de las instalaciones, cuyo tiempo de simulación es el mismo que en el caso anterior, para conseguir una visión más amplia de la evolución del error provocado.

Puesto que el régimen de funcionamiento de las explotaciones no sigue un patrón común, se han analizado cada una de estas de manera individual para su comparación. Las instalaciones SGS-1, SGS-3 y SGS-5 en general tienen un régimen de funcionamiento continuo, cuyos caudales promedio son los más elevados (661, 865 y 892 m³/día respectivamente), a excepción de pequeños intervalos de tiempo en los que no se produce el vertido de agua. Por el contrario, las instalaciones SGS-2 y SGS-4 desarrollan un régimen variable registrando caudales más bajos (457 y 265 m³/día), con intervalos prolongados en los que se encuentran apagadas. La demanda de climatización es únicamente para refrigeración en SGS-3 y SGS-4, a diferencia de las restantes que tienen un uso combinado de la misma (refrigeración y calefacción). Las plumas que alcanzan una mayor área de influencia térmica (100 y 200 m) son las pertenecientes a las instalaciones SGS-2 y SGS-3, siendo ambas las que registran las temperaturas de vertido más altas (>30°C) durante la época estival; en el caso de la instalación SGS-4 la pluma generada es de menor dimensión debido la realización de un vertido a menor temperatura que en el caso anterior (<30°C) además de un régimen variable, encontrándose apagada durante largos periodos. Las plumas de dimensiones más pequeñas son las generadas por las instalaciones SGS-1 y SGS-5 derivado de un uso combinado de la climatización, tanto para calefacción como para refrigeración, además de producir un vertido a temperaturas inferiores que en los primeros casos (<30°C).

A partir de las simulaciones en el modelo numérico de las series correspondientes a cada instalación, se ha calculado el error provocado por las aproximaciones realizadas mediante *upscaling* tomando como referencia la serie resultante del modelado de los datos reales de alta cadencia. Las temperaturas generadas a lo largo de los puntos de observación, considerando la distancia de 20 m representativa del alcance de la pluma térmica, han permitido deducir la evolución de la desviación. Se observa que las aproximaciones diarias realizadas mediante los valores mínimo y máximo son las que causan un rango de desviación promedio más amplio, comprendido entre 0,8 - 4,6°C y 1,2 - 3,2°C respectivamente, seguidas del resto de parámetros estadísticos cuyo valor promedio global de desviación estándar es de 0,73°C. La desviación mínima se da en el caso de la temperatura calculada comprendida entre 0,3 y 0,5°C. Se deduce por tanto que la técnica de *upscaling* cuya aproximación resulta más útil y fiable es la derivada de la temperatura calculada empíricamente a partir del régimen de funcionamiento real de cada explotación, la cual se ha observado que es el único parámetro en el que el total de las instalaciones analizadas se encuentran en un rango de desviación por debajo de 0,8°C.

Por otro lado, las aproximaciones realizadas a partir de la variación de la resolución temporal de la temperatura calculada en dos de las instalaciones estudiadas, demuestran que tanto la serie de valores medio-diarios como diarios, teniendo en cuenta todos los puntos de observación establecidos en el modelo, provocan los valores más bajos de desviación. Se deduce entonces,

que los aumentos de intervalos temporales realizados no son de utilidad. Además, mediante la eliminación de los puntos de observación cercanos al foco de emisión (1, 3 y 5m) se observa una reducción del rango de error del orden de 1°C aproximadamente situándose su máximo en el punto de 10 m con un valor de desviación de 0,25°C. Esto es debido a que los citados puntos se encuentran demasiado influenciados por su cercanía al foco de emisión. Este hecho indica que para poder reproducir el régimen térmico en puntos cercanos a los pozos de inyección se requeriría una simulación con cadencia horaria o incluso menor. Teniendo en cuenta que este entorno próximo al punto de vertido no es el objetivo, se pueden suprimir tales distancias en el análisis de errores, ya que la distancia media mínima a la que se sitúan en general los puntos de las redes de control piezométricas es de más de 20 m.

