

# ESTUDIO EN PROFUNDIDAD SOBRE LAS POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO EN NAVARRA E IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS CON MAYOR POTENCIAL





# INDICE

1	OBJETIVOS .....	5
2	INTRODUCCIÓN .....	7
3	CONCEPTOS GENERALES .....	11
3.1	DEFINICIONES .....	12
3.1.1	ENERGIA GEOTERMICA.....	12
3.1.2	GRADIENTE GEOTÉRMICO .....	12
3.1.3	YACIMIENTOS GEOTERMICOS .....	13
3.1.4	ANOMALÍA GEOTÉRMICA.....	23
3.1.5	FLUJO GEOTÉRMICO.....	24
3.1.6	ACUÍFERO .....	25
3.1.7	FORMACIÓN GEOTÉRMICA .....	26
3.1.8	AGUAS MINERALES Y AGUAS TERMALES .....	26
3.1.9	CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS.....	28
3.1.10	GEOTERMÓMETROS.....	29
3.1.11	PARÁMETROS TÉRMICOS DEL TERRENO .....	30
3.1.12	TRITIO .....	38
3.2	LEGISLACIÓN DE REFERENCIA .....	39
3.3	METODOLOGÍA, RECURSOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS PARA LA INVESTIGACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS .....	41
3.3.1	METODOLOGÍA.....	41
3.3.2	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN .....	43
3.4	CONTENIDO MÍNIMO DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN GEOTÉRMICA.....	52
3.5	IMPACTOS DERIVADOS DE LA EXPLOTACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS.....	53
4	INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE NAVARRA CON INTERÉS GEOTÉRMICO .....	56
4.1	GRANDES DOMINIOS TECTÓNICOS Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES .....	57
4.2	GRANDES UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....	69
4.2.1	Unidad Hidrogeológica Norte.....	74
4.2.2	Unidad hidrogeológica de Aralar (Aralar – Ultzama) .....	78
4.2.3	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE URBASA (URBASA – ANDÍA).....	83
4.2.4	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LÓQUIZ.....	87
4.2.5	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LARRA.....	90

4.2.6	Unidad hidrogeológica de Pamplona – Ochagavía.....	90
4.2.7	Unidad hidrogeológica de Leyre.....	92
4.2.8	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE ALAIZ.....	96
4.2.9	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DEL EBRO Y AFLUENTES.....	97
4.2.10	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DEL SUR.....	101
4.2.11	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE FITERO.....	102
4.3	INFORMACIÓN ADICIONAL DE LOS ALMACENES POTENCIALES SUBTERRÁNEOS DE CO <sub>2</sub> .....	105
4.3.1	ALMACÉN RONCAL – ILLÓN (PEGE13).....	106
4.3.2	ALMACÉN LEYRE – BERDÚN (PEGE14).....	108
4.3.3	ALMACÉN RIOJA NORTE (CDGE24).....	110
4.3.4	ALMACÉN ARNEDO (PEGE03).....	111
4.3.5	ALMACÉN MAGALLÓN (PEGE04).....	111
4.4	FORMACIONES GEOTÉRMICAS DESCRITAS EN LA CUENCA DEL EBRO.....	111
4.5	MANANTIALES DE NAVARRA.....	118
4.6	MANIFESTACIONES TERMALES EN NAVARRA.....	124
4.6.1	SURGENCIAS TERMALES DE BAÑOS DE FITERO.....	125
4.6.2	SURGENCIAS TERMALES DE BETELU.....	128
4.6.3	SURGENCIAS TERMALES DE IBERO – ETXAURI – BELASCOAIN.....	129
4.7	PRINCIPALES ZONAS DE INTERÉS GEOTÉRMICO.....	131
5	APLICACIONES Y TECNOLOGÍAS GEOTÉRMICAS.....	140
5.1	GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD.....	141
5.1.1	PLANTAS DE VAPOR SECO.....	141
5.1.2	PLANTAS FLASH.....	142
5.1.3	PLANTAS DE CICLO BINARIO.....	143
5.1.4	PLANTAS DE CICLO COMBINADO.....	144
5.2	USO DIRECTO DEL CALOR.....	145
5.2.1	BOMBAS DE CALOR.....	145
5.2.2	OTROS.....	150
5.2.3	ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO DE ENERGÍA TÉRMICA.....	152
5.2.4	YACIMIENTOS PROFUNDOS.....	153
5.2.5	OTROS USOS.....	154

6	SITUACIÓN ACTUAL DE LA GEOTERMIA .....	157
6.1	GEOTERMIA EN EL MUNDO.....	158
6.2	GEOTERMIA EN EUROPA.....	161
6.3	GEOTERMIA EN ESPAÑA.....	164
7	ESTUDIO SOBRE INSTALACIONES GEOTÉRMICAS EXISTENTES EN NAVARRA .....	167
7.1	LISTADO DE INSTALACIONES EXISTENTES EN NAVARRA.....	168
7.2	VISITAS A INSTALACIONES GEOTERMICAS .....	171
8	ANÁLISIS DE DATOS SOBRE LAS INSTALACIONES EXISTENTES EN NAVARRA.....	227
8.1	ANÁLISIS DE INSTALACIONES EXISTENTES .....	228
8.1.1	ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES EXISTENTES POR USO .....	228
8.1.2	ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES EXISTENTES POR POTENCIA INSTALADA .....	229
8.2	ANÁLISIS DE INSTALACIONES VISITADAS.....	230
8.2.1	ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES VISITADAS ATENDIENDO AL FUNCIONAMIENTO 230	
8.2.2	ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES VISITADAS ATENDIENDO A LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO 231	
8.2.3	ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES VISITADAS POR POTENCIA.....	232
8.2.4	ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES VISITADAS POR TIPO DE SISTEMA INSTALADO	233
9	ANÁLISIS COMPARATIVOS DE COSTES DE INSTALACIONES .....	234
9.1	ANÁLISIS EN INSTALACIONES DE BAJO CONSUMO .....	235
9.2	ANÁLISIS EN INSTALACIONES DE GRAN CONSUMO.....	238
10	CONCLUSIONES .....	242
10.1	CONCLUSIONES GEOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS.....	243
10.2	CONCLUSIONES SOBRE LAS INSTALACIONES DE GEOTERMIA EN NAVARRA.....	253
10.3	CONCLUSIONES GENERALES.....	257
11	BIBLIOGRAFIA .....	259



# 1 OBJETIVOS

El presente documento pretende dar respuesta a las siguientes cuestiones planteadas por el **Servicio de Energía, Minas y Seguridad Industrial, Departamento de Desarrollo Económico** entidad que encarga el presente estudio:

- Recopilación y análisis de los datos existentes en la actualidad a nivel geológico sobre potencial geotérmico de Navarra, incluido un análisis de los principales acuíferos termales y no termales.
- Análisis del parque geotérmico actual en Navarra, incluido su estado actual y grado de satisfacción.
- Informe final de conclusiones que evalúe las posibilidades reales del aprovechamiento geotérmico en Navarra y que identifique as zonas de mayor potencial.
- Análisis de costes de sustitución de instalaciones por sistemas como la geotermia, aerotermia, etc.

Para ello, se procede a la realización del presente estudio por parte de MyA Ingeniería, con la colaboración de Fran Sanz Morales.

Este estudio integra dos visiones de la geotermia, la visión puramente geológica e hidrológica orientada a identificar el potencial geotérmico de Navarra y sus acuíferos termales y no termales. Y otra visión desde el punto de vista de ingeniería de instalaciones, en la cual se analizan las tipologías de instalaciones geotérmicas existentes, su incidencia en el mundo y particularmente en Navarra.

Además, se tratan de ofrecer una serie de conclusiones desde varios puntos de vista que puedan aclarar los puntos anteriormente planteados y orientar a las instituciones públicas en la toma de decisiones estrategias en lo que a instalaciones de geotermia se refiere.



## 2 INTRODUCCIÓN

La sociedad actual, en el contexto de la reducción de la dependencia energética exterior, de un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles y de una mayor sensibilización ambiental, demanda cada vez más la utilización de las energías renovables y la eficiencia en la generación de electricidad como fundamentos para conseguir un desarrollo sostenible desde un punto de vista económico, social y ambiental.

Además, la política energética debe posibilitar, mediante la búsqueda de la eficiencia energética en la generación de electricidad y la utilización de fuentes de energía renovables, la reducción de gases de efecto invernadero de acuerdo con los compromisos adquiridos con la firma del protocolo de Kioto.

Se consideran "renovables" el conjunto de fuentes energéticas primarias que tienen su origen en la radiación solar, ya sea de forma directa como la solar térmica o fotovoltaica o de forma indirecta como la eólica, hidroeléctrica y biomasa, pero también se incluye la energía geotérmica. La energía geotérmica a diferencia del resto de energías renovables tiene su origen en el calor interior de la Tierra que se alimenta de la desintegración de isótopos radiactivos, de movimientos diferenciales entre las distintas capas que constituyen la Tierra y del calor latente de cristalización del núcleo externo.

Todos los procesos geodinámicos que suceden en la Tierra, desde los procesos más superficiales, hasta los volcanes, las intrusiones, los terremotos, la formación de cordilleras y el metamorfismo, son controlados por la transferencia y generación de calor en su interior. El calor es asimismo el motor de la tectónica de placas, que involucra a la litosfera y a la astenosfera, y de otros procesos a mayor profundidad, como los movimientos de convección entre el manto y el núcleo externo. Han pasado ya más de 250 años desde que se pudo constatar el hecho de que en las minas, la temperatura aumenta con la profundidad a un ritmo de, aproximadamente, 1 °C cada 30 m. También, la existencia en determinadas regiones del planeta, de volcanes con erupción periódica de rocas en estado de fusión, de fumarolas con vapores y gases calientes que pueden alcanzar temperaturas superiores a los 1.000 °C, de fuentes termales y otras manifestaciones térmicas atestiguan la existencia de un calor que proviene del interior de la Tierra.

Geotermia es una palabra de origen griego, que deriva de "geos" que quiere decir tierra, y de "thermos" que significa calor, es decir, el calor de la Tierra. El término anterior se emplea indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil.

Hasta hace relativamente pocos años, la utilización de la energía térmica de la Tierra ha estado restringida a regiones del planeta donde condiciones geológicas favorables hacen posible la transferencia de calor desde zonas calientes profundas hasta la superficie, o muy cerca de ella, y el posterior aprovechamiento de éste en forma de agua caliente en fase líquida o vapor.

Además del calor interno, la superficie de la Tierra recibe del Sol cada segundo, en forma de calor,  $2 \times 10^{17}$  J, que es cuatro órdenes de magnitud superior al calor geotérmico. Esa energía

penetra a escasa profundidad en el subsuelo, haciendo que la superficie del planeta se mantenga a una temperatura promedio de 15°C. Esta energía es irradiada de nuevo al espacio por lo que no interfiere en los procesos energéticos internos de la Tierra.

Por otro lado, la aplicación práctica que se puede obtener del fluido geotermal depende de su calor o en otras palabras, de su entalpía. La entalpía es la cantidad de energía térmica que un fluido u objeto son capaces de intercambiar con el medio que les rodea. Sin embargo, debido a que no existen aparatos capaces de medir la entalpía de los fluidos contenidos en el subsuelo, se utiliza la temperatura como parámetro determinante de las aplicaciones. Esto es porque temperatura y entalpía pueden considerarse a grandes rasgos proporcionales.

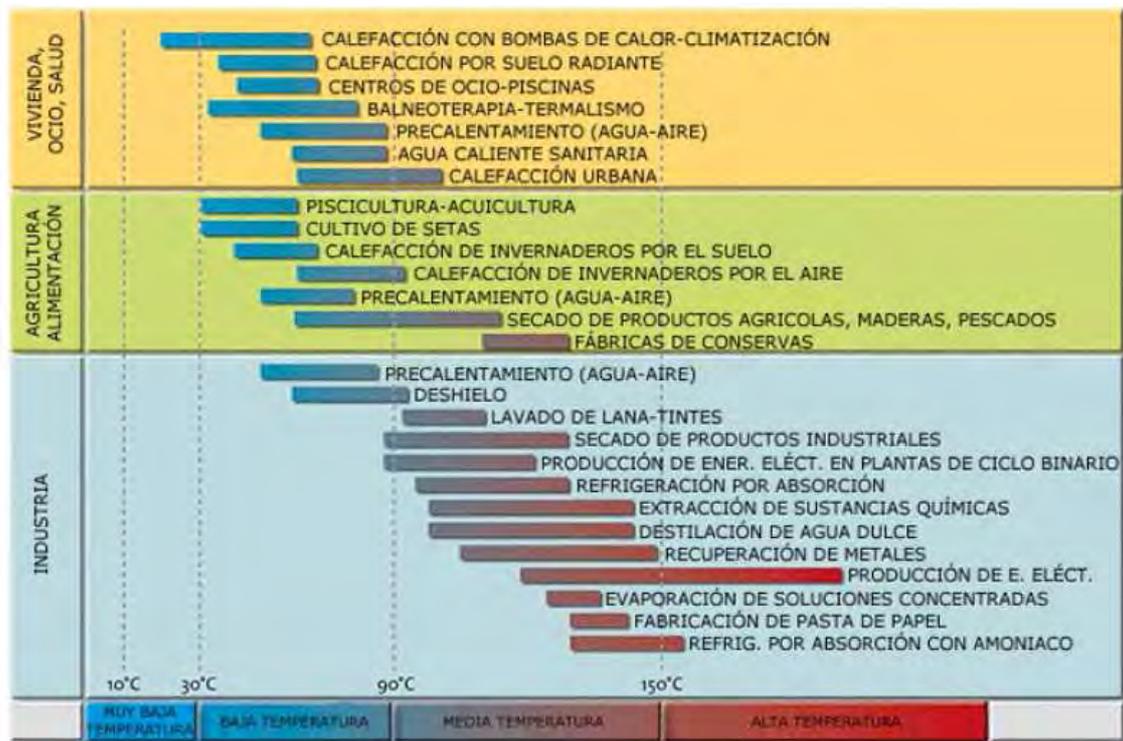


Ilustración 1 Clasificación de las aplicaciones en función de la temperatura.  
Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'DEME et du BRGM.

Así pues, se establecen las cuatro categorías siguientes para la energía geotérmica:

- Alta temperatura: más de 150 °C. Una temperatura superior a 150 °C permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.
- Media temperatura: entre 90 y 150 °C. Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales.
- Baja temperatura: entre 30 y 90 °C. Su contenido en calor es insuficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para calefacción de edificios y en determinados procesos industriales y agrícolas.

- Muy baja temperatura: menos de 30 °C. Puede ser utilizada para calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor.

En lo que llevamos de siglo XXI, el máximo interés se sitúa en los yacimientos geotérmicos profundos, con escasa o incluso nula permeabilidad, pero que pueden ser aprovechados para la producción de electricidad tras la estimulación del yacimiento. La búsqueda de este tipo de yacimientos y su investigación requieren una fuerte dotación económica ya que precisa tecnologías altamente sofisticadas y de elevado riesgo. Sin embargo, los datos económicos de los proyectos actualmente en desarrollo en países como Francia y Alemania, permiten contemplar el futuro de la energía geotérmica en España con gran esperanza.



## 3 CONCEPTOS GENERALES

### 3.1 DEFINICIONES

#### 3.1.1 ENERGIA GEOTERMICA

**Energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra.**

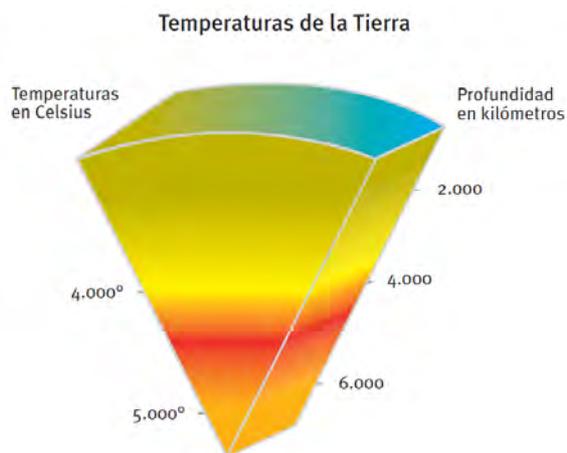
La definición anterior es oficial en Alemania (VDI 4640) y ha sido adoptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC). Esto quiere decir que la energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia.

Esto quiere decir que el calor contenido en masas de agua superficial, continental o marino, cuyo aprovechamiento también es posible mediante intercambiadores y bombas de calor, no se encuentra dentro de los límites considerados como geotermia.

Sin embargo, el calor contenido en rocas y suelos es demasiado difuso para ser extraído directamente de forma económica, siendo necesario disponer de un fluido, generalmente agua, para transportar el calor hacia la superficie de forma concentrada, mediante sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales, o mediante intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a poca profundidad en el subsuelo y otras tecnologías que se verán más adelante.

#### 3.1.2 GRADIENTE GEOTÉRMICO

Es la variación de la temperatura con la profundidad, expresado en  $^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ . Este gradiente geotérmico adopta valores normales de 2,5 - 3 $^{\circ}\text{C}$  cada 100 metros (gradiente geotérmico normal), salvo en aquellas situaciones en las que existe una anomalía geotérmica que haga variar dicho gradiente. Asumiendo un valor teórico promedio de 30 $^{\circ}\text{C}/\text{Km}$  y un promedio de temperatura media anual de 12 $^{\circ}\text{C}$  en superficie, los 25 $^{\circ}\text{C}$  se alcanzarían a 430 metros de profundidad y los 55 $^{\circ}\text{C}$  a 1.430 metros (Somogyi et al, 2017).



Fuente: Manual de geotermia del IDAE

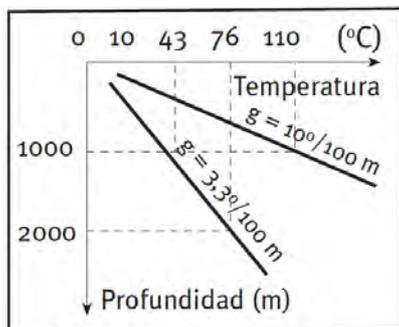


Ilustración 2. Gradiente geotérmico

Fuente: [Manual de geotermia del IDAE](#)

En regiones muy delimitadas y específicas del globo, el gradiente es muy superior al gradiente normal. Se trata de regiones de gradiente geotérmico anómalo en las que el incremento de temperatura con la profundidad es muy superior a los 3°C/100 m. Estas regiones se sitúan sobre áreas geológicamente activas de la corteza terrestre, como se verá a continuación.

El gradiente geotérmico es una medida fácil de obtener y permite conseguir una estimación de la cantidad de flujo de calor que se transmite desde las zonas internas de la corteza hacia las zonas externas. El flujo de calor se expresa en unidades de  $\text{mW/m}^2$  y, aunque más difícil de medir en campo, representa la cantidad de calor geotérmico que se desprende por unidad de superficie.

Bajo la corteza terrestre, que tiene un espesor muy variable de entre 5 y 6 km en zonas oceánicas y de unos 20-65 km en zonas continentales, se sitúa el manto con un espesor de 2.900 km y bajo este, el núcleo, con un espesor de unos 3.500 km.

### 3.1.3 YACIMIENTOS GEOTERMICOS

Un recurso geotérmico es una concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción económica es potencialmente posible. Si en un área geográfica determinada se cumplen los requisitos necesarios (geológicos y geotérmicos) para que la explotación de los recursos geotérmicos existentes en el subsuelo sea económicamente viable, se habla de yacimiento geotérmico (Llopis y Rodrigo, 2010).

Los yacimientos geotérmicos pueden clasificarse en cuatro categorías en base a su temperatura. Los rangos que marcan el límite entre unas y otras son los siguientes (Llopis y Rodrigo, 2010):

- Yacimientos geotérmicos de alta temperatura: mayor de 150°C
- Yacimientos geotérmicos de media temperatura: entre 90°C y 150°C
- Yacimientos geotérmicos de baja temperatura: entre 30°C y 90°C
- Yacimientos geotérmicos de muy baja temperatura: menos de 30°C

En diferentes fuentes bibliográficas encontramos ligeras diferencias en los rangos de temperatura, como se observa en el siguiente cuadro:

TIPO	TIPO DE TERRENO	TEMPERATURA	USO PRINCIPAL
Alta entalpía		> 150°C	Electricidad
Media entalpía		150-100°C	Electricidad, ciclos binarios
Baja entalpía	Sedimentos profundos	< 100°C	Calor de distrito
	Zonas volcánicas		
	Aguas termales	50-22°C	Balnearios
Muy baja entalpía	Aguas subterráneas	22-10°C	Climatización
	Subsuelo con o sin agua	25-5°C	

Fuente: **Lago et al. (2015)**. Clasificación de yacimientos geotérmicos según entalpía creciente.

En otras fuentes bibliográficas es frecuente observar una clasificación ligeramente diferente, diferenciándose yacimientos de alta, media, baja y muy baja entalpía (**IDAE e IGME, 2008**):

Recursos geotérmicos	Temperaturas	Tecnología	Aplicación	
Muy baja entalpía	5-25°C	Utiliza bomba de calor	Usos directos Climatización	
Baja entalpía	25-50°C	Puede precisar bomba de calor	Usos directos	
	50-100°C		Usos directos	
	Media entalpía	100-150°C	Ciclos binarios	Electricidad Procesos
Alta entalpía	>150°C		Electricidad	
No convencionales	EGS - HDR	>150°C	Ciclos binarios	Electricidad
	Supercríticos	>300°C		Electricidad Hidrógeno

Es frecuente utilizar el término “entalpía” en lugar de “temperatura”. La entalpía es una propiedad de cualquier objeto o fluido, que representa la cantidad de calor que éste es capaz de intercambiar con su entorno. La práctica habitual de medir la temperatura de los fluidos geotermales utilizados en las instalaciones geotérmicas ha hecho que ambos términos se hayan considerado proporcionales (**Llopis y Rodrigo, 2010**).

Geothermal resources	Temperature (°C)				
	Muffler and Cataldi [30]	Hochstein [37]	Benderitter and Corny [38]	Nicholson [39]	Axelsson and Gunnlaugsson [40]
Low-enthalpy resources	<90	<125	<100	≤ 150	≤ 190
Intermediate-enthalpy resources	90–150	125–225	100–200	–	–
High-enthalpy resources	>150	>225	>200	>150	>190

Fuente: **Porowski (2018)**. Clasificación de recursos geotérmicos según entalpía del sistema.

Los requisitos necesarios desde un punto de vista geológico para que exista un yacimiento geotérmico de alta energía son los siguientes: a) la presencia de una formación geotérmica, es decir, una formación geológica profunda y de carácter permeable que actúe como almacén. Se trataría de un acuífero, con capacidad de almacenar un fluido y permitir el flujo en su interior; b) un flujo de calor interno que caliente la formación geotérmica; c) una formación geológica superficial y de carácter impermeable (arcillosa o margosa) que dificulte la disipación del calor interno en superficie. (Gobierno de Aragón, 2001). Las zonas potencialmente explotables de alta energía están asociadas por lo general a sectores de la corteza terrestre de carácter distensivo, o bien en sectores o áreas de tracción dentro de zonas compresivas.

En el caso de que se trate de un yacimiento geotérmico de baja energía, los requisitos necesarios desde un punto de vista geológico serían la existencia de zonas con un gradiente geotérmico normal o ligeramente superior, junto con la presencia de unidades acuíferas (que almacenen y permitan el flujo en su interior) a suficiente profundidad. Con un gradiente geotérmico normal de 3°C/100 metros, a una profundidad de 2.000 metros se puede alcanzar una temperatura de 70°C. (Llopis y Rodrigo, 2010). En este último supuesto, también cabe la posibilidad de que la estructura geológica favorezca un rápido ascenso de las aguas subterráneas a superficie.

TIPO	FLUIDOS NATURALES	SUBTIPO	TEMPERATURA	Uso	
				ACTUAL	POTENCIAL
Convectivo (Hidrotermal)	SI	Continental	A, I, B	Eléctrica, usos directos	
		Submarino	A	Ninguna	Eléctrico
Conductivo	NO	Somero (<400 m)	B	Directos (y GHP)	
		Roca seca caliente (EGS)	A, I	Prototipos	Eléctrico, directos
		Reservorios de magma	A	En desarrollo	Eléctricos
Acuíferos profundos	SI	Acuíferos hidrostáticos	A, I, B	Directos	Eléctrico, directos
		Geopresurizados			

Fuente: **Lago et al. (2015)**. Tipos de recursos geotérmicos. Temperaturas (A: alta, >180°C; I: Intermedia, 180-100°C y B: Baja <100°C); EGS: Sistemas geotérmicos estimulados; GHP: Bombas de calor geotérmico.

Indudablemente, el tipo de tecnología disponible para la extracción y/o intercambio de calor en instalaciones geotérmicas condicionará en gran medida la viabilidad del recurso geotérmico. Estudios detallados sobre la aplicabilidad de la energía geotérmica fueron llevados a cabo por el Instituto Geológico y Minero (IGME 1982, código 00749 e IGME, 1982, código 00751).

El Atlas de la Energía Geotérmica en Aragón (Gobierno de Aragón, 2001) define la potencialidad geotérmica de la región en base a dos parámetros: la temperatura del agua y el caudal (surgente o extraíble por captación):

Temperatura	Caudal (l/s)	Potencialidad	Usos potenciales (*)
> 20°C y <30°C	< 5 l/s	MUY BAJA	Bombas de calor
	> 5 y <50 l/s	BAJA	Invernaderos, balneoterapia
	> 50 l/s	MEDIA	Calefacción
> 30°C y <60°C	< 2 l/s	BAJA	Invernaderos, balneoterapia
	> 2 y <50 l/s	MEDIA	Calefacción
	> 50 l/s	ALTA	Piscifactoria, procesos industriales
> 60°C y <80°C	< 2 l/s	MEDIA	Calefacción
	> 2 y <25 l/s	ALTA	Piscifactoria, procesos industriales
	> 25 l/s	MUY ALTA	Producción de energía
> 80°C		MUY ALTA	Producción de energía

(\*) Cada potencialidad dada implica los usos de las potencialidades inferiores

Una amplia información de diferentes términos relacionados con la energía geotérmica puede encontrarse también en [Tecnología y Recursos de la Tierra \(2011\)](#).

Cuando en un área geográfica concreta se dan determinadas condiciones geológicas y geotérmicas favorables para que se puedan explotar de forma económica los recursos geotérmicos del subsuelo, se dice que allí existe un yacimiento geotérmico. Las condiciones no son las mismas para cada uno de los cuatro tipos de recursos geotérmicos que se han mencionado en el apartado anterior.

Los yacimientos geotérmicos pueden ser clasificados conforme a diferentes criterios: el contexto geológico, el nivel de temperatura, el modo de explotación y el tipo de utilización.

La clasificación más común es la del nivel de temperatura, y es la que se ha tenido en cuenta, con los mismos intervalos de temperatura anteriores, para describir en los apartados siguientes algunos aspectos importantes de cada tipo de yacimiento.

Para evaluar un área de interés como potencial recurso geotérmico, es necesario disponer de una información mínima que permita definir su viabilidad económica. Desde el punto de vista del entorno natural, son tres los grandes pilares sobre los que se debe hacer hincapié:

- + **La estructura geológica:** indudablemente, muchas manifestaciones termales están asociadas a grandes fracturas, tanto a escala local como regional, en ocasiones fracturas profundas de zócalo. Además de la presencia de accidentes estructurales, es importante estudiar la disposición de los estratos (dirección, buzamiento y detalles de la estructura geológica), ya que en muchas ocasiones ésta favorece el flujo preferente de las aguas subterráneas, de carácter vertical ascendente y a la velocidad suficiente para que el calor no se disipe en su recorrido hasta la superficie. Aún más, el grado de fracturación del macizo rocoso también influirá en las propiedades intrínsecas de matriz rocosa, como la conductividad térmica. Este aspecto es claramente descrito por [Sánchez et al. \(2004\)](#).
- + **La litología:** existe una gran cantidad de rocas y suelos, y todos ellos tienen unos valores de conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica diferentes. Existen numerosas fuentes bibliográficas que ofrecen valores teóricos (orientativos) sobre éstos parámetros y que se incluyen en párrafos siguientes.

- + **La presencia de agua:** los estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos son imprescindibles para cualquier caracterización del área de interés, ya que la presencia de agua en el subsuelo condiciona el intercambio de calor del recurso geotérmico. Valores como la permeabilidad y el tipo de porosidad de la roca, la transmisividad de la formación acuífera, la velocidad y dirección de flujo, el caudal y la variabilidad de los niveles freáticos (acuíferos libres) y piezométricos (acuíferos confinados), son parámetros de especial relevancia en un estudio más detallado. Pero además de los estudios hidráulicos donde se valora el caudal y el tiempo de residencia en el interior del macizo, también los estudios geoquímicos y geotermométricos basados en reacciones de equilibrio mineral son extremadamente importantes para realizar deducciones de temperatura de las aguas en profundidad.

### 3.1.3.1 Yacimientos de muy baja temperatura

Prácticamente la totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso yacimiento de recurso geotérmico de muy baja temperatura, menos de 30 °C, que se ve interrumpido por la presencia de masas de agua continentales o marinas.

En cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del sub-suelo, a pocos metros de profundidad, o en acuíferos poco profundos, para climatización de casas individuales y edificios por intermedio de bombas de calor geotérmicas.

En un principio, el interés por aprovechar la energía térmica de la Tierra se centró principalmente en aquellas regiones del planeta donde las condiciones geológicas favorecían la transferencia de calor desde zonas muy profundas de la corteza hasta la superficie o muy cerca de ella. Pero además del calor interno terrestre, la superficie recibe la radiación solar que penetra a escasa profundidad en el subsuelo, contribuyendo a mantener una temperatura casi constante durante todo el año. El desarrollo de técnicas de circuito cerrado con bombas de calor ha permitido en los últimos años explotar el calor almacenado a poca profundidad en suelos, rocas y aguas subterráneas en ellas almacenadas.

La guía de la Energía Geotérmica elaborada por la Comunidad de Madrid (Llopis y Rodrigo, 2011) explica la evolución de la temperatura y su influencia con el exterior en los primeros metros de terreno:

*La superficie del suelo intercambia calor con la atmósfera y sufre las variaciones diarias de temperatura hasta una profundidad de 0,5 metros. A pocos metros de profundidad, la temperatura permanece relativamente estable entre 7 y 13°C si se compara con la temperatura ambiente de superficie.*

*Las variaciones estacionales de temperatura son perceptibles en el terreno hasta una profundidad de alrededor 10 metros. A partir de diez metros y con poca circulación de agua subterránea, el subsuelo es capaz de almacenar el calor que recibe y mantenerlo incluso estacionalmente, de forma que el terreno permanece a una temperatura prácticamente constante durante todo el año.*

*A una profundidad de 15 metros se considera que el terreno está a temperatura constante, con un valor ligeramente superior a la temperatura media anual de la superficie. Dicho valor depende del clima, la vegetación, la cobertera de suelo, su pendiente, cantidad de nieve y propiedades generales del suelo.*

*Por debajo de 20 metros de profundidad, la temperatura aumenta a razón de 3°C cada 100 metros como consecuencia del gradiente geotérmico. (Fuente: (Llopis y Rodrigo, 2010).*

De forma general, la diferenciación entre energía geotérmica somera y energía geotérmica profunda se establece de forma arbitraria a los 400 metros de profundidad bajo la superficie (Llopis y Rodrigo, 2010).

### **3.1.3.2 Yacimientos de baja temperatura**

Yacimientos geotérmicos de baja temperatura, entre 30 y 90 °C, pueden encontrarse en cuencas sedimentarias en las que el gradiente geotérmico sea el normal o ligeramente superior. La única condición geológica requerida es la existencia a profundidad adecuada, entre 1.500 y 2.500 m, de formaciones geológicas permeables, capaces de contener y dejar circular fluidos que porten el calor de las rocas. Con un gradiente geológico normal, de alrededor de 3 °C cada 100 m, a una profundidad de 2.000 m, la temperatura puede alcanzar 70°C o más.

Anteriormente se ha que una de las mayores fuentes de calor terrestre era la desintegración de isótopos radiactivos presentes en las rocas. Ese calor varía con la composición química y con la edad de las rocas, razón por la cual, los gradientes geotérmicos son más elevados en cuencas sedimentarias jóvenes que en zócalos antiguos.

Existen yacimientos geotérmicos de baja temperatura en numerosas regiones del planeta: Cuenca del Amazonas y del Río de la Plata en América del Sur, Región de Boise (Idaho) y Cuenca del Mississippi – Missouri en América del Norte, Cuenca Artesiana de Australia, la Región de Pekín y de Asia Central, las cuencas de París y Aquitania en Francia, la Cuenca Panónica en Hungría, etc.

La Cuenca Panónica está rellena de materiales procedentes de la erosión de las montañas circundantes de edad Alpina. El gradiente geotérmico es de 5 – 6 °C cada 100 m.

La Cuenca de París está formada por un apilamiento de capas sedimentarias depositadas en el transcurso de las tres últimas eras geológicas, sobre un zócalo cristalino o granítico más antiguo. Se explotan cinco acuíferos geotérmicos en diferentes capas de sedimentos. El más explotado es el de calizas del Dogger en la región de Ile de France, que se extiende sobre una superficie de 15.000 km<sup>2</sup> y proporciona agua a temperaturas que varían entre 56 y 85 °C desde profundidades de 1.800 a 2.000 m.

Otro ejemplo de este tipo de yacimientos es el de Boise (Idaho, EE. UU.), cuya primera red de calefacción a distancia entró en funcionamiento en 1892. Actualmente, los edificios del Capitolio, Juzgados y 40 edificios comerciales más, tienen calefacción con agua geotermal a una temperatura de unos 80 °C, que se extrae por varios pozos desde 268 – 580 m de

profundidad, y se inyecta por otro pozo situado a 1,6 km al suroeste del campo de pozos de producción.

### 3.1.3.3 *Yacimientos de media temperatura*

Yacimientos con recursos geotérmicos a temperaturas comprendidas entre 90 y 150 °C se encuentran en numerosos lugares del planeta: en cuencas sedimentarias, como los de baja temperatura, pero a profundidades comprendidas entre 2.000 y 4.000 m; en zonas de adelgazamiento litosférico; en zonas con elevada concentración de isótopos radiactivos; o en los mismos ámbitos geológicos que los yacimientos de alta temperatura, pero a menos profundidad, menos de 1.000 m.

Yacimientos de este tipo se encuentran en un gran número de zonas muy localizadas donde, debido a discontinuidades y fallas, el agua puede remontar fácilmente hasta la superficie, señalando su presencia mediante aguas termales.

Al igual que los yacimientos de alta temperatura, precisan de una intrusión magmática como fuente de calor, y de un acuífero con buena recarga. Se diferencian de ellos en que no existe capa impermeable sobre el acuífero que mantenga el calor y la presión en el yacimiento.

Ejemplos cercanos en cuencas sedimentarias se encuentran en Alemania y en Austria.

En Alemania, en Neustad-Glewe, región de Pomerania, una pequeña planta para producción de energía eléctrica y calefacción explota agua caliente a 97 °C desde una profundidad de 2.250 m. En Unterhachim, en Baviera, al sureste de Munich, está en construcción una planta para producción de energía eléctrica y calefacción que explotará un pequeño yacimiento con agua caliente a 122 °C desde 3.450 m de profundidad.

En Austria, en Altheim, en la Cuenca molásica de Haute-Autriche se extrae agua caliente a 106 °C desde 2.300 m de profundidad para una red local de calefacción a distancia y para producción de electricidad en una pequeña planta de 1 MW. Dependiendo de la estación anual y de la demanda de calefacción, las dos plantas se reparten el recurso geotérmico.

### 3.1.3.4 *Yacimientos de alta temperatura*

Los yacimientos con fluidos geotermales, o con rocas calientes, a más de 150 °C de temperatura, se encuentran en zonas geográficas con gradiente geotérmico extraordinariamente elevado, hasta 30 °C cada 100 m.

Esas zonas suelen coincidir con la existencia de fenómenos geológicos notables, como actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes, actividad volcánica muy reciente y, principalmente, regiones volcánicas situadas en los bordes de las placas litosféricas. Se suelen explotar a profundidades comprendidas entre 1.500 y 3.000 m.

Esos fenómenos no son otra cosa que distintas formas de liberación de la energía interna de la Tierra y se producen como consecuencia de los movimientos de convección de masas de rocas

fundidas, magmas, procedentes del manto, y por los desplazamientos relativos de las distintas placas litosféricas que constituyen la litosfera terrestre.

La litosfera, formada por la corteza terrestre y parte del manto superior, con un espesor variable entre 70 y 150 km, es frágil y quebradiza. Lejos de ser una capa homogénea, está constituida por 12 placas principales y varias más pequeñas que flotan sobre la astenosfera, formada por material plástico y dotada de movimientos de convección lentos y regulares.

Las placas litosféricas se desplazan a velocidad muy lenta, entre 1 y 20 cm al año, y su tamaño y forma cambian a lo largo de millones de años.

Es esencialmente en los bordes o límites de esas placas, y más generalmente en las zonas frágiles de la corteza, por donde el magma puede escaparse y ascender, dando nacimiento a las intrusiones plutónicas y a los volcanes. En estos casos el calor se disipa principalmente por convección, y la transferencia de calor es mucho más eficaz.

Como zonas propicias para que el magma ascienda a la corteza terrestre, pudiendo llegar o no a la superficie, se pueden citar:

- **Dorsales centro-oceánicos:** áreas de separación de placas en donde existe una generación continua de corteza a partir de magmas ascendentes. Es el caso, por ejemplo, de Islandia, Islas Azores y el mar Rojo.
- **Áreas de choque de placas:** se produce la subducción de una placa bajo la otra con la consiguiente fusión de corteza y generación de magmas. Es el caso del margen occidental del Océano Pacífico y de la costa occidental de América del Sur.
- **Áreas de actividad distensiva:** dentro de una placa, en zonas de adelgazamiento de la corteza, se pueden originar ascensos de magmas procedentes del manto. Son los casos del gran Rift de África Occidental, el Rift de Río Grande en América del Norte, el Graben del Rin en Europa y el Rift Baikal en Asia.
- **Puntos calientes (*Hot spots*):** son también áreas de actividad geotérmica situadas en el interior de placas litosféricas. Focos de calor concentrado situados en el manto, cercanos a la base de la litosfera, que son capaces de calentar la corteza terrestre y producir actividad volcánica.

Los puntos calientes permanecen fijos en el manto mientras las placas litosféricas se mueven sobre ellos. A medida que se mueve la placa, los volcanes se van enfriando y extinguiendo al quedar cada vez más alejados del foco de calor, que permanece fijo.

Son los casos, entre otros, de las Islas Hawai y del Parque Nacional de Yellowstone en Estados Unidos.

En la Fig. 3.6 se adjunta una sección transversal esquemática del interior de la Tierra, donde están representadas la mayoría de las situaciones anteriormente comentadas.

Un modelo, o prototipo de yacimiento geotérmico de alta temperatura, debe reunir tres condiciones geológicas básicas:

- Fuente de calor: un magma, que puede estar a 700 – 1.000 °C, situado a 5-10 km de la superficie. En determinadas zonas con fuerte actividad tectónica como los graben (bloques hundidos y limitados por fallas normales), el magma se encuentra más cerca de la superficie y además puede ascender por fallas.
- Acuífero: una capa de rocas calientes permeables de las que el agua en circulación pueda extraer calor que esté conectada a un área de recarga superficial, a través de la cual el agua meteórica pueda reemplazar a la que se escapa por las fuentes termales, o a la que es extraída mediante los pozos de explotación. El agua, dependiendo de su temperatura y presión, estará en fase líquida o en fase vapor, y podrá contener sales disueltas y gases como CO<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>, etc.
- Capa impermeable: situada sobre el acuífero para que mantenga el agua atrapada y la presión del mismo.