En base a la investigación realizada a lo largo del presente trabajo a partir de la integración del régimen de explotación de instalaciones geotérmicas, se puede establecer que los resultados obtenidos son considerados de gran utilidad e importancia puesto que se ha conseguido un método para la obtención de funciones de tiempo de cadencia diaria capaces de reproducir, con un error asumible, dichos regímenes de explotación incluso cuando su funcionamiento es muy variable.

9. CONCLUSIONS

The exploitation regime of geothermal systems does not follow a common pattern, which increases the difficulty of processing the data of such installations prior to their simulation in numerical models of heat flow.

By using the data obtained by the upscaling procedure of the temperature calculated from the dissipated power of each installation, both daily and half-daily cadence, it has been possible to reduce the amount of data to optimize its implementation in complex numerical models at urban scale. The deviation raised from the upscaling of the data sets has been considered acceptable and, therefore, useful.

The most relevant conclusions of this study, which should be considered in the numerical modeling of the heat regime in urban aquifers with shallow geothermal installations, are listed below:

1. The temperature and flow record with a 15-minute cadence is suitable to estimate the thermal power dissipated by the geothermal facilities.
2. The upscaling process that best fits the actual operation is the calculation of the injection temperature by integrating the daily dissipated energy.
3. The numerical modeling of the studied exploitation regimes can be efficiently implemented through daily resolution.
4. The error analysis performed indicates that, using the proposed upscaling procedure, the errors in the calculated thermograms are less than 0.4 ± 0.1 °C. These results add an additional uncertainty within the calibration process of numerical models and therefore should be considered during the estimation of thermal parameters.
5. The upscaling process with random temperatures has been found to be 0.6 ± 0.4 °C. This means that the simulations carried out using random measures for the reproduction of the thermal response in aquifers present higher associated uncertainty.

In conclusion, the present work depicts a great advance in the implementation process of real shallow geothermal systems in numerical models of heat flow, allowing an optimal management of renewable energy resources in urban environments.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Banks, D. (2009): Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches. *Hydrogeology Journal*, 17: 1149-1155.
- Barnolas, A. y Robador, A. (1991): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 383 (Zaragoza) y memoria*. IGME, Madrid. 44 p.
- Díaz, R., Fernández, J.P. y Álvarez, L. (2012): *Estudio comparativo de los simuladores de flujo subterráneo Visual MODFLOW y FEFLOW 6.0*. 7^a Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. 7 p.
- Diersch, J.G. (2009): *30 years of FEFLOW. A Brief Historical Review*. DHI-WASY GmbH. Alemania. 9 p.
- Directiva 2000/60/CE de 23 de octubre (2000): que establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*. Vol. 22.
- Epting, J. y Huggenberger, P. (2013): Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies – Definition of a potential natural state. *Journal of Hydrology*, 501: 193-204.
- García Gil, A. (2015): *Criterios técnicos para la gestión de recursos geotérmicos someros en acuíferos urbanos*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 283 p.
- Garrido, E.A., Arce, M.V. y Van Ellen, W. (2006): Modelo matemático de flujo subterráneo del acuífero aluvial del Ebro en el entorno de Zaragoza. *De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada. serie Hidrogeología y Aguas Subterránea*. Alicante. 657 p.
- Garrido, E., Sánchez Navarro, J.A. y Coloma, P. (2010): Aprovechamiento geotérmico somero del acuífero aluvial urbano de Zaragoza: primeros resultados. *Geogaceta*, 49: 119-122.
- Geoplatt (2010): *Visión a 2030*. Ministerio Ciencia e Innovación, Madrid. 51 p.
- Jaudin, F. (2013): General Report of the current situation of the regulative framework for the SGE systems. *Regeocities*, 50 p.
- Luzón, A., Pérez, A., Soriano, M. A., Gil, H., Yuste, A., y Pocoví, A. (2010): El relleno de paleodolinas en la cuenca del Ebro y sus posibles aportaciones a la evolución geodinámica y ambiental durante el Pleistoceno. *Geogaceta* 48: 11-14.
- Moreno Merino, L., Garrido Schneider, E.A, Azcón González de Aguilar, A., Duran Alsero, J.J. (2008): *Hidrogeología Urbana de Zaragoza*. IGME, Madrid. 200 p.
- Parsons, M.L. (1970): Groundwater Thermal Regime in a Glacial Complex. *Water Resources Research*, 6: 1701-1720.
- Quirantes, J. (1978): *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros*. Diputación Provincial de Zaragoza. 200 p.