Muchos yacimientos de este tipo que se explotan actualmente contienen agua a presión y temperatura elevada, ocasionalmente 300°C. Generalmente llevan asociadas manifestaciones en superficie como géiseres, fuentes termales, fumarolas, etc.

Cuando el agua asciende por el pozo de extracción a la superficie, la presión disminuye bruscamente y se genera una gran cantidad de vapor. Una vez separado el vapor con un separador de fases, se pasa a una turbina para que genere energía eléctrica.

A estos yacimientos se les denomina de vapor húmedo por la presencia de agua en fase líquida en el cabezal del pozo. Es el caso, por ejemplo, de Cerro Prieto en México, Reykjanes en Islandia, Otake en Japón y Wairakei en Nueva Zelanda.

Si para la presión del yacimiento, la temperatura es superior a la de saturación correspondiente, habrá un sobrecalentamiento sin contenido de agua líquida. En este caso, los yacimientos se llaman de vapor seco y permiten obtener mejores rendimientos en las turbinas generadoras de electricidad. Ejemplos de los mismos se encuentran en Larderello (Toscana, Italia) y en The Geysers (California, EE.UU.).

Por lo que a las capas de rocas permeables que constituyen el acuífero se refiere, existe una gran variedad. En Cerro Prieto son arenas deltaicas; en Wairakei, brechas pumíticas; en Larderello, calizas y dolomías fracturadas; en The Geysers, grauvacas fracturadas.

Larderello, en funcionamiento desde 1913, Wairakei, desde 1958, y The Geysers, desde 1960, han sufrido pérdidas de presión en los acuíferos con los consiguientes descensos de producción de energía eléctrica a lo largo de sus dilatados periodos de explotación. Actualmente siguen en producción reinyectando agua a los acuíferos para mantener la presión.

En The Geysers, uno de los campos geotérmicos más grande del mundo, con 21 plantas de generación de energía eléctrica y 900 MW de capacidad conjunta, la producción empezó a declinar dramáticamente a finales de los años 80 por falta de fluidos. En 1997 se empezó a hacer una recarga artificial con agua depurada, lo cual permitió reactivar las plantas que habían cesado su actividad. Actualmente se está reinyectando, a través de pozos perforados al efecto, agua reciclada procedente de depuradoras situadas en la ciudad de Santa Rosa, que llega hasta el campo por una tubería de 66 km de longitud.

Dos excepciones al modelo de yacimiento de alta temperatura descrito anteriormente lo constituyen los llamados yacimientos de roca seca caliente (HDR por sus siglas en inglés), también llamados sistemas geotérmicos estimulados (EGS en inglés), y los llamados yacimientos geopresurizados.

### 3.1.3.5 Yacimientos de roca seca caliente

De lo visto hasta ahora se infiere que un recurso geotérmico es explotable actualmente para producción de energía eléctrica si reúne cuatro condiciones: que no esté a demasiada profundidad, y que en el yacimiento en que se encuentra haya calor, rocas permeables y agua suficiente.

De esas condiciones, si se exceptúa el calor, que es el que el flujo de calor terrestre proporciona, y la profundidad, que tiene que ser accesible con los equipos de perforación disponibles, las otros dos, permeabilidad en las rocas y agua en circulación, pueden ser mejoradas por el hombre, de ahí el nombre de Sistemas Geotérmicos Estimulados.

La permeabilidad en las rocas puede crearse artificialmente inyectando grandes volúmenes de agua a elevada presión por un pozo para producir su fracturación. El proceso llamado hidrofracturación, o fracturación hidráulica, es usado frecuentemente en la producción de petróleo y gas.

La distribución en profundidad del sistema de fracturas que se crea puede modelizarse utilizando métodos sísmicos de prospección geofísica, al objeto de determinar la ubicación de un segundo pozo de extracción de agua caliente, que será enviada a una central de ciclo binario para generación de energía eléctrica, y posteriormente reinyectada de nuevo al yacimiento.

Esta tecnología se probó por primera vez en el año 1977 en Los Álamos (Nuevo México, EE. UU.), y está siendo ensayada actualmente en Japón, Alemania, Francia, Inglaterra y Estados Unidos.

El proyecto más avanzado comenzó en 1987 en Francia, en Soultz-sous-Forêts, a unos 50 km de Estrasburgo, en el flanco occidental del Graben del Rin, cerca de un campo petrolífero antiguo bien conocido.

La roca caliente es un plutón granítico fracturado situado a 1.400 m por debajo de un conjunto de sedimentos terciarios y mesozoicos. El proyecto contempla inyectar agua fría hasta 5.000 m de profundidad por un pozo central, que el agua circule por las fracturas en contacto con el granito caliente (200 °C), y extraerla del subsuelo mediante dos pozos de producción, distantes

450 m, para alimentar una central de ciclo binario de 6 MW de capacidad, que se piensa incrementar a 25MW en etapas posteriores.

La tecnología EGS (Enhanced Geothermal Systems), además de poder utilizarse para crear yacimientos de alta temperatura nuevos, puede aplicarse para ampliar la extensión de yacimientos que están actualmente en producción, con el consiguiente incremento de las reservas geotérmicas y de la productividad.

El campo geotérmico de Coso, situado a unos 160 km al norte de Los Ángeles (California, EE.UU.), tiene una capacidad de producción de 260 MW, estando previsto aumentarla en 20 MW interconectando y aumentando artificialmente el tamaño de las fracturas naturales de las rocas que han sido selladas por procesos de mineralización secundaria.

#### 3.1.3.6 Yacimientos geopresurizados

Son otro caso particular de yacimientos de alta temperatura. El agua contenida en el acuífero está sometida a grandes presiones, entre un 40 y un 90% superiores a la presión hidrostática que correspondería a la profundidad a la que se encuentra.

Han sido descubiertos como consecuencia de exploraciones petrolíferas en cuencas sedimentarias con gradiente geotérmico normal, pero en las que el agua se encuentra a una profundidad de 6.000 m o mayor, y por lo tanto a temperaturas superiores a 150 °C. Ninguno se encuentra en explotación.

#### 3.1.4 ANOMALÍA GEOTÉRMICA

Hace referencia a áreas de la corteza terrestre donde el gradiente geotérmico es inusualmente alto, pudiendo alcanzar valores del orden de hasta diez veces los valores del gradiente geotérmico natural. El origen de dichas anomalías geotérmicas en determinadas zonas no necesariamente coincide con la presencia y ascenso de magmas en profundidad. [Garrido y Sánchez-Navarro \(2004\)](#) exponen diferentes tipos de anomalías geotérmicas positivas de al menos +4°C detectadas en la Cuenca del Ebro:

- a) Flujos ascendentes regionales en rocas sedimentarias. Es el mecanismo más frecuente en zonas donde no existe un vulcanismo activo. Estos flujos se caracterizan por una composición química constante, caudales constantes, bajo contenido en tritio y mineralización alta.
- b) Flujos ascendentes en granitos, con permeabilidad desarrollada por fisuración.
- c) Surgencias en estratos verticalizados, que favorecen el rápido ascenso de las aguas profundas.
- d) Surgencias sobre alineaciones tectónicas como fallas y pliegues de escala regional (ejemplos como los de Tiermas y Fitero-Arnedillo).
- e) Anomalías térmicas positivas en sondeos profundos de investigación petrolífera.
- f) Anomalías térmicas positivas en sondeos poco profundos, generalmente ubicados en áreas próximas a zonas de descarga de flujos regionales.

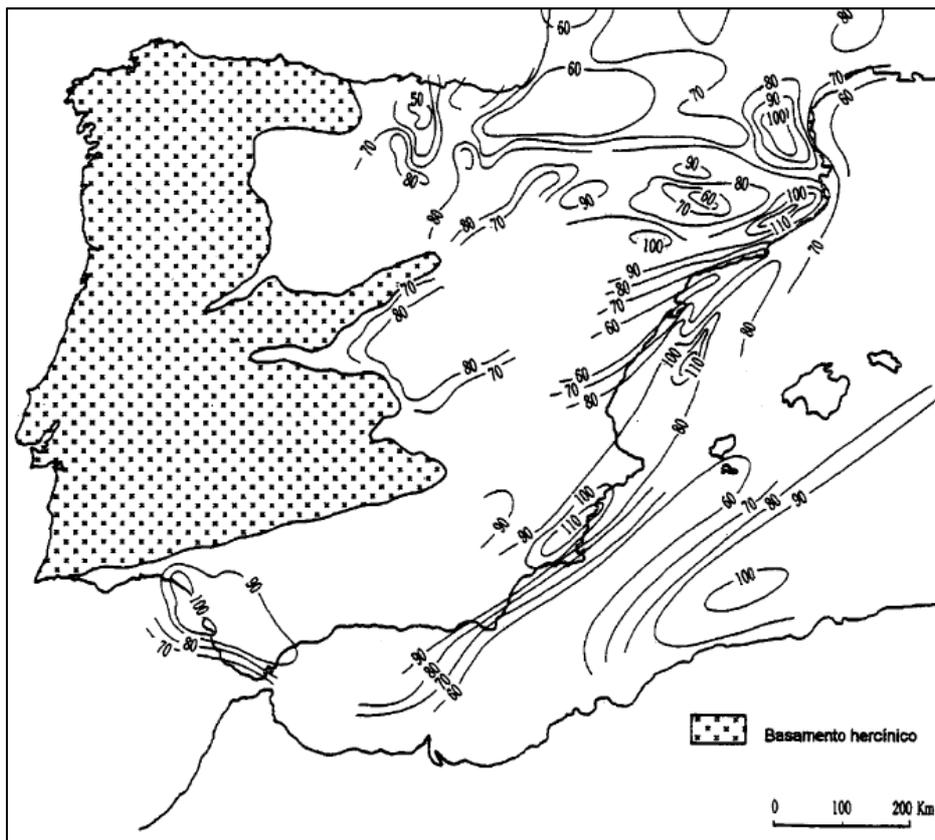
**Muchas de las áreas que presentan anomalías geotérmicas combinan varios de estos tipos de situaciones donde confluyen grandes estructuras tectónicas regionales que determinan el flujo regional profundo, una fuerte tectonización y verticalización de las formaciones que favorecen la circulación vertical ascendente de los flujos.**

### 3.1.5 FLUJO GEOTÉRMICO

Se trata de una magnitud física que depende de dos parámetros, la conductividad térmica del terreno y el gradiente geotérmico. Más exactamente, el flujo calorífico que se irradia a través de la superficie de la Tierra es el resultado de multiplicar el gradiente térmico por la conductividad térmica de los materiales atravesados, y se expresa en  $W / m^{\circ}C$  (Gobierno de Aragón, 2001).

Los mecanismos que generan dicho flujo térmico son la convección y la conducción. La conducción es el mecanismo de transferencia de calor a través de un medio sólido, líquido o gaseoso (principalmente en medios sólidos), por la interacción entre las partículas del mismo. De acuerdo con la Ley de Fourier,  $q = k * dT/dz$  (el flujo de calor  $q$  es el producto de la conductividad térmica  $k$  por el gradiente geotérmico  $dT/dz$ ).

Por otro lado, la convección es el mecanismo de transferencia de calor en un fluido (líquido o gas) donde capas más calientes del mismo desplazan a otras capas más frías (que se hunden por gravedad), dando lugar a un flujo. Cuanto mayor sea la velocidad de dicho intercambio, mayor será el efecto del mecanismo de convección. (Llopis y Rodrigo, 2010).



Fuente: **Gobierno de Aragón (2001)**. *Mapa español del flujo calorífico (mW/m<sup>2</sup>)*. En este mapa no se han tenido en cuenta las modificaciones producidas en dicho flujo por las aguas subterráneas (Fuente original: **Albert, 1979**).

Teniendo presente la definición aportada sobre los mecanismos de convección y conducción que tienen lugar en la transmisión del flujo calorífico, los magmas y las aguas subterráneas serán los elementos principales de transferencia en la corteza terrestre.

### 3.1.6 ACUÍFERO

Formación geológica permeable que es susceptible de almacenar agua y permitir el flujo en su interior (**González de Vallejo, 2002**). En función de la capacidad de una formación rocosa para almacenar y transmitir el agua, existen diferentes tipos de comportamiento diferenciándose: acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugos. Los primeros (acuíferos) representan las mejores formaciones rocosas para el almacenamiento y transmisión de agua. En cuanto a la textura de estos acuíferos, la porosidad puede deberse a porosidad intergranular, porosidad por fisuración y porosidad por karstificación. Finalmente, teniendo en cuenta su geometría y sus circunstancias hidráulicas y estructurales, se diferencian acuíferos libres, confinados y semiconfinados.

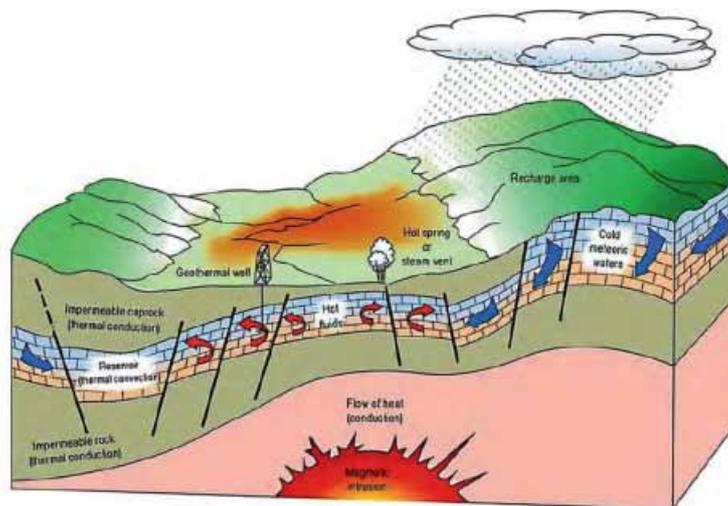
Los parámetros físicos relevantes en el estudio de los acuíferos son: porosidad, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad, transmisividad y caudal.

En Castiella (1985) puede encontrarse una buena explicación del concepto de acuífero y sus diferentes tipos, así como otros conceptos de interés como el de recurso y reserva hídrica, o una caracterización de las principales unidades acuíferas de Navarra.

### 3.1.7 FORMACIÓN GEOTÉRMICA

Sánchez et al (2004) definen una formación geotérmica como una formación geológica que, por sus peculiaridades hidrogeológicas, puede contener agua u otros fluidos y tener la capacidad potencial de permitir un flujo termal significativo. En muchas ocasiones, estas formaciones geotérmicas coinciden con unidades geológicas clasificadas como acuíferos. No obstante, existen excepciones como el caso de las rocas graníticas del Pirineo axial.

De acuerdo con Porowski (2018), un sistema geotermal se compone de varios elementos: a) la fuente de calor; b) la unidad geotérmica (generalmente un acuífero) y c) un fluido (por ejemplo el agua) como flujo conductor de calor. Incluye por tanto todo el área conectada hidrogeológicamente, incluyendo el área de recarga, el propio reservorio y la zona de descarga.



Fuente de la imagen: Porowski, 2018

### 3.1.8 AGUAS MINERALES Y AGUAS TERMALES

Este concepto se explica de forma sencilla y eficaz en la bibliografía científica que aporta el Instituto Geológico y Minero de España a través de su sección de Aguas minerales y termales: *El Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería profunda en la definición de las aguas minerales en su artículo 38.1: "A efectos de lo dispuesto en el presente Reglamento, las aguas minerales se clasifican en:*

- a) *Minero-medicinales: las alumbradas natural o artificialmente que por sus características y cualidades sean declaradas de utilidad pública. En función del uso o*

*destino, éstas se clasifican en aguas minero-medicinales con fines terapéuticos, aguas minerales naturales y aguas de manantial.*

*b) Minero-industriales: las que permiten el aprovechamiento racional de las sustancias que contengan.”*

Respecto a las aguas termales, este real decreto profundiza en su definición en su artículo 38.2: *“Son aguas termales aquellas cuya temperatura de surgencia sea superior, al menos, en cuatro grados centígrados a la media anual del lugar donde alumbren, siempre que, caso de destinarse a usos industriales, la producción calorífica máxima sea inferior a quinientas termias por hora”.*

La existencia de manantiales donde la temperatura de surgencia es mayor a 4°C respecto a la temperatura del aire en esa zona es habitual en situaciones donde existe un flujo vertical y ascendente de las aguas subterráneas, condicionado principalmente por la estructura geológica.

Se considera que la temperatura media diaria es la media de las temperaturas máxima y mínima obtenidas en ese día con los termómetros diseñados a tal efecto. Asimismo, la temperatura media mensual será la media de todos los días de dicho mes.

**Porowski (2018)** define las aguas termales (o aguas geotermiales) como aguas subterráneas con una temperatura de al menos 20°C en el punto de surgencia.

Si se tiene en cuenta esta diferencia de temperatura en el punto de surgencia del manantial y se mide el caudal por unidad de tiempo, se puede hacer una estimación del potencial calorífico del recurso.

**Sánchez et al (2000)** expresa el flujo geotérmico de los manantiales a través de la siguiente expresión:  $E = DT * Q * c * \rho$

Donde E es la energía que sale por unidad de tiempo (MW), DT es la diferencia entre la temperatura del agua del manantial y la temperatura media del aire (si fuese mayor de 4°C), Q es el caudal que sale por el manantial (litros/segundo) c es el calor específico del agua (4.200 J/Kg\*°K) y  $\rho$  es la densidad del agua (1.000 kg / m<sup>3</sup>).

Una descripción interesante sobre las aguas termales y su relación con el quimismo, origen y localización y depósitos minerales asociados puede encontrarse en **(IGME, 1981 código 10780).**

### 3.1.9 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS

**CLAVE PARA LA CLASIFICACION DE LAS AGUAS**

Por la dureza (según Noisette)

aguas muy blandas	0 a 4 °F
aguas blandas	4 a 12 °F
aguas de dureza media	12 a 35 °F
aguas duras	35 a 65 °F
aguas extremadamente duras	> 65 °F

Por la mineralización (según Noisette)

aguas sin mineralización	15 a 65 micromho/cm
aguas con mineralización débil	65 a 200
aguas con mineralización ligera	200 a 500
aguas con mineralización notable	500 a 2.000
aguas fuertemente mineralizadas	> 2.000

Por la composición iónica

a) Criterio Schoukarev: se asigna determinado carácter iónico a un agua cuando su concentración en meq/l, en relación a la suma total de miliequivalentes, es superior al 25%.

b) Clasificación de Schoeller: se trata de una denominación en clave que comprende tres bloques de números y letras.

1.º bloque: se compone de 3 números que indican respectivamente el contenido de cloruros, sulfatos y bicarbonatos.

Grupo de bicarbonatos	Denominación	Valor rCO <sub>3</sub> H
1	Hiperbicarbonatado	>7
2	Bicarbonatado normal	7 a 2
3	Hipobicarbonatado	<2

2.º bloque: indica la relación entre iones mediante tres símbolos, según el siguiente esquema.

Tipo	Carácter	Subtipo	Carácter	Parcial	Carácter
1	rCl>rNa icb (+)	a	rCa>rCO <sub>3</sub> H	a	rCa>rSO <sub>4</sub> +rCO <sub>3</sub> H
		ab	rCa=rCO <sub>3</sub> H	ab	rCa=rSO <sub>4</sub> +rCO <sub>3</sub> H
2	rCl=rNa icb=0	a	rCa>rCO <sub>3</sub> H	b	rCa<rSO <sub>4</sub> +rCO <sub>3</sub> H
		b	rCa<rCO <sub>3</sub> H	b	rCa<rSO <sub>4</sub> +rCO <sub>3</sub> H
3	rCl<rNa icb (-)	a	rCa>rCO <sub>3</sub> H	a	rCO <sub>3</sub> <rMg+rCa
		ab	rCa=rCO <sub>3</sub> H	ab	rCO <sub>3</sub> =rMg+rCa
6	rCl<rNa icb (-)	b	rCa<rCO <sub>3</sub> H	b	rCO <sub>3</sub> >rMg+rCa

3.º bloque: indica cuáles son los iones dominantes mediante un número y una letra.

Grupo de cloruros	Denominación	Valor rCl
1	Hiperclorurado	> 700
2	Clorotalásico	700 a 420
3	Clorurado fuerte	420 a 140
4	Clorurado medio	140 a 40
5	Oligoclorurado	40 a 15
6	Clorurado normal	< 10

Grupo de sulfatos	Denominación	Valor rSO <sub>4</sub>
1	Hipersulfatado	>58
2	Sulfatado	58 a 24
3	Oligosulfatado	24 a 6
4	Sulfatado normal	< 6

Aniones		Cationes	
1	rCl>rSO <sub>4</sub> >rCO <sub>3</sub> H	a	rNa>rMg>rCa
2	rCl>rCO <sub>3</sub> H>rSO <sub>4</sub>	b	rNa>rCa>rMg
3	rSO <sub>4</sub> >rCl>rCO <sub>3</sub> H	c	rMg>rNa>rCa
4	rSO <sub>4</sub> >rCO <sub>3</sub> H>rCl	d	rMg>rCa>rNa
5	rCO <sub>3</sub> H>rCl>rSO <sub>4</sub>	e	rCa>rNa>rMg
6	rCO <sub>3</sub> H>rSO <sub>4</sub> >rCl	f	rCa>rMg>rNa

Así, un agua de la siguiente composición:

CO <sub>3</sub> H	3,2 meq/l	Ca	6,2 meq/l
SO <sub>4</sub>	4,5 meq/l	Mg	1,3 meq/l
Cl	2,0 meq/l	Na	2,2 meq/l

sería catalogada como: 642-3a-4e.

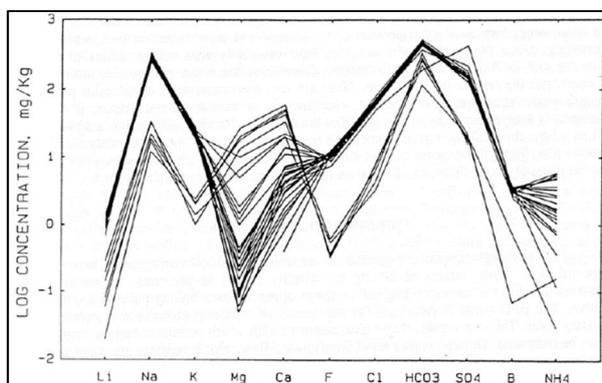
Fuente: Diputación Foral de Navarra (1982). Aguas subterráneas de Navarra.

Classification of Davis [6]		Classification of Krieger [7]		Classification of Pazdro and Kozerski [8]	
TDS (ppm)		TDS (ppm)		TDS (g/L)	
Freshwaters	0–1,000	Freshwaters	0–1,000	Ultra-freshwaters	<0.1
Brackish waters	1,000–10,000	Slightly saline	1,000–3,000	Freshwaters	0.1–0.5
Saline waters	10,000–100,000	Moderately saline	3,000–10,000	Acraopegae	0.5–1.0
Brines	>100,000	Very saline	10,000–35,000	Mineral waters	1.0–35.0
		Brines	>35,000	Brines	>35.0

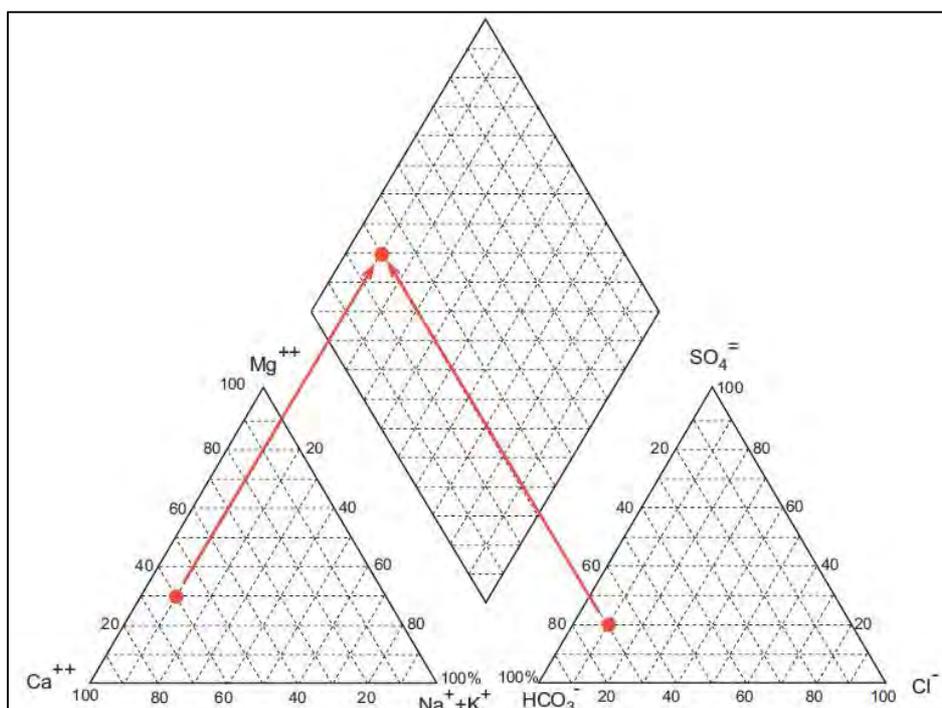
Fuente: Porowski (2018). Clasificación de las aguas subterráneas basada en la cantidad de sólidos disueltos (TDS).

De acuerdo con este mismo autor (Porowski, 2018), los establecimientos balneoterápicos de países europeos utilizan aguas termales y/o aguas minerales consideradas como aguas curativas. Se trata de aguas no contaminadas química y microbiológicamente y que tienen unas propiedades físico-químicas y una concentración de componentes activos dentro de unos límites establecidos (TDS, Fe, I, F, S, SiO<sub>2</sub>, radón, CO<sub>2</sub>, etc).

La representación del quimismo y tipología del agua se expresa de formas diferentes. Las más habituales son los diagramas de Schoeller y los diagramas de Piper-Hill.



Fuente: **Marini (2004)**. Ejemplo de un diagrama de Schoeller.



Fuente: F. Javier Sánchez San Román / Dpto. Geología Universidad de Salamanca (España). Ruta de internet: <http://hidrologia.usal.es>

### 3.1.10 GEOTERMÓMETROS

Un geotermómetro es una herramienta basada en el análisis geoquímico e isotópico de muestras de fluidos hidrotermales, y que permiten establecer la temperatura de equilibrio que está presumiblemente presente en zonas donde estas muestras de fluido se encuentran en equilibrio químico (**Marini, 2004**).

### 3.1.11 PARÁMETROS TÉRMICOS DEL TERRENO

Se ha considerado necesario aportar información adicional sobre los valores teóricos de los **parámetros de conductividad térmica** que aparecen reflejados en diferentes fuentes de información, con el fin de obtener valores contrastados que puedan ser útiles al lector. La definición de un parámetro preciso y realista de las propiedades de conductividad térmica de una roca o un suelo puede acarrear incertidumbres significativas, por lo que es necesario incidir en este aspecto. La única solución eficaz para obtener un dato real de dicho parámetro podría ser la realización de un test de respuesta térmica en el terreno que es objeto de explotación para realizar el diseño correcto de la instalación geotérmica. Dicho test se realizaría de acuerdo a una metodología que se ajuste a las especificaciones de la norma de referencia **UNE 100715-1:2014 Anejo G (normativo) Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte 1 Sistemas de circuito cerrado vertical**. El test de respuesta térmica consiste en inyectar calor in situ al terreno de forma constante mediante la ejecución de un sondeo y medir y registrar la respuesta térmica de las rocas que forman el sustrato en ese punto. Más información en la norma **ISO 17628: 2015 Geotechnical investigation and testing. Geothermal testing. Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger**.

Valores teóricos estimados del parámetro de conductividad térmica del terreno, así como de la capacidad térmica volumétrica a partir de diferentes fuentes de información:

a) Tomado de la **norma UNE 100715-1:2014**:

Tipo de terreno		Conductividad térmica (W/m·K)	Capacidad térmica volumétrica MJ/(m <sup>3</sup> ·K)
Materiales no consolidados	Limo/Arcilla seco	0,4 – 1,0	1,5 – 1,6
	Limo/Arcilla saturado	1,1 – 3,1	2,0 – 2,8
	Arena seca	0,3 – 0,9	1,3 – 1,6
	Arena húmeda	1,0 – 1,9	1,6 – 2,2
	Arena saturada	2,0 – 3,0	2,2 – 2,8
	Gravas secas	0,4 – 0,9	1,3 – 1,6
	Gravas saturadas	1,6 – 2,5	2,2 – 2,6
	Marga	1,1 – 2,9	1,5 – 2,5
	Turba	0,2 – 0,7	0,5 – 3,8

Tipo de terreno		Conductividad térmica (W/m·K)	Capacidad térmica volumétrica MJ/(m <sup>3</sup> ·K)	
Rocas sedimentarias	Lutita	1,1 – 2,9	2,1 – 2,4	
	Limolita	1,4 – 2,4		
	Arenisca	1,9 – 3,5	1,8 – 2,6	
	Conglomerado	1,3 – 5,1	1,8 – 2,6	
	Mármol	1,8 – 2,9	2,2 – 2,3	
	Caliza	2,0 – 3,80	2,1 – 2,4	
	Dolomia	1,6 – 5,0	2,1 – 2,4	
	Anhidrita	1,5 – 7,7	2	
	Yeso	1,3 – 2,8	2	
	Roca salina	3,6 – 6,1	1,2	
	Antracita	0,3 – 0,6	1,3 – 1,8	
	Tipo de terreno		Conductividad térmica (W/m·K)	Capacidad térmica volumétrica MJ/(m <sup>3</sup> ·K)
Rocas magmáticas	Toba	1,1		
	Roca volcánica ácida a intermedia	Riolita - Traquita	3,1 – 3,4	2,1
		Latita - Dacita	2,0 – 2,9	2,9
	Roca volcánica alcalina a ultraalcalina	Basalto, andesita	1,3 – 2,3	2,3 – 2,6
	Roca plutónica ácida a intermedia	Granito	2,1 – 3,3	2,1 – 3,0
		Sienita	1,7 – 3,5	2,4
	Roca plutónica alcalina a ultraalcalina	Diorita	2,0 – 2,9	2,9
		Gabro	1,6 – 2,9	2,6

Tipo de terreno		Conductividad térmica (W/m·K)	Capacidad térmica volumétrica MJ/(m <sup>3</sup> ·K)
Rocas metamórficas	Ligeramente metamórfica	Pizarra	1,5 – 2,6
		Chert	4,5 – 5,0
	Moderada a fuertemente metamórfica	Mármol	2,1 – 3,1
		Cuarcita	5,0 – 6,0
		Micaesquisto	1,5 – 3,1
		Gneiss	1,9 – 3,5
		Anfibolita	2,1 – 3,6
Otros materiales	Bentonita	0,5 – 0,8	
	Hormigón	0,9 – 2,0	
	Hielo (-10 °C)	2,32	
	PEAD	0,42	
	Aire (0-20 °C)	0,02	
	Acero	60	
	Agua (10 °C)	0,59	

Puede observarse la variabilidad del parámetro de conductividad térmica en función del grado de saturación del terreno. La conductividad aumenta con la densidad, el contenido en cuarzo y el grado de saturación. Los mayores valores corresponden a rocas yesíferas y salinas y rocas cuarcíticas, principalmente (UNE 100715-1:2014).

La norma de referencia propone utilizar valores mínimos en caso de falta de criterio para elegir entre el rango de valores propuestos.

- b) Tomado de la **Guía de la Geotermia** publicado por la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Consejería de Economía y Consumo de la Comunidad de Madrid, así como de la Guía Técnica de Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado, publicado por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Gobierno de España junto con IDAE. Ambas fuentes adoptan los mismos datos teóricos cuya fuente original es Pahud, D. (2002).

Type de roche – <i>rock type</i>	Conductibilité thermique – <i>Thermal conductivity</i>			Capacité thermique volumétrique – <i>Volumetric thermal capacity</i> $\rho C$ (MJ/m <sup>3</sup> K)
	$\lambda$ (W/mK)	min	max	
<b>Roches magmatiques – <i>Magmatic rocks</i></b>				
Basalte – <i>basalt</i>	1.3	1.7	2.3	2.3 – 2.6
Diorite – <i>diorite</i>	2.0	2.6	2.9	2.9
Gabbro – <i>gabbro</i>	1.7	1.9	2.5	2.6
Granit – <i>granite</i>	2.1	3.4	4.1	2.1 – 3.0
Péridotite – <i>peridotite</i>	3.8	4.0	5.3	2.7
Rhyolithe – <i>rhyolite</i>	3.1	3.3	3.4	2.1
<b>Roche métamorphiques – <i>Metamorphous rocks</i></b>				
Gneiss – <i>gneiss</i>	1.9	2.9	4.0	1.8 – 2.4
Marbre – <i>marble</i>	1.3	2.1	3.1	2.0
Métaquartzite – <i>metaquartzite</i>		env. 5.8		2.1
Micaschistes – <i>micaschists</i>	1.5	2.0	3.1	2.2
Schistes argilleux – <i>argillaceous schists</i>	1.5	2.1	2.1	2.2 – 2.5
<b>Roches sédimentaires – <i>Sedimentary rocks</i></b>				
Calcaire – <i>limestone</i>	2.5	2.8	4.0	2.1 – 2.4
Marne – <i>marl</i>	1.5	2.1	3.5	2.2 – 2.3
Quartzite – <i>quartzite</i>	3.6	6.0	6.6	2.1 – 2.2
Sel – <i>salt</i>	5.3	5.4	6.4	1.2
Grès – <i>sandstone</i>	1.3	2.3	5.1	1.6 – 2.8
Roches argilleuses, limoneuses – <i>claystone/siltstone</i>	1.1	2.2	3.5	2.1 – 2.4
<b>Roches non consolidées – <i>Unconsolidated rocks</i></b>				
Gravier, sec – <i>gravel, dry</i>	0.4	0.4	0.5	1.4 – 1.6
Gravier, saturé d'eau – <i>gravel, watersaturated</i>		env. 1.8		env. 2.4
Moraine – <i>moraine</i>	1.0	2.0	2.5	1.5 – 2.5
Sable, sec – <i>sand, dry</i>	0.3	0.4	0.8	1.3 – 1.6
Sable, saturé d'eau – <i>sand, watersaturated</i>	1.7	2.4	5.0	2.2 – 2.9
Argile/limon, sec – <i>clay/silt, dry</i>	0.4	0.5	1.0	1.5 – 1.6
Argile/limon, saturé d'eau – <i>clay/silt, watersaturated</i>	0.9	1.7	2.3	1.6 – 3.4
Tourbe – <i>peat</i>	0.2	0.4	0.7	0.5 – 3.8
<b>Autres substances – <i>Other substances</i></b>				
Bentonite – <i>bentonite</i>	0.5	0.6	0.8	env. 3.9
Béton – <i>concrete</i>	0.9	1.6	2.0	env. 1.8
Glace (-10°C) – <i>ice (-10°C)</i>		2.32		1.87
Plastique (PE) – <i>plastic (PE)</i>		0.39		-
Air (0-20°C, sec) – <i>air (0-20°C, dry)</i>		0.02		0.0012
Acier – <i>steel</i>		60		3.12
Eau (+10 °C) – <i>water (+10 °C)</i>		0.58		4.19

c) Tomado del **Atlas de la Energía Geotérmica de Aragón** (Gobierno de Aragón, 2001):

Tabla 2.1.- Conductividades térmicas de las principales rocas (mcal/cm-seg-K)  
(Fuente: Albert Beltran, Josep F., 1988 – Elaboración: Propia).

Tipo de Roca	Mínima	Media	Máxima
Arcilla	4,14	5,68	8,18
Marga	4,21	6,44	7,71
Caliza	4,05	5,28	6,40
Dolomía	6,01	7,98	9,06
Arenisca	5,20	7,75	12,18
Yeso	9,80	12,61	14,50
Sal	10,70	13,19	13,80
Basalto	3,30	4,21	6,40
Escoria de lava	0,60	1,16	1,74
Granito	3,91	6,35	7,35
Gneiss	6,16	6,46	7,03
Mármol	6,40	6,70	6,90
Cuarcita	7,00	14,76	19,00

d) **Sundberg (1988)**: datos en W/mK

Rock type	Number of obs	Mean value	Stand. dev.	greater than	within the interval	log-normal distr.
Granite	848	3.47	0.380	2.95	2.85-4.15	No
Granodiorite	255	3.34	0.292	2.95	2.85-3.85	Yes
Tonalite	171	3.16	0.269	2.80	2.70-3.65	Yes
Aplite,pegmatite m m	44	3.31	0.477	2.60	2.45-4.35	Yes
Quartzdiorite	122	2.87	0.227	2.55	2.50-3.30	Yes
Syenite,diorite m m	188	2.67	0.305	2.25	2.15-3.25	Yes
Porphyry	95	3.55	0.463	2.75	2.65-4.50	(Yes)
Porphyrite	59	2.54	0.468	1.80	1.70-3.60	(Yes)
Ryolite,dacite	119	3.37	0.397	2.80	2.70-4.20	Yes
Trachyte,basalt m m	70	2.83	0.347	2.35	2.25-3.55	Yes
Quartzite	32	6.62	0.628	5.50	5.35-8.10	(Yes)
Other quartzite	272	4.65	0.681	3.75	3.55-6.00	Yes
Other metamorphic sediment	122	3.58	0.488	2.90	2.75-4.55	Yes
Metamorph.sed. unspecified	192	3.54	0.699	2.65	2.45-4.90	Yes
Metamorph. basic rocks	184	2.56	0.309	2.15	2.05-3.15	Yes
Gneiss, unspec. Leptite, leptite gneiss	227	3.47	0.465	2.85	2.70-4.40	Yes
	726	3.58	0.603	2.8	2.65-4.70	Yes

Tabla 1: valores principales e intervalos para rocas cristalinas.

Rock type	$\lambda$ (W/(m,K))	c (J/(m <sup>3</sup> ,K))
Sandstone (Mesozoic)	2.3-4.5	2.87-2.26·10 <sup>6</sup>
Sandstone (Cambro-silur)	4.0-6.0	2.28-2.22·10 <sup>6</sup>
Sandstone (Pre-cambrium)	4.0-6.5	2.28-2.18·10 <sup>6</sup>
Shale (Mesozoic)	1.5-3.0	2.98-2.34·10 <sup>6</sup>
Shale (Cambro-silur)	2.0-3.5	2.65-2.26·10 <sup>6</sup>
Limestone (Mesozoic)	1.5-2.8	2.98-2.26·10 <sup>6</sup>
Limestone (Cambro-silur)	2.8-3.3	2.36-2.18·10 <sup>6</sup>

Tabla 2: valores de conductividad y capacidad térmica volumétrica en rocas sedimentarias.