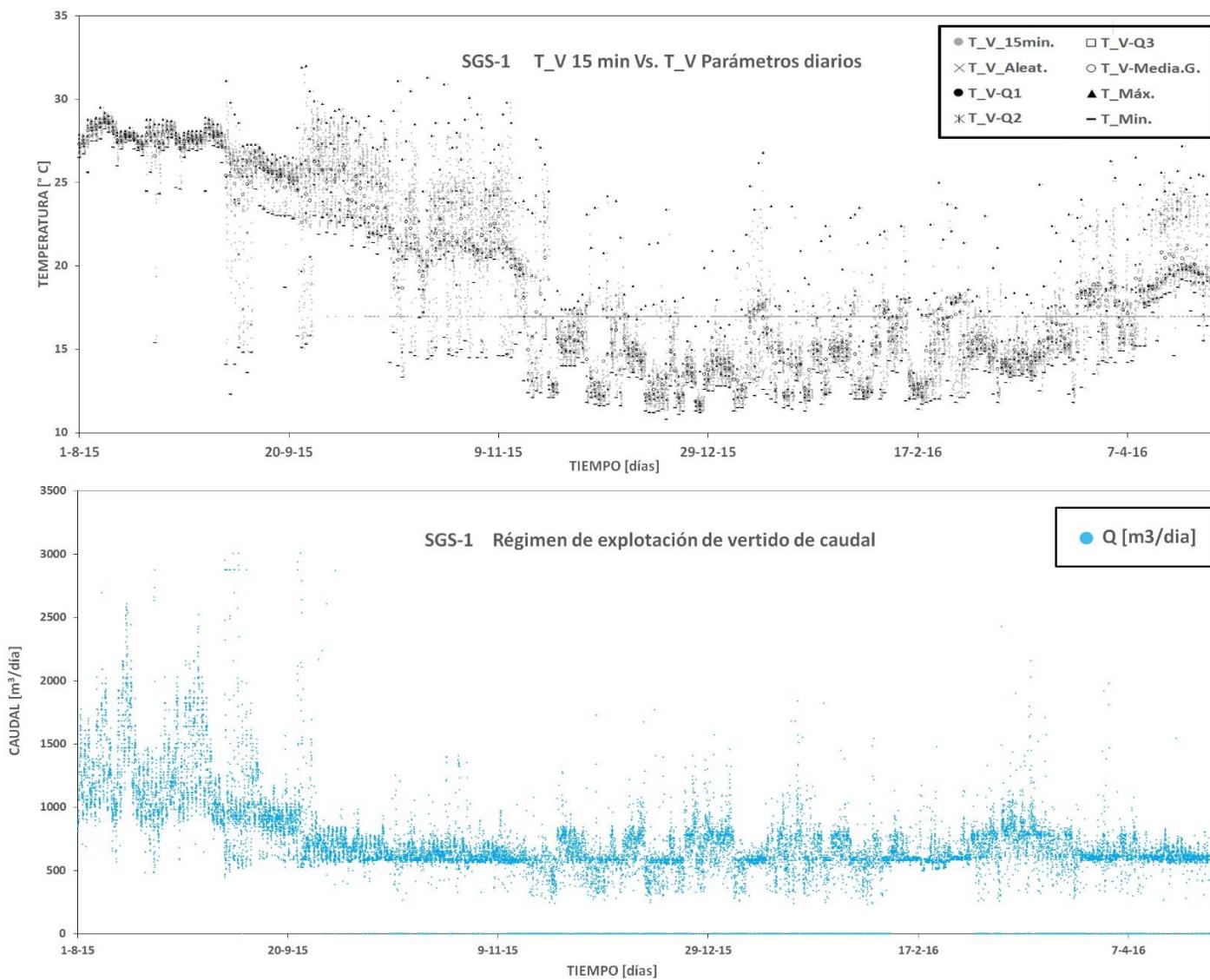
Sánchez Navarro, J.A., Jiménez, N., Galve, P., Asta, M.P., Gómez, L., y Fuentes, J. (2004): *Estudio hidrogeológico de la subsidencia y los humedales en el entorno de Zaragoza*. Ayuntamiento de Zaragoza (inédito).