Soil	Thermal conductivity W/(m,K)		Thermal capacity J/(m <sup>3</sup> K)		Latent heat J/m <sup>3</sup>
	Unfrozen	Frozen	Unfrozen	Frozen	
			x 10 <sup>6</sup>		x 10 <sup>8</sup>
Clay with high clay content	0.85-1.1	2.0-2.2	3.0-3.6	2.0	2.1-2.5
Dry crust clay ditto	1.1-1.4	1.7-2.3	2.6-3.0	1.7-2.0	1.1-1.6
Silty clay/ silt layer	1.1-1.5	2.3-2.8	2.9-3.3	2.0	1.5-2.0
Dry crust clay ditto	1.2-1.6	1.9-2.9	2.5-3.0	1.7-2.0	1.1-1.6
Silt	1.2-2.4	2.3-3.2	2.4-3.3	2.0	0.8-2.0
Sand, gravel below gw-table	1.5-2.6 (1.6-2.0)	2.7-3.3 (2.8-3.0)	2.5-3.2 (2.9)	2.0 (2.0)	0.8-1.7 (1.3-1.6)
Sand, gravel above gw-table	0.4-1.1 (0.7-0.9)	0.4-1.0 (0.8-0.9)	1.2-1.7 (1.4)	1.1-1.6 (1.2)	0.1-0.3 (0.2)
Till below gw-table	1.5-2.5	2.3-2.7	2.2-3.0	2.0	0.3-1.5
Sandy till above gw-table	0.6-1.8	0.5-1.6	1.3-1.9	1.2-1.5	0.1-0.8
Peat below gw-table	0.6	1.7	4.0	2.0	3.1-3.2
Peat above gw-table	0.2-0.5	0.4-1.5	0.7-3.2	0.5-1.7	0.6-2.4

Tabla 3: Propiedades térmicas de suelos.

- e) **Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado**, publicado por IDAE (2012).
- f)

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	Mín.	Valor típico	Máx.	(MJ/m <sup>3</sup> K)
<b>Rocas magmáticas</b>				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
Peridotita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
<b>Rocas metamórficas</b>				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita		aprox. 5,8		2,1
Mica esquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
<b>Rocas sedimentarias</b>				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Halita	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	Mín.	Valor típico	Máx.	(MJ/m <sup>3</sup> K)
<b>Rocas sedimentarias</b>				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Halita	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
<b>Rocas no consolidadas</b>				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava, saturada de agua		aprox. 1,8		aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
<b>Otros materiales</b>				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	aprox. 1,8
Hielo (-10°C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0 - 20 °C, seco)		0,02		0,0012
Acero		60		3,12
Agua (+ 10 °C)		0,58		4,19

- g) **Pahud (2002)** incluye una interesante tabla adicional donde se reflejan valores típicos de calor específico de extracción para diferentes materiales:

Underground	Specific heat extraction	
	for 1800 h/y	for 2400 h/y
<b>General guideline values</b>		
Poor underground (dry sediment) ( $\lambda < 1.5$ W/mK)	25 W/m	20 W/m
Normal rocky underground and water saturated sediment ( $\lambda < 1.5 - 3$ W/mK)	60 W/m	50 W/m
Consolidated rock with high thermal conductivity ( $\lambda > 3.0$ W/mK)	84 W/m	70 W/m
<b>Individual rocks</b>		
Gravel, sand, dry	<25 W/m	<20 W/m
Gravel, sand, water saturated	65 – 80 W/m	55 – 65 W/m
For strong groundwater flow in gravel and sand, for individual systems	80 – 100 W/m	80 – 100 W/m
Clay, loam, damp	35 – 50 W/m	30 – 40 W/m
Limestone (massif)	55 – 70 W/m	45 – 60 W/m
Sandstone	65 – 80 W/m	55 – 65 W/m
Siliceous magmatite (e.g. granite)	65 – 85 W/m	55 – 70 W/m
Basic magmatite (e.g. basalt)	40 – 65 W/m	35 – 55 W/m
Gneiss	70 – 85 W/m	60 – 70 W/m

Un detallado y exhaustivo análisis de las propiedades térmicas de los suelos, los principales mecanismos de transferencia de calor y la influencia del agua en dichas propiedades puede consultarse en **Farouki (1981)** y en **Sundberg (1988)**.

En **Tecnología y Recursos de la Tierra (2011)**, se sintetiza el siguiente cuadro de capacidad de extracción de calor para diferentes tipos de materiales, modificado a partir de la norma alemana VDI4640. En el mismo capítulo, estos autores incluyen una exhaustiva tabla donde se asignan valores de potencia térmica superficial a cada una de las casi 700 litologías definidas en el mapa litoestratigráfico y de permeabilidades de España a escala 1:200.000 del IGME.

En **IGME (1984, código 00885 “tecnología de pruebas de producción en yacimientos geotérmicos”)** se citan los parámetros necesarios para evaluar un recurso energético, diferenciando entre parámetros del medio, del fluido y de sistema.

Tabla 7.1. Capacidad de extracción de calor de las rocas [Modificado de la Norma VDI4640]

Tipo de roca (litologías)	Capacidad de extracción de calor (W/m)
Gravas y arenas secas	<25
Arcillas y margas húmedas	35-50
Calizas y dolomías masivas	55-70
Areniscas	65-80
Granitos	68-85
Rocas básicas (basaltos)	40-65
Rocas metamórficas (gneis)	70-85
Gravas y arenas saturadas de agua	65-80
Gravas y arenas con gran circulación de agua	80-100

### 3.1.12 TRITIO

El tritio ( $^3\text{H}$ ) es un isótopo del hidrógeno cuyo núcleo consta de un protón y dos neutrones. Su periodo de semi-desintegración es de 12,3 años. Es una herramienta útil para conocer la edad de las aguas subterráneas.

Finalmente, y con el objetivo de aclarar terminología de la abundante bibliografía existente, se incluye a continuación una tabla sintética elaborada por [Somogyi et al \(2017\)](#):

Nomenclature	
ASHP	Air Source Heat Pump
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers founded in 1959
BHE	Borehole Heat Exchanger
BTES	Borehole Thermal Energy Storage
CaRM	Computational Capacity Resistance Model
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHP	Combined Heat and Power
COP	Coefficient of Performance
EGS	Enhanced Geothermal System
FEFLOW	Finite Element subsurface FLOW system
Fo	Fourier number
GDP	Gross Domestic Product
GHG	Greenhouse Gas
GHP	Geothermal Heat Pump
GIS	Geographic Information System
GSHP	Ground Source Heat Pump
GWHP	Ground Water Heat Pump
HDR	Hot Dry Rock
HDPE	High-density polyethylene
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning
LCA	Life Cycle Analysis
MLAA	Multiple Aggregation Algorithm
nZEB	Nearly Zero-Energy Buildings
ORC	Organic Rankine Cycle
Pe	Péclet number
Re	Reynolds number
RSME	Root Mean Square Error
SGE	Shallow Geothermal Energy
SPF	Seasonal Performance Factor
TAZ	Thermally affected zone
TRT	Thermal Response Test
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione - Italian Organization for Standardization
UTES	Underground Thermal Energy Storage
VDI	Verein Deutscher Ingenieure - Association of German Engineers - standards association

### 3.2 LEGISLACIÓN DE REFERENCIA

Se citan brevemente algunas de las normativas de referencia que deberían ser tenidas en cuenta en mayor o menor medida para el diseño de un proyecto geotérmico y que tienen relación directa con la protección del Medio Ambiente.

- Ley 22/1973, de Minas.
- Ley 54/1980 Sección D, que modifica la Ley 22/1973.
- Ley Foral 4/2005, de intervención para la protección ambiental.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.
- Orden ARM/1312/2009, de 20 de mayo, por la que se regulan los sistemas para realizar el control efectivo de los volúmenes de agua utilizados por los aprovechamientos de agua del dominio público hidráulico, de los retornos al citado dominio público hidráulico y de los vertidos al mismo.
- Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.
- DIRECTIVA 2006/118/CE, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.
- Ley 11/2014, de 3 de julio, por la que se modifica la ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.
- REAL DECRETO 2090/2008, de responsabilidad medioambiental.
- Ley 21/2013 de 9 de diciembre de Evaluación Ambiental.
- Ley 42/2007, del Patrimonio Natural y la Biodiversidad.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
- Guía Técnica de aplicación del RD 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
- Real Decreto 238/2013, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE "Ahorro de Energía", del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.
- Ley 6/1994, de Balnearios y de Aguas Minero-Medicinales y/o Termales.

- Real Decreto-ley de 25 de abril de 1928, que aprueba el Estatuto sobre la explotación de manantiales de aguas minero-medicinales.
- Real Decreto 1799/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula el proceso de elaboración y comercialización de aguas preparadas envasadas para el consumo humano.
- [Cuchí-Oterino et al \(2000\)](#) aportan algunas referencias adicionales en relación a las aguas minerales naturales y aguas minero-medicinales y que ya han sido actualizadas e incluidas en el listado descrito en este capítulo.

En este breve apartado no se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de la legislación aplicable ni se han citado todas las normativas existentes. Se trata únicamente de hacer entender al lector la importancia de ser consciente de que existe una normativa legal vigente y de que será necesario utilizar todos los recursos necesarios (consulta con la Administración competente, asesoramiento de empresas externas especializadas, etc) para determinar la totalidad de los requisitos legales de obligado cumplimiento que deberán respetarse para el proyecto y explotación de un recurso geotérmico.

### 3.3 METODOLOGÍA, RECURSOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS PARA LA INVESTIGACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

#### 3.3.1 METODOLOGÍA

Las fases de investigación que se llevan a cabo antes de la explotación de un yacimiento geotérmico dependen en primer lugar del tipo de yacimiento geotérmico de que se trate, es decir si se trata de un yacimiento de alta temperatura cuya finalidad sea la obtención de electricidad, o bien de un yacimiento de baja temperatura cuya finalidad sea el uso directo del calor. A modo sintético, éstas son las fases de investigación habituales de acuerdo con la información recogida en el I Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria (ponencia de D. José Sánchez Guzmán con el título “*Yacimientos geotérmicos. Investigación y explotación*”. Madrid, 15 de Octubre de 2008).

FASE I: ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS			
Finalidad	Etapas	Objetivos	Técnicas Empleadas
SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE OBJETIVOS DE EXPLOTACIÓN	I. Documentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antecedentes</li> <li>• Planificación etapas posteriores</li> </ul>	Geología, geofísica, hidrogeología
	II. Evaluación de información y selección de áreas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir almacenes explotables</li> <li>• Seleccionar puntos favorables</li> <li>• Definir el modelo geotérmico</li> </ul>	Geología, hidrodinámica, hidroquímica, evaluación de almacenes
FASE II: ESTUDIOS DE ALMACENES			
Finalidad	Etapas	Objetivos	Técnicas Empleadas
CONFIRMAR LAS HIPÓTESIS GEOLÓGICAS Y DEFINIR CONDICIONES DE EXTRACCIÓN DEL RECURSO	I. Perforación de sondeos profundos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confirmar el modelo previsto</li> <li>• Seleccionar almacenes</li> </ul>	Sondeos profundos, diagrfias, pruebas de producción, ensayos sobre testigo.
	II. Evaluación del yacimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establecer las características hidráulicas del almacén</li> <li>• Estimar el potencial térmico explotable</li> </ul>	Bombes de larga duración, diagrfias, evaluación de almacenes, hidroquímica.
FASE III: FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA			
Finalidad	Etapas	Objetivos	Técnicas Empleadas
DEFINIR LAS CONDICIONES DE UTILIZACIÓN Y ESTUDIAR LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA EXPLOTACIÓN	I. Estudio térmico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elegir los utilizadores</li> <li>• Definir el aporte geotérmico y seleccionar el sistema</li> </ul>	Estudios de mercado, análisis energético de sistema de utilización
	II. Balance energético, económico y financiero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir los parámetros económicos del sistema</li> </ul>	Análisis energético, cálculo de inversiones y costes, estudios de financiación
	III. Montaje jurídico y administrativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir el modelo de empresa explotadora y modo de operación</li> </ul>	Estudios jurídicos. Estudios de mercado.

Fuente: Congreso de Energía Geotérmica (Sánchez Guzmán, 2008). Investigación de yacimientos geotérmicos de baja temperatura. Aplicación: usos directos de calor.

En el Atlas Geotérmico de Aragón (Gobierno de Aragón, 2001) se reflejan de forma muy sintética las diferentes fases de investigación para el caso de yacimientos geotérmicos de alta y media entalpía:

*Tabla 5.3 Investigación de yacimientos geotérmicos de alta y media entalpía (Producción de electricidad) (Fuente: Sánchez Guzmán, J. 1985 – Elaboración: Propia).*

FASE	FINALIDAD	ETAPAS	OBJETIVOS	TÉCNICAS EMPLEADAS
1. Reconocimiento	Selección de regiones geotérmicas y proposición de programas	I. Recopilación y evaluación de información	Antecedentes Documentación Planificación de etapas posteriores	Topografía, imagen de satélite y aérea, cartografía geológica Geofísica, etc
		II. Investigación de campo y laboratorio	Estructura geológica Geoquímica	Geología, Hidrogeología
		III. Tratamiento de datos e interpretación	Definición de procesos agua-roca Síntesis geológica Síntesis hidrogeológica	Tratamientos estadísticos, cálculos geotermométricos, equilibrio fluid-roca, hidroquímica
		IV. Conclusiones y recomendaciones	Selección regiones geotérmicas Modelo probable de yacimiento	Geología, hidrogeología
2. Prefactibilidad	Selección de áreas Estimación potencial geotérmico Proposición de modelo de formación	I. Estudio geológico	Fuente de calor Estructura geológica Definición de almacén y cobertera	Cartografía geológica, tectónica, estratigrafía, petrografía, geoquímica
		II. Estudio hidrogeológico y geoquímico	Hidroquímica Condiciones de equilibrio agua-roca Proceso de los fluidos, recarga, circulación, escapes	Hidrología, hidrodinámica, hidroquímica, geoquímica, técnicas isotópicas, geotermometría, etc.
		III. Estudios geofísicos estructurales	Definición estructuras geológicas	Gravimetría, teledetección, magnetometría
		IV. Estudios geofísicos de detalle	Definir y delimitar anomalías geotérmicas	Eléctrica, sísmica electromagnética, polarización, termometrías
		V. Selección de puntos de prospección y evaluación de potencial	Definir los puntos de máxima anomalía Cálculo del potencial geotérmico Modelo de yacimiento	Síntesis geológica e hidrogeológica. Evaluación de yacimientos
3.- Factibilidad	Confirmación del yacimiento. Viabilidad técnico-económica de su explotación	I. Estudio de yacimiento geotérmico	Confirmar el modelo de yacimiento Evaluar las características del almacén	Sondeos de investigación, petrografía, ensayos de producción y laboratorio, pruebas de presión, diagráfias
		II. Estudio de la gestión técnica de la explotación	Cauda de extracción, tratamiento del fluido, procesos de conversión, etc	Evaluación de almacenes, geoquímica, termodinámica
		III. estudio de la gestión económica de la explotación	Definir el mercado de consumidores Inversiones y costes de explotación Cálculo de la rentabilidad económica	Estudio de mercado. Estudios de financiación Cálculo de costes

Fuente: Gobierno de Aragón (2001), modificado de Sánchez Guzmán (1985).

La magnitud referente al área de investigación involucrada y la duración aproximada de las investigaciones puede verse en el siguiente recuadro:

ETAPAS	FASES	OBJETIVOS	ÁREA	DURACIÓN (AÑOS)	
Investigación	Reconocimiento	Caracterización general regiones geotérmicas; modelo general de funcionamiento; priorización, y propuesta de actuaciones	Nacional 100.000-10.000 Km <sup>2</sup>	3-4	9-12
	Prefactibilidad	Selección zonas y áreas; estimación potencial; modelo de campo, y delimitación puntos de interés	Regional 2.000-500 Km <sup>2</sup>	4-5	
	Factibilidad	Confirmación y adecuación modelo campo; evaluación del yacimiento; diseño modelo explotación; valoración económica detallada	Yacimiento 100-10 Km <sup>2</sup>	2-3	
Aprovechamiento	Desarrollo y explotación	Actualización de información y evaluación precisa del modelo	Local	25-30	
	Renovación, desmantelamiento	Retorno a fase de explotación o restauración de los terrenos	Local	2-3	

Fuente: Lago et al. (2015), modificado de IDAE-IGME (2008).

### 3.3.2 TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

Dependiendo del tipo de recurso geotérmico de que se trate, las técnicas de investigación que deben llevarse a cabo son muy dispares. Se exponen a continuación algunos métodos de investigación para el caso de recursos geotérmicos de muy baja energía, así como de baja energía, tal y como se explica en la Guía de la Energía Geotérmica (Llopis y Rodrigo, 2010):

#### 3.3.2.1 Técnicas de investigación recomendadas para recursos geotérmicos de muy baja energía.

En este caso, las tipologías de explotación del recurso geotérmico pueden ser colectores horizontales enterrados, sondas geotérmicas, sondeos someros de captación de agua y cimientos geotérmicos.

- + **Técnicas destinadas a Colectores horizontales enterrados:** resultará necesario tener un conocimiento detallado del clima local, ya que la escasa profundidad de la instalación hará que este aspecto cobre especial relevancia. Asimismo, una investigación directa mediante calicatas o sondeos cortos puede ser suficiente para tener una breve caracterización geológica y geotécnica de los primeros metros de terreno.
- + **Técnicas destinadas a Sondas geotérmicas verticales:** dado que la profundidad de instalación de la sonda geotérmica (o campo de sondas geotérmicas) es muy variable, desde 20 metros a más de 100 metros, será necesario llevar a cabo una campaña de investigación geológica para definir las características geológicas e hidrogeológicas del terreno, incluyendo: parámetros de las rocas atravesadas (especialmente conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica, porosidad y permeabilidad), estructura geológica, presencia de niveles freáticos y/o piezométricos, red de flujo subterráneo, tipología de los acuíferos y parámetros del mismo (gradiente hidráulico, transmisividad). Habitualmente, los parámetros térmicos del terreno suelen estimarse de forma teórica a través de valores estandarizados. No obstante y en función de las

dimensiones de la instalación, podría ser necesario realizar un Test de respuesta térmica en sondeo siguiendo las recomendaciones de la norma UNE 100715-1:2014.

- + **Sondeos de explotación de acuíferos someros:** es necesario un estudio geológico y un estudio hidrogeológico detallado a nivel local donde se precise la presencia y variabilidad de los niveles freáticos y piezométricos, la transmisividad de tales acuíferos.
- + **Cimentaciones geotérmicas:** La profundidad de la investigación vendrá marcada por la longitud de la cimentación profunda (pilotes de hormigón armado, muros pantalla). La caracterización geotécnica de los materiales atravesados está implícita en la investigación necesaria para el diseño de la cimentación profunda. Además, deberán incluirse parámetros térmicos de las rocas atravesadas y de nuevo, un estudio preciso de la presencia de unidades acuíferas, altura de los niveles freáticos y piezométricos, gradiente hidráulico y transmisividad, variaciones estacionales, etc.
- + **Técnicas para aplicación geotérmica en Túneles:** este último caso es aplicable a infraestructuras lineales bajo tierra con un gran espesor de recubrimiento de macizo rocoso que alberga aguas subterráneas en su interior y que debido al gradiente geotérmico natural pueden constituir una fuente de calor a través de la sección del túnel. Las campañas de investigación geológica y geotécnica llevadas a cabo para la modelización del terreno pueden implementarse con la obtención de parámetros térmicos de los materiales atravesados con el fin de caracterizar su potencial geotérmico.

Otras aplicaciones recogidas en la bibliografía tales como **Rodríguez y Díaz (2009)**, plantean técnicas como el uso de galerías mineras en explotaciones cercanas al final de su vida útil como intercambiadores de calor para aplicaciones en sistemas geotermales de baja entalpía.

### *3.3.2.2 Técnicas de investigación recomendadas para recursos geotérmicos de baja energía.*

La potencial explotación de recursos geotérmicos de baja energía requiere estudios de índole muy diversa que en conjunto, permiten caracterizar con gran definición un potencial recurso geotérmico, incluyendo la modelización del flujo subterráneo.

**IDAE e IGME (2008)** muestran la siguiente tabla sintética donde resumen las principales técnicas de investigación aplicables a todos los tipos de yacimientos geotérmicos. Obviamente, para cada tipo (alta, media, baja y muy baja entalpía), deberán seleccionarse las técnicas más convenientes en cada caso:

Técnicas	Objetivos	Pruebas
Geológicas	Confirmar las condiciones geológicas del yacimiento: foco de calor, almacén y cobertera	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotointerpretación</li> <li>• Tectónica</li> <li>• Estratigrafía</li> <li>• Volcanología</li> <li>• Sismología</li> <li>• Petrografía</li> <li>• Datación absoluta</li> </ul>
Geoquímicas	Confirmar la existencia de fluidos geotérmicos y definir sus características físico-químicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidroquímica</li> <li>• Geotermometría química</li> <li>• Técnicas isotópicas</li> <li>• Geoquímica de gases y volátiles</li> <li>• Estudio de depósitos y alteraciones hidrotermales</li> </ul>
Geofísicas	Delimitar geoméricamente el yacimiento geotérmico y definir sus características térmicas (temperatura y flujo de calor)	<p><b>Geofísica estructural:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teledetección</li> <li>• Gravimetría</li> <li>• Magnetismo</li> <li>• Sísmica</li> </ul> <p><b>Geofísica de detalle:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eléctrica</li> <li>• Electromagnética</li> <li>• Magnetotelúricos</li> <li>• Microsismicidad</li> <li>• Polarización espontánea</li> <li>• Sísmica 3D</li> <li>• Termometrías y medidas de flujo</li> </ul>
Sondeos exploratorios	Confirmar todos los datos previos y evaluar el yacimiento geotérmico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perforación</li> <li>• Diagrafías eléctricas</li> <li>• Ensayos en testigos (porosidad y permeabilidad)</li> <li>• Pruebas de presión</li> <li>• Ensayos de producción e interferencias</li> </ul>

- + **Información directa de sondeos profundos** (generalmente destinados a investigación de petróleo y otros recursos naturales) donde se incluya además de la testificación, datos in situ de parámetros relevantes como la temperatura, la salinidad de las aguas y permeabilidad del macizo rocoso. Un trabajo detallado sobre las técnicas de medición de temperatura, presión y otros datos de interés en sondeos de investigación para potenciales recursos geotérmicos puede encontrarse en [IGME \(1981, código 00800\)](#).
- + **Estudios geológicos e hidrogeológicos** detallados que permitan definir con la mayor precisión el modelo del terreno en profundidad (litologías presentes, espesores, estructuras y accidentes geológicos, disposición de los estratos, áreas de recarga y descarga de los acuíferos, barreras hidrogeológicas, compartimentación de acuíferos, gradiente hidráulico, redes de flujo, mapas de isopiezas y modelización del flujo local y regional).
- + **Estudios geofísicos** (principalmente sísmica y gravimetría) son una herramienta útil y necesaria para tal caracterización. En los años 80, el Instituto Geológico y Minero de España realizó investigaciones geofísicas destinadas a obtener información geotérmica mediante técnicas de “dipole-mapping”, magnetotelúrico y Audio-MT ([IGME, 1982 código 00711](#)). Un análisis detallado de los diferentes métodos geofísicos que se utilizaron en las campañas geofísicas de los años ochenta se describe en [IGME \(1985, código 1291\)](#). Una interesante conclusión de este trabajo es que los diferentes tipos de recursos geotérmicos estudiados utilizaron no una sino un conjunto de varias técnicas

geofísicas conjuntamente (promedio de seis), lo que otorga más fidelidad a los resultados.

- + Finalmente, los **estudios geotermométricos** realizados en las aguas subterráneas, basados en geotermómetros químicos, geotermómetros isotópicos y modelizaciones geoquímicas basadas en las variaciones de la tasa de saturación de determinadas especies minerales. **IGME (1985)** describe un detallado análisis de las técnicas geoquímicas empleadas en la prospección geotérmica.

El siguiente recuadro muestra de forma algo más explícita las diferentes metodologías y ejemplos de posibles técnicas aplicables a cada caso

TÉCNICAS GEOLÓGICAS (FASE DE EXPLORACIÓN)		
Teledetección	Fotos satélite y aéreas de detalle	Modelo geológico: materiales infrayacentes, fracturas con circulación de fluidos en zonas permeables, P y T del reservorio
Tectónica	Fallas y régimen de fracturación	
Neotectónica	Sismicidad actual y fallas activas	
Estratigrafía	Perfiles detallados	
Petrología	Materiales encajantes	
Mineralizaciones	Rellenos de fracturas e inclusiones fluidas	
Vulcanología	Litología y composición	Posibles reservorios magmáticos
	Geoquímica gases	
	Geotermobarometría	
Hidrogeología	Geometría y localización de posibles acuíferos	
	Recargas de acuíferos	
	Balace hídrico del sector	Pluviometría, escorrentía, infiltración, evapotranspiración, parámetros hidráulicos
Técnicas geoquímicas		Muestreo; análisis de aguas y gases; identificar procesos de mezcla de aguas; identificar posible origen común o no
Aguas subterráneas	Análisis fisicoquímicos	pH (rango común 5.0-8.6)
	Análisis químicos	Composición. Potencial efecto corrosivo o incrustaciones en tuberías de explotación
	Elementos volátiles	volátiles: B, F, Ar, Hg y su distribución que oriente anomalías geotérmicas
	Isotópicos	<sup>3</sup> H (tiempo residencia del agua); mezcla de agua
Gases no condensables	CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , metano, N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , otros	
Geotermometría química en aguas		
Termómetros Empleados:	Concentración de sílice aumenta con la T <sup>3</sup>	
	Relaciones Na/K y Ca/Na (CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> y CaSO <sub>4</sub> ) aumentan su solubilidad con el descenso en T <sup>3</sup> Metano, H, CO <sub>2</sub> y SH <sub>2</sub> ; sus concentraciones dependen de la T <sup>3</sup> interna	
Técnicas geofísicas	Eléctricos	Identificación de capas, contenido de sales
	Electromagnéticos	Resistividad de rocas mediante radiación electromagnética
	Gravimétricos	Distribución de cámaras magmáticas y/o precipitados en agua termal
	Sísmicos	Identificar niveles litológicos
	Termométricos	Gradiente de T <sup>3</sup> y flujo de calor
Sondeos de exploración (confirmar datos previos y evaluar el yacimiento geotérmico)	T <sup>3</sup> y gradiente acuífero, quimismo del agua, T <sup>3</sup> agua/roca, nivel hidráulico, verificar termómetros químicos, piezómetro.	
Sondeos de Explotación	Técnicas extractivas clásicas	

Fuente: **Lago et al. (2015)**. Técnicas geológicas empleadas durante la fase de exploración.

Molinero et al. (2013) exponen un ejemplo de integración de técnicas geológicas, hidrogeológicas, geofísicas y geoquímicas para una completa modelización del recurso geotérmico. Este artículo pone en valor la necesidad de contar con un equipo multidisciplinar que permita la perfecta combinación de todos los conocimientos para lograr una integración más eficiente y rigurosa. Finalmente, ponen de relieve la modelización termo-hidráulica como herramienta clave para la modelización del sistema geotermal.

Con el objeto de citar más técnicas o herramientas de la Geología para la investigación de macizos rocosos, cabe citar también a Santesteban (1986), quien describe la importancia de las observaciones geomorfológicas e investigaciones espeleológicas de campo en macizos calizos con desarrollo de gran aparato kárstico (caso de la Sierra de Andía) como una herramienta adicional de detección de flujos de circulación preferente de agua en acuíferos calizos dominados por porosidad por fisuración y karstificación.

### 3.3.2.3 Geotermometría

Los métodos geotermométricos establecen unas condiciones de partida hipotéticas entre las que destacan: a) debe existir un equilibrio químico entre los elementos involucrados (especies minerales hidrotermales, solución acuosa y gas disuelto) en el reservorio, b) Las muestras acuosas recogidas en la superficie son totalmente representativas de las aguas presentes en profundidad dentro del reservorio (Marini L., 2004). Esta segunda condición no siempre se cumple debido a que durante el ascenso, las aguas pueden mezclarse con aguas superficiales más frías, separarse la fase gaseosa, precipitar fases minerales o reequilibrarse en condiciones de menor temperatura.

En el último caso, cabe destacar las aportaciones de Blasco et al (2018) en relación a los estudios geotermométricos, principalmente porque aportan conclusiones muy interesantes tras la aplicación de diferentes metodologías sobre macizos rocosos de naturaleza carbonatada y evaporítica (sistema hidrotermal de Arnedillo con rocas carbonatadas en contacto con facies Keuper de naturaleza evaporítica). Se describen tres métodos distintos de geotermometría: a) métodos basados en geotermómetros químicos, métodos basados en geotermómetros isotópicos y finalmente, métodos basados en la modelización geoquímica.

Los geotermómetros químicos más utilizados son: SiO<sub>2</sub>-Cuarzo, SiO<sub>2</sub>-Calcedonia, Na-K, K-Mg, Na-K-Mg (a priori destinados especialmente para sistemas hidrotermales de alta temperatura pero que en ocasiones ofrecen resultados coherentes en sistemas de baja temperatura). Fouillac y Michard (1981) describen el uso y utilidad del geotermómetro Na/Li. Fournier y Potter (1982) llevan a cabo en su estudio una revisión del geotermómetro SiO<sub>2</sub>-Cuarzo. También los trabajos de Chandler et al. (1978) aportan información sobre la relación lineal entre las temperaturas de aguas subterráneas basadas en el contenido de sílice y el flujo térmico regional. Otros geotermómetros químicos propuestos para el estudio de reservorios geotermales carbonatado-evaporíticos son Ca-Mg y SO<sub>4</sub>-F (Marini et al, 1986). Los geotermómetros isotópicos más utilizados son: δ<sup>18</sup>O, δD, δ<sup>2</sup>H, δ<sup>13</sup>C, δ<sup>34</sup>S. Los gases presentes como componentes del sistema geotermal pueden ser el H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y en menor

concentración N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, Ar, y He. Luego su detección puede ser también una herramienta a tener en cuenta en determinadas situaciones.

**La conclusión más relevante en relación con la utilización de geotermometría es la integración de todas las técnicas descritas (geotermómetros químicos, isotópicos y modelizaciones geoquímicas) para lograr una estimación más precisa de la temperatura del reservorio en profundidad (Blasco et al, 2018).** Más aún cuando se identifican situaciones de mezcla con aguas más superficiales, lo que podría invalidar algunos de los métodos clásicos de determinación.

Cabe destacar algunos estudios relevantes como el realizado por [Auqué et al. \(1989\)](#) en el sistema hidrotermal de Fitero-Arnedillo. En este estudio, consideran de gran utilidad el uso de programas de modelización cinética para el cálculo de las condiciones físico-químicas y termodinámicas del fluido hidrotermal en profundidad. La elaboración de diagramas de estabilidad de la solución con minerales alumino-silicatados como la montmorillonita cálcica y magnésica y caolinita, además de cuarzo permiten otorgar más garantía a los valores de temperatura de equilibrio obtenidos a partir de los geotermómetros clásicos. Cabe citar otros estudios en la misma línea de investigación como [Fernández et al \(1988\)](#).

[Fournier \(1977\)](#) ofrece un interesante punto de vista en el que considera importante tener en cuenta además de los geotermómetros químicos cuantitativos, las técnicas cualitativas que permitan la identificación de indicadores químicos en suelos, gases de suelos, corrientes y surgencias en los que no se observan a priori indicios de posibles anomalías térmicas en profundidad. Algunos de tales indicadores químicos de carácter cualitativo son B, NH<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, Hg, H<sub>2</sub>S y He. Algunos de estos indicadores cualitativos son útiles en casos de sistemas termales de alta temperatura con presencia de gases o agua hirviendo en profundidad.

#### *3.3.2.4 Modelizaciones de flujo subterráneo*

Es muy importante disponer de una modelización hidrogeológica del terreno en áreas donde previsiblemente se prevea la explotación de un recurso geotérmico. El conocimiento de la trayectoria del flujo subterráneo del agua, así como la respuesta del acuífero a la explotación del recurso geotérmico subterráneo, son necesarias para un diseño sostenible de futuro proyecto de explotación.

[García-Gil et al. \(2017\)](#) ofrecen una solución a través del código FEFLOW para la modelización del flujo de agua subterránea y flujo de calor en el acuífero aluvial urbano de la ciudad de Zaragoza. Para llevar a cabo la modelización mediante el citado código, han sido necesarios los siguientes parámetros: porosidad, espesor saturado, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, capacidad calorífica, conductividad térmica y dispersividad (transversal y longitudinal). Para el área de estudio se han calculado datos de infiltración y descarga para estimar los caudales, así como temperaturas en el fondo del acuífero y en superficie.

García-Gil et al. (2015) plantea en su artículo una interesante propuesta para llevar a cabo la explotación de recursos geotermales someros, como el caso de estudio del acuífero aluvial del Ebro en Zaragoza. Introducen el concepto de “factor de relajación” para otorgar a la explotación un carácter más justo y sostenible con el Medio Ambiente.

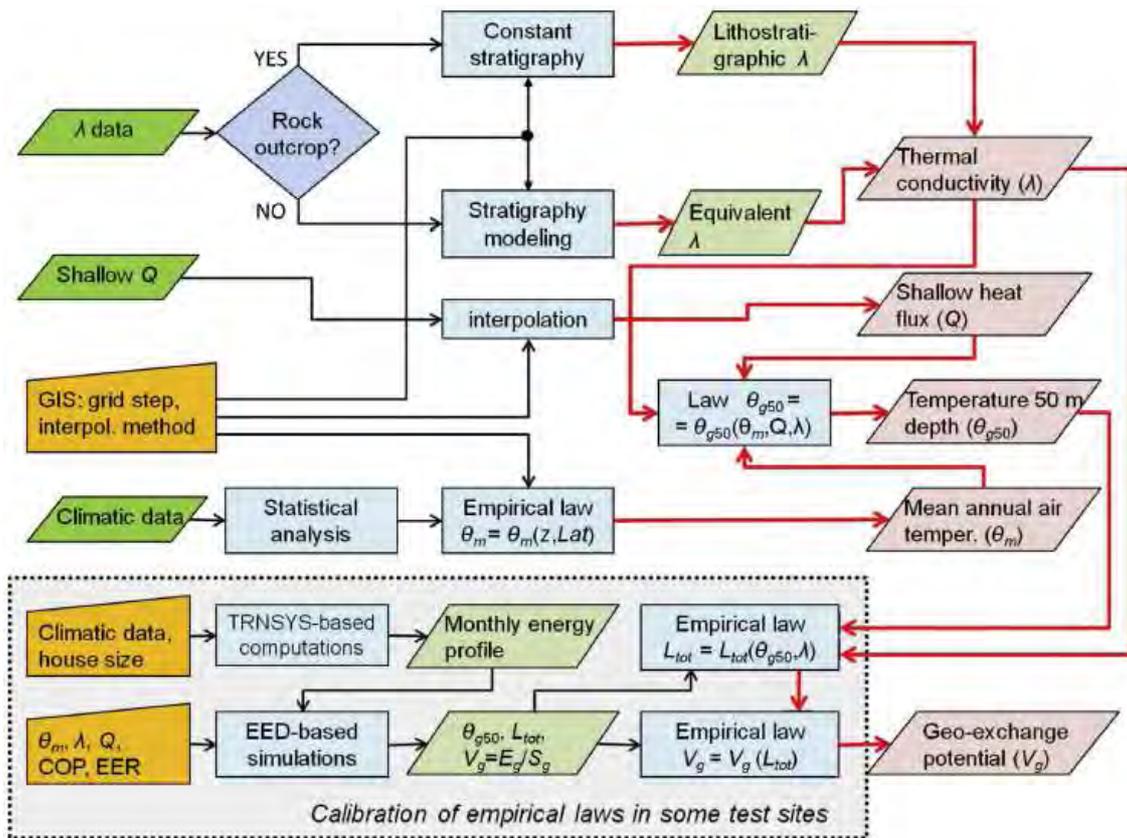
La integración de la modelización hidráulica en una plataforma GIS constituye una herramienta de gran valor, tal y como lo exponen García-Gil et al. (2015) en su estudio de sistemas geotermales de baja temperatura.

Otra aportación interesante es realizada por García-Gil et al. (2014) en relación a las variaciones del nivel de los ríos asociados a los episodios de inundaciones y su conexión con las variaciones de temperatura entre el agua del acuífero y el agua superficial, en zonas donde existen explotaciones geotérmicas de baja energía como es el caso de acuíferos urbanos (Zaragoza). Uno de los objetivos de este estudio es determinar la distancia crítica a la cual en la cual el río tiene influencia termal sobre el acuífero subterráneo y con ello, su posible influencia sobre las instalaciones geotérmicas.

Finalmente, Sanz y Yélamos (1998) modelizan el sistema hidrotermal de Alhama de Aragón y explican la importancia de integrar el conocimiento de diferentes herramientas geológicas disponibles como mapas geológicos convencionales, investigaciones geofísicas, parametrización de datos meteorológicos para la estimación de recargas, además de la geoquímica convencional e isotópica, para determinar los parámetros necesarios en la modelización del sistema hidrogeológico del área investigada.

### 3.3.2.5 Otras técnicas y métodos de modelización. SIG

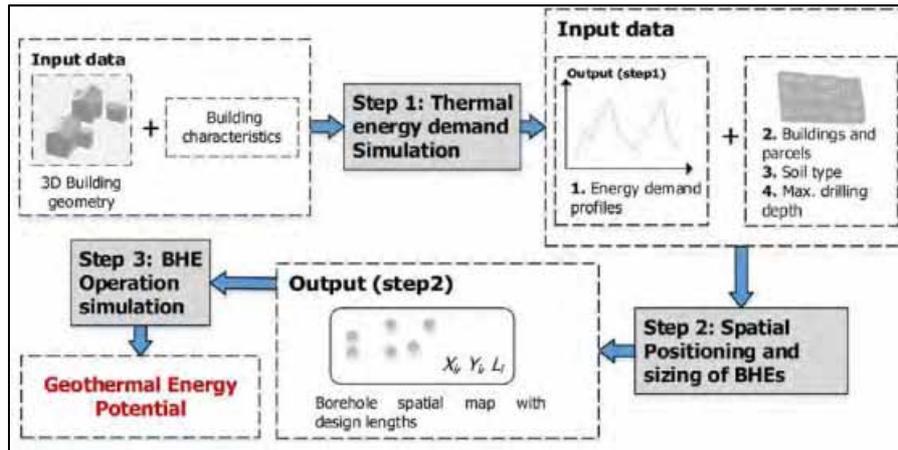
Galgaro et al. (2015) proponen una metodología para la interpretación del modelo de flujo subterráneo de energía geotérmica somera en sistemas cerrados. La utilización de Sistemas de Información Geográfica, de nuevo, constituyen una herramienta fundamental. Estos autores representan un diagrama de flujo con la metodología llevada a cabo y la secuencia de pasos para desarrollar el modelo de estudio, tal y como se muestra en la figura:



Fuente: Galgaro et al. (2015). Significado de los parámetros:  $\lambda$ : thermal conductivity,  $Q$ : shallow geothermal heat flux,  $\theta_m$ : average annual surface (air) temperature,  $\theta_{g50}$ : ground temperature at 50m depth,  $L_{tot}$ : total length of borehole heat exchanger,  $V_g$ : geo-exchange potential,  $z$  and  $Lat$ : elevation above sea level and latitude of a site respectively, COP and EER: coefficient of performance and energy efficiency ratio of a heat pump respectively.

En este estudio, los datos de carácter geológico y climático constituyen el punto de partida para el desarrollo del modelo. La implementación de la información de carácter puntual en sistemas SIG permiten su interpolación en toda el área de investigación, integrando además la información con otros datos/mapas temáticos disponibles, mejorando así la precisión del modelo del terreno.

Miglani et al. (2018) muestran en su estudio la gran aplicabilidad para determinar el potencial geotérmico a largo plazo en el caso de áreas urbanizadas, teniendo en cuenta las posibles interferencias con sistemas de captación geotérmica adyacentes, principalmente en sistemas de intercambio de calor mediante intercambiadores verticales (BHE). Mediante los sistemas SIG se consigue una modelización que recoge las interferencias de captaciones vecinas, estimando así el potencial a largo plazo.



Fuente: Miglani et al. (2018). Pasos clave de la metodología con entradas y salidas del sistema.

Este estudio demostró que las técnicas de captación geotérmica pueden sobreestimar su capacidad si no se tienen en cuenta las interferencias con otras captaciones cercanas. También proponen el uso de colectores solares termales como sistemas de apoyo auxiliar.

SchellSchmidt and Hurter (2003), en su metodología de investigación de reservorios geotermiales, establecen la relevancia de disponer de un sistema de información geográfica con al menos cuatro grandes tipos de mapas de isolíneas con la siguiente información:

- profundidad a la que se encuentra el techo del reservorio geotermal y sus variaciones, con el fin de determinar la necesidad y recursos de investigación disponibles y el coste de la campaña exploratoria.
- espesor de dicho reservorio. Establecen un espesor mínimo recomendable superior a 20 metros.
- Temperatura a techo del acuífero, con el fin de establecer la tipología de la instalación geotérmica aplicable según dicho parámetro.
- Porosidad de la unidad acuífera, para deducir los restantes parámetros de permeabilidad y transmisividad de la formación rocosa.

Finalmente, IGME (1982, código 37018), establece una metodología para el tratamiento informático de la documentación referente a la analítica de muestras en trabajos de interés geotérmico. Se demuestra la relevancia de identificar cada punto de control analítico indicando en cada caso punto de muestreo (manantial, pozo, sondeo, etc), parámetros analizados y unidad a la que pertenece (acuífero, estructura geológica, litologías).

### 3.4 CONTENIDO MÍNIMO DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN GEOTÉRMICA

Todo proyecto de aprovechamiento de energía geotérmica de baja energía debe incluir una serie de contenidos mínimos en su memoria descriptiva, tal y como recoge la Guía de la Energía Geotérmica de la Comunidad de Madrid (Llopis y Rodrigo, 2010, Anejos):

- + Objeto.
- + Legislación aplicable.
- + Datos generales.
- + Emplazamiento geográfico.
- + Geología de la zona.
- + Perforaciones a realizar.
- + Principales alternativas.
- + Espacios protegidos y acuíferos existentes.
- + Posibles afecciones al Medio Ambiente.
- + Vigilancia y seguridad ambiental.
- + Identificación de la dirección facultativa.
- + Programa de mantenimiento.
- + Presupuesto.
- + Planos.
- + Anejos.

La Norma UNE 100715-1:2014 “Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte I: Sistemas de circuito cerrado vertical”, describe detalladamente el contenido de un proyecto de instalación geotérmica de esta índole.

### 3.5 IMPACTOS DERIVADOS DE LA EXPLOTACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

Es muy necesario disponer de un estudio detallado de los posibles impactos sobre el reservorio subterráneo, así como de los suelos y las aguas involucrados, antes de llevar a cabo cualquier proyecto de explotación geotérmica. Además, tales impactos también afectan a la eficiencia de la propia instalación geotérmica a lo largo del tiempo.

Los efectos pueden ser muy diversos (hidráulicos, térmicos y químicos), tales como la alteración de los gradientes hidráulicos, cambios en la cinética de las reacciones químicas por variaciones de temperatura, variaciones físico-químicas (tasas de precipitación mineral, tasas de intercambio de CO<sub>2</sub>, etc).

IGME (1982, código 00750) cita tres grandes problemas relacionados con la explotación de recursos geotérmicos de baja entalpía, principalmente situados en los pozos de la instalación geotérmica: corrosión (de tipo químico o de tipo bacteriano), obstrucción y enconstramiento (por precipitación).

García-Gil et al. (2016) en su artículo de Journal of Hydrogeology, plantean una modelización de flujo para sistemas geotérmicos de bombeo de calor de tipo abierto en el acuífero aluvial del Ebro, con el objetivo de cuantificar los riesgos de dichos tipos de explotación. Algunos de los primeros impactos observados fue la reducción de la conductividad hidráulica inducida por la precipitación de calcita (carbonato cálcico) alrededor de los pozos de inyección. Dicho proceso de precipitación está estrechamente relacionado con la tasa de intercambio de CO<sub>2</sub> con la atmósfera. Otro de los grandes impactos observados es el colapso del sistema de inyección (fallos geotécnicos por procesos de disolución). Este segundo riesgo está asociado a la naturaleza evaporítica del sustrato rocoso que delimita la base del acuífero aluvial.

García-Gil et al. (2016) en su artículo de Science of the Total Environment, documentan la posible relación entre la concentración de ciertos elementos químicos traza en las aguas subterráneas en relación con las anomalías de temperatura en sistemas termales someros como el acuífero aluvial de la ciudad de Zaragoza. La relación entre la variación de temperatura en el agua subterránea y la variación en la concentración de algunos metales pesados como Bario, Boro, Cadmio y Níquel no arroja una correlación significativa. Por otro lado, estos sistemas de bombeo de calor (GWHP) pueden alterar el pH y alcalinidad, el potencial redox, la cantidad de oxígeno disuelto o el total de sólidos disueltos (conductividad eléctrica). Estos parámetros tienen estrecha relación con la concentración de metales pesados y elementos traza en las aguas. Este estudio justifica la necesidad de adoptar medidas que garanticen la preservación de las características físico-químicas de las aguas subterráneas y evitar así su contaminación y/o alteración de sus propiedades.

Bonte et al. (2013) describen en su artículo los impactos sobre acuíferos que son explotados para captación de agua de boca y así como para explotación geotérmica somera, en este caso asociados a la movilidad del arsénico y su repercusión en la calidad del agua. Se estudiaron

sedimentos arenosos no consolidados de carácter aluvial y se demostró como la variación de temperatura tenía repercusiones en la movilidad de algunos elementos químicos como el Arsénico (As), además de otros elementos como P, Si, As, Mo, V, B y F. Este artículo concluye además que el efecto inducido por el aumento de temperatura puede tener relación con procesos de disolución incongruente y/o desorción sobre diferentes fases minerales.

Existen otros impactos relacionados con la explotación de recursos geotérmicos que describe [López, I., \(2014\)](#) en el Curso Online de Especialista en Geotermia somera y certificación energética de edificios, organizado por el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos:

- + Afecciones a la calidad del aire por emisión de partículas de polvo generadas por la implantación del sistema de explotación geotérmica.
- + Ocupación del suelo, especialmente para algunas técnicas más extensivas superficialmente y sobre todo en áreas urbanizadas donde pudieran afectar a canalizaciones e infraestructuras existentes, incluyendo además afecciones a zonas verdes arboladas.
- + Contaminación química en aguas, suelos y sustrato por vertidos, fugas, uso de aditivos o manipulaciones incorrectas derivadas de la ejecución de la instalación. Principalmente relevante en sistemas geotérmicos abiertos.
- + Contaminación térmica, como ya se ha descrito en párrafos anteriores.
- + Variaciones del nivel freático (o piezométrico).
- + Generación de residuos.
- + Emisión de ruidos.

Otros impactos son comentados por [Garrido et al. \(2010\)](#) para sistemas de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía para refrigeración y calefacción de espacios. Destacan impactos como el arrastre de arenas (en acuíferos aluviales arenosos, en este caso del río Ebro) debido al elevado volumen de agua bombeado, además de colapsos y desbordamiento del caudal inyectado, todo ello provocado por un mal diseño hidrogeológico del aprovechamiento. Estos autores ponen de relieve la importancia de determinar un correcto modelo hidrogeológico del terreno para poder determinar la distancia mínima aconsejable entre pozos de captación geotérmica de la misma instalación, así como de los pozos de vertido y de otros sistemas de captación aledaños. Finalmente, se aconseja que el salto térmico no supere los 10°C y que la temperatura de los pozos de vertido no alcance los 30°C.

[Somogyi et al \(2017\)](#) incluyen además la importancia de determinar el tiempo de recuperación para diferentes tipos de sistemas geotermiales de cara a definir y proyectar las instalaciones geotérmicas.

[Garrido et al. \(2016\)](#) ponen de manifiesto la falta de información sobre la posible interacción entre captaciones geotérmicas vecinas, pero sobre todo, hacen hincapié en las alteraciones geoquímicas asociadas al impacto de las instalaciones geotérmicas. Además, muestran como los sistemas de captación geotérmica somera en zonas con sustrato rocoso yesífero (como es el caso de la ciudad de Zaragoza), conllevan procesos de disolución de halita y yeso y pueden provocar fenómenos de colapso del terreno en los alrededores de los pozos de bombeo. El

estudio de datos químicos del agua y su modelización geoquímica han sido herramientas indispensables para este estudio.

Coloma et al. (1997) ponen en valor este aspecto como patrimonio hidrogeológico, indicando además la legislación de referencia sobre la que se basa la protección de las aguas minero-medicinales. También se pone en valor la necesidad de estudiar los perímetros de protección de los acuíferos y el perfecto conocimiento del funcionamiento hidrogeológico. En este mismo sentido, IGME (1996) describe la metodología de perímetros de protección para las aguas minero-medicinales.

Possemiers et al. (2014) describen en su artículo la potencial vulnerabilidad de las aguas subterráneas destinadas a uso de boca cuando se instalan captaciones geotérmicas. En este sentido, afirman que las aguas subterráneas más profundas en el acuífero son más susceptibles de sufrir cambios cuando se mezclan con aguas más someras que son inyectadas a más profundidad en los pozos de intercambio de calor y que están más influenciadas por la actividad humana. La elección de los puntos de perforación y el diseño (longitud y distribución de los pozos de captación) juegan un papel importante que es necesario tener en cuenta cuando se modeliza el diseño del sistema. Por tanto, consideran que el sistema de captación geotérmica debe tener integrado un sistema de monitoreo del quimismo de las aguas con el fin de evaluar posibles afecciones a su calidad, sobre todo en la proximidad de posibles captaciones hidráulicas para uso de boca.

Son numerosos los tipos de procesos geoquímicos en los que pH y temperatura pueden tener un efecto, como son la formación de complejos, reacciones ácido-base, reacciones de oxidación-reducción, reacciones de disolución-precipitación, hidrólisis y reacciones de adsorción-desorción, además de otros procesos de carácter bioquímico.

Un estudio exhaustivo de los impactos térmicos de instalaciones geotérmicas someras sobre las aguas subterráneas puede encontrarse en CHE e IGME (2014). Este trabajo explica los aprovechamientos térmicos de las aguas subterráneas de la localidad de Zaragoza y la explotación de su acuífero urbano, describiendo metodologías y parámetros de control del acuífero, características de sus aguas, impactos generados, modelización matemática del flujo de calor e interferencias térmicas entre aprovechamientos.

No cabe duda alguna de que el agua es el principal recurso natural de nuestra comunidad y constituye parte de nuestra riqueza. Su protección y preservación es fundamental ya que dichas aguas, tanto las aguas superficiales (frías, termales y/o minero-medicinales) son a su vez vulnerables a la contaminación.

No cabe duda de que la implantación de políticas y normas de actuación para el control y mantenimiento de instalaciones geotérmicas debe ser imprescindible para evitar, reducir y mitigar los posibles impactos de este tipo de explotaciones.



## **4 INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE NAVARRA CON INTERÉS GEOTÉRMICO**

La Comunidad Foral de Navarra cuenta con una enorme riqueza geológica, ya que alberga un registro geológico muy extenso y presenta multitud de regiones con muy diversos estilos tectónicos y gran variedad paisajística y climática. Algunos documentos de referencia como [Gobierno de Navarra \(2010\)](#), [Floristán, A. \(1995\)](#) y [Del Valle y Villanueva \(1988\)](#), entre otros destacados, dejan claramente patente este hecho.

A efectos del presente estudio, se considera suficiente con indicar de forma muy sintética cuáles son los aspectos singulares de la geología navarra que pudieran aportar información directa en relación con un estudio geotérmico:

- a) Estructuras y accidentes geológicos más relevantes en cada área.
- b) Principales litologías presentes.
- c) Grandes unidades Hidrogeológicas y principales acuíferos y manantiales.

#### 4.1 GRANDES DOMINIOS TECTÓNICOS Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

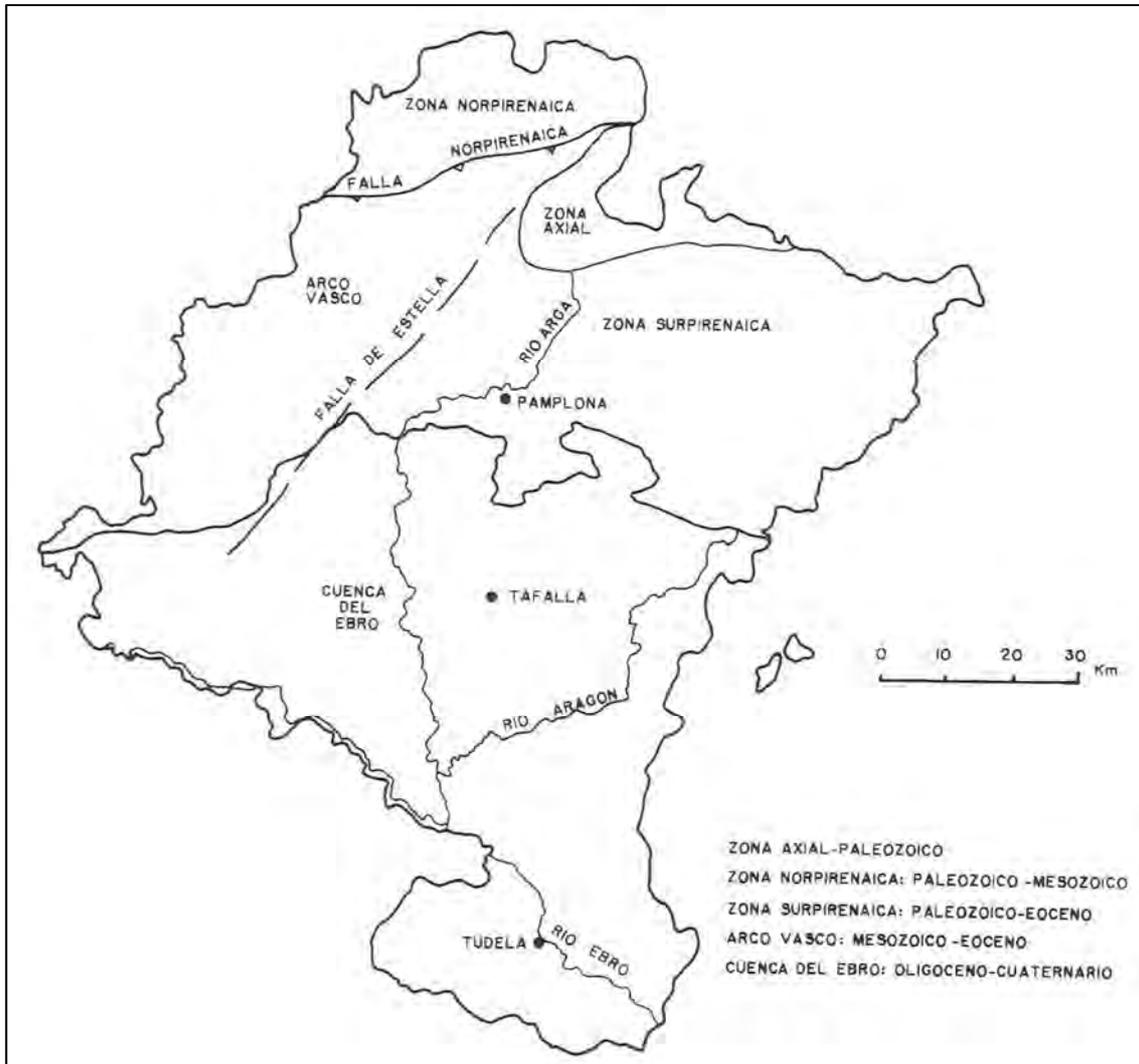
Siguiendo las directrices establecidas en el Mapa Geológico de Navarra 1:200.000 del Gobierno de Navarra, así como otras observaciones recogidas en el documento “Síntesis Geológica de Navarra” del Gobierno de Navarra, se establecen los siguientes dominios tectónicos:



Fuente: Memoria del Mapa Geológico 1:200.000 del Gobierno de Navarra.

Se indican los principales Dominios tectónicos y las Áreas o sectores en los que se dividen. En este mapa no se delimita un último Dominio (aunque sí se cita), correspondiente al Dominio de la Cordillera Ibérica (Sistema Ibérico), donde se ubicaría el complejo termal de Baños de Fitero.

En el siguiente mapa, se indican además algunas de las fallas más representativas del territorio navarro, así como algunos de los ríos más caudalosos:



Fuente: Memoria del Mapa Geológico 1:200.000 del Gobierno de Navarra.

Un Dominio Tectónico es una subdivisión geográfica de carácter estructural que viene marcado por un sustrato rocoso cuyas características le permiten diferenciarse de otros dominios adyacentes, como el estilo tectónico, es decir, principales orientaciones de fracturación, direcciones paleomagnéticas observadas, número y distribución de las familias de esfuerzos, tipos de materiales rocosos presentes y el estilo de deformación que presentan, principalmente. Las observaciones en superficie gracias a la cartografía geológica existente, la información procedente de sondeos profundos y las técnicas geofísicas, permiten llevar a cabo esta diferenciación.

Los diferentes Dominios Tectónicos así definidos son los siguientes de Norte a Sur (y de Este a Oeste):

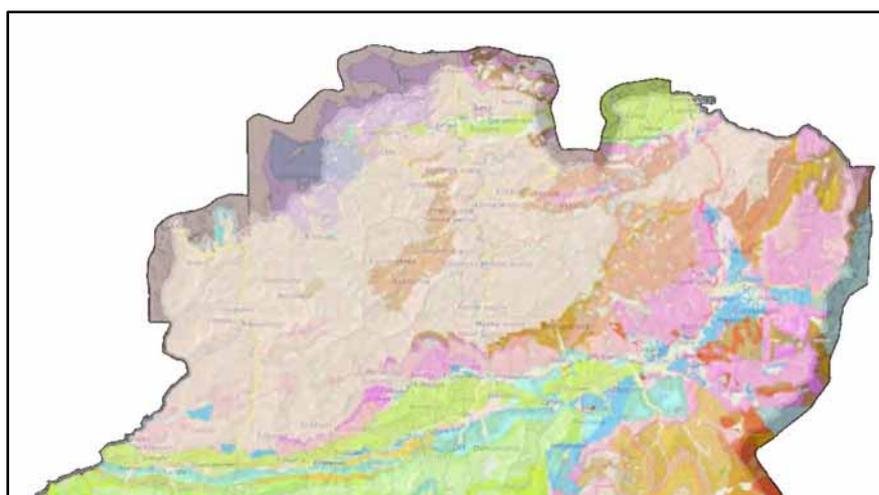
- Dominio Norpirenaico (correspondiente al Macizo de Cinco Villas al norte del Baztán).
- Dominio Surpirenaico, al este.
- Dominio de la Cuenca de Pamplona, en el área central de Navarra.
- Dominio Vasco-Cantábrico, al oeste.
- Dominio de la Depresión del Ebro.

Cada uno de los Dominios aquí definidos está a su vez subdividido en principales subdominios con estructuras singulares o características bien definidas. Asimismo, en cada dominio o subdominio se han reconocido una serie de estructuras geológicas (pliegues, estructuras diapíricas, etc) y accidentes geológicos (fallas, cabalgamientos) significativos.

En el siguiente esquema se ha sintetizado toda la información:

➤ **Dominio Norpirenaico**

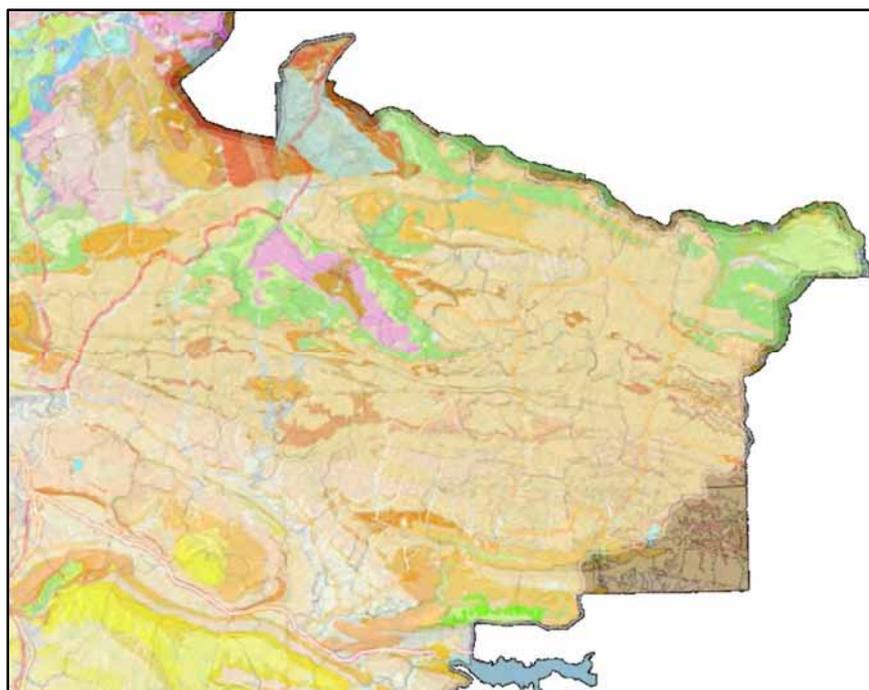
- + *Macizo de Cinco Villas*
  - Stock granítico de Peñas de Aia
  - Falla inversa de Arichulegui
- + *Depresión intermedia*
  - Sinclinorio de la Depresión intermedia
- + *Sinclinal de Vera*
  - Sinclinal de Vera de Bidasoa-Zugarramurdi
- + *Sinforme de Echalar*
- + *Los diques basálticos* de Ibantelli, Larrun, Mendaur y Yanci-Aranaz y (Lasheras et al, 1999)



Fuente: Imagen tomada a través del visor IDENA (Infraestructura de datos espaciales de Navarra) combinando capa de cartografía topográfica y mapa geológico 1:25.000.

➤ **Dominio Surpirenaico (Montaña oriental)**

- + *Macizo de Quinto Real*
  - Cabalgamiento de Roncesvalles
  - Anticlinal cabalgante de Ocoro
  - Anticlinal de Asturreta
  - Anticlinal volcado de Artesiaga
  - Sinclinal colgado de Orbaiceta
- + *Macizo de Oroz – Betelu*
  - Paleo-domo de Oroz-Betelu
  - Falla de Oroz-Betelu (relacionado con el monte Baigura)
  - Anticlinal de Oroz-Betelu (monte Larrogain)
  - Sinclinal de Abodi (ref. monte Berrendi)
  - Falla de Abodi
  - Anticlinales del Irati (eje Arpea – Orhi)
  - Cabalgamiento de Larrau (pico Orhi)
  - Anticlinal de Lacabe
- + *Macizo de Izaga – Loiti*
  - Falla de Loiti
  - Sinclinal colgado de Izaga
  - Anticlinal de Arbayún
- + *Macizo de Lákora*
  - + Cabalgamiento de Lákora (pico Lákora)
- + *Macizo de Belagua*
  - Cabalgamiento de Belagua
- + *Macizo de Ezkaurre*
  - Anticlinales de Belabarce y Ezkaurre
- + *Anticlinorio de Guesa – Roncal*
  - Cabalgamiento de Isaba – Ochagavía
  - Anticlinal cabalgante de la Sierra de San Miguel
- + *Sierra de Illón*
  - Cabalgamiento de la Sierra de Illón
- + *Sierra de Leyre*
  - Cabalgamiento de la Sierra de Leyre
  - Anticlinal cabalgante de Lumbier
  - Falla de Yesa
- + *Cuenca potásica de Javier*



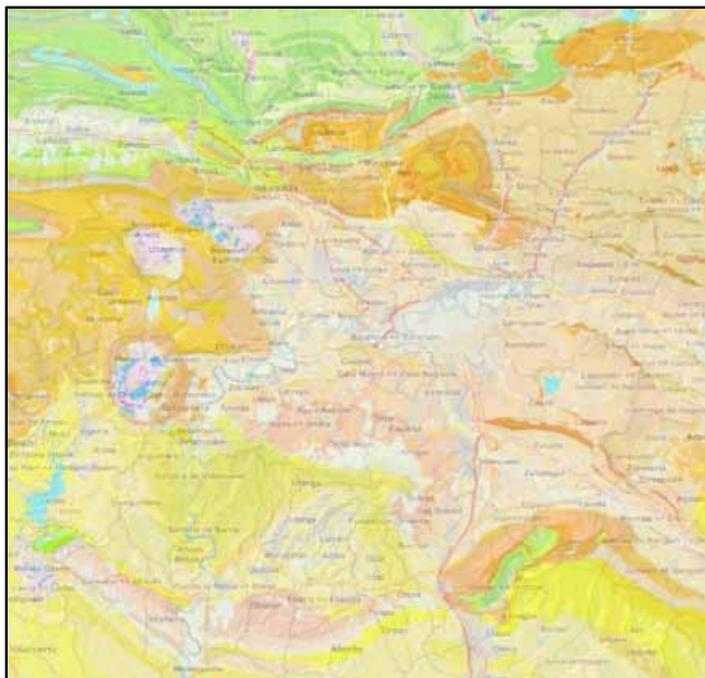
Fuente: Imagen tomada a través del visor IDENA

➤ **Dominio de la Cuenca de Pamplona**

- + *Área septentrional*
  - Sinclinal de Añezcar
  - Anticlinal tumbado de Errotz-Sarasate
  - Sinclinal de Pamplona
- + *Área meridional*
  - Falla de Beriain
  - Falla de Esparza
  - Anticlinal cabalgante de Añorbe-Cirauqui o Puente La Reina
- + *Área oriental*
  - Falla de Monreal
  - Cabalgamiento de la Sierra de Alaiz
  - Sinclinorio del Valle de Aranguren
  - Anticlinal de Zabalegui (al sur del sinclinal de Izaga)
- + *Área occidental*
  - Falla de Estella (o Pamplona)
  - Falla de Echauri
  - Diapiro de Estella
  - Diapiro de Alloz (Lorca)
  - Diapiro de Salinas de Oro
  - Diapiro de Arteta

- Diapiro de Anoz
- Diapiro de Iza

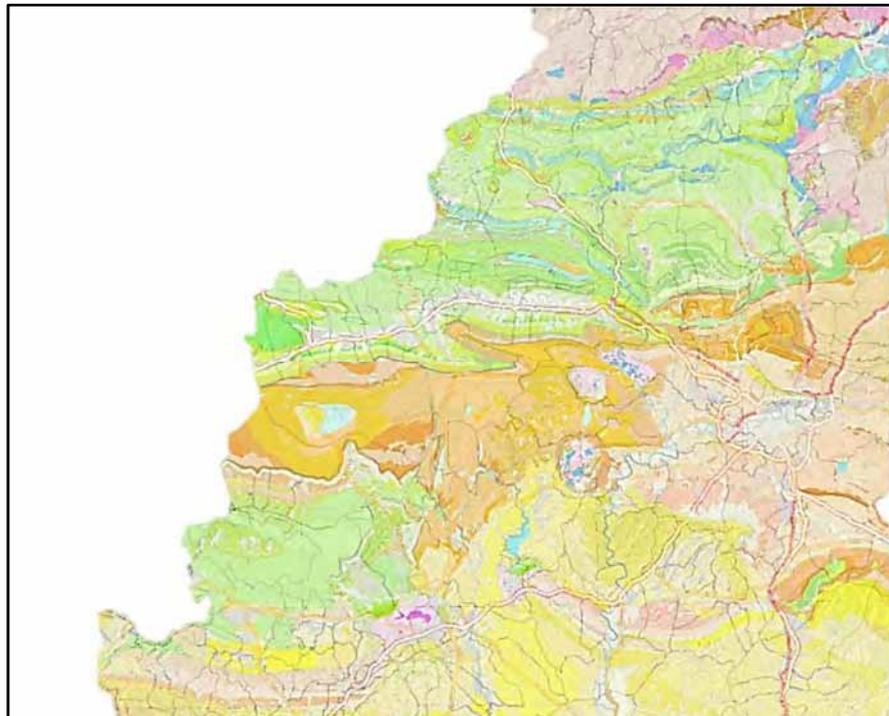
En este dominio tectónico, muchos de los accidentes geológicos indicados marcan el límite entre varios dominios y pueden ser atribuibles a dichos otros dominios. Con el objetivo de unificar un criterio, se ha elegido este dominio para su identificación.



Fuente: Imagen tomada a través del visor IDENA (Infraestructura de datos espaciales de Navarra) combinando capa de cartografía topográfica y mapa geológico 1:25.000.

- **Dominio Vasco-cantábrico (Montaña occidental)**
  - ❖ **Subdominio del Arco Vasco (estructuras con vergencia norte)**
    - + *Manto de los mármoles*
      - Falla de Leitza
      - Domo de Atallo
      - Sinclinorio de Amezketa-Almandoz (Zozaiá)
      - Anticlinal de Huici (domo de Huici)
      - Sistema de sinclinales NO-SE/NE-SO
      - Estructura replegada de Beruete
      - Diapiro de Beruete
      - Diapiro de Otzola
      - Estructura replegada de Leurza
      - Falla (cabalgamiento) de Lekunberri – Oroquieta
      - Diapiro de Lekunberri – Albiasu.

- + *Sierra de Aralar*
  - Domo de Ataun
  - Anticlinal cabalgante de Aralar (frente de cabalgamiento norte)
  - Falla de Azkárate
  - Cabalgamiento de Oderiz
  - Sinclinal central
  - Falla de Muguero
  - Falla tensional de la Barranca
- + *Utzama*
  - Cabalgamiento de Udabe
  - Diapiro de Echalecu
  - Sinclinal de Urrizona (confluencia Andía, Aralar, Cuenca de Pamplona)
  - Diapiro de Lizaso
  - Cabalgamiento de Olagüe – Múzquiz



Fuente: Imagen tomada a través del visor IDENA (Infraestructura de datos espaciales de Navarra) combinando capa de cartografía topográfica y mapa geológico 1:25.000.

#### ❖ Subdominio del Bloque Alavés con estructuras sin vergencia

- + *Sierras de Urbasa y Andía*
  - Sinclinal de Urbasa
  - Falla de Zumbel o Lizarraga

- Sinclinal de la Sierra de San Donato
- Anticlinal de Ergoyena
- Sinclinal de Andía
- Anticlinal de Anoz

❖ **Subdominio del Bloque Alavés (estructuras con vergencia sur)**

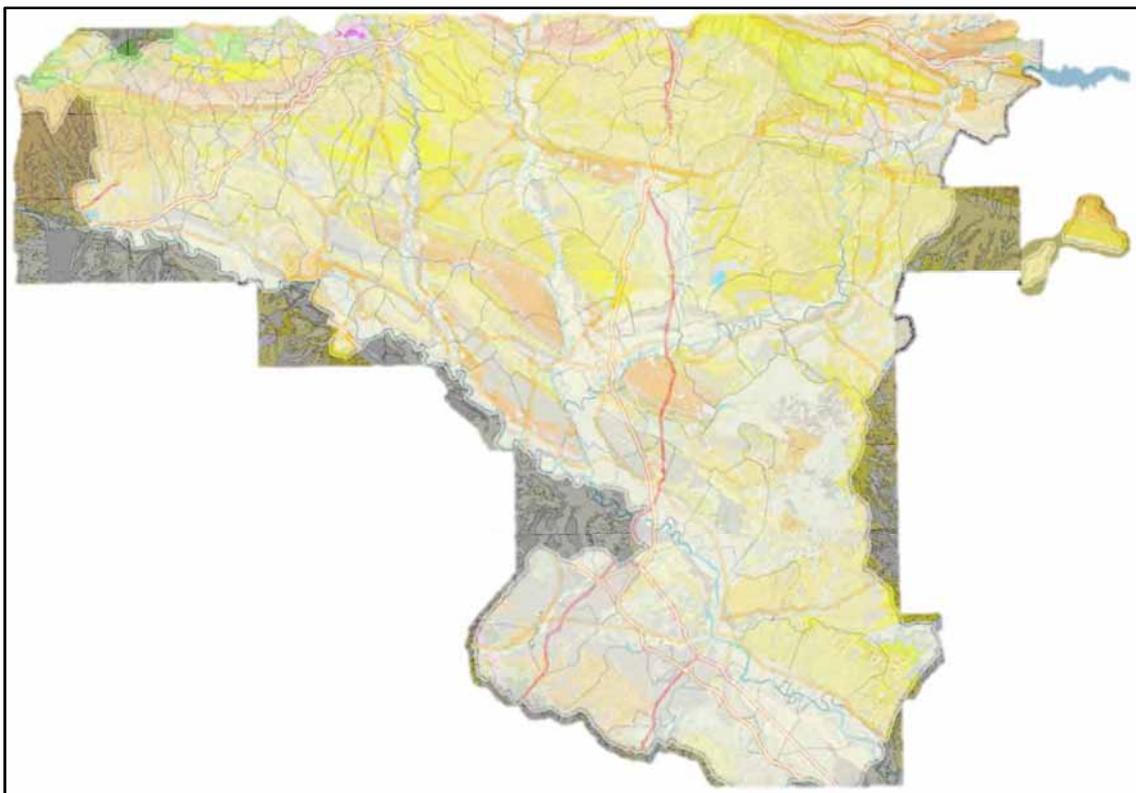
- + *Sierras de Lóquiz, Codés y de Cantabria*
  - Anticlinal de Gastiain (Lóquiz)
  - Anticlinal de Metauten (Lóquiz)
  - Falla de Piedramillera
  - Falla de Monjardín (Codés)
  - Cabalgamiento de la Sierra de Cantabria (estribación oriental)

➤ **Dominio de la Depresión del Ebro**

- + *Área oriental*
  - Sinclinal de Sangüesa
  - Sinclinal de la Sierra de Izco (Rocaforte)
  - Anticlinal y cabalgamiento de Aibar
  - Sinclinal de Ayesa-Dicastillo
  - Anticlinal de Abaiz (o anticlinal de Cáseda-Gallipienzo)
- + *Área intermedia*
  - Anticlinal de Marcilla - Falces
  - Anticlinal de Azagra
  - Anticlinal cabalgante de Tafalla
  - Anticlinal de Cárcar-Andosilla
  - Sinclinal de Lerín
- + *Área occidental*
- + *Área meridional*
  - Falla del Ebro (eje del río Ebro)
  - Falla de las Bardenas

➤ **Dominio de la Cordillera Ibérica**

- + *Área de Fitero*



Fuente: Imagen tomada a través del visor IDENA (Infraestructura de datos espaciales de Navarra) combinando capa de cartografía topográfica y mapa geológico 1:25.000.

La relación de Dominios, Áreas y accidentes geológicos es muy relevante al describir un indicio geotérmico, dada la gran importancia de la estructura geológica como factor condicionante de la red de flujo en profundidad. Por dicha razón, la contextualización de un indicio geotérmico en la estructura geológica donde se define puede ayudar a centrar y delimitar el área de investigación para futuras investigaciones.

Las manifestaciones termales de Navarra se encuentran incluidas en los siguientes dominios (y áreas):

Aguas termales de <b>Fitero</b>	Dominio de la <b>Cordillera Ibérica sector occidental</b> / Área de Fitero
Aguas termales de <b>Betelu</b>	Dominio <b>Vasco-Cantábrico</b> / Subdominio del Arco Vasco / Área del Manto de los Mármoles
Aguas termales de <b>Ibero-Etxauri-Belascoain</b>	Dominio de la <b>Cuenca de Pamplona</b> , límite con Dominio Vasco-Cantábrico / Área occidental

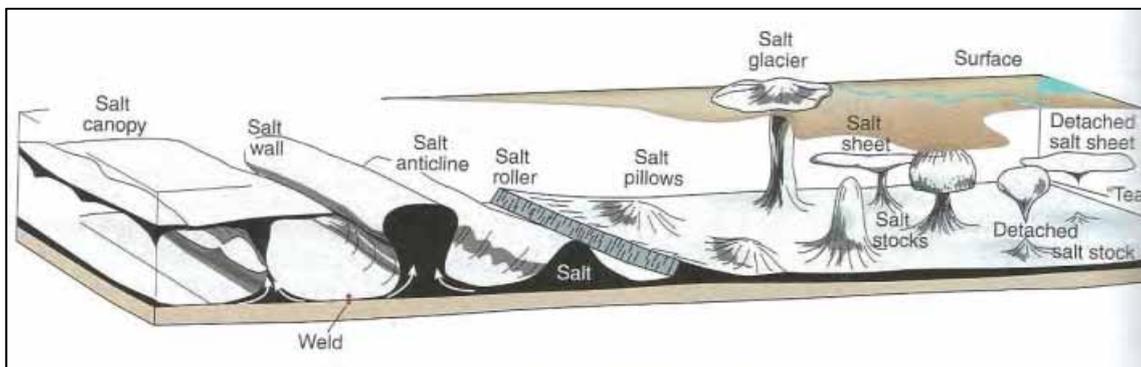
Es necesario incluir una mención a las **aguas termales de Tiermas**. A pesar de que la manifestación termal aflora en territorio aragonés, su cercanía y su correlación con las estructuras geológicas en las que se define, comunes con las definidas en Navarra, ponen de relieve el **Dominio Surpirenaico**, en el sector oriental navarro.

Finalmente, es necesario poner de relieve la presencia de grandes estructuras geológicas singulares de Navarra como son los **diapiros**. Algunos de ellos ya se han citado como estructuras geológicas en sus respectivos dominios tectónicos, pero se deben poner especialmente de relieve porque en algunos casos son testimonio de grandes fracturas de zócalo muy representativas de Navarra.

Los diapiros de Estella, Alloz, Salinas de Oro, Arteta y en menor medida Anoz, afloran en superficie alineados sobre la traza de la Falla de Estella. El diapiro de Estella representa el punto de confluencia entre la traza de dicha falla (NE-SO) y el límite sur del Bloque Alavés del Dominio Vasco-Cantábrico (E-O). Los diapiros de Anoz e Iza están alineados según una dirección ESE-ONO.

Los diapiros de Lekunberri, Beruete, Otzola, Echalecu y Lizaso están asociados a estructuras más complejas, resultado de cruces de lineaciones estructurales E-O y NO-SE e incluso N-S.