Simón, J.L., Soriano, M.A., Pocoví, A., Arlegui, L.E., Casas, A.M., Liesa, C.L., Luzón, A., Pérez, A., Pueyo, O., Pueyo, E., Mochales, T., Gracia Abadías, F.J. y Ansón, D. (2009): *Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: El caso de Zaragoza*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra: 303-315.

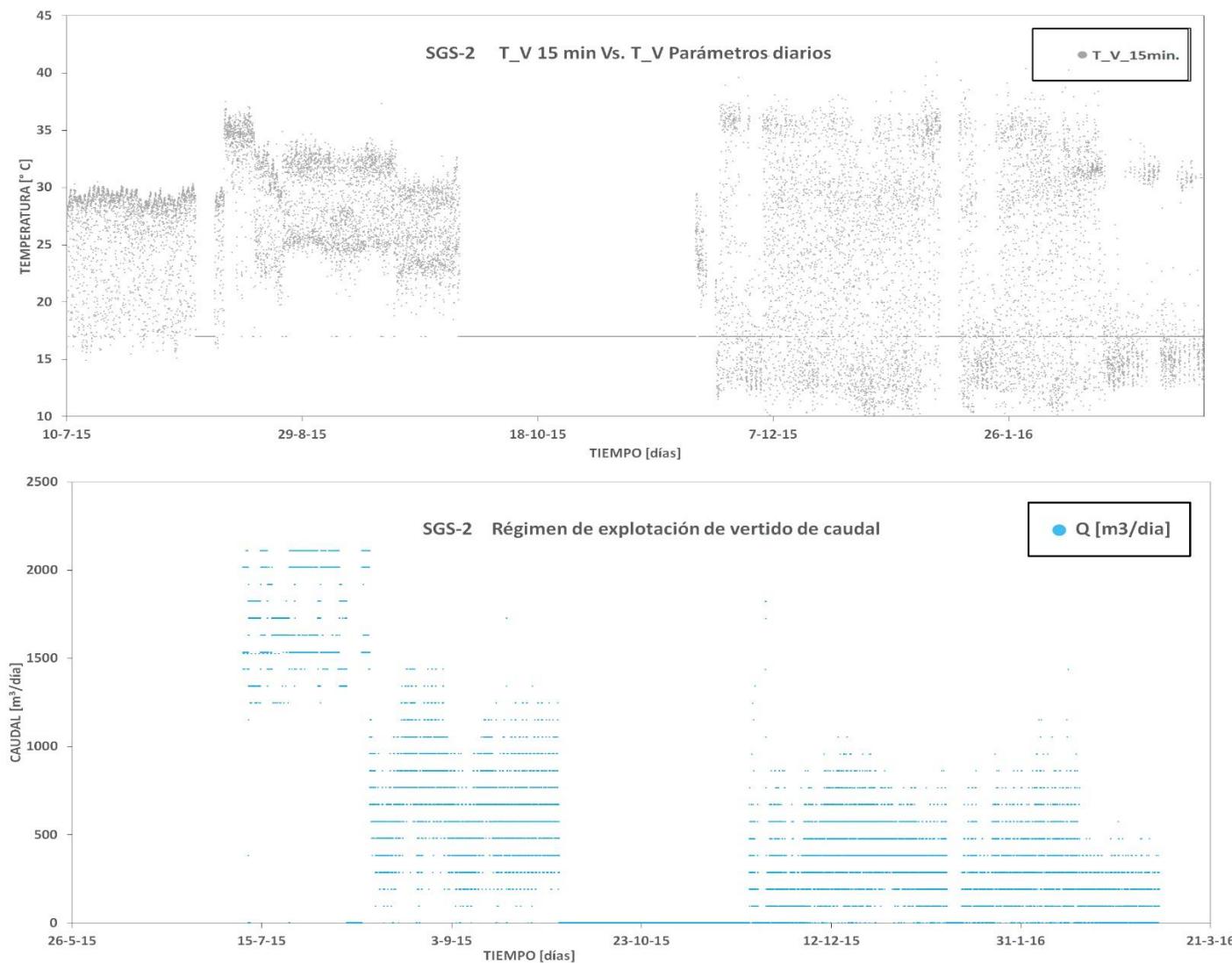
Trefry, M. G. y Muffels, C. (2007): *FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool*. Ground Water: 525-528.

11. ANEXO 1. Gráficas del régimen de explotación de las instalaciones analizadas.

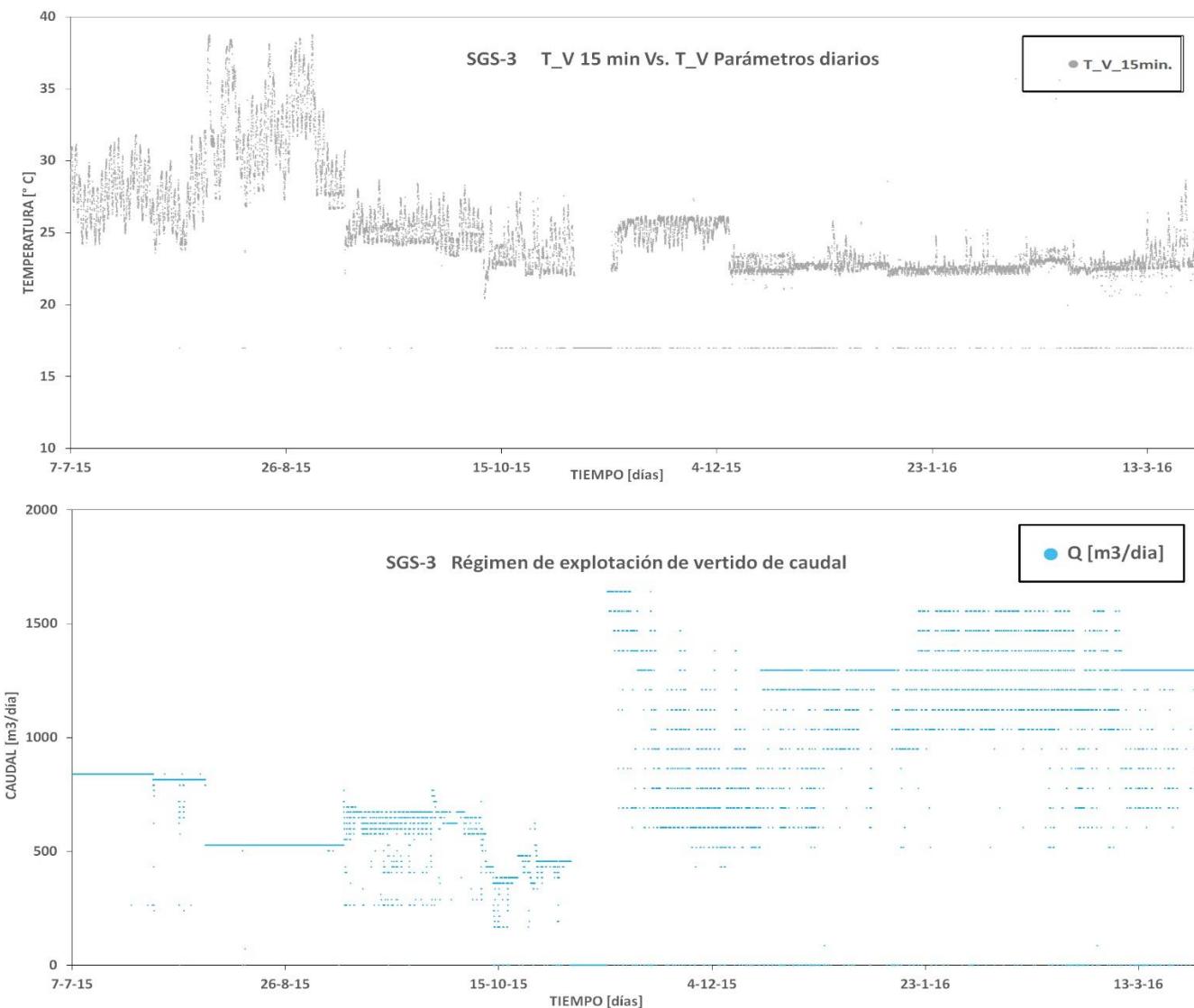
Anexo 1A. Gráficas del régimen de funcionamiento real de la instalación SGS-1 a partir de la temperatura y el caudal de vertido.