Los principales tipos de diapiros desde el punto de vista estructural se pueden resumir en los siguientes:



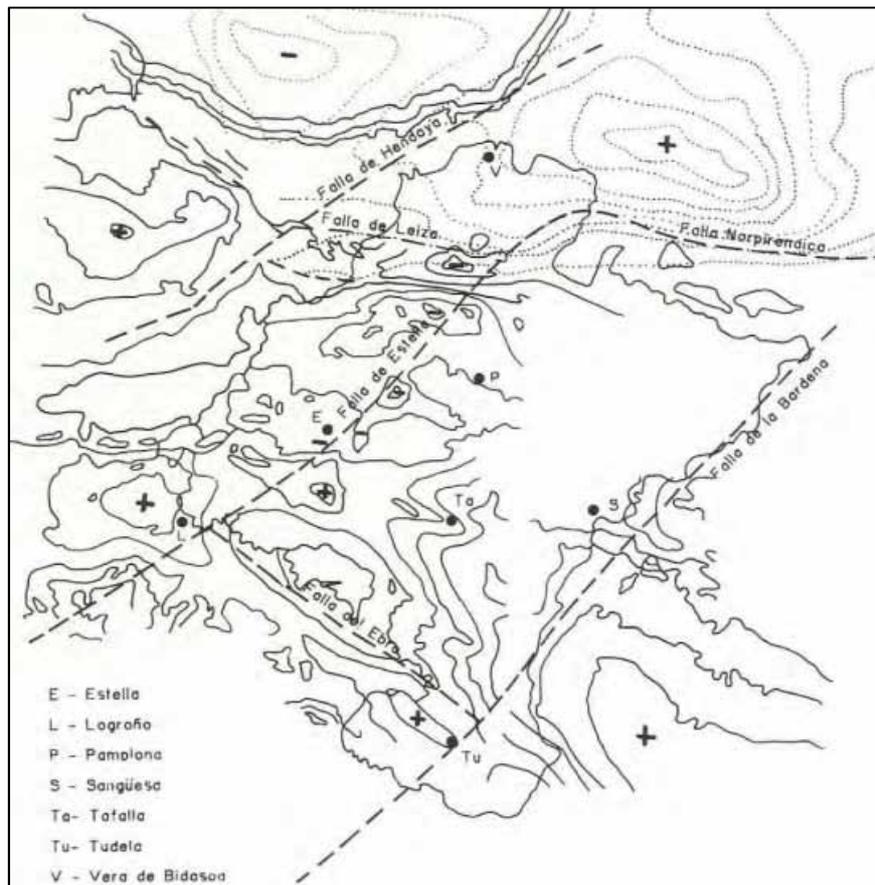
Fuente: Fossen (2016). Diferentes tipos de estructuras salinas.

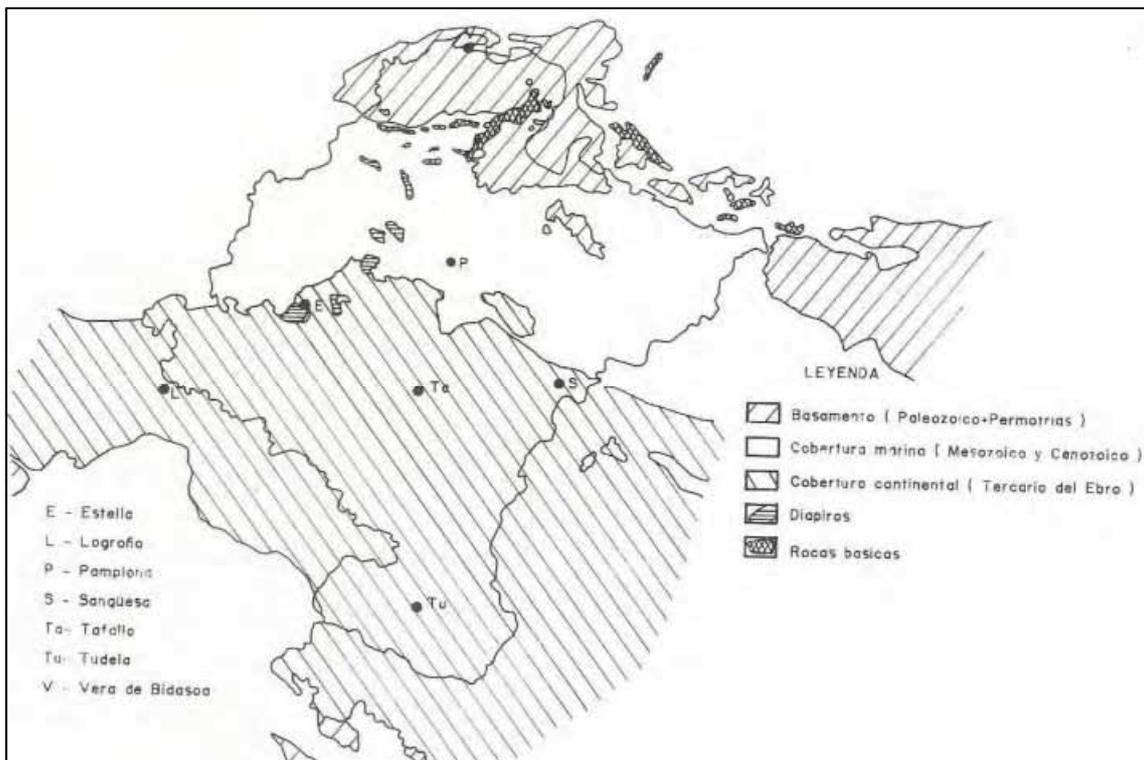
Los diapiros de Salinas de Oro, Arteta y Estella son ejemplos de chimeneas salinas de sección circular, principalmente los dos primeros, ya que el de Estella es algo más complejo. Los diapiros de Iza y Echalecu se consideran como diapiros de tipo laminar.

Los tipos de rocas más frecuentes que afloran en las estructuras diapíricas son las litologías evaporíticas (sales y yesos) y arcillosas, además de rocas carbonatadas (dolomías), rocas ígneas (ofíticas principalmente).

La importancia de estudiar la morfología y tipo estructural de estos diapiros radica en que aporta una notable información geológica sobre su génesis y sobre los accidentes geológicos profundos, aportando información complementaria sobre el posible contacto de las aguas profundas con materiales salinos evaporíticos presentes en dichos diapiros.

En IGME (1984, código 00885), este autor incluye un apartado especial dedicado a los diapiros. Tal y como cita el autor, la sal es un material con altos valores de conductividad térmica.





Fuente: Memoria del Mapa Geológico 1:200.000 del Gobierno de Navarra. Gravimetría y fallas (arriba) y grandes divisiones estratigráficas de Navarra (abajo).

## 4.2 GRANDES UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

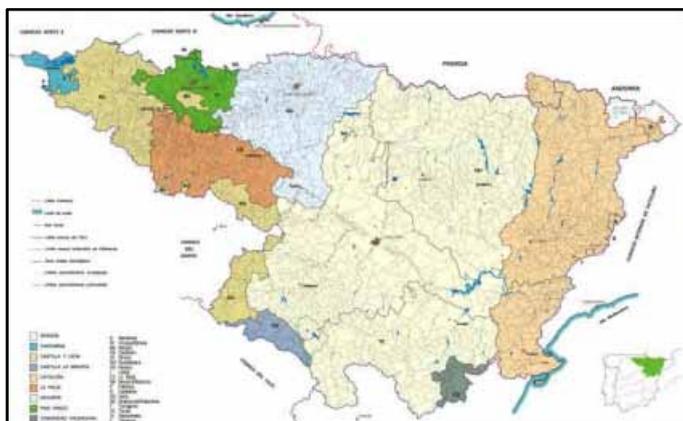
Se presenta a continuación un breve resumen de la información existente en relación con las grandes Unidades Hidrogeológicas de Navarra. Para ello se han consultado dos fuentes principales de información: a) Las Aguas Subterráneas de Navarra. Proyecto Hidrogeológico, elaborado por el Gobierno de Navarra y b) Dominios Hidrogeológicos de la Cuenca del Ebro, elaborado por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

La Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE/OPH, 1995) establece varios Dominios Hidrogeológicos que en su conjunto engloban la totalidad de la Cuenca del Ebro. Son los siguientes:



Mapa de principales dominios hidrogeológicos. Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro

Los Dominios involucrados en el territorio Foral son: a) el área oriental del Dominio *Pirineo Vasco-Cantábrico*, b) el área occidental del Dominio *Sinclinal de Pamplona-Jaca*, c) sector noroccidental del Dominio *Depresión del Ebro* y d) pequeño sector nororiental del Dominio *Demanda-Cameros*.



Delimitación de la Cuenca hidrográfica del Ebro. Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

Cada uno de los Dominios Hidrogeológicos engloba varios Sistemas Acuíferos o Unidades Hidrogeológicas de referencia. Centrándonos de nuevo en la provincia de Navarra, las Unidades Hidrogeológicas de interés serían las siguientes:

- **Dominio Pirenaico Vasco-Cantábrico**
  - + Unidad Hidrogeológica 090108 Sierra de Cantabria.
  - + Unidad Hidrogeológica 090109 de la Sierra de Lóquiz.
  - + Unidad Hidrogeológica 090110 de la Sierra de Urbasa, que incluye expresamente las subunidades de Urbasa y Andía.
  - + Unidad Hidrogeológica 090111 Basaburúa – Ulzama.
  - + Unidad Hidrogeológica 090123 de la Sierra de Aralar.
  - + Unidad Hidrogeológica 090122 de la Sierra de Aizkorri (estribación oriental).
- **Dominio Pirenaico del Sinclinal Jaca – Pamplona**
  - + Unidad Hidrogeológica 090201 del Alto Irati
  - + Unidad Hidrogeológica 090202 de la Sierra de Alaiz
  - + Unidad Hidrogeológica 090203 de la Sierra de Leyre
  - + Unidad Hidrogeológica 090204 de Peña Ezkaurre
  - + Unidad Hidrogeológica 090221 de Larra
- **Dominio de la Depresión del Ebro (terrazas aluviales y afluentes)**
  - + Unidad Hidrogeológica 090404 Cenicero - Lodosa
  - + Unidad Hidrogeológica 090405 Lodosa - Tudela
  - + Unidad Hidrogeológica 090406 Tudela - Gelsa
  - + Unidad Hidrogeológica 090407 Arga medio
  - + Unidad Hidrogeológica 090408 Cidacos
- **Dominio Ibérico de La Demanda - Cameros**
  - + Unidad Hidrogeológica 090502 Fitero - Arnedillo

El Dominio Pirenaico Vasco-Cantábrico está limitado al sur por el cabalgamiento surpirenaico, al este por el río Arga y en el resto por el límite de los afloramientos permeables más próximos al límite de la cuenca. El río Arga se considera límite natural cuyo recorrido se asemeja en cierta forma a la traza de la falla de zócalo de Estella.

El Dominio Pirenaico del Sinclinal Jaca - Pamplona está limitado al sur por el cabalgamiento surpirenaico (frente de Gavarnie), los ríos Arga y Cinca por el oeste y este respectivamente, y por el límite de los afloramientos permeables sobre la divisoria de la cuenca, al norte.

El Dominio de la Depresión del Ebro se circunscribe entre las Cadenas Ibérica y Pirenaica, siendo las formaciones aluviales cuaternarias las más relevantes.

El Dominio Ibérico de La Demanda – Cameros está limitado al norte por el cabalgamiento noribérico, al sur y oeste por la divisoria de cuenca sobre materiales de baja permeabilidad y al este por la traza del río efluente Alhama.

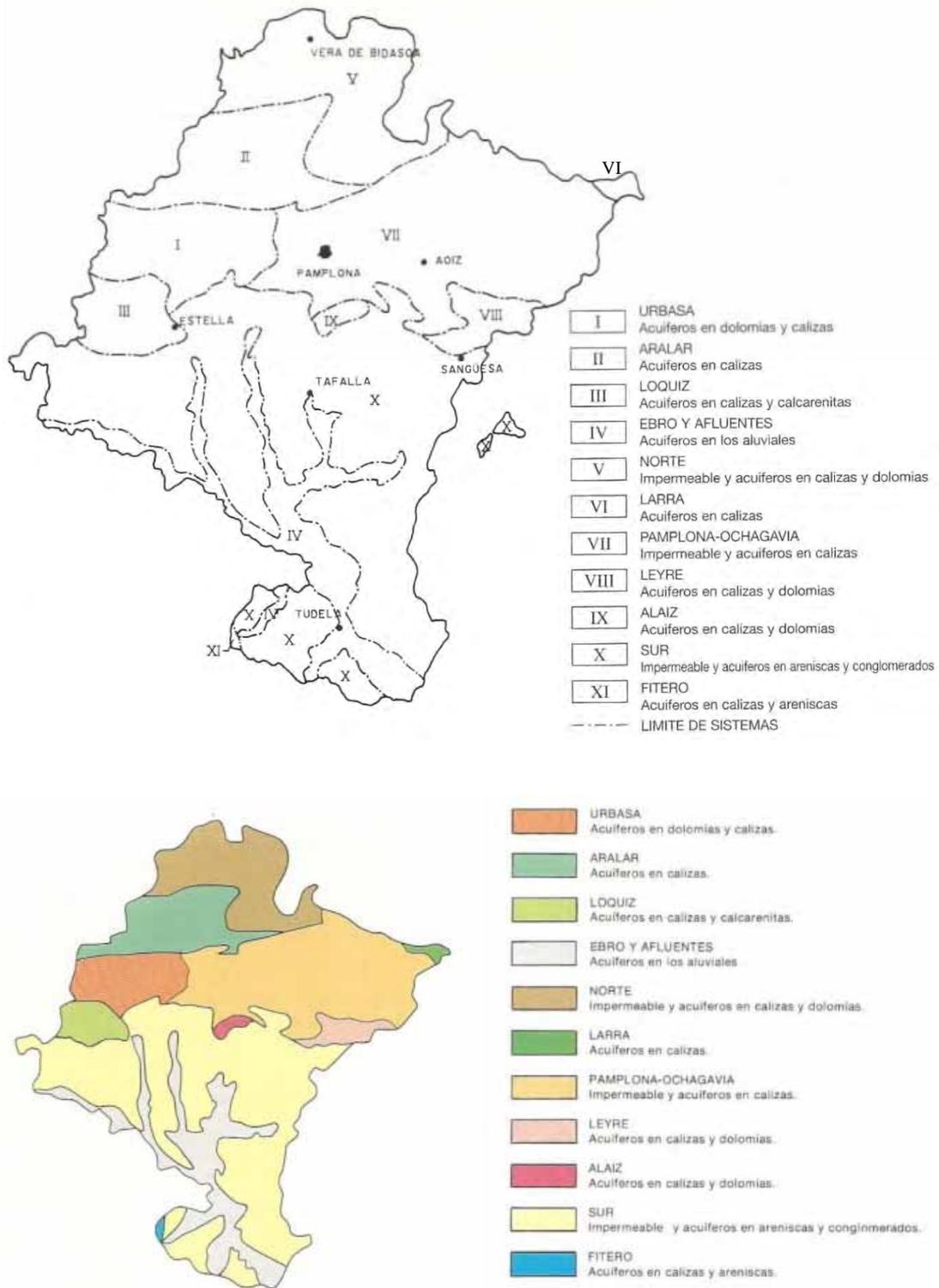
Una vez definidas las diferentes Unidades Hidrogeológicas siguiendo la nomenclatura de la Confederación Hidrográfica a nivel de de Cuenca del Ebro, se describen a continuación las Unidades Hidrogeológicas definidas en el Proyecto Hidrogeológico de Navarra (“Las Aguas Subterráneas de Navarra”. [Diputación Foral de Navarra, 1982](#)). El objetivo es mostrar la equivalencia entre las diferentes designaciones (a nivel de Cuenca regional y a nivel de Provincia de Navarra).

En Navarra se definen 11 grandes Unidades Hidrogeológicas, las cuales se identifican en base a las litologías presentes y la estructura geológica de cada una de ellas. Son las siguientes de Norte a Sur y de Este a Oeste:

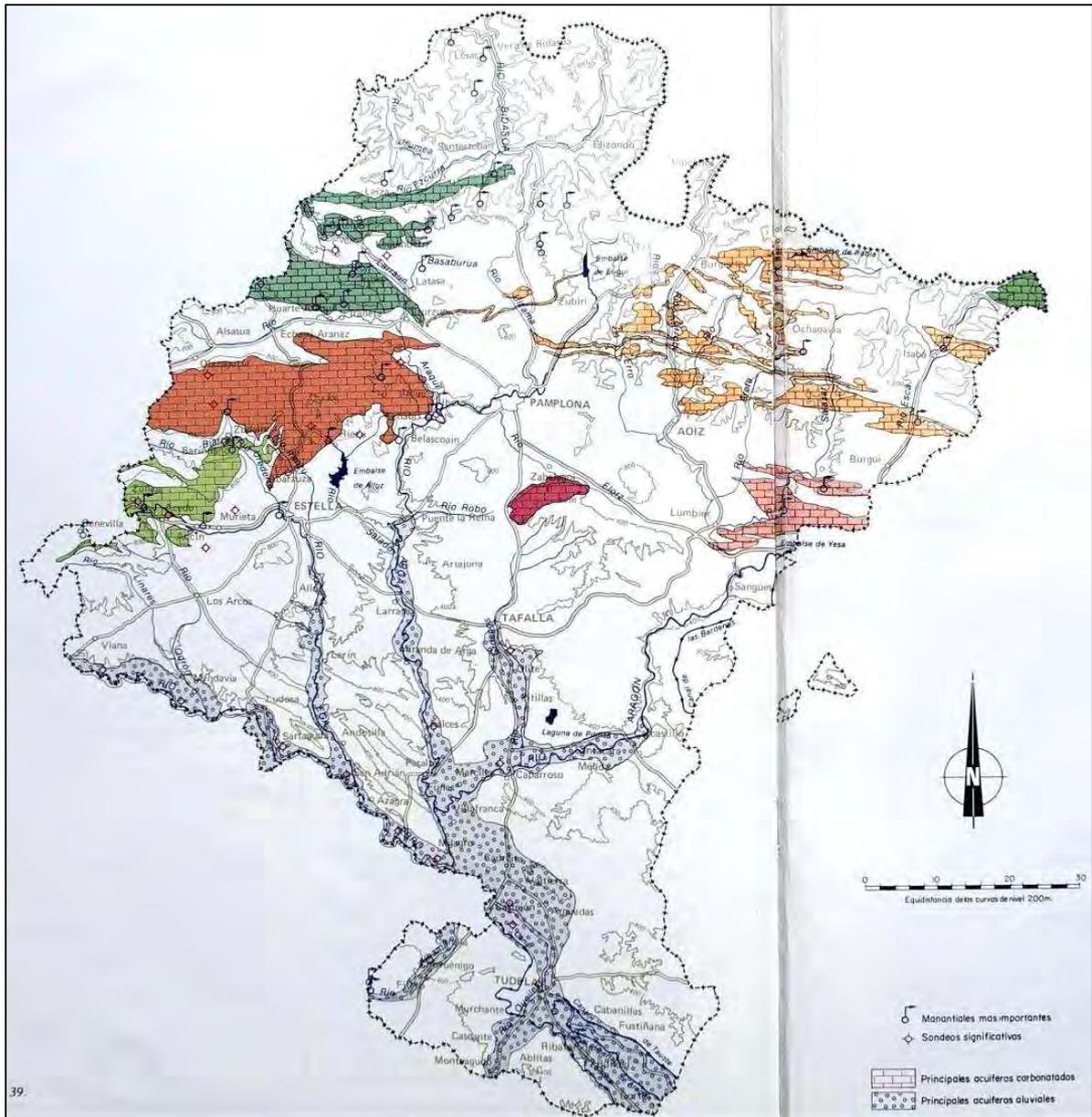
- Unidad Norte
- Unidad de Aralar
- Unidad de Urbasa
- Unidad de Larra
- Unidad Pamplona – Ochagavía
- Unidad de Leyre
- Unidad de Alaiz
- Unidad de Lóquiz
- Unidad Sur
- Unidad del Ebro y Afluentes
- Unidad de Fitero

Se describen a continuación los aspectos más relevantes a partir de la bibliografía consultada.

Se incluye a continuación un mapa sintético con la distribución de las 11 Unidades Hidrogeológicas de Navarra tal y como se representa en la Memoria del Mapa Geológico de Navarra 1:200.000:



Fuente: Diputación Foral de Navarra (1982). Proyecto Hidrogeológico. Las aguas subterráneas de Navarra.

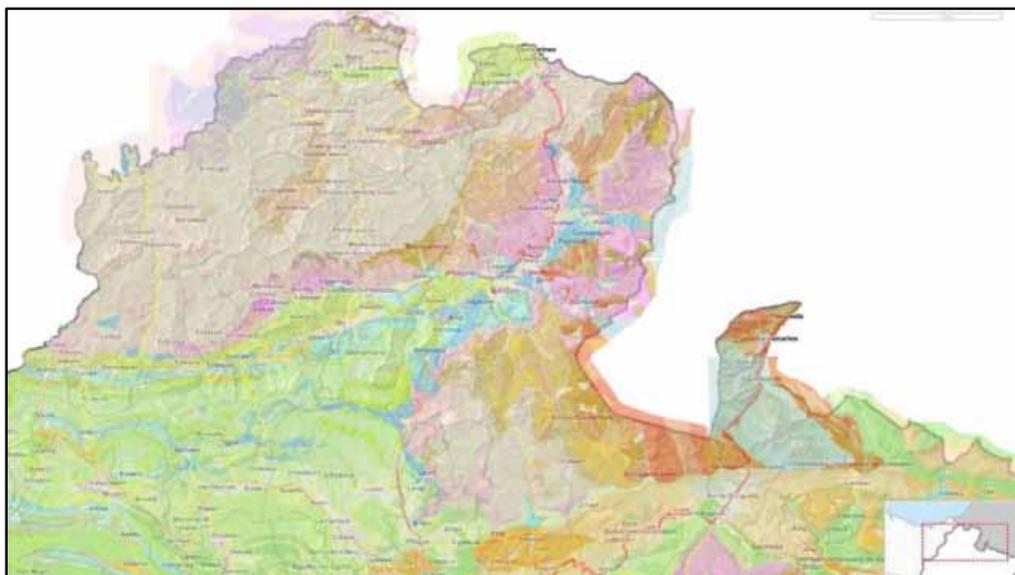


Fuente: **Diputación Foral de Navarra (1982)**. Proyecto Hidrogeológico. Las aguas subterráneas de Navarra. Ubicación de los principales acuíferos de Navarra.

Dentro de cada Unidad Hidrogeológica así definida se identifican Acuíferos propiamente dichos que drenan sus aguas a través de manantiales y surgencias. A continuación, se incluye un resumen de todas ellas indicando los rasgos más importantes:

#### 4.2.1 Unidad Hidrogeológica Norte

Esta Unidad Hidrogeológica está englobada en dos Dominios Tectónicos, el Dominio Norpirenaico y la zona norte del Dominio Surpirenaico (zona axial del Pirineo en el sector navarro). Corresponde a los macizos rocosos de Cinco Villas, Quinto Real y Oroz – Betelu. En esta Unidad se reconoce una gran variedad de litologías pertenecientes a las Eras Paleozoica y Mesozoica (Periodo Triásico). Se trata de rocas metamórficas como pizarras, esquistos y cuarcitas, rocas ígneas como ofitas, basaltos y diabasas, y rocas sedimentarias como areniscas, conglomerados, grauvacas, calizas, dolomías, magnesitas y lutitas.



Todo esta área está muy afectada por su historia geológica, ya que ha sufrido dos Orogenias (Hercínica y Alpina). Por dicha razón, los macizos presentan gran fracturación con muy diversas direcciones de esfuerzo, razón por la que se encuentran muy compartimentados. La permeabilidad desarrollada es principalmente por fisuración. Esto condiciona la existencia de pequeños acuíferos independientes y aislados de pequeña importancia. Los rasgos climáticos de esta zona dan lugar a una intensa meteorización, lo que da lugar a una cobertera superficial de alteración que favorece la infiltración del agua de lluvia.

Se definen dos tipos de acuíferos: a) acuíferos formados por el manto de alteración superficial que permite un drenaje sub-superficial a través de pequeños manantiales; b) acuíferos en rocas de naturaleza carbonatada como calizas, dolomías y magnesitas. En el segundo tipo destacan dos Acuíferos:

- **Acuífero de las Calizas de Lesaca**, con descarga a través de manantiales de pequeño caudal y a través de los ríos Onín y Latsa.
- **Acuífero en calizas, dolomías y magnesitas de Asturreta**, con descarga a través de manantiales y ríos como el Arga.

Las aguas son de dureza blanda a dureza media, bicarbonatadas cálcicas, en ocasiones magnésicas (Asturreta) y de mineralización muy débil a ligera. El siguiente cuadro recoge algunos de los manantiales más representativos:

Manantial	Localidad	Litología	Clasificación	Mineralización
<b>Kakoleta</b>	Ezcurra	Ofitas	643-3ba-6f	Muy débil
<b>Aranibar</b>	Aranaz	Calizas	642-2ab-6e	Ligera
<b>Sastra</b>	Almandoz	Calizas y dolomías	643-3ba-6f	Muy débil
<b>Zocoa</b>	Eugui	Dolomías y magnesitas	642-3ba-6d	Ligera
<b>San Antón</b>	Lesaca	Granito	643-3ab-5e	Muy débil

Se estiman unos recursos de 157 Hm<sup>3</sup> / año.

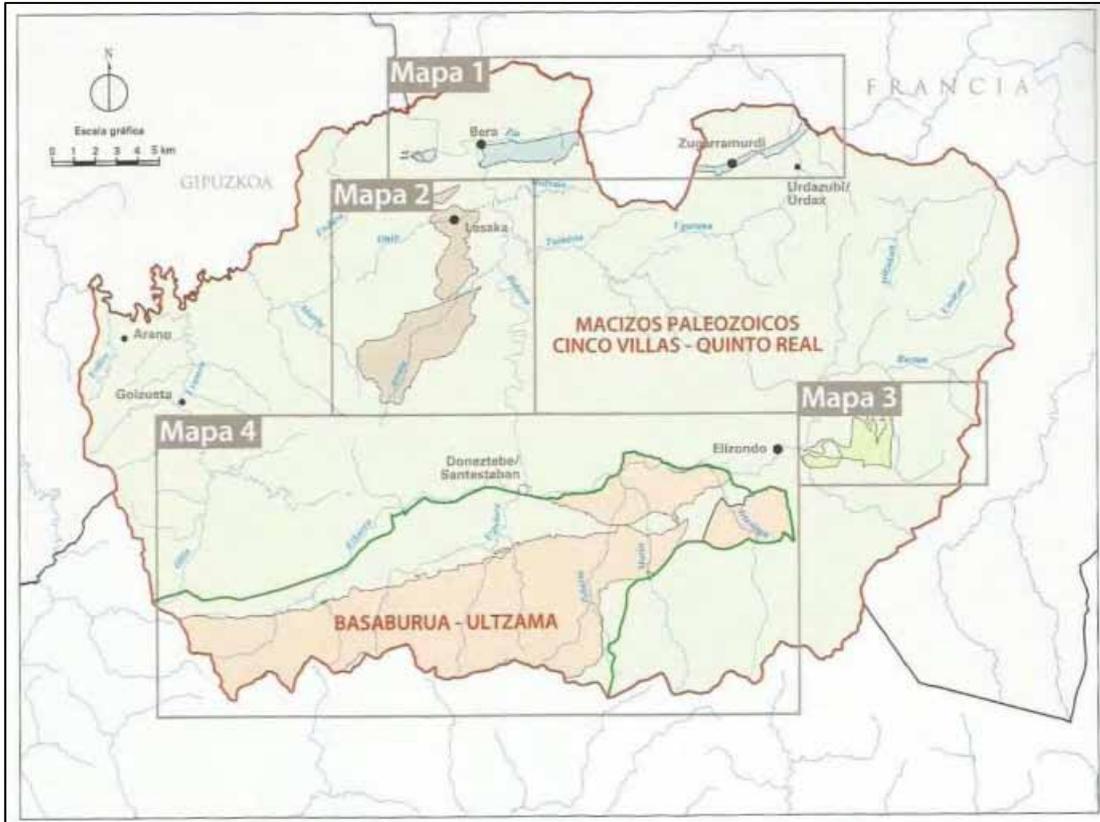
El Proyecto Interreg IVa **BIDUR (2011)** describe las principales formaciones carbonatadas aflorantes que destacan por su mayor permeabilidad, citando las calizas paleozoicas de Lesaca-Arantza y las dolomías del Devónico que afloran en el sector suroriental de la masa de agua 013.10 Macizo paleozoico de Cinco Villas-Quinto Real. Se cita además que la circulación de agua subterránea por las formaciones paleozoicas (con excepción de las calizas paleozoicas) es somera y con poca capacidad de almacenamiento, por lo que los flujos subterráneos tienen poca entidad y baja inercia en su circulación. Mayor relevancia se otorga a los terrenos con presencia de manto de alteración donde los manantiales tienen mayores caudales y mayor permanencia.

En este mismo Proyecto Bidur se lleva a cabo una caracterización climática para la estimación de los recursos hídricos. Se atribuye una precipitación media anual de 1663 mm como valor promedio para la cuenca del Bidasoa y Urumea (periodo 1980-2007), y una temperatura media de 13,5°C.

Asimismo, se lleva a cabo un inventario de 275 puntos de agua en el que se atribuyen 243 a puntos de aguas subterráneas. De todos ellos, 218 son puntos de agua de abastecimiento. Este inventario incluye algunas observaciones en relación a puntos de agua subterránea relacionados con manantiales con características particulares, tales como propiedades curativas, temperatura y/o conductividades anómalas y caudales significativos.

- + Sondeo del Balneario de Elgorriaga: conductividad superior a 30.000 µS/cm.
- + Sondeo de Elizondo (SB-8): conductividad eléctrica 2.600 µS/cm y de carácter sulfatada cálcico-magnésica, no apta para abastecimiento. Coordenadas UTM del sondeo (X = 621.807m, Y = 4777.857m) y cota +232,80 metros. Temperatura agua/aire = 14°C (50/100 metros de perforación).

Gestión Ambiental de Navarra (2012) lleva a cabo un detallado estudio de las principales unidades acuíferas y sus características principales. De forma sintética se incluyen a continuación algunas tablas con información relevante:



Masa de agua subterránea	Sistemas acuíferos identificados	Sectores o subunidades destacadas
Macizos Paleozoicos Cinco Villas - Quinto Real	Calizas Paleozoicas de Lesaka-Arantza	Bloque Norte (Lesaka-Igantzi) Bloque Sur (Igantzi-Arantza)
	Dolomías del Devónico en Elizondo	Sector oriental Sector occidental
	Sinclinal Cretácico Bera-Urdazubi/Urdax	Sinclinal Cretácico Bera Sinclinal Cretácico Zugarramurdi Urdazubi/Urdax
Basaburua-Ultzama	Sinclinal Jurásico-Cretácico de Basaburua-Ultzama	Sinclinal Jurásico-Cretácico de Ezkurra-Berroeta Sinclinal Jurásico-Cretácico de Gatzelu-Arraioz Sinclinal Jurásico de Irurita

Tabla 11, Principales acuíferos identificados en las cuencas del Bidasoa, Urumea y cuencas pirenaicas.

Fuente: Gestión Ambiental de Navarra (2012). Principales sistemas acuíferos con las principales subunidades identificadas.

Formaciones Geológicas		Nº de puntos
Código	Litología y Edad	
Q	Cuaternarios (arenas, gravas y arcillas)	3
PZ	Paleozoico (esquistos, pizarras, grauvacas y niveles de areniscas)	121
PZc	Calizas paleozoicas	16
Tb	Areniscas y arcillas del Buntsandstein	43
Tm	Calizas del Muschelkalk	7
Tk	Arcillas y yesos del Keuper	6
Ji	Calizas y dolomías del Jurásico inferior	16
Jm	Calizas y margas del Jurásico medio	2
Js	Calizas arenosas del Jurásico superior	6
Ci	Calizas arrecifales del Cretácico inferior	18
Cs	Margas y areniscas del Cretácico superior	8
G	Granitos	1
RV	Rocas volcánicas: Ofitas	28
<b>Total</b>		<b>275</b>

Tabla 37. Ubicación hidrogeológica de los puntos de agua inventariados.

Fuente: **Gestión Ambiental de Navarra (2012)**. Principales litologías asociadas a los puntos de agua inventariados.

Las mediciones en ensayos de bombeo han arrojado un valor estimado de Transmisividad de 259 m<sup>2</sup>/día para el Sinclinal cretácico de Bera-Urdax. Este dato puede ser muy variable y condicionado por el grado de karstificación. La gran variabilidad en los datos de transmisividad también se pone de manifiesto en los ensayos realizados para el caso del Sinclinal cretácico de Zugarramurdi-Urdax. Para la unidad de calizas paleozoicas de Lesaka-Arantza, se arroja un valor generalizado de 410 m<sup>2</sup>/hora y una permeabilidad de 2,85 · 10<sup>-3</sup> m/s, insistiendo de nuevo en que no debe tomarse este dato como generalizado, dado que dependerá del grado de karstificación.

En este trabajo también se resumen las características de las aguas subterráneas con mayor recorrido en las formaciones acuíferas. Describiendo dichas aguas como de mineralización débil (150-500 µS/cm) y composición bicarbonatada-cálcica.

Asimismo, se hace una mención especial al sondeo del Balneario de Elgorriaga donde se midieron concentraciones de conductividad eléctrica de más de 30.000 µS/cm y alta concentración de cloruros, sulfatos y sodio. Dicha concentración de sales se presume debida a la disolución salina de la formación triásica del Keuper infrayacente bajo el aluvial.

Finalmente, este trabajo incluye en sus Anejos una serie de mapas detallados de los diferentes sistemas acuíferos descritos.

#### 4.2.2 Unidad hidrogeológica de Aralar (Aralar – Ultzama)

La Unidad Hidrogeológica de Aralar – Ultzama se engloba dentro del Dominio tectónico Vasco-Cantábrico, más concretamente en el Subdominio del Arco Vasco, donde las estructuras principales tienen vergencia hacia el norte. Desde el punto de vista geográfico, esta Unidad comprende la Sierra de Aralar, los valles de Larraun, Basaburúa y Ultzama, y parte del valle de la Barranca, principalmente.

Las litologías más frecuentes son calizas, dolomías y margas, abarcando unidades geológicas comprendidas entre el Triásico superior (Keuper) y el Cretácico superior.

El sector más relevante por su extensión y por su interés desde el punto de vista hidrogeológico corresponde a la Sierra de Aralar. Su estructura geológica se puede simplificar como un anticlinal de dirección Este-Oeste que va evolucionando hacia un anticlinal tumbado hacia el norte, y que finalmente acaba convirtiéndose en un cabalgamiento (frente norte de cabalgamiento de Aralar). Esta estructura está limitada al Sur por la falla inversa de la Sakana, que atraviesa el corredor del río Arakil y que la separa de la Unidad de Urbasa-Andía. Dentro de la Sierra de Aralar hay otras estructuras y accidentes menores como el Domo de Ataun, las fallas de Azkárate y Muguiro o la escama de cabalgamiento de Odériz. Esta diferenciación estructural da lugar a diferentes acuíferos, destacando:

- **Acuífero de Iribas:** (68 Km<sup>2</sup>) acuífero libre formado por calizas, principalmente las correspondientes a las formaciones jurásicas con mayor desarrollo kárstico, con recarga por el agua de lluvia y las aportaciones del manantial de Aitzarreta (que a su vez se recarga en las calizas del Cretácico inferior del sinclinal central de Aralar, al norte del cabalgamiento de Odériz), y con descarga a través de la sucesión escalonada en Trop Plein de los manantiales de Basakaitz. Este acuífero presenta una karstificación importante y heterogénea, arrojando permeabilidades medias – altas.
  - + Manantial de Aitzarreta: su descarga se produce en el contacto entre las calizas del Cretácico inferior (facies Urgon) y las margas infrayacentes, formando el río Ertzilla. Este cauce se infiltra en su totalidad pocos metros más adelante, en las calizas del Jurásico que alimentan el manantial de Iribas.
  - + Manantial de Iribas: su descarga se produce entre las calizas jurásicas y las margas impermeables infrayacentes. Drena todo el acuífero del sector norte de Aralar.
  - + Manantial de Irañeta: Drena el acuífero de Irañeta en la parte sur de Aralar y su descarga se produce entre las calizas del Cretácico inferior y las margas impermeables suprayacentes.

En este acuífero se realizaron medidas de flujo subterráneo mediante testificaciones isotópicas durante los sondeos de reconocimiento para el Proyecto Hidrogeológico de

Navarra. Se comprobó que en algunos sectores con niveles de mayor fisuración se han detectado flujos verticales ascendentes fuertes.

- **Acuífero de Latasa:** (18 Km<sup>2</sup>) acuífero libre separado del acuífero anterior por la falla de Muguiro y constituido por calizas del Cretácico inferior y Jurásico. Su descarga se realiza directamente a través del río Larraun.
- **Acuífero de Irañeta:** (23 Km<sup>2</sup>) acuífero libre a confinado (hacia el sur) comprendido entre el cabalgamiento de Odériz y la falla inversa de la Sakana. La descarga se realiza a través de los manantiales de Irañeta y Huarte-Arakil. La karstificación de este acuífero es reducida y la permeabilidad es baja.
- **Otros acuíferos** de la Sierra de Aralar: los acuíferos de Amézqueta (12 Km<sup>2</sup>) y Osimberde (28 Km<sup>2</sup>) forman parte del sector guipuzcoano de Aralar, por lo que no se incluyen en la descripción.

Todos estos manantiales tienen caudales muy variables y dependen principalmente de la pluviometría de la zona.

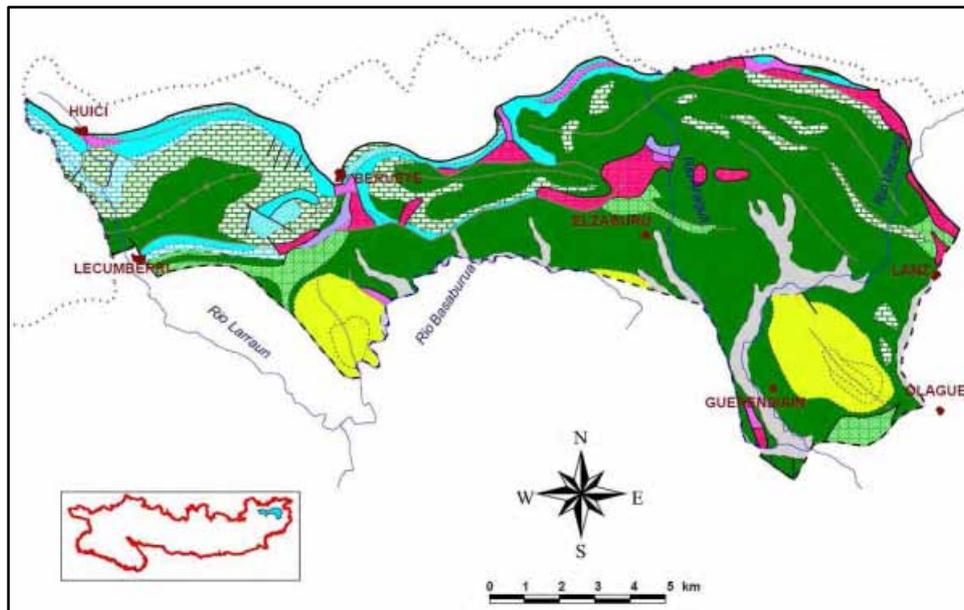
Además de la Sierra de Aralar, cabe mencionar otros Acuíferos que forman parte de esta Unidad Hidrogeológica:

- **Acuífero de Huici – Arrarás:** (28 Km<sup>2</sup>) Se trata de un acuífero de carácter principalmente libre que está formado por calizas jurásicas y calizas arrecifales cretácicas, similares a las definidas en Aralar. Estos materiales se disponen en una banda de dirección Este-Oeste y presentan una estructura geológica muy afectada por la tectónica, lo que da lugar a una compartimentación del acuífero. El drenaje se realiza por manantiales y salidas directas a los cauces de los ríos. Algunos de los manantiales más importantes se ubican en Azpiroz, **Betelu**, Oroquieta y Elzaburu. Destaca el manantial de Betelu de carácter termal, que será desarrollado en el capítulo *7.4 Manifestaciones termales en Navarra*.
- **Acuífero de Leiza – Belate:** (25 Km<sup>2</sup>) Es otro acuífero en similares materiales jurásicos y cretácicos y dispuestos en otra banda paralela de dirección Este-Oeste e igualmente afectada por una intensa tectonización. Los manantiales más importantes se ubican en Leiza, Oiz y Donamaría.

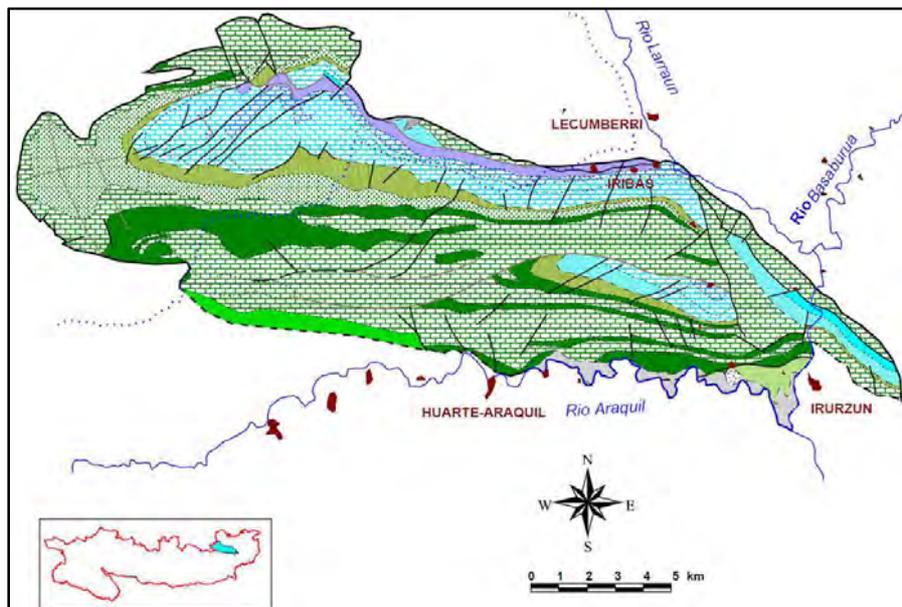
Todas las aguas de la Unidad Hidrogeológica de Aralar son de carácter bicarbonatado cálcico, mineralización ligera y de dureza media. Se clasifican según Schoeller como 642–3ba(a)–6f(e).

Parámetros más representativos de los diferentes acuíferos definidos (\*) Tipología del agua según la clasificación de Schoeller.(\*\*) Representa el caudal medio equivalente de todo el acuífero a partir de los recursos estimados.

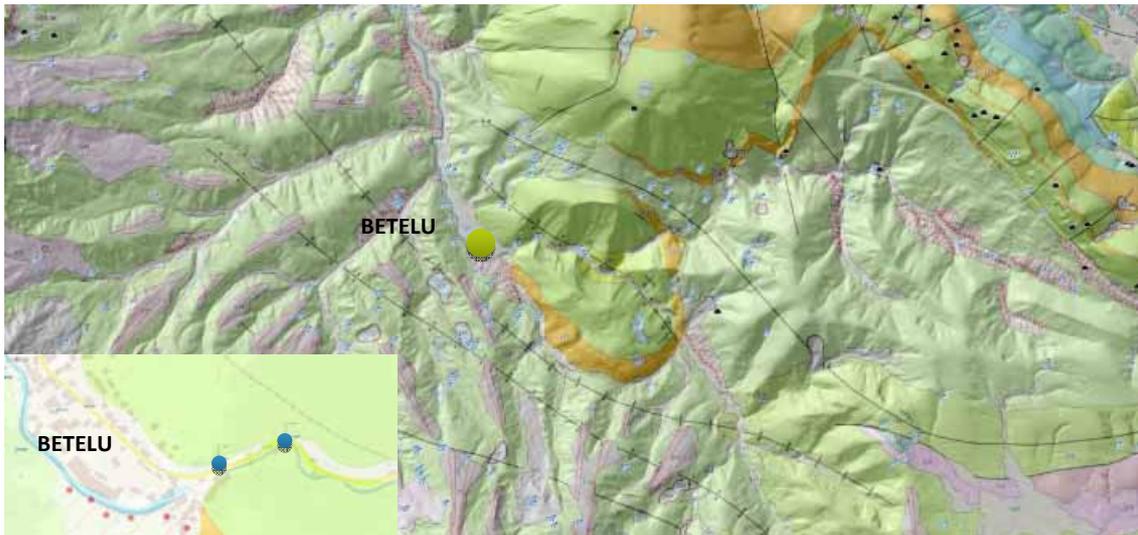
Acuífero	Litología	Porosidad Eficaz (%)	Permeabilidad m / día	Transmisividad m <sup>2</sup> / día	Caudal l / s (**)
Iribas		4	1 – 1,5	400 - 800	2650
Latasa		0,3		15	550
Irañeta		0,3 – 0,5	0,1 – 0,5	15 - 60	690
Huici-Arrarás					760
Leiza-Belate					760



Fuente: CHE/OPH, 1995: Asistencia Técnica para la delimitación de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del Ebro (Plan Hidrológico). Clave 09.820.023/041111. Figuras U.H. 1.11 Basaburúa - Ultzama.

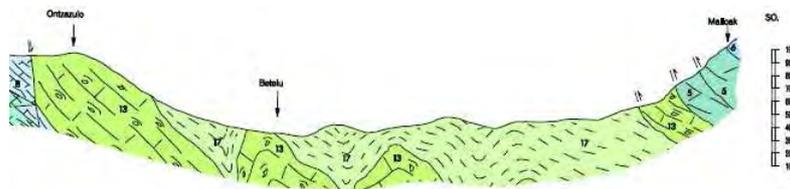


Fuente: CHE/OPH, 1995: Asistencia Técnica para la delimitación de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del Ebro (Plan Hidrológico). Clave 09.820.023/0411. Figuras U.H. 1.23 Sierra de Aralar.

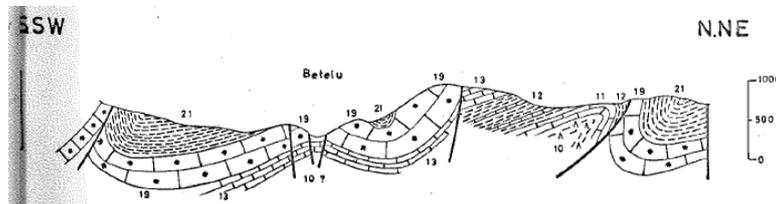


Fuente: visor online IDENA (Gobierno de Navarra). Entorno geológico local. En recuadro inferior izquierdo, ubicación de los dos manantiales principales.

Por su especial interés, cabe recalcar el entorno geológico próximo a la localidad de Betelu y al complejo hidrotermal descrito en torno a él. La literatura describe una estructura tipo “domo”, continuación del conjunto diapírico de Albiasu. Los materiales afectados corresponden a litologías calcáreas del Periodo Cretácico (colores verdes y naranjas), así como otras litologías del Triásico y Jurásico infrayacentes.



Fuente: Hoja 89-IV del Mapa geológico 1:25.000 del Gobierno de Navarra. Corte NE-SO.



Fuente: Diputación Foral de Navarra (1977). Corte NNE-SSO.

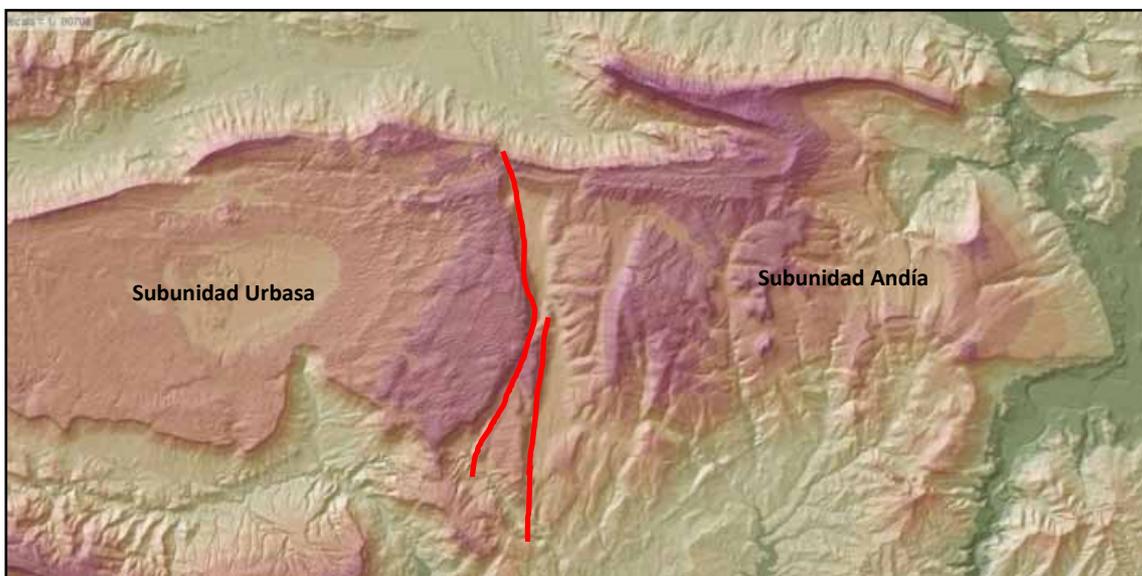
La hoja 89-IV del mapa geológico 1:25.000 del Gobierno de Navarra especifica los materiales en los que se identifican las principales surgencias de la zona y cuyo cuadro se incluye aquí:

Nº	Denominación	Acuífero	Coordenadas		Cauda I (l/s)	Fecha
			UTM X	UTM Y		
89-7-01		Cuaternario	585219	4770087	18,0	22/03/71
89-7-02		Cuaternario	585417	4770124	10,8	22/03/71
89-7-10		Cuaternario	585933	4770606	8,20	22/03/71
89-7-15	Busburu	Aptiense-Albiense	581839	4767739	1,80	15/01/79
89-7-18	Del Molino	Cuaternario	586453	4764762	15,0	26/02/79
89-7-19	Urzuri	Aptiense-Albiense	585313	4764732	1,75	14/12/72
89-7-21	Dama Iturri	Aptiense-Albiense	583752	4764195	1,25	08/08/76
89-7-22	Urberoa	Aptiense-Albiense	583585	4764140	12,4	23/05/71
89-7-24	Urzaco	Cretácico sup.	581905	4762152	150,0	15/01/79
89-7-31		Lías	585203	4770705	2,50	22/03/71
89-7-36	Fte. de Araxes	Cuaternario	586476	4764753	100,0	18/01/82
89-8-03	Doce Fuentes I	Cuaternario	588081	4770783	30,0	14/12/72
89-8-04	Doce Fuentes II	Cuaternario	587941	4770711	4,58	14/12/72
89-8-06	Zurbarrain II	Buntsandstein	589620	4770600	9,40	14/12/72
89-8-09	Achotaeta	Lías	591356	4770226	2,82	16/11/72
89-8-10	Carunuieta I	Lías	591318	4770126	10,1	16/11/72
89-8-12	Oyampe I	Lías	591216	4769787	1,66	16/11/72
89-8-14	Eranzi	Lías	592984	4770622	1,26	04/06/71
89-8-16		Lías	588025	4766477	1,80	13/03/79
89-8-18		Lías	590096	4766259	11,0	13/03/79
89-8-21		Dogger-Malm	588986	4764287	1,35	13/03/79
89-8-22		Dogger-Malm	588803	4764520	3,70	13/03/79
89-8-23		Aptiense-Albiense	588879	4765130	1,45	13/03/79
89-8-24		Cuaternario	590420	4765850	4,60	13/03/79
89-8-30	Ituriberrea	Buntsandstein	588944	4762314	2,20	17/11/79
89-8-31	Albardain	Buntsandstein	588572	4762492	2,20	23/02/79
89-8-33	Aguerre	Buntsandstein	589372	4762707	3,70	23/02/79
89-8-34	Del Matadero	Cuaternario	590424	4761874	30,0	23/02/79
89-8-35	Iturgo	Aptiense-Albiense	593134	4762789	2,60	24/03/79
89-8-38	Alcazauzrenea	Aptiense-Albiense	590170	4762236	45,0	23/02/79

#### 4.2.3 UNIDAD HIDROGEOLOGICA DE URBASA (URBASA – ANDÍA)

La Unidad Hidrogeológica de Urbasa - Andía se engloba dentro del Dominio tectónico Vasco-Cantábrico, más concretamente en el Subdominio del Bloque Alavés, sector septentrional, donde las estructuras principales no muestran vergencia definida. Las litologías dominantes son calizas, calcarenitas, dolomías, margo-calizas y margas pertenecientes formaciones geológicas del Terciario basal (Paleoceno y Eoceno inferior).

Esta Unidad Hidrogeológica comprende dos subunidades: Urbasa y Andía. Ambas subunidades se encuentran separadas por la falla de Lizarraga, de dirección NNE-SSO.



Fuente: Visor del mapa geológico online del Gobierno de Navarra. Capa de relieve coloreada.

La Subunidad de Urbasa tiene una estructura que se puede resumir como un sinclinal colgado de dirección Este-Oeste, limitado al norte y sur por los valles de la Barranca-Burunda y las Améscuas, respectivamente.

La Subunidad de Andía tiene una estructura más compleja. Se trata de una subunidad que desciende de cota hacia el sur debido a un sistema de fallas de dirección NE-SO, hasta quedar oculta bajo el Terciario continental. Presenta una serie de estructuras subparalelas de dirección aproximada Este-Oeste como son el sinclinal de la Sierra de San Donato, el anticlinal de Ergoyena, el sinclinal de Andía (continuación del sinclinal de Urbasa). Además, la estructura se complica debido a la presencia de estructuras diapíricas en la margen occidental y que marcan el límite con el Dominio tectónico de la Cuenca de Pamplona. Son los diapiros de Anoz, Arteta y Salinas de Oro (de norte a sur) y dan lugar a una red de fracturas radiales que compartimentan la subunidad de Andía. Destaca por encima de las demás la fractura radial en

el sector oriental del diapiro de Salinas de Oro. Se trata de la falla de Echaury, que genera el escarpe de Etxauri y que tiene influencia en la presencia de las aguas termales del eje Ibero-Etxauri-Belascoain.

Bajo estas unidades carbonatadas se encuentra una formación geológica de carácter margoso impermeable perteneciente al Cretácico superior. El contacto entre esta formación margosa y el resto de las formaciones carbonatadas suprayacentes favorece los puntos de drenaje principales en esta Unidad.

#### Subunidad de Urbasa

- **Acuífero de Zadorra-Andoain:** (25 Km<sup>2</sup>) de carácter libre y de menor entidad que el acuífero de Urbasa, drena en el territorio alavés. Destacan los manantiales de Zadorra y Andoain.
- **Acuífero de Urbasa:** (175 Km<sup>2</sup>) de carácter libre, está formado por una potente serie de calizas y calcarenitas paleocenas y eocenas. La descarga se realiza a través de numerosos manantiales entre los que destacan Urederra (vertiente sur) y Olazagutía (vertiente norte).
  - + Manantial de Urederra: drena el acuífero de Urbasa a través del contacto entre las calizas paleocenas y las margas cretácicas infrayacentes. El caudal que arroja este manantial es muy variable y sujeto al régimen de lluvias. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-3ba-6f, de carácter bicarbonatado cálcico, de mineralización ligera y de dureza media.
  - + Manantial de Olazagutía.

#### Subunidad de Andía

- **Acuífero de Arteta:** (100 Km<sup>2</sup>) de carácter libre – confinado, está formado por calizas y dolomías del Paleoceno inferior, así como calizas y calcarenitas del Eoceno suprayacentes. Estas últimas son muy compactas, mientras que las calizas paleocenas están mucho más fracturadas. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-3ba-6f, de carácter bicarbonatado cálcico, de mineralización ligera y de dureza media.
  - + Manantial de Arteta: drena la subunidad de Andía a través del contacto entre las calizas y las margas impermeables infrayacentes.
- **Acuífero de Riezu:** (80 Km<sup>2</sup>) de carácter libre a confinado y formado por formaciones carbonatadas del Paleoceno y Eoceno. Destaca la fracturación de las unidades calcáreas (calizas, calizas dolomíticas y dolomías) paleocenas. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-3ba-6f, de carácter bicarbonatado cálcico, de mineralización ligera y de dureza media.
  - + Manantial de Riezu: en este punto, el acuífero de carácter libre pasa a ser confinado al quedar recubierto por litologías más compactas de menor permeabilidad.

- + Manantial de La Mina: se trata de otra descarga aguas abajo del manantial de Riezu, que se produce mediante un flujo ascendente a través de una falla de dirección ENE-OSO y que pone en contacto unidades carbonatadas del Paleoceno y Eoceno. La descarga se realiza directamente en el cauce del río.
- **Acuífero de Ibero – Etxauri**: (25 Km<sup>2</sup>) de carácter confinado. Alimentado por las mismas unidades calcáreas del Paleoceno y Eoceno, la descarga de este acuífero tiene lugar en las margas eocenas impermeables debido a la interconexión de dos fallas, la primera de ellas, la falla de Etxauri, una falla de dirección Este-Oeste, y la segunda, una falla de dirección NE-SO, la falla de Belascoain-Etxauri-Ibero (IGME, 2004), cuya traza no es visible en superficie ya que coincide con el trazado del río Arga, y que intersecta con la falla anterior. Esta disposición estructural ha favorecido el ascenso vertical de aguas más profundas y la instalación del sistema termal Ibero – Etxauri - Belascoain. Las calizas y calcarenitas del Eoceno son bastante compactas pero presentan mayor karstificación en las zonas de falla.
  - + Manantiales de Ibero. Destacan Uberba, el Molino y Las Huertas. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-1aa-2b, de carácter clorurado sódico-cálcico, de mineralización fuerte y duras.
  - + Manantiales de Etxauri. Destacan Pozo Grande, Del Pueblo, Calvario, Ykarrea, Txitxorreka, Buchico, La Nogalera. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-1aa-2b, de carácter clorurado-bicarbonatado sódico-cálcico, de mineralización notable y son duras.
  - + Manantiales de Belascoain. Destacan Agua caliente, Balneario, Uzulo, San Pedro y Eskisortia. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-1ab-2b, de carácter clorurado-bicarbonatado sódico-cálcico, de mineralización notable a fuerte y son duras.

Estos manantiales se explicarán con más detalle en el apartado de manifestaciones termales de Navarra.

- **Acuífero de Abárzuza**: (9 Km<sup>2</sup>) se ubica en el suroeste de la subunidad de Andía, junto a la localidad del mismo nombre, más al suroeste del acuífero de Riezu. Consta de dos pequeños acuíferos en calizas paleocenas y eocenas que están separados por un tramo más impermeable. El primero de ellos es superficial y de carácter libre, y el segundo es más profundo y de carácter confinado. Los materiales son en general bastante compactos.
- **Acuífero de San Donato**: (8 Km<sup>2</sup>). Formado por las calizas y calcarenitas eocenas y paleocenas de la Sierra de San Donato. Su descarga se realiza a través de manantiales ubicados en ambos márgenes de la Sierra.
- **Acuífero de Iranzu**: (5 Km<sup>2</sup>). Destacan los manantiales de Iranzu (I, II y III) ubicados en el entorno del actual Monasterio y que drenan al cauce del río Iranzu.
- **Acuífero de Oskía**: (4 Km<sup>2</sup>).

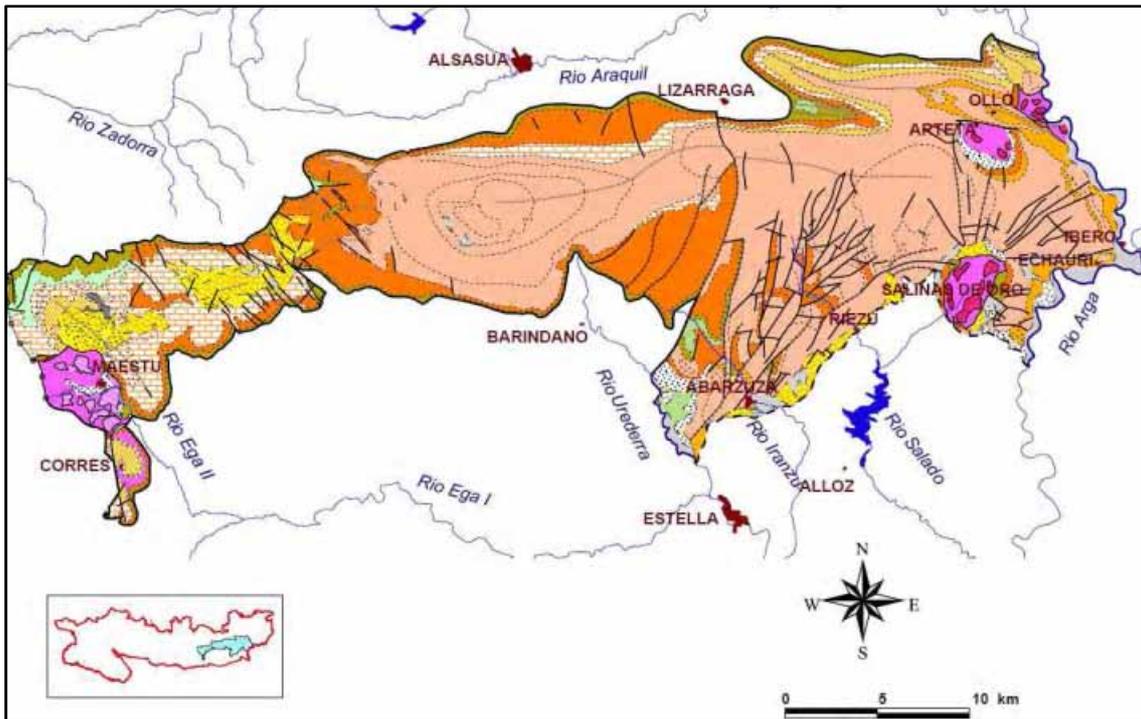
- **Acuífero de Anoz:** (2 Km<sup>2</sup>) asociado a las formaciones carbonatadas que delimitan en diapiro de Anoz, al este de la subunidad de Andía.

Parámetros más representativos de los diferentes acuíferos definidos:

Acuífero	Litología	Porosidad Eficaz (%)	Permeabilidad m / día	Transmisividad m <sup>2</sup> / día	Caudal l / s (**)
Urbasa		0,3 – 0,5	0,01 – 0,1	5 – 10	4500
Arteta		1	0,01 – 5	5 – 200	3250
Riezu		2	10 – 30	2000	2250
Ibero-Etxauri		-	0,001 - 5	150	550
Abárzuza		-		20	150
Anoz		-		5	-

(\*) Tipología del agua según la clasificación de Schoeller.

(\*\*) Representa el caudal medio equivalente de todo el acuífero a partir de los recursos estimados.



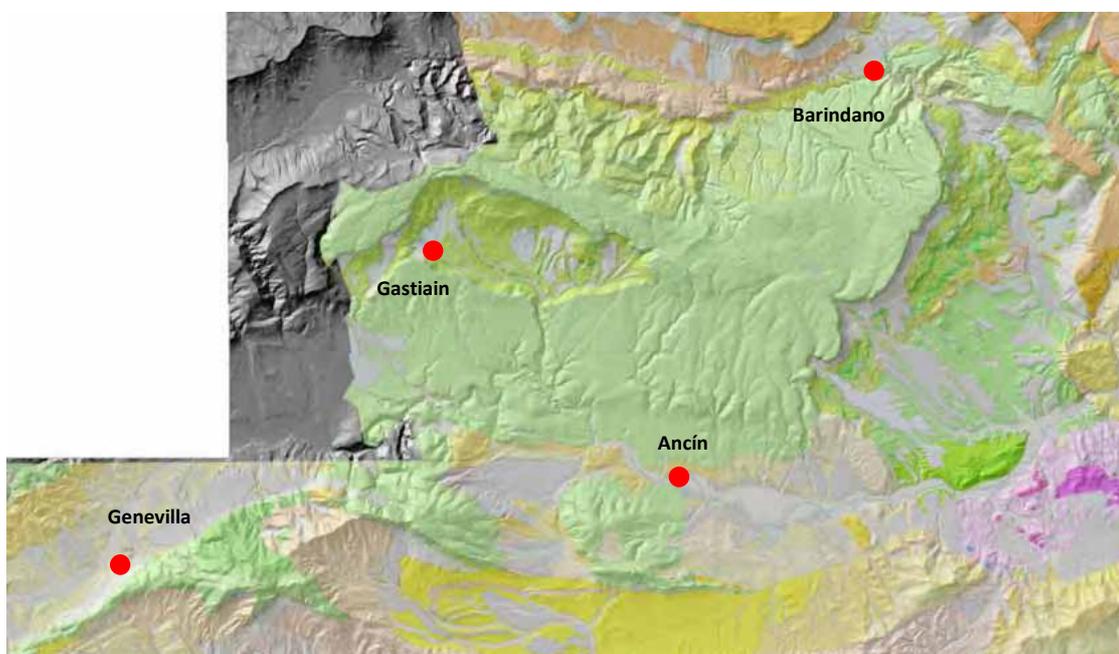
Fuente: CHE/OPH, 1995: Asistencia Técnica para la delimitación de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del Ebro (Plan Hidrológico). Clave 09.820.023/0411. Figuras U.H. 1.10 Sierra de Urbasa.

#### 4.2.4 UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LÓQUIZ

La Unidad Hidrogeológica de Lóquiz se engloba dentro del Dominio tectónico Vasco-Cantábrico, más concretamente en el Subdominio del Bloque Alavés, sector meridional, donde las estructuras principales tienen vergencia hacia el sur.

Esta Unidad Hidrogeológica engloba la Sierra de Lóquiz, delimitada entre el valle de las Améscoas al norte y el valle de la Berrueza al sur, y más al sur la Sierra de Codés, delimitada entre el valle de Campezo al noroeste y el valle de Aguilar al sur. Incluye también las estribaciones más orientales de la Sierra de Cantabria (Meano y La Población).

Está formada por formaciones geológicas de naturaleza carbonatada, principalmente calizas y calcarenitas de la época Cretácico superior.



Fuente: visor online del Mapa geológico de Navarra. Gobierno de Navarra.

Entre las estructuras geológicas más relevantes cabe destacar al sur el cabalgamiento de la Sierra de Cantabria, de dirección Este-Oeste, que pone en contacto las formaciones carbonatadas del Cretácico con los materiales detríticos de la Depresión del Ebro. Algo más hacia el norte respecto a este accidente tectónico se identifica una gran falla de dirección paralela, la falla de Piedramillera, que también pone en contacto unidades cretácicas con formaciones terciarias detríticas más modernas. Al noroeste destaca una serie de secuencias anticlinales – sinclinales, destacando el anticlinal de Gastiain y la red de familias de fallas conjugadas NE-SO y NO-SE que la cortan. En el valle de Lana se identifican además los mejores ejemplos de karstificación en las formaciones carbonatadas.

Desde el punto de vista hidrogeológico se identifican cuatro acuíferos de carácter kárstico diferentes, independizados entre sí debido a su condicionamiento estructural:

- **Acuífero de Itxako:** (51 Km<sup>2</sup>) Es un acuífero de carácter libre que se identifica en el flanco septentrional del anticlinal de Gastiain y que pasa a adoptar un carácter confinado al sumergirse bajo formaciones margosas de carácter impermeable. La recarga se realiza por infiltración del agua de lluvia y por infiltración del río Biarra. Por otro lado, la descarga se lleva a cabo por el manantial de Itxako como punto más importante, aunque también se identifican manantiales que drenan en la confluencia entre los ríos Biarra y Urederra. Se trata de un acuífero heterogéneo y anisótropo donde las calizas son en general bastante compactas pero en las que se identifican conductos kársticos bien comunicados en ciertas direcciones. Por dicha razón, los valores de permeabilidad son muy variables entre sectores del mismo acuífero.
  - + Manantial de Itxako: el punto de surgencia corresponde al contacto entre formaciones calizas y otras formaciones margosas impermeables del Cretácico. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-3ba-6f, de carácter bicarbonatado cálcico, de mineralización ligera a notable y de dureza media a duras.
- **Acuífero de Alborón:** Es un acuífero de carácter libre que se identifica en el sector central de la Sierra de Lóquiz, y queda separado del acuífero de Ancín situado algo más hacia el este por la presencia de una falla de dirección NO-SE que los separa. Entre ambos acuíferos se estima un área de recarga de más de 90 Km<sup>2</sup>. La recarga se realiza por infiltración del agua de lluvia. Este acuífero está formado por calcarenitas cretácicas y en general, presentan una fisuración y karstificación homogénea.
  - + Manantiales de Alborón: estos manantiales afloran en las calcarenitas cretácicas y parecen estar relacionadas con una falla de dirección NO-SE. Además, se constata que los dos principales manantiales, ubicados a diferentes cotas, tiene relación hidráulica. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-3a-5e, de carácter bicarbonatado-clorurado cálcico-sódico, de mineralización notable y duras.
- **Acuífero de Ancín:** Es un acuífero de carácter libre que se sitúa en el sector central aunque algo más al este. Sobre las unidades calizas cretácicas se disponen depósitos cuaternarios de glaciares y terrazas del río Ega (de carácter detrítico granular permeable) conectados hidráulicamente con aquéllas. Como en el caso del acuífero de Alborón, las calcarenitas que forman el acuífero presentan una fisuración y karstificación homogénea. La recarga se produce por infiltración del agua de lluvia, pero además por infiltración directa a partir del río Ega. La descarga se produce a través de los depósitos cuaternarios anteriormente descritos. El espesor de estos depósitos granulares hasta las calizas es variable según su posición, entre 40 y 80 metros según los trabajos de geofísica realizados en la zona. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-3ba-5e, de carácter bicarbonatado cálcico, de mineralización ligera a notable y de dureza media a duras.

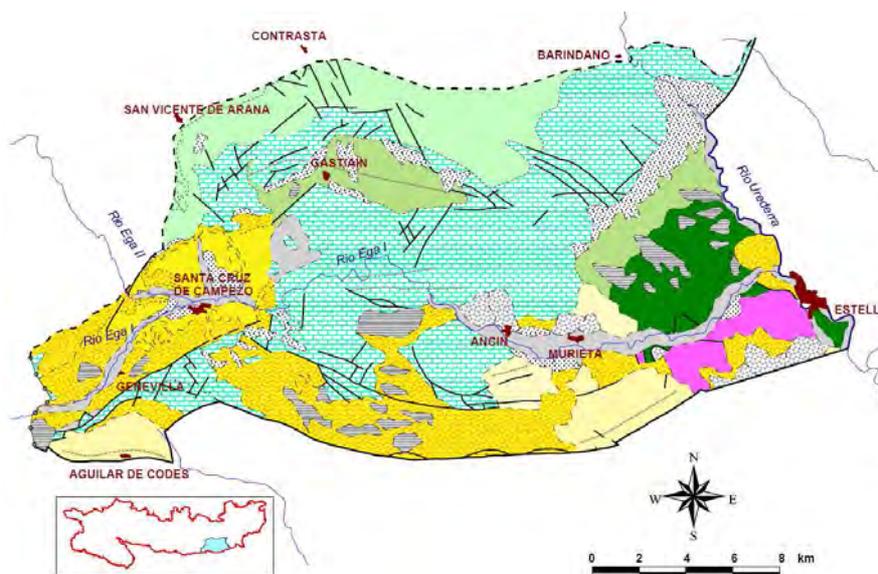
- + Manantial de El Pueblo.
- + Manantial de El Encino.
- + Manantial de El Molino.
- **Acuífero de Genevilla:** (8 Km<sup>2</sup>) Es un acuífero de carácter libre que se sitúa en el sector meridional de la Sierra de Lóquiz. Como en el caso anterior, las calizas que forman este acuífero están en conexión hidráulica con los depósitos cuaternarios de tipo glacis y coluvial, permeables y de carácter detrítico. También muestran una fisuración y karstificación homogénea. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-3ba-5f, de carácter bicarbonatado cálcico, de mineralización ligera a notable y de dureza media a duras.
  - + Manantial de Genevilla.

Parámetros más representativos de los diferentes acuíferos definidos:

Acuífero	Litología	Porosidad	Permeabilidad	Transmisividad	Caudal
		Eficaz (%)	m / día	m <sup>2</sup> / día	(**) l / s
Itxako		2	0,001 – 5	150 – 1200	1500
Alborón		3	0,1 – 1	200	500
Ancín		3 - 7	1 – 5	400 – 1000	2200
Genevilla		-	-	-	-

(\*) *Tipología del agua según la clasificación de Schoeller.*

(\*\*) *Representa el caudal medio equivalente de todo el acuífero a partir de los recursos estimados.*



Fuente: CHE/OPH, 1995: Asistencia Técnica para la delimitación de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del Ebro (Plan Hidrológico). Clave 09.820.023/0411. Figuras U.H. 1.09 Sierra de Lóquiz.

#### 4.2.5 UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LARRA

La Unidad Hidrogeológica de Larra se engloba dentro del Dominio Surpirenaico, en el extremo más nororiental del territorio navarro y que se extiende por territorio francés y aragonés.

Está formada principalmente por calizas del Cretácico, con espesores del orden de 350 metros, donde se ha desarrollado un intenso aparato kárstico. Bajo esta unidad se hallan unidades paleozoicas impermeables que constituyen el zócalo. La superficie del techo de dicho zócalo no es constante, hundiéndose progresivamente hacia el norte debido a las fallas que lo afectan. Esto condiciona notablemente la descarga de la unidad acuífera hacia el norte (lado francés).

No obstante, el macizo rocoso está intensamente fracturado y se identifican pequeños acuíferos, todos ellos alimentados por infiltración de agua de lluvia y por procesos nivales. Las aguas procedentes de la descarga son blandas, de mineralización muy débil y de carácter bicarbonatado cálcico. Se estiman unos recursos de 73 Hm<sup>3</sup>/año (Navarra).

#### 4.2.6 Unidad hidrogeológica de Pamplona – Ochagavía

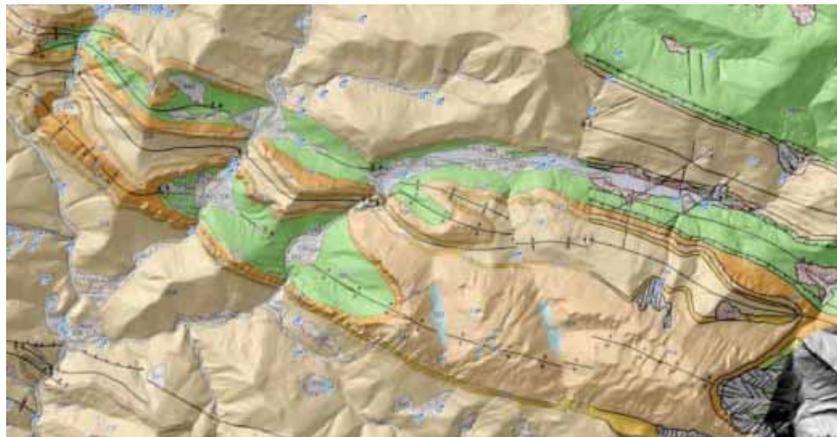
La Unidad Hidrogeológica de Pamplona - Ochagavía se engloba dentro de los Dominios Surpirenaico y Cuenca de Pamplona. A pesar de que ocupa una extensión considerable dentro del territorio navarro, la presencia de litologías margosas impermeables en las Cuencas de Pamplona y Lumbier reduce el área aflorante de materiales calcáreos acuíferos. Entre ellos, destacan:

- **Acuífero de Abodi – Berrendi:** está asociado a la Sierra de Abodi y está formado por formaciones calcáreas del Paleoceno y Eoceno, junto con formaciones en facies flysch de carácter más detrítico, además de otras unidades de carácter más margoso. De acuerdo con la información recogida en CHE/OPH, 1995 (Unidad Hidrogeológica Alto Irati 09205), en este acuífero cabe destacar el manantial de Berrendipea, con un caudal muy variable entre 10 y 500 l/s.



Fuente: Visor del Mapa Geológico online del Gobierno de Navarra.

**Acuífero de Peña Ezkaurre:** está formado por calizas y calcarenitas del Paleoceno que forman una estructura de dirección ESE-ONO donde se aprecian abundantes secuencias de pliegues anticlinales y sinclinales, seccionadas el río Belagua y cauces como el Barranco de Belabarce. Todo el conjunto de manantiales es drenado por hacia el río Belagua antes de alcanzar Isaba.



Fuente: Visor del Mapa Geológico online del Gobierno de Navarra.

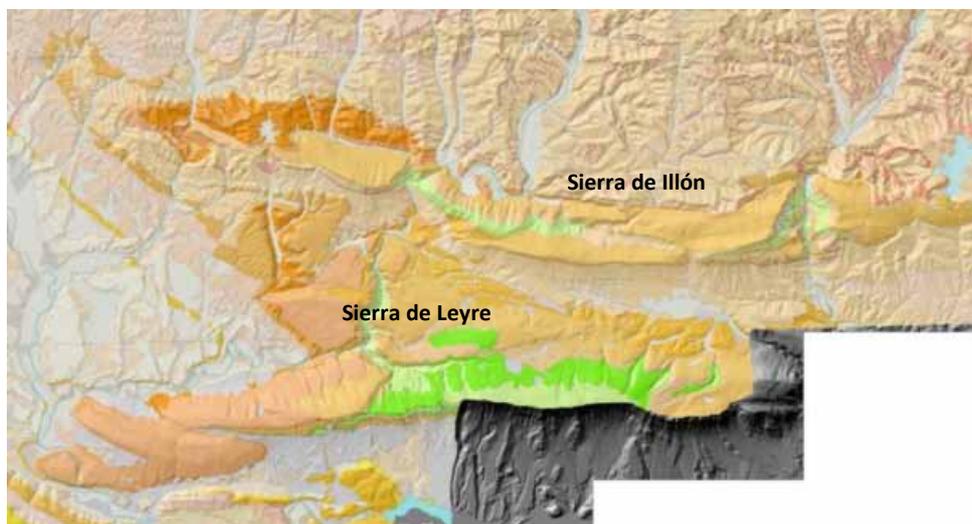
- **Acuífero de Arrieta-Garralda:** está formado por unidades calcáreas del Cretácico Superior, dispuestas alrededor del contorno del Macizo paleozoico de Oroz-Betelu. Todo este conjunto drena hacia el cauce de los ríos que seccionan la estructura.
- **Otros acuíferos calcáreos de la margen oriental:** se incluyen aquí otras unidades geológicas de naturaleza calcárea que afloran en relieves importantes como las Sierras de San Miguel, Areta, Artxuba y Zariquieta. De acuerdo con la información recogida en CHE/OPH, 1995 (Unidad Hidrogeológica Alto Irati 09205), en el sector Salazar – Irati se identifican puntos de drenaje importantes como son los manantiales de Mozarre (66 l/s), La Balsa (80 l/s) y Laurence (66 l/s).

- **Acuíferos de la Cuenca de Pamplona:** De acuerdo con [Del Valle \(1993\)](#), las principales formaciones acuíferas de la Cuenca de Pamplona se resumen principalmente en a) depósitos cuaternarios (principalmente aluviales y glaciares), b) Formación de Conglomerados del Perdón (subunidades inferior y superior), c) Formación Areniscas de Galar, d) Formación Calcarenitas de Gazolaz, e) formaciones calcáreas del Paleoceno y Eoceno inferior-medio. A destacar en los acuíferos de naturaleza detrítica, se citan el Manantial de Subiza (0,6 l/s), la Fuente de la Mina (1,6 l/s), la Fuente Chufría y el Pozo de El Soto.