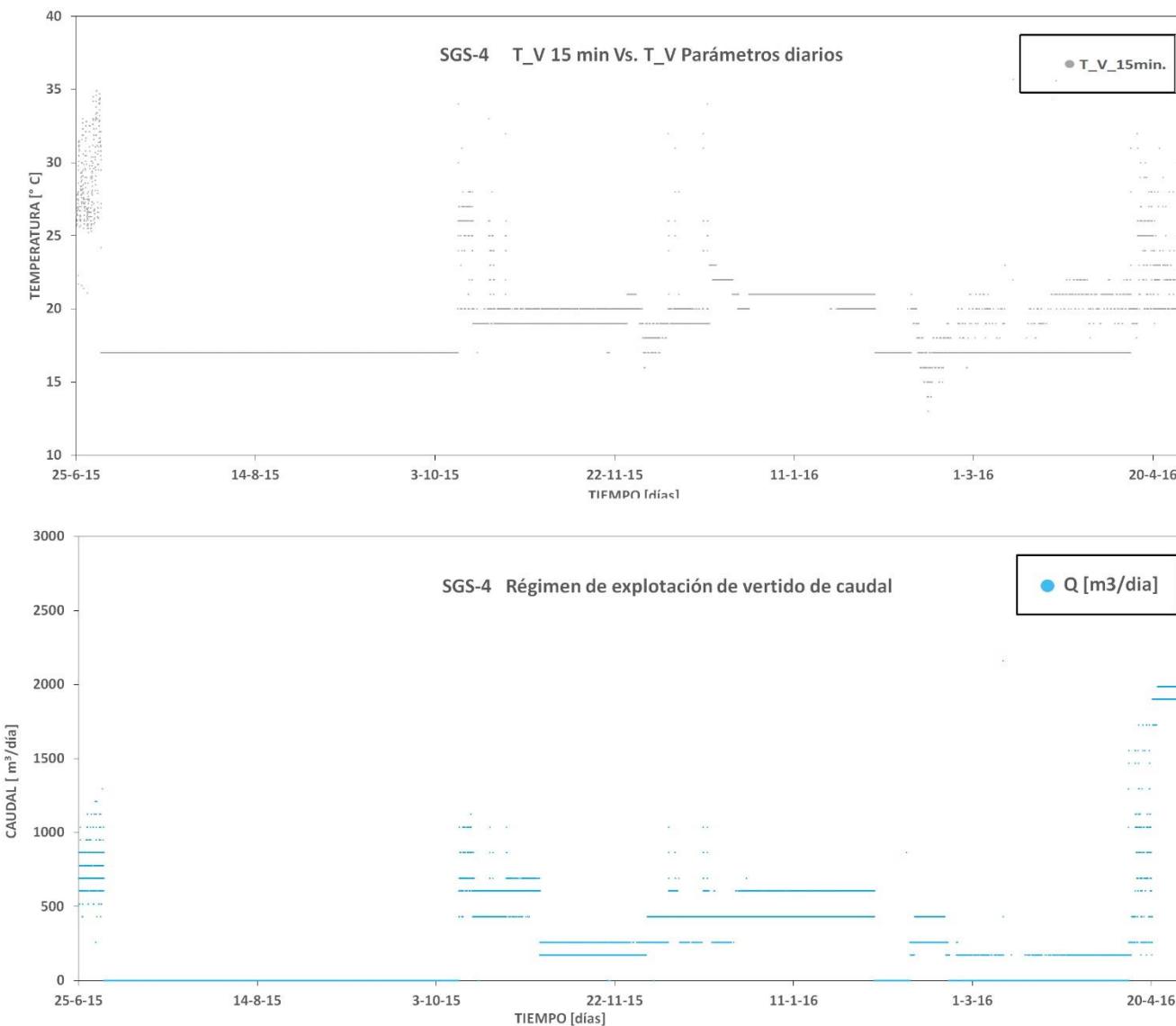
Anexo 1B. Gráficas del régimen de funcionamiento real de la instalación SGS-2 a partir de la temperatura y el caudal de vertido.