#### 4.2.7 Unidad hidrogeológica de Leyre

La Unidad Hidrogeológica de Leyre se sitúa dentro del Dominio tectónico Surpirenaico. En esta unidad se incluyen dos grandes estructuras geológicas que dan lugar a las Sierras de Leyre e Illón, de dirección aproximada Este-Oeste.

Las Sierras de Illón (más al norte) y de Leyre (más al sur) responden a cabalgamientos con vergencia sur donde afloran litologías de calizas y dolomías del Periodo Paleoceno y Eoceno, además de calizas del Cretácico en su núcleo cuando la erosión permite su observación.



Fuente: Visor del Mapa Geológico online del Gobierno de Navarra.

Todas las unidades carbonatadas conforman los **Acuíferos de Illón y Leyre**. La recarga se produce por infiltración directa del agua de lluvia y la descarga a través de manantiales que drenan en los ríos que surcan las estructuras de norte a sur, el Irati, el Salazar y el Esca. Debido a la estructura geológica descrita, ambos acuíferos pasan de ser libres a confinados hacia este, oeste y norte, ya que las unidades carbonatadas subyacen bajo las unidades margosas suprayacentes. En el caso de la Sierra de Leyre, las calizas y calcarenitas paleocenas y eocenas

desarrollan algunas fracturas de tensión antes de desaparecer bajo las margas de la Cuenca de Lumbier. Se han estimado unos recursos de 48 Hm<sup>3</sup>/año. Las aguas se clasifican según Schoeller como 642-3ba-6f, de carácter bicarbonatado cálcico (Benasa) a bicarbonatada cálcico-magnésica (Arbayún), de mineralización ligera y dureza media.

Los manantiales más significativos son:

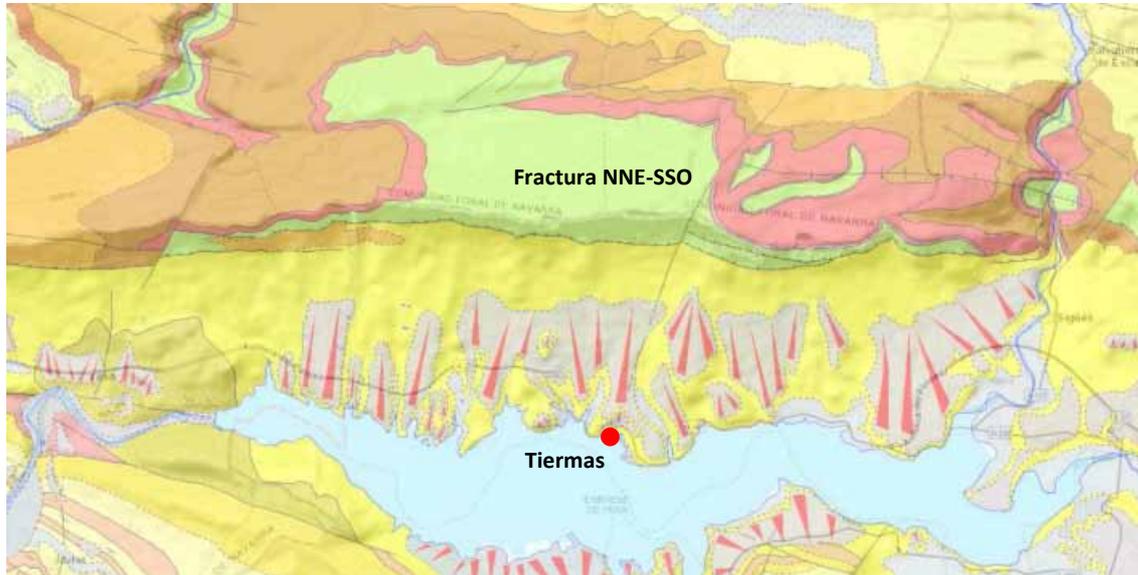
- + Manantial del Barranco de Benasa.
- + Manantial de Arbayún.

En esta Unidad Hidrogeológica cabe mencionar el sistema hidrotermal de Tiermas. Pese a estar ubicado en la provincia de Zaragoza, su proximidad y la continuidad de su estructura geológica hacia el oeste (territorio navarro), podrían ejercer cierta influencia para su posible aprovechamiento termal. En este sentido, cabe citar el trabajo de [CGS \(1986\)](#). Se trata de un estudio geoquímico del sistema hidrotermal de Yesa cuya finalidad fue precisar con más detalle las características del sistema hidrotermal de Tiermas.

Para llevar a cabo la caracterización del sistema hidrotermal, se analizaron muestras de agua de la surgencia así como de las aguas del embalse (aguas arriba de la surgencia). Se llevaron a cabo análisis geoquímicos e isotópicos (<sup>13</sup>C, <sup>18</sup>O, <sup>3</sup>H) y se dedujo que el tiempo de residencia de estas aguas es de aproximadamente 33 años. Los análisis permitieron deducir además las siguientes conclusiones:

- El área de recarga del sistema hidrotermal se realiza en los macizos calcáreos de la Sierra de Leyre (Acuífero de Leyre).
- La caracterización isotópica indica que la temperatura del supuesto almacén termal es inferior a 100°C, precisándose unos intervalos entre 60-87°C. Aún más, los cálculos termodinámicos para los equilibrios minerales estudiados acotan la temperatura del agua en profundidad en un rango entre 50-75°C. Comparando las diferentes metodologías utilizadas, se estima como más probable un rango de temperatura en profundidad (1000-2000 metros) del orden de 60-75°C.
- Se trata de aguas clorurado sódicas con fuertemente mineralizadas, con valores de conductividad del orden de 10.000 µS/cm, denotando una circulación subterránea a través de litologías evaporíticas sulfatadas y cloruradas.
- La facies evaporítica mencionada por la que circulan las aguas en profundidad puede estar ligada a depósitos evaporíticos sulfatados del Eoceno superior-Oligoceno, o bien a facies Keuper del Triásico superior que constituye la capa de despegue de la cobertera mesozoica.
- La descarga del sistema hidrotermal se realiza a favor de los sedimentos margosos terciarios eocenos que constituyen el vaso del embalse de Yesa, presumiblemente favorecido por la presencia de fracturas de orientación NNE-SSO. La temperatura de surgencia termal es de unos 39°C.

- No se observan procesos de mezcla entre las aguas termales y las aguas superficiales del embalse.



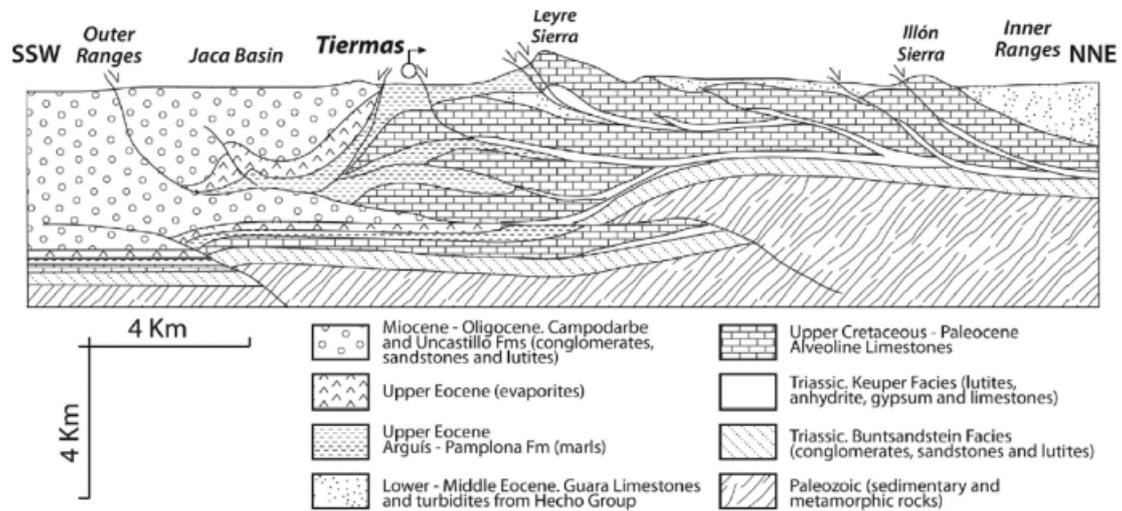
Fuente: Visor cartográfico del IGME (capa geología 1:50.000 e imagen de fondo).

En la imagen superior puede verse la falla de dirección NNE-SSO a favor de la cual se produce la salida de las aguas termales de Tiermas. Como puede apreciarse, existen otras fallas de orientación similar tanto hacia el este (Sigües) como al oeste (al norte Yesa).

No se han encontrado datos adicionales con analíticas de aguas en manantiales cercanos que pudiesen estar relacionados con tales fracturas. Una investigación más detallada podría arrojar alguna información valiosa que pudiera poner de relieve la continuación del sistema hidrotermal de Tiermas hacia el oeste, ya en territorio navarro.

En el trabajo realizado por Jocal (2003), donde se llevó a cabo un sondeo para estudiar la posible captación de agua subterránea en Bigüezal (entre las Sierras de Leyre e Illón), se atravesó una formación principalmente caliza y se identificó un nivel freático a -200 m bajo la superficie. Los análisis químicos realizados en las aguas subterráneas arrojan una mineralización notable (del orden de 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) respecto a los valores normales medidos en las aguas de manantial cercanos. Así por ejemplo, en el manantial de Arbayún, al oeste de Bigüezal, se miden valores de mineralización del orden de 360  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , es decir casi la mitad de la concentración obtenida en las aguas subterráneas. Las aguas de los manantiales son bicarbonatadas cálcicas, mientras que las aguas medidas en el sondeo, pese a ser predominantemente bicarbonatadas cálcicas, tienen también un notable carácter sulfatado magnésico. No se dispone de datos de temperatura del agua.

De gran interés es el trabajo realizado por [Blasco et al. \(2017\)](#) en relación a los estudios de geoquímica y geotermometría realizados sobre el sistema hidrotermal de Tiermas. En dicho trabajo se identifican dos grandes grupos de aguas desde el punto de vista hidrogeoquímico, unas con menor concentración de sulfatos que otras. Además, las temperaturas en profundidad estimadas de acuerdo a diferentes métodos geotermométricos arrojan valores ligeramente diferentes para cada una ( $90 \pm 20$  y  $82 \pm 15^\circ\text{C}$ , respectivamente). Las diferencias encontradas sugieren que cada una de las dos tipologías de agua lleva consigo diferentes líneas de flujo con distintos tipos o intensidades de procesos de interacción agua-roca.

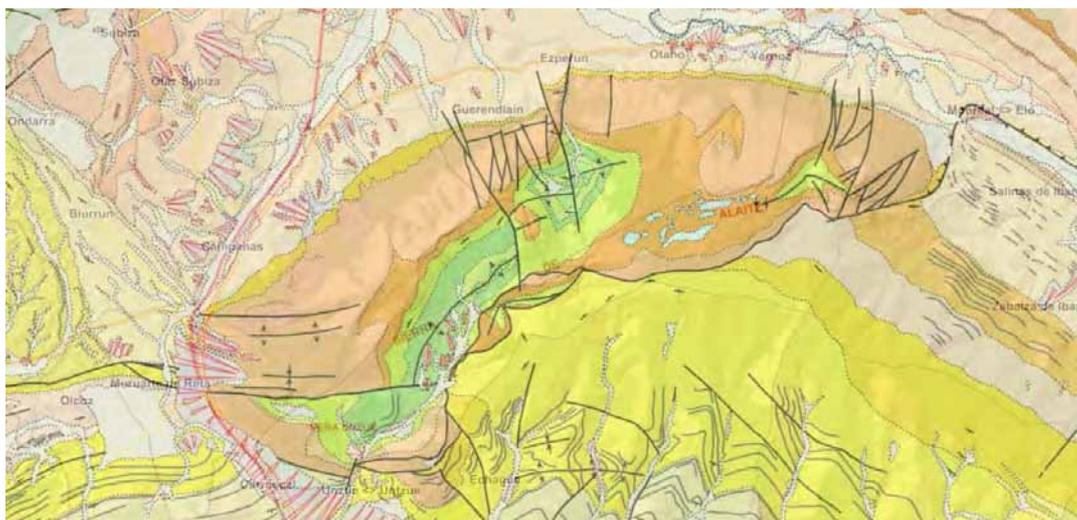


Fuente: Blasco et al. (2017), modificado de ALGECO2 project: <http://info.igme.es/algeco2/>; IGME, 2010). Sección transversal de la estructura de la Cuenca Pamplona-Jaca y localización de los manantiales termales de Tiermas.

#### 4.2.8 UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE ALAIZ

La Unidad Hidrogeológica de Alaiz se sitúa dentro del Dominio tectónico de la Cuenca de Pamplona, en el sector más oriental que limita con el Dominio tectónico Surpirenaico a través del accidente de Monreal. Esta Unidad está representada por la Sierra de mismo nombre.

Las litologías que afloran son calizas y dolomías del Cretácico superior, calizas del Paleoceno y calizas y calcarenitas del Eoceno. A grandes rasgos, la estructura geológica corresponde a un anticlinal vergente hacia el sur que cabalga sobre los depósitos detríticos terciarios del Dominio de la Depresión del Ebro. El Acuífero calizo pasa a ser confinado al desaparecer sobre las formaciones margosas más modernas de la Cuenca de Pamplona. La recarga del acuífero se produce por infiltración directa del agua de lluvia. Sin embargo, no se conocen los puntos de descarga al no localizarse manantiales significativos. Presumiblemente, el drenaje se realizará hacia el cauce del río Arga en el sector occidental de la Cuenca de Pamplona, a través de fracturas que favorezcan dicha dirección de flujo. Los recursos del acuífero de Alaiz en régimen libre se estiman en 10 Hm<sup>3</sup>/año. Las aguas son de carácter bicarbonatado cálcico, de mineralización ligera y dureza media.



Fuente: Visor del Mapa Geológico online del Gobierno de Navarra.

De acuerdo con la información recogida en CHE/OPH, 1995 (Unidad Hidrogeológica Alaiz 09202), se definen los siguientes acuíferos:

- + Acuífero carbonatado constituido por formaciones geológicas carbonatadas del Cretácico, Paleoceno y Eoceno inferior-medio, con un espesor promedio de 300 metros. En este acuífero se lleva a cabo la inyección profunda de salmuera procedente de Potasas de Navarra, S.A.

- + Acuífero detrítico correspondiente a la Formación *Areniscas de Galar* (Eoceno-Oligoceno), de espesor variable 30-130 metros y permeable en la zona de alteración superficial.
- + Acuífero detrítico correspondiente a la Formación Conglomerados del Perdón (se incluyen dos Formaciones Conglomerados inferiores y Conglomerados superiores del Perdón), de potencia variable y permeables en zonas de alteración. Se ha identificado el drenaje de esta formación conglomerática a partir del manantial de Subiza.

#### 4.2.9 UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DEL EBRO Y AFLUENTES

La Unidad Hidrogeológica del Ebro y Afluentes se sitúa dentro del Dominio tectónico de la Depresión del Ebro. Se asocia a los depósitos aluviales de los ríos Ega, Arga, Aragón y Cidacos, además de los ríos de la margen derecha del Ebro como el Alhama y el Queiles. Pese que esta Unidad engloba a la totalidad de los depósitos aluviales de los mencionados ríos, realmente son interesantes los tramos en los que dichos depósitos alcanzan mayor desarrollo. Por tanto, se considera:

- Los depósitos aluviales del río Ebro en toda su extensión en territorio navarro.
- Los depósitos del río Ega desde Lerín hasta su confluencia en el Ebro.
- Los depósitos del río Arga desde Larraga hasta su confluencia con el Aragón.
- Los depósitos del río Aragón desde Caracastillo hasta su confluencia en el Ebro.
- Los depósitos del río Cidacos desde Tafalla hasta su confluencia con el Aragón.
- Los depósitos del río Alhama desde Fitero hasta su confluencia con el Ebro.
- Los depósitos del río Queiles desde la frontera navarra hasta su confluencia en el Ebro.

Los materiales que constituyen estos depósitos aluviales corresponden a la llanura de inundación, terrazas bajas y terrazas medias de los ríos. Los niveles de terrazas altas no se tienen en cuenta debido a su grado de cementación, constituyendo en algunos casos acuíferos colgados de poca relevancia. El Acuífero, que engloba la totalidad de la Unidad descrita, tiene carácter libre.

Todos los materiales aluviales de esta Unidad están formados por gravas, arenas, limos y arcillas, generalmente en secuencia granodecreciente de la base al techo de la formación. Es decir, en la base de los depósitos aluviales encontramos las granulometrías más gruesas (gravas y arenas) y paulatinamente va aumentando la proporción de limos y arcillas hacia la superficie). Los espesores observables de dichos depósitos en la sección central de los cauces son muy variables. Se han detectado espesores máximos en el eje central del río Ebro con valores de hasta 35 metros, aunque en la mayoría de los tramos no suele superar los 20 metros. Gracias a la investigación realizada mediante geofísica (sondeos eléctricos verticales), se han llegado a medir los siguientes espesores promedio por tramos en el **río Ebro**:

- + Tramo inicial Logroño – Azagra: 20 metros de espesor.
- + Tramo Azagra – Tudela: hasta 50 metros de espesor, con un promedio de 35 metros.
- + Tramo Tudela – Cortes: hasta 10 metros de espesor.

En lo que respecta al espesor de los depósitos aluviales en los demás ríos:

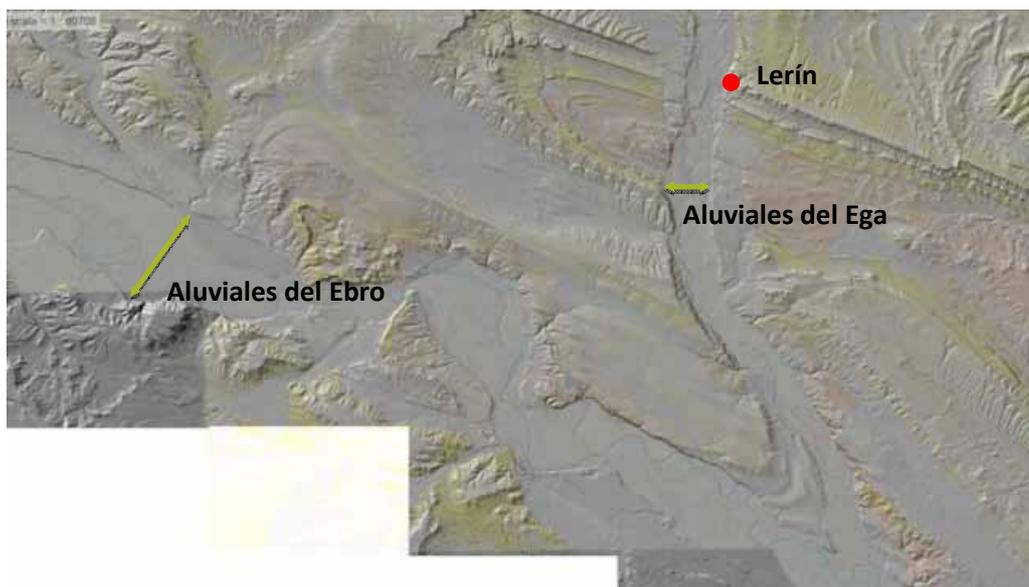
- + Río Aragón: espesor promedio de 20 metros, con un incremento notable en el tramo Funes – Milagro.
- + Río Arga: espesores muy variables con promedios de 10-15 metros.
- + Río Cidacos: espesores de hasta 20 metros en el tramo Tafalla – Olite.

La modelización informática llevada a cabo durante el estudio de esta Unidad Hidrogeológica en el Proyecto Hidrogeológico de Navarra permitió constatar algunos aspectos relevantes:

- a) todos los niveles de terrazas y llanura de inundación están conectados hidráulicamente.
- b) En la mayoría de los tramos de los ríos (Ebro y Arga en su totalidad y nivel superior del Aragón), los cauces funcionan como drenaje del acuífero aluvial, mientras que otros tramos (Cidacos y curso bajo del Aragón) recargan el acuífero aluvial. La recarga de todo el sistema aluvial se produce por infiltración directa del agua de lluvia y por el aporte de los regadíos.

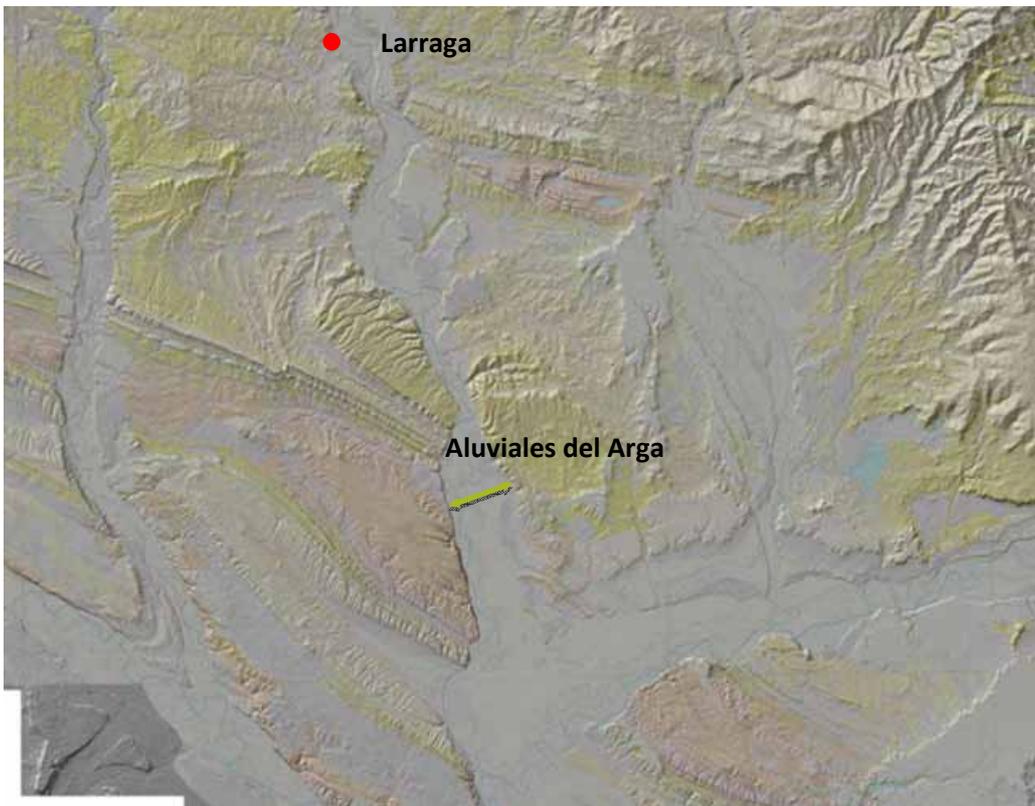
El sustrato rocoso sobre el que se depositan estos materiales es también muy variable en función de la geología local de cada tramo fluvial, encontrándose litologías tales como areniscas, lutitas, calizas y yesos, principalmente.

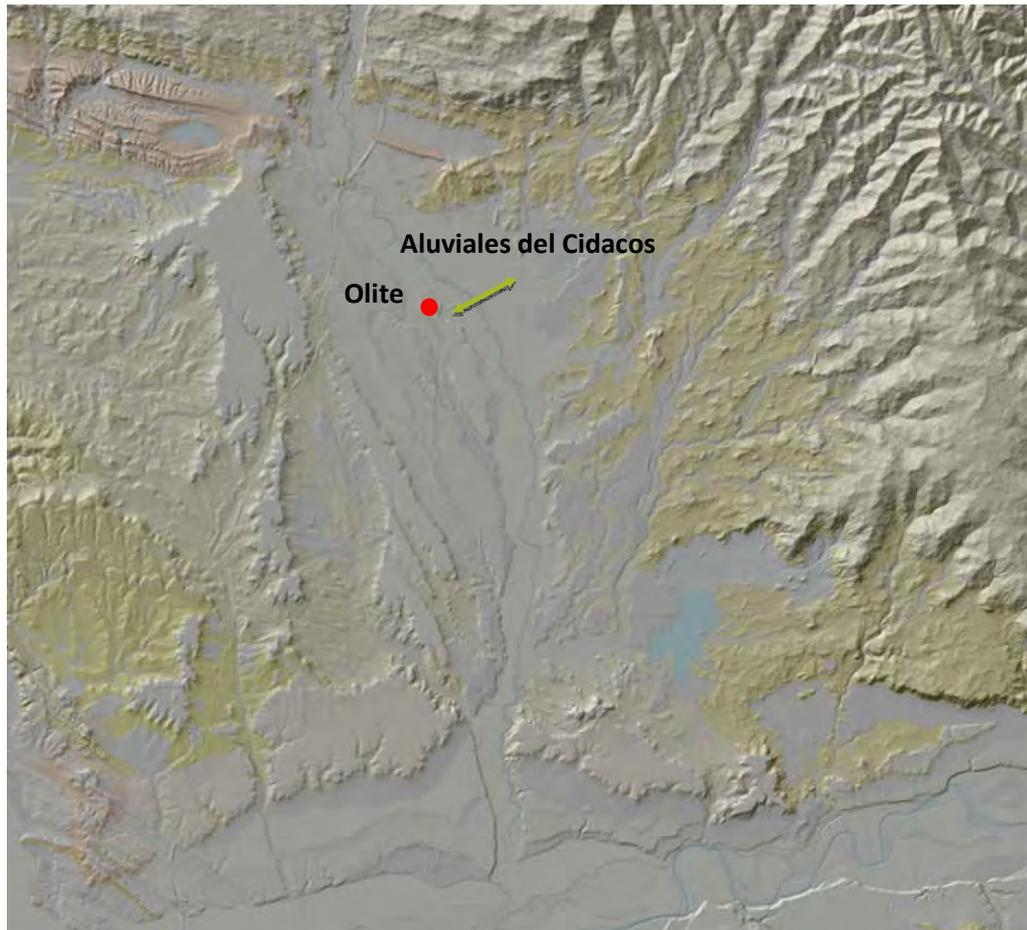
Esta Unidad Hidrogeológica tiene una extensión aproximada de 905 Km<sup>2</sup>.





Fuente: Visor online del mapa geológico de Navarra. Gobierno de Navarra.





Fuente: Visor online del mapa geológico de Navarra. Gobierno de Navarra.

Las aguas del aluvial del Ebro y afluentes tienen una caracterización química muy variable, pero a grandes rasgos se puede sintetizar de la siguiente forma:

- + Las aguas del río Ebro son de naturaleza principalmente sulfatada cálcica aunque variable, de mineralización notable a fuerte y duras e incluso extremas.
- + Las aguas del río Aragón son de carácter bicarbonatado cálcico, de mineralización notable y de dureza media.
- + Las aguas del río Arga son de carácter clorurado sódico, de mineralización notable y duras.
- + Las aguas del río Ega son de carácter sulfatado cálcico, de mineralización fuerte y de dureza extrema.
- + Las aguas del río Cidacos son de carácter bicarbonatado-sulfatado cálcico, de mineralización notable y duras.
- + Las aguas del río Alhama son de carácter sulfatado cálcicas, de mineralización fuerte y de dureza extrema.
- + Las aguas del río Queiles son de carácter sulfatado cálcico, de mineralización fuerte y dureza extrema.

Es importante mencionar que dentro de este Dominio se incluyen áreas que han sido declaradas como “zonas vulnerables” por la Confederación Hidrográfica del Ebro según la Directiva 91/676/CEE (protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos de origen agrario) y su transposición estatal el R.D. 261/1996.

#### 4.2.10 UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DEL SUR

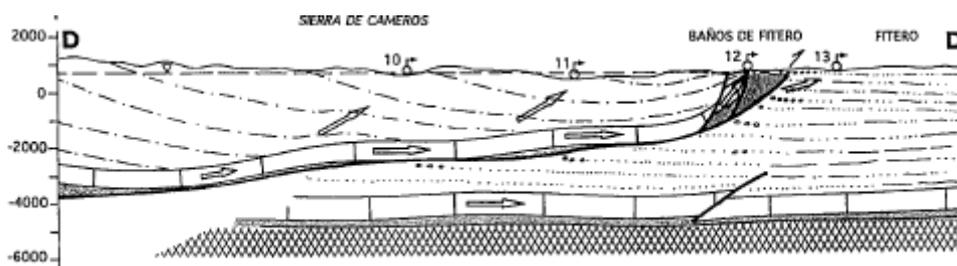
La Unidad Hidrogeológica del Sur se sitúa dentro del Dominio tectónico de la Depresión del Ebro. Esta Unidad ocupa una extensión considerable, aunque no se definen en ella importantes Acuíferos debido al carácter impermeable de muchas de las formaciones geológicas presentes.

Estructuralmente, la Unidad del Sur está formada por alineaciones estructurales de dirección NO-SE a ONO-ESE (lineación pirenaica) que corresponden principalmente a secuencias de pliegues anticlinales y sinclinales. De noreste a suroeste se observa una distribución litológica que va desde litologías detríticas gruesas (conglomerados y areniscas), litologías detríticas finas (limolitas y lutitas) hasta litologías evaporíticas y carbonatadas.

A grandes rasgos, las litologías más interesantes desde el punto de vista hidrogeológico se asocian a los conglomerados y areniscas. En muchas ocasiones, el grado de cementación hace que no merezcan interés hidrogeológico. Constituyen pequeños acuíferos confinados cuya recarga se produce por infiltración del agua de lluvia y la descarga a través de pequeños manantiales que drenan a los cauces principales.

#### 4.2.11 UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE FITERO

La Unidad Hidrogeológica de Fitero se sitúa dentro del Dominio tectónico de Cordillera Ibérica. Esta Unidad aflora en una superficie muy reducida en territorio navarro, y en ella se identifica el sistema hidrotermal de Baños de Fitero y en el que se encuentran los mayores valores de temperatura registrados (47°C) en superficie.



Coloma et al (1995).

Desde el punto de vista estructural, el aspecto más relevante es el contacto mecánico entre las Unidades geológicas del Sistema Ibérico y los materiales detríticos terciarios de la Depresión del Ebro. El accidente tectónico más relevante en la zona de Baños de Fitero es una fractura principal de dirección NO-SE y un sistema de fallas conjugadas de menor envergadura que compartimentan el macizo rocoso.

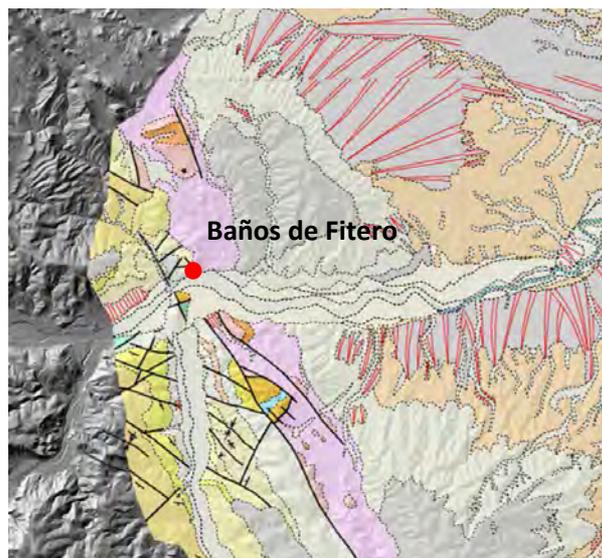
Las litologías que pertenecen a esta Unidad Hidrogeológica y constituyen el principal acuífero de esta zona se diferencian en tres grandes grupos: a) un tramo basal muy permeable formado por dolomías y carniolas del Jurásico inferior (Formación *Dolomías de Imón* y Formación *Carniolas de Cortes de Tajuña* y Formación *Cuevas Labradas*); b) tramo intermedio de baja permeabilidad y de carácter más margoso del Jurásico inferior (Formaciones *Margas del Cerro del Pez*, *Calizas bioclásticas de Baraona* y *Margas y calizas de Turmiel*); c) tramo superior permeable del Jurásico medio-superior formado por las Formaciones *Calizas de Chelva*, *Calizas negras de Aldealpozo* y *Calizas coralinas de Torrecilla*. (Coloma et al, 1996). Además de estas unidades que en su conjunto tienen una edad que se extiende desde el Jurásico hasta el Cretácico inferior (facies Purbeck y Weald), destaca la presencia del Keuper (Triásico superior) impermeable, formado por arcillas, yesos y sales. La surgencia de los manantiales tiene lugar a través de las unidades jurásicas en el contacto con la formación triásica impermeable (Keuper).

A excepción del Triásico superior, todas estas unidades descritas están interconectadas hidráulicamente debido a la fracturación que les afecta (Blasco et al, 2018). Los materiales jurásicos formados por carniolas, dolomías, brechas dolomíticas y calizas forman un conjunto de alta porosidad y permeabilidad, debido tanto a la red de fracturación que presenta como a un gran desarrollo de oquedades interconectadas que presentan (Coloma, Sánchez y Martínez, 1997). El principal flujo subterráneo de agua se realiza a favor del primer tramo permeable

descrito. La surgencia de las aguas termales tiene lugar a través de las unidades jurásicas en el contacto con la formación triásica impermeable del Keuper (Coloma et al, 1997). Sánchez y Coloma (1998) describen el funcionamiento hidrogeológico de los manantiales termales de Arnedillo, cuyas manifestaciones son similares a las de los manantiales de Baños de Fitero.

La recarga de este “acuitardo” se realiza preferentemente por infiltración del agua de lluvia a través de las formaciones jurásicas más permeables y que constituyen acuíferos en profundidad. Una segunda vía de recarga se debe a la infiltración en materiales detríticos en facies Weald (tránsito Jurásico-Cretácico) que a pesar de su baja permeabilidad, y debido a su notable extensión superficial, pueden dar lugar a una infiltración importante.

Las aguas alcanzan grandes profundidades tras la recarga (2000 – 2500 metros) y ascienden rápidamente hacia la superficie gracias a la verticalización de las estructuras. Además, la presencia de la formación margoyesífera impermeable del Keuper impide la entrada y consiguiente mezcla con aguas superficiales más frías, y favoreciendo la conservación de calor durante el ascenso debido a su menor conductividad térmica respecto a otros materiales rocosos (Coloma et al, 1996).



Fuente: Visor online del mapa geológico de Navarra. Gobierno de Navarra.

La documentación derivada del Proyecto de Asistencia Técnica para la delimitación de Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca del Ebro (CHE/OPH, 1995) aporta información adicional a esta Unidad Hidrogeológica.

Los acuíferos más importantes que se describen en la Unidad Hidrogeológica 502 Fitero – Arnedillo definida por la Confederación Hidrográfica del Ebro son:

- + Acuífero carbonatado del Jurásico (formaciones del Lias y Dogger) de espesor variable entre 300 y 700 metros.
- + Acuífero carbonatado del Cretácico inferior (formaciones pertenecientes al Grupo Oncala), con una potencia máxima de 440 metros.
- + Acuífero detrítico en conglomerados del borde de la Sierra de Cameros, de Época Oligoceno, con una potencia estimada de 1000 metros.
- + Acuífero detrítico cuaternario en aluviales del río Cidacos (Nota: no confundir con el río navarro Cidacos, afluente del río Aragón).

Los caudales de las surgencias termales de Fitero se estiman en 50 litros / segundo (código 241280020, cota 485 msnm y régimen constante).

De acuerdo con el documento “Masa de agua subterránea de Fitero-Arnedillo, 66” de la Confederación Hidrográfica del Ebro, se ofrecen algunos datos más:

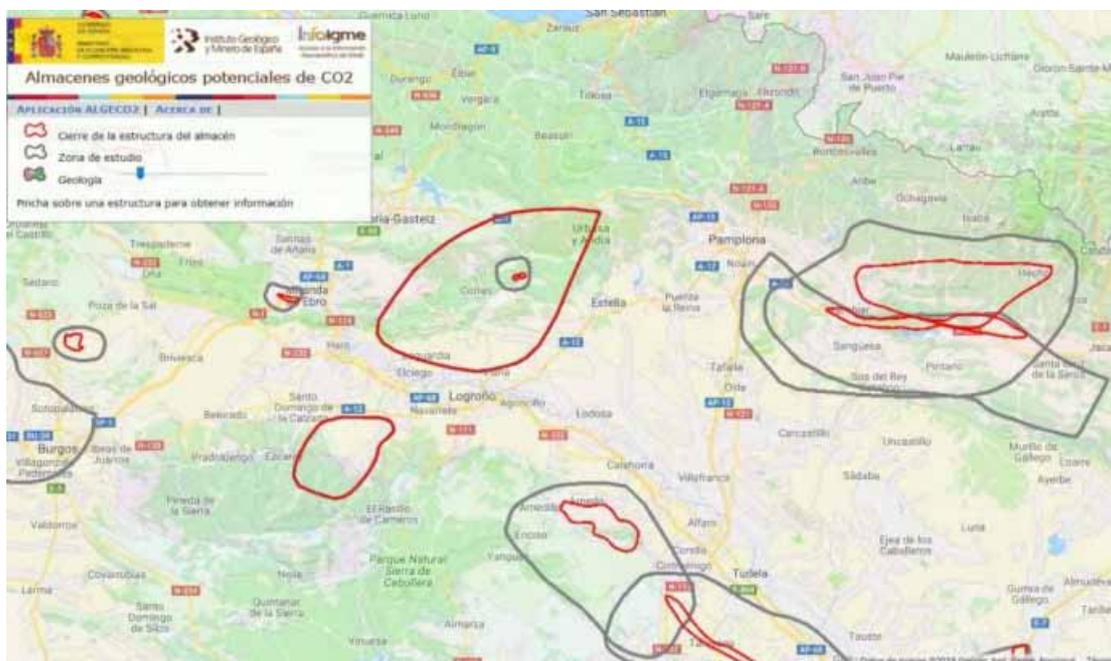
- + Sondeos realizados en las formaciones del Cretácico inferior (Grupo Oncala) de esta Unidad Hidrogeológica (sondeo de Grávalos, nº de inventario 241230012, al noroeste de Baños de Fitero), arrojan un valor de Transmisividad de 100 m<sup>2</sup>/día.
- + En esta Unidad se identifican tres tipos de aguas: a) aguas termales de carácter clorurado-sódico con valores de conductividad de 6.000 µS/cm; b) aguas sulfatado-cálcicas, no termales, muy duras y mineralizadas y que drenan el borde oriental de la Sierra de Cameros; c) aguas no termales de carácter bicarbonatado-cálcico, que drenan unidades calcáreas jurásicas.

Una vez descritas las Unidades Hidrogeológicas, es relevante incluir una descripción breve de las áreas de interés para el almacenamiento geológico profundo de CO<sub>2</sub>, recogido por el IGME a través del visor temático de Almacenes geológicos potenciales de CO<sub>2</sub>. El interés de este siguiente capítulo reside en que dicho estudio aporta información adicional sobre unidades acuíferas profundas, citándose además gradientes geotérmicos estimados y temperaturas en profundidad.

### 4.3 INFORMACIÓN ADICIONAL DE LOS ALMACENES POTENCIALES SUBTERRÁNEOS DE CO<sub>2</sub>

En los últimos años se ha llevado a cabo una investigación del subsuelo a raíz de un proyecto de selección y caracterización de áreas e y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España. La información publicada procedente de este trabajo (IGME, 2010) dirigido por el Instituto Geológico y Minero y bajo la consultoría de Gessal, tiene aportaciones muy interesantes que pueden ser de interés por las estimaciones aportadas sobre el gradiente geotérmico.