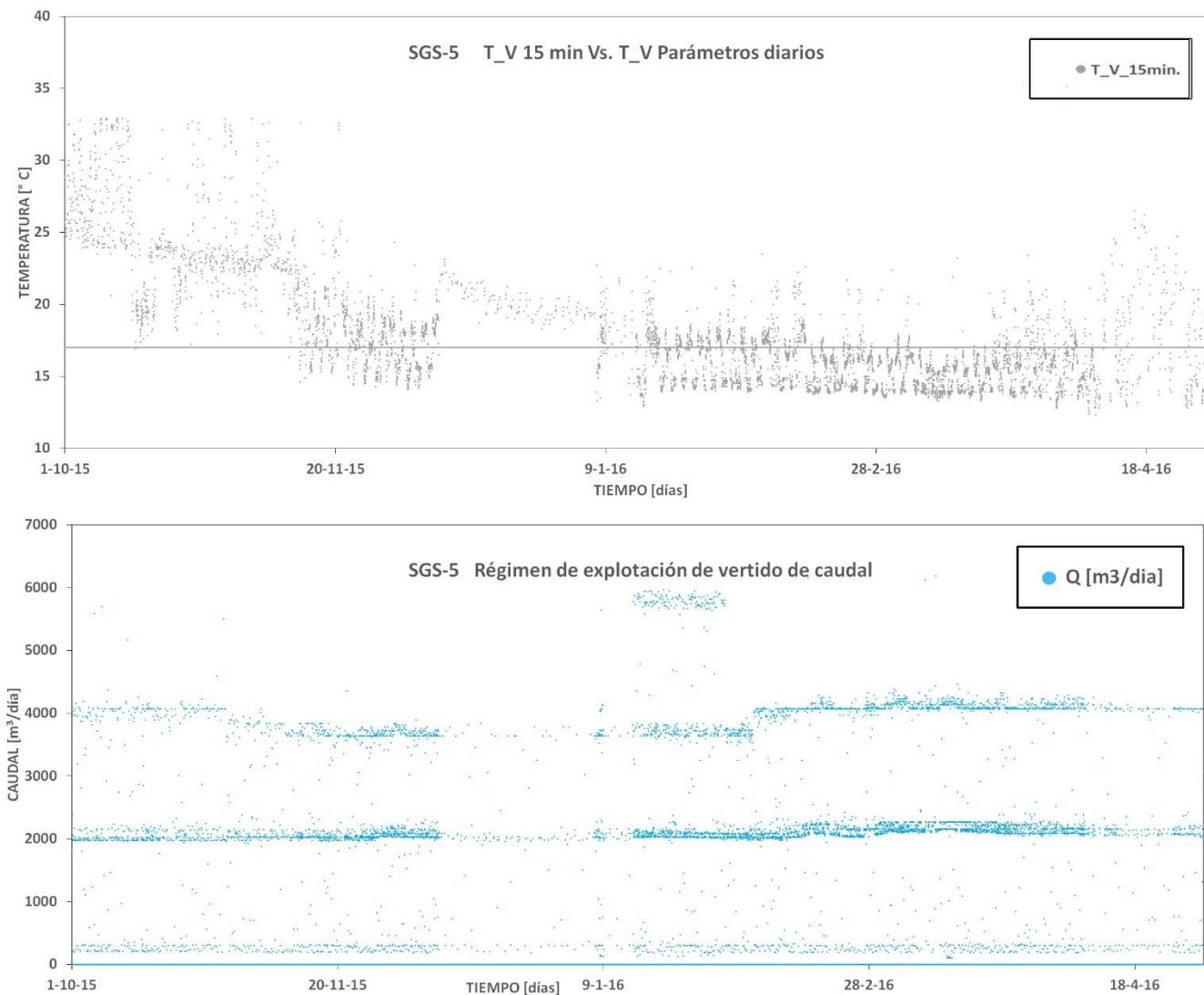
Anexo 1C. Gráficas del régimen de funcionamiento real de la instalación SGS-3 a partir de la temperatura y el caudal de vertido.



Anexo 1D. Gráficas del régimen de funcionamiento real de la instalación SGS-4 a partir de la temperatura y el caudal de vertido.



Anexo 1E. Gráficas del régimen de funcionamiento real de la instalación SGS-5 a partir de la temperatura y el caudal de vertido.



12. ANEXO 2. Ampliación de la Fig. 5. Plumás generadas por las instalaciones analizadas.