Se han identificado varios almacenes potenciales para el almacenamiento subterráneo de CO<sub>2</sub> en Navarra. Se incluye a continuación un mapa de ubicación de las principales áreas:



Fuente: visor online INFOIGME del Instituto Geológico y Minero de España.

Las líneas representadas en el mapa de fondo corresponden a zonas potenciales de estudio (en gris) y áreas concentradas donde se cartografió la unidad geológica de interés en profundidad (color rojo).

Los cuatro sectores definidos donde se encuentran potenciales almacenes de CO<sub>2</sub> son:

- + Almacén **Illón** (PEGE13) – **Leyre** (PEGE14) en sector noreste de Navarra.
- + Almacén **Rioja Norte** (CDGE24) en sector occidental del área Vasco-Cantábrica.
- + Almacén **Arnedo** (PEGE03) en sector suroccidental de Navarra.

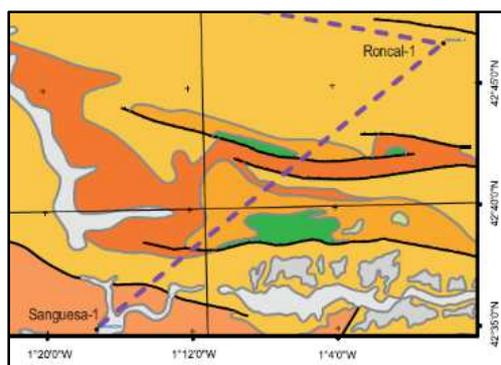
- + Almacén **Magallón** (PEGE04) en sector meridional de Navarra.

Se resumen a continuación algunas características básicas de estos almacenes potenciales subterráneos cuya información pudiera tener relación con el potencial geotérmico, tales como la potencia de algunas formaciones geológicas, porosidad, gradiente geotérmico local, etc.

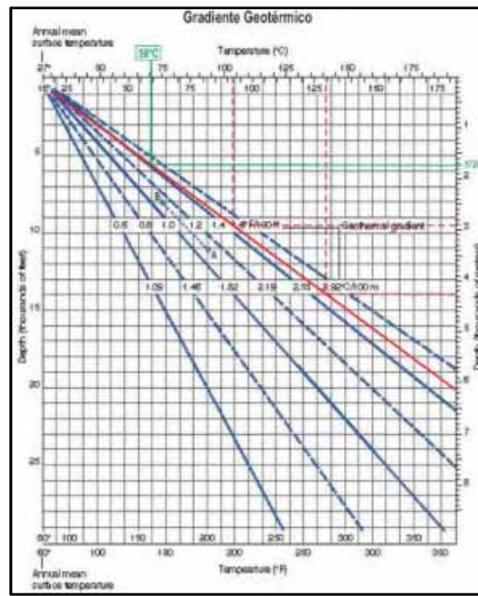
#### 4.3.1 ALMACÉN RONCAL – ILLÓN (PEGE13)

Se han estudiado varias formaciones geológicas como almacén potencial subterráneo de CO<sub>2</sub>. Aunque la formación más analizada corresponde a la formación detrítica del Buntsandstein del Triásico inferior cuyo techo se sitúa a más de 1.000 metros de profundidad, se han caracterizado otras formaciones geológicas. Concretamente, la formación calcárea (calizas y dolomías) del Paleoceno – Eoceno inferior, descrita como Unidad Hidrogeológica de Leyre en el apartado anterior.

El sondeo Roncal-1 identifica el techo de esta formación geológica a -300 metros, y su base a -444 metros, estableciendo una potencia medida de 144 metros. Bajo esta unidad se identifica otra formación geológica del Cretácico superior (Edad Campaniense – Maastrichtiense) formada por areniscas dolomíticas, dolomías arenosas y calizas, con un espesor medido de 286 metros. Bajo ésta, una nueva formación carbonatada del Cretácico superior (Edad Santoniense) formada por 65 metros de calizas oscuras y conglomerados calizos. Figura: IGME (2010). Proyecto “Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España”. Cadena pirenaica y Cuenca del Ebro. Estructura Roncal – Illón. Correlación. Consultor Gessal. 2010.



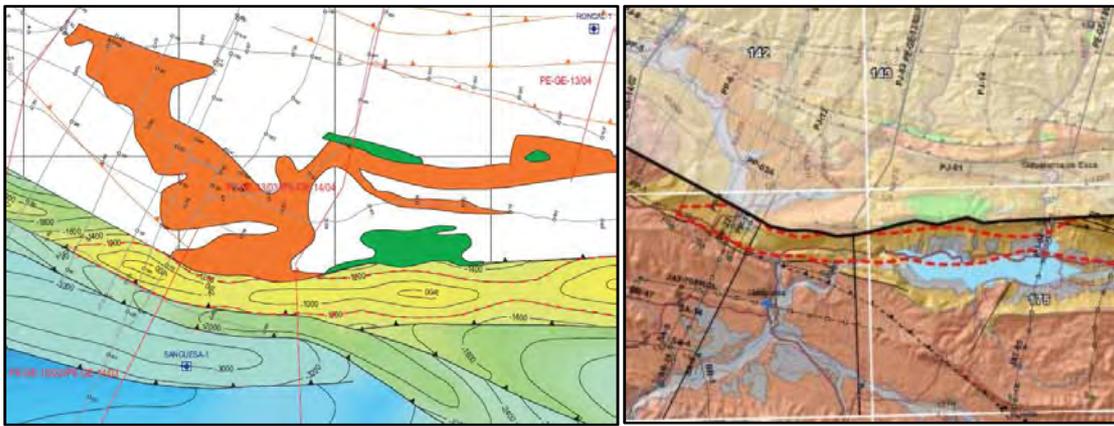
El gradiente geotérmico estimado para la zona es de 2,7°C / 100 metros. En la siguiente gráfica se observa el valor de temperatura medido (59°C) a una profundidad de 1.720 metros, correspondiente a la ubicación de la formación detrítica de interés como almacén subterráneo.



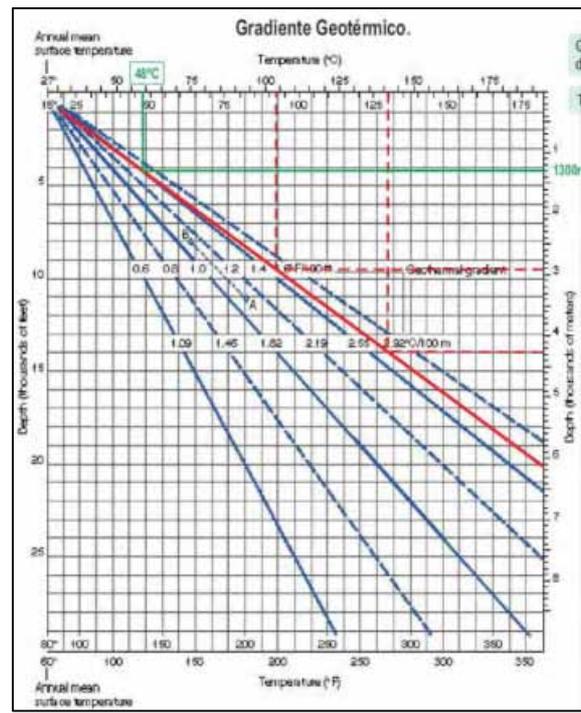
#### 4.3.2 ALMACÉN LEYRE – BERDÚN (PEGE14)

El estudio de este sector, adyacente al anterior, se ha centrado en las formaciones terciarias calcáreas del Paleoceno superior a Eoceno inferior. Los parámetros interpretados para esta unidad de interés como almacén subterráneo de CO<sub>2</sub> son: a) espesor de la formación 144 metros. Este espesor se define en el sondeo Roncal-1, aumentando a 175 metros en el sondeo Sangüesa-1; b) porosidad 7,5%; c) gradiente geotérmico regional 2,7°C / 100 metros.

Gracias a la investigación geofísica existente, se ha elaborado un mapa de isobatas correspondiente al techo de la unidad carbonatada del Eoceno inferior, lo que permite entender mejor las estructuras geológicas locales.

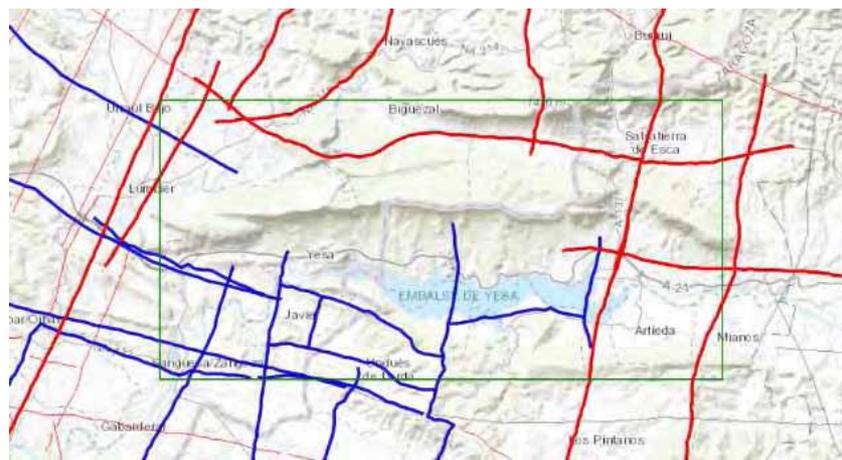


Fuente: IGME (2010). Proyecto “Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España”. Cadena pirenaica y Cuenca del Ebro. Estructura Leyre-Berdún. Mapa isobatas techo Eoceno inferior carbonatado (izda). Mapa geológico (dcha). Consultor Gessal. 2010.



Fuente: IGME (2010). Proyecto “Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España”. Cadena pirenaica y Cuenca del Ebro. Estructura Leyre-Berdún. Petrofísica y tabla resumen. Consultor Gessal. 2010. A 1.300 metros se estima una temperatura de 48°C.

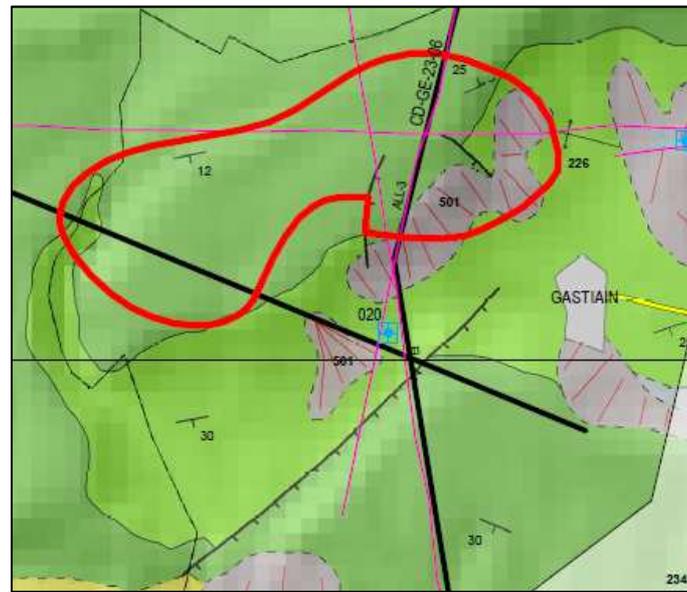
Gracias al visor temático del IGME, sistemas de información geofísica, se pueden observar las zonas de investigación geofísica y la metodología empleada.



- + Línea PJ-1 (cód. 9861) orientación E-W Bigüezal – Salatierra de Esca.
- + Línea PJ-4 (cód. 9875) orientación NNE-SSO Salatierra de Esca – Los Pintanos.
- + Línea PP-10 (cód. 9880) orientación NNE-SSO Lumbier.
- + Línea SA-8 (cód. 9882) orientación NNE-SSO Embalse de Yesa.
- + Línea SA-2 (cód. 9888) orientación NNE-SSO Yesa.

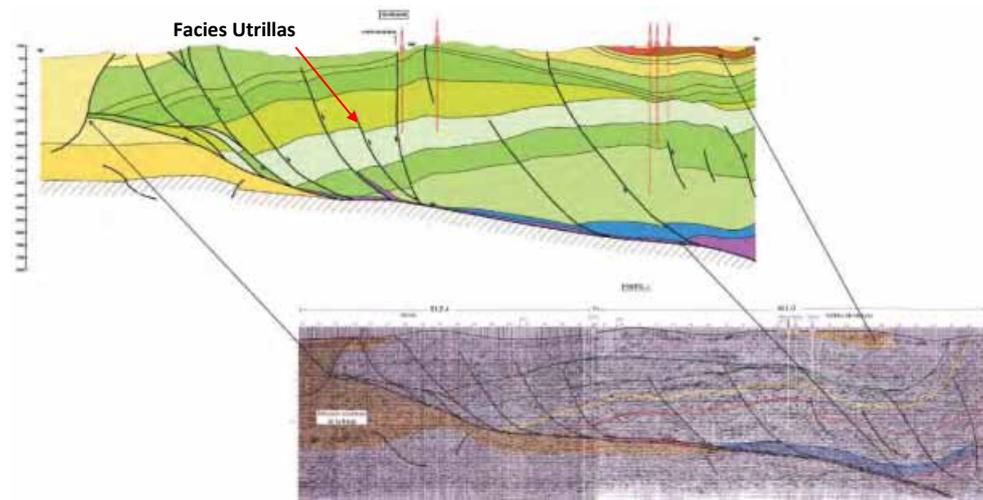
#### 4.3.3 ALMACÉN RIOJA NORTE (CDGE24)

El sector identificado como almacén Rioja Norte se centra en la estructura del anticlinal de Gastiain, en el Dominio tectónico Vasco-Cantábrico, Subdominio Bloque alavés, Sector Meridional (Sierra de Lóquiz), ya descrito en capítulos anteriores. La información aquí recogida permite aportar información complementaria a la ya descrita en capítulos anteriores, tanto para la Unidad hidrogeológica de Lóquiz, como también para la Unidad de Urbasa.



Fuente: IGME (2010). Proyecto "Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España". Cadena cantábrica y Cuenca del Duero. Cortes geológicos y líneas sísmicas. Consultor Gessal. 2010.

Este estudio está centrado en una formación geológica de edad Albiense (Cretácico inferior) formada principalmente por areniscas (Facies Utrillas). El perfil geológico que se incluye a continuación representa una dirección Norte-Sur seccionando transversalmente el anticlinal de Gastiain.



Fuente: IGME (2010). Proyecto "Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España". Cadena cantábrica y Cuenca del Duero. Montes Obarenes - Cortes geológicas. Consultor Gessal. 2010.

No se han encontrado datos de gradiente geotérmico.

#### 4.3.4 ALMACÉN ARNEDO (PEGE03)

Se cita un gradiente geotérmico regional de 3,5°C / 100 metros.

#### 4.3.5 ALMACÉN MAGALLÓN (PEGE04)

Se cita un gradiente geotérmico regional de 3,0°C / 100 metros.

### 4.4 FORMACIONES GEOTÉRMICAS DESCRITAS EN LA CUENCA DEL EBRO

Dada la cercanía y la gran conexión geológica entre las Comunidades de Navarra y Aragón, es relevante citar de forma sucinta cuáles son las principales formaciones geotérmicas que se han definido en nuestra comunidad vecina con la finalidad de aportar datos adicionales que pudieran apuntar hacia formaciones geológicas similares o equivalentes en nuestra comunidad. De acuerdo con [Sánchez Navarro et al \(2004\)](#) y [Gobierno de Aragón \(2001\)](#), se sintetizan en las siguientes:

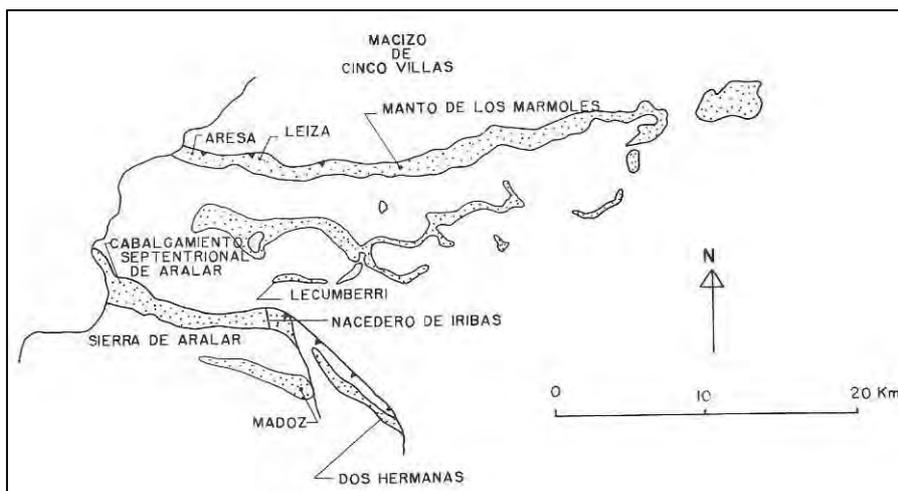
- + FG01 Granitos y granodioritas del Pirineo axial.
- + FG02 Areniscas y conglomerados del Periodo Triásico en facies Buntsandstein.
- + FG03 Rocas carbonatadas del Periodo Triásico medio en facies Muschelkalk.
- + FG04 Rocas carbonatadas del Periodo Jurásico inferior (Lias). En esta formación geotérmica se ha definido una especial actividad geotérmica asociada a su porosidad.
- + FG05 Rocas carbonatadas del Jurásico medio-superior (Dogger-Malm).
- + FG06 Rocas carbonatadas del Cretácico superior.
- + FG07 Rocas carbonatadas del Periodo Paleoceno-Eoceno (Calizas de Guara).
- + FG08 Materiales carbonatados y detríticos terciarios de relleno de cuenca.

IGME (1982, código 00660) describe las mismas formaciones geológicas, distribuidas entre las regiones Pirenaica, Valle del Ebro y Zona Cantábrica.

En el apartado 7 de este informe se describen las principales formaciones geológicas por Dominios tectónicos. La memoria del mapa geológico 1:200.000 del Gobierno de Navarra incluye algunos mapas sintéticos, algunos de los cuales ya se incluyen en el mencionado apartado, y otros como los que se incluyen a continuación:



Fuente: Memoria del Mapa geológico 1:200.000 del Gobierno de Navarra. Distribución de materiales paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos en Navarra.



Fuente: Memoria del Mapa geológico 1:200.000 del Gobierno de Navarra. Distribución de materiales del Jurásico en Navarra. Como puede verse, las litologías carbonatadas del Jurásico afloran en Navarra en el Dominio Vasco-Cantábrico, subdominio del Arco Vasco, áreas del Manto de los Mármoles y Sierra de Aralar.

En Navarra se identifican muchas de las formaciones geológicas descritas en párrafos anteriores como formaciones geotérmicas, bien aflorando en superficie o bien identificadas en profundidad gracias a la información aportada por sondeos profundos.

Garrido y Sánchez-Navarro (2004) citan y describen las principales manifestaciones geotérmicas y de aguas termales de la Cuenca del Ebro y que se pueden resumir de la siguiente manera:

- + Flujos regionales profundos en acuíferos carbonatados del dominio Vasco-Cantábrico que ascienden a favor de las principales alineaciones estructurales del Dominio tectónico. La presencia de estructuras diapíricas podrían favorecer el ascenso rápido de las aguas y aumentar su mineralización.
- + Alineaciones estructurales de las Sierras exteriores y marginales del Pirineo con presencia de acuíferos carbonatados (de edad cretácica y paleógena) que constituyen límites hidráulicos en su contacto con unidades más impermeables (caso de Tiermas). Se incluyen además los almacenes profundos de Jaca y el Serrablo.
- + Hidrotermalismo asociado a batolitos graníticos del pirineo axial.
- + Anomalías geotérmicas profundas en sondeos petrolíferos que afectan a formaciones carbonatadas triásicas, jurásicas y terciarias (por ejemplo, caso del sondeo profundo de Sangüesa a +776 metros, con aguas clorurado sódicas y en formación terciaria con litologías de margas, calizas, areniscas y anhidritas).
- + Estructuras del Dominio de la Sierra de la Demanda-Cameros asociadas a la Falla Nordibérica, con flujo regional a través de acuíferos carbonatados jurásicos, y la descarga a través del contacto con materiales terciarios (casos de Fitero y Arnedillo).
- + Otras manifestaciones en áreas más distantes.

IGME (1982, código 00660) incluye en su Anexo II la lista de sondeos profundos realizados, indicando la denominación del sondeo (columna de la izquierda), los materiales atravesados y la cota a la que se definen (columna central) y los valores de temperatura medidos a la cota indicada (columna derecha). Se trata de los sondeos Roncal-1, Pamplona-1, Pamplona-2 y Pamplona-sur, Marcilla y Sangüesa-1.

En ITGE (1982, código 00225), Anejos 1 y 2, se incluyen fichas de sondeos en los que se anotan algunas observaciones sobre las mediciones de temperatura realizadas.

NOMBRE		COORDENADAS		X	Y
PAMPLONA-3		GEOGRAFICAS		1° 56' 42"	42° 56' 52"
		LAMBERT		759,014	917,769
EMPRESA CONTRATISTA VALDEBRD-24					
OBSERVACIONES	COLUMNA LITOLÓGICA		MTS.	T °C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
Cota: 450 m. Profundidad: 3554 m. GAS=-  28°C - 1322 m. 47°C - 2852 m. 75°C - 3554 m.	ENC. MED: Pirarnes				
	y calizas		396		
	ENC. SUP: Calizas				
	y jurarnes		884		
	RET. SUP: Calizas				
	y dolomitas		1189		
	CENOM: Pirarnes				
	y calizas		1433		
	APT. SUP: Calizas		1585		
	APT. INF: Pirarnes				
y calizas		1737			
JURAS: Dolomitas					
y calizas		1890			
TRUPER: Evaporitas					
y sal		2173			
Calizas		3554			

NOMBRE		COORDENADAS		X	Y
PAMPLONA-2		GEOGRAFICAS		1° 59' 10"	42° 49' 35"
		LAMBERT		762,411	915,159
EMPRESA CONTRATISTA VALDEBRD-21					
OBSERVACIONES	COLUMNA LITOLÓGICA		MTS.	T °C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
Profundidad: 2100 m. NEGATIVO  30°C - 1143 m. 32°C - 1654 m.					

NOMBRE SANGÜESA - I		COORDENADAS X Y			
GEOGRAFICAS		2° 23' 52"	42° 35' 08"		
LAMBERT		796.805	889.520		
EMPRESA CONTRATISTA ENPENSA - 2					
OBSERVACIONES Cota: 407,73 m. Profundidad: 4776 m. 43°C - 379 m. 81°C - 3437 m. 132°C - 4112 m.  3779-3793 m: Agua lodosa Q = 320 l. Sol. 14 gr/l	COLUMNA LITOLOGICA		MTS.	T °C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
	OLIGOCENO		0-306		
	II - EOCENO		3285		
	LUTECIENSE		3580		
	PERMO-TRIAS		4430		
	CARBONIFERO		4662		
DEVONICO		4776			

NOMBRE PAMPLONA - I		COORDENADAS X Y			
GEOGRAFICAS		1° 57' 05"	42° 51' 03"		
LAMBERT		759.845	918.189		
EMPRESA CONTRATISTA VALDEBRO - 18					
OBSERVACIONES Cota: 480 m. Profundidad: 3788,3 m. PETRÓLEO Y GAS  33°C - 990 m. 50°C - 2107 m.  metros fluido Q salin. 548-576 agua 30 m <sup>3</sup> 20.000 ppm 576-554 " 9,6 832-940 " 5 74.000 1532-1636 n+gas - 117.000	COLUMNA LITOLOGICA		MTS.	T °C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			

NOMBRE PAMPLONA - SUR - I		COORDENADAS X Y			
GEOGRAFICAS		2° 06' 23"	42° 43' 40"		
LAMBERT		772.496	904.742		
EMPRESA CONTRATISTA VALDEBRO - 33					
OBSERVACIONES Profundidad: 2457 m.  (?) { 40°C - 614 m. (11-10-61) 36°C - 1492 m (6-12-61) 56,1°C - 1886 m (4-6-62)	COLUMNA LITOLOGICA		MTS.	T °C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			

NOMBRE MARCILLA - I		COORDENADAS X Y			
		GEOGRAFICAS		1° 57' 38" 42° 20' 17"	
		LAMBERT		762.881 861.227	
EMPRESA CONTRATISTA VALDEBRO - I					
OBSERVACIONES	COLUMNA LITOLÓGICA		MTS.	T °C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
Profundidad: 3415 m. NEGATIVO: 40 °C - 1557 m (23-4-53) 98 °C - 3048 m (23-6-53)					

NOMBRE URBASA - 2		COORDENADAS X Y			
		GEOGRAFICAS			
		LAMBERT		716.097 912.455	
EMPRESA CONTRATISTA C.I.E.P.S.A. - SEPE					
OBSERVACIONES	COLUMNA LITOLÓGICA		MTS.	T °C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
Cota: 971,91 m. Profundidad: 5842 m. NEGATIVO 112 °C - 3955 m. 144 °C - 5116 m.					
	Caliza sin fosilif.		165		
	CAMPAN: Areniscas y limolitas		276		
	SANT. SUP: Marga		425		
	SANT - CONIAC: Calizas		1695		
	CONIAC INF: Calizas y arcillas		1815		
	TURON: Calizas		1930		
	CEVOM: Calizas		2015		
	ALB: Calizas		2995		
	APT: Calizas, arcillas		3380		
	WELD: Areniscas		5842		

NOMBRE GASTIAIN - I		COORDENADAS X Y			
		GEOGRAFICAS		1° 24' 45" 42° 43' 51"	
		LAMBERT		715.673 903.959	
EMPRESA CONTRATISTA C.I.E.P.S.A. - 20					
OBSERVACIONES	COLUMNA LITOLÓGICA		MTS.	T °C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
Cota: 794,15 m. Profundidad: 3438 m. 645 38 °C - 211 m. 35 °C - 724 m. 37 °C - 1887 m. 108 °C - 2493 m. 123 °C - 3438 m.					
	TURONENSE		65		
	CEVOMANENSE		1090		
	ALBENSE		3240		
	APTENSE		3438		

Finalmente, otros autores consideran además como potenciales formaciones geotérmicas de interés a los depósitos aluviales de los ríos. [Tecnologías y Recursos de la Tierra \(2011\)](#). IGME

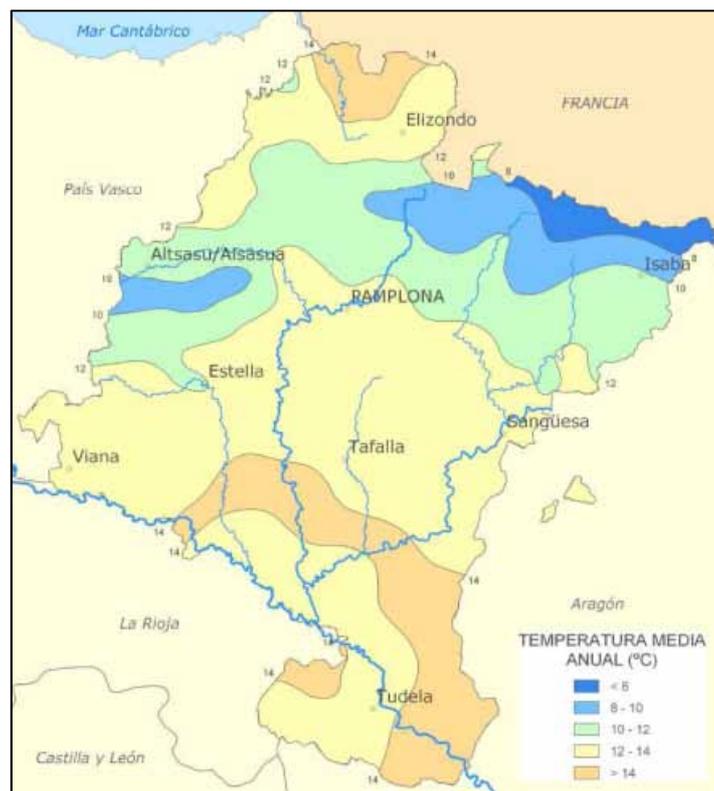
(1984, código 00885 “síntesis almacenes muy baja entalpía”) mencionan los acuíferos granulares de los aluviales de los ríos, que por su proximidad a núcleos urbanos podrían ser explotables energéticamente mediante bomba de calor.

#### 4.5 MANANTIALES DE NAVARRA

Tal y como se ha visto en la descripción de las Unidades Hidrogeológicas de la provincia de Navarra, se han definido hasta 11 grandes subdivisiones y se han descrito los acuíferos y principales manantiales asociados a éstas.

A través del visor online de IDENA del Gobierno de Navarra se pueden localizar todos ellos seleccionando la capa temática de Geología, que incluye entre otras cosas el inventario de manantiales.

La Dirección General de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Servicio de Economía Circular y Agua, dispone de más servicios e información adicional sobre los recursos hídricos. Este servicio realiza un exhaustivo control de las aguas de todos los manantiales y pozos referenciados mediante la medición de parámetros físicos y químicos de forma periódica.



Fuente: Gobierno de Navarra.

La Confederación Hidrográfica del Ebro dispone además de información pública adicional sobre la red de piezometría de las aguas subterráneas, informes periódicos de control de vigilancia de la calidad de las aguas, zonas sensibles y zonas vulnerables, etc.

Además del inventario de manantiales, se ha recogido información expresa de los manantiales termales y minero-medicinales de Navarra. De acuerdo con la información publicada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 2001), se definen 39 captaciones de agua mineral que se sintetizan de la siguiente manera:

6.16.1. CAPTACIONES INACTIVAS CON FECHA DE DECLARACIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA EN NAVARRA							
Nº L.	N	T.M.	DENOMINACIÓN	D.	AÑO	FACIES/ OTRAS CARACT.	P.P.
1	M	Alsasua	Iturbendicáin	MM	1892	ClNa / -	No
2	M	Aoiz	Góriz	MM	1892	ClNa / -	No
3	M	Basaburua Mayor	Jaunsarás	MM	1892	- / Fe	No
5	M	Belascoáin	Urbeloa	MM	1869	ClNa / -	-
6	M	Betelu	Iturresanto	MM	1866	- / Sulf	-
8	M	Burlada	Burlada	MM	1892	BNa / -	No
9	P	Burlada	La Asunción	MM	1903	BNa / -	No
10	M	Cizur	Fuente El Batueco	MM	1892	- / Sulf	No
25	M	Doneztebe	Elbetea	MM	1892	- / Fe	No
11	M	Echaurri	Echaurri	MM	1892	B / -	No
12	M	El Gorriaga	El Gorriaga	MM	1919	ClNa / -	No
13	M	Estella	Azqueta	MM	1892	- / Fe	No
14	M	Estella	Carcar	MM	1892	SCa / -	No
15	M	Estella	Lodosa	MM	1892	- / Fe	No
17	M	Imotz	Zarrauz	MM	1892	- / Sulf	No
18	M	Isaba	Fuente del Minchante	MM	1892	BCa / -	No
19	M	Larraun	Azpiroz	MM	1892	- / Sulf	No
20	M	Leitza	Leitza	MM	1892	- / Fe	No
21	M	Obanos	Obanos	MM	1892	- / Sulf	No
22	M	Pamplona	Goldaraz	MM	1892	- / Sulf	No
23	M	Pamplona	La Tasa	MM	1892	- / Fe	No
26	M	Tafalla	Fuente Calchea (Falces)	MM	1892	- / Fe	No
27	M	Tudela	Cascante	MM	1892	ClNa / -	No
28	M	Vera de Bidasoa	Vera	MM	1892	- / Fe	No

Fuente: IGME, 2001

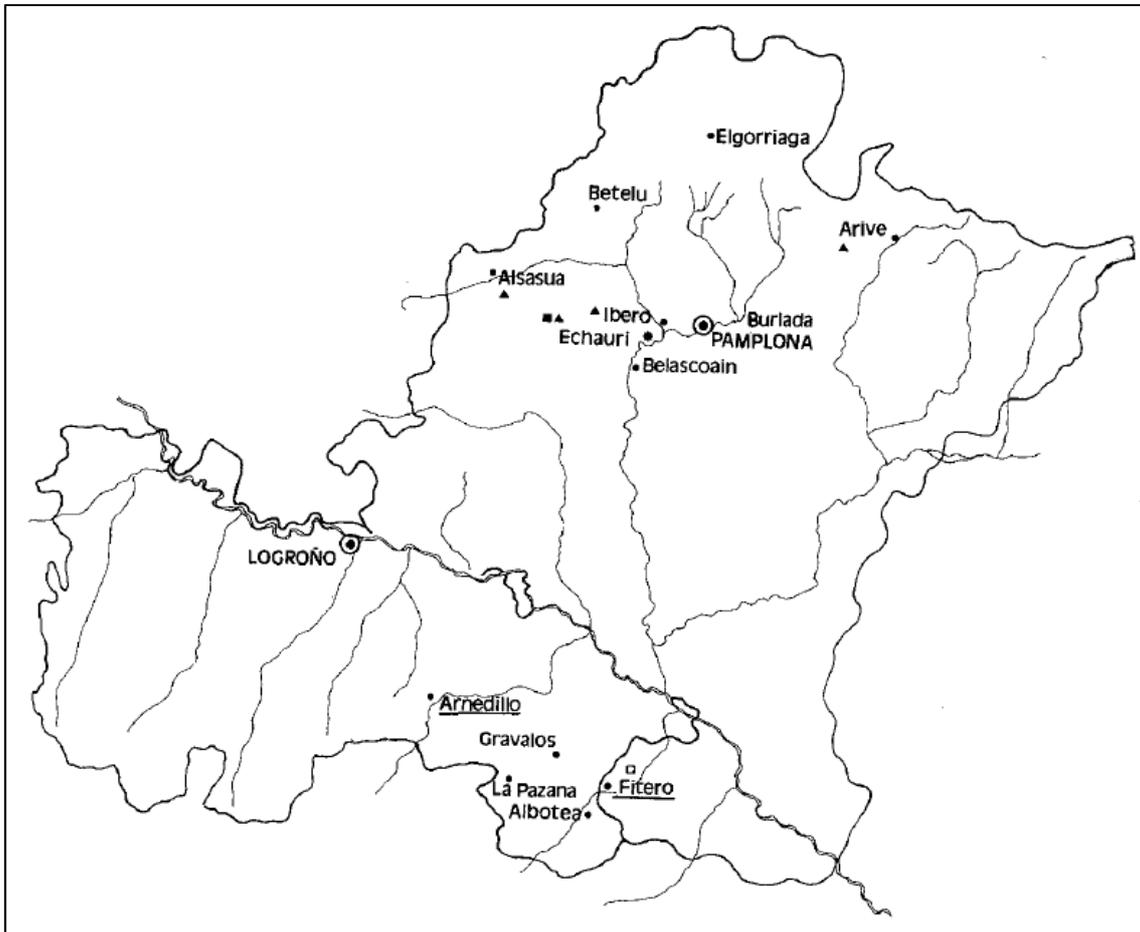
6.16.2. CAPTACIONES DE AGUAS MINERALES INACTIVAS ESCASAMENTE DOCUMENTADAS EN NAVARRA					
N	T.M.	DENOMINACIÓN	D.	AÑO	FACIES/ OTRAS CARACT.
M	Anué	Leazcue	MM	-	- / Fe
M	Aribe	Onbixatxulo	MM	-	BCa / -
M	Basaburua	Jaunsaras	MM	-	- / Fe
M	Baztan	Errazu	MM	-	- / Fe
M	Cárcar	Cárcar	MM	-	- / Sulf
M	Cascante	El Matador	MM	-	S / -
M	Falces	Calceta	MM	-	S / -
M	Garde	Garde	MM	-	- / Sulf
M	Imotz	Goldaraz	MM	-	- / Sulf
M	Lodosa	Calderín	MM	-	- / Fe
M	Lónguida	Gorritz	MM	-	- / Sulf
M	Pamplona	Echandico-Bordaco-Iturria	MM	-	BCa / -

Fuente: IGME, 2001

En resumen, se definen:

- + Balnearios activos: (1) Baños de Fitero.
- + Plantas envasadoras de agua mineral: (2) Belascoain y Betelu.
- + Captaciones inactivas con fecha de declaración de utilidad pública: (24).
- + Captaciones inactivas escasamente documentadas: (12).

Peréx y Unzu (1992) describen una relación de los principales puntos donde se detecta la presencia de aguas termales y/o aguas mineromedicinales:



Fuente: Pérex y Unzu, 1992. Yacimientos y hallazgos asociados a manantiales minero-medicinales y/o termales en Navarra y La Rioja.

En la Montaña de Navarra se citan las aguas minero-medicinales de Elgorriaga, Betelu, Arive y Alsasua. Las aguas minero-medicinales de Elgorriaga son de carácter clorurado-sódicas, y además bromo-yoduradas, y presentan una fuerte mineralización. El manantial sulfuroso de Alsasua se explotó antiguamente como balneario. En el caso de Arive, sus aguas ferruginosas y carbonatadas se explotaron como balneario antiguamente.

En la Cuenca de Pamplona se citan los manantiales de Burlada, Ibero, Echaury y Belascoain. En el caso de Burlada, se describe como una fuente de aguas alcalinas, salinas, bicarbonatado-sódicas y yoduradas. Fueron explotadas como balneario hasta antes de mediados del siglo pasado hasta su clausura.

En el Somontano riojano se citan los balnearios de Arnedillo, Grávalos, La Razana y Albotea (La Rioja) y Fitero (Navarra).



Fuente: Pérex y Unzu, 1992. Relación de fuentes en Navarra con alguna propiedad característica.

Martín-Gil et al. (1999) dejan clara la diferencia entre aguas de consumo público envasadas, aguas preparadas, aguas de manantial y aguas minerales naturales. Estas últimas deben cumplir entre otros requisitos, una composición química, un caudal y una temperatura de surgencia estables.

En la obra de Méndez (2009) se citan todos los complejos balneoterápicos y de aguas minero-medicinales de España, de los cuales, en Aragón se incluyen Tiermas y Panticosa (entradas al catálogo nº 871-920), mientras que en Navarra (entradas al catálogo nº 3164-3283) se incluyen por orden alfabético: Alsasua, Belascoain, Betelu, Burlada, Fitero (nuevo y viejo).

En Caja de Ahorros de Navarra (1991) se incluye cierta información adicional sobre algunos de los puntos de cierto interés citados en este capítulo:

- Balneario de Alsasua: aunque ya no existe como tal, se conserva el manantial (nombre local *Iturri Mendicatu*), que brota a una altitud de 400 metros con un aforo de 40.000 l/día y una temperatura de surgencia de 13°C. Sus aguas son clorurado-sódicas. También se clasificaron como sulfurosas.
- Balneario de Arike: sus aguas estaban clasificadas como ferruginosas bicarbonatadas.
- Balneario de Burlada: no existiendo como tal, se trataba de un pozo cuyas aguas se clasificaron como alcalinas, salinas, bicarbonatado-sódicas yoduradas.

En esta obra se citan otros puntos de agua minero-medicinal o manantiales donde la creencia popular les atribuye propiedades curativas, aunque sin base científica.

## 4.6 MANIFESTACIONES TERMALES EN NAVARRA

En el territorio navarro no se identifican señales de actividad volcánica actual o reciente que pongan de relieve un mayor flujo térmico regional relacionado con el vulcanismo. Los únicos vestigios de rocas ígneas son por un lado, el stock granítico de Peñas de Aia y, por otro lado, diques doleríticos y basaltos emplazados durante el Pérmico superior (Era Paleozoica) en el Macizo de Cinco Villas (Lasheras et al, 1999) o las rocas ofíticas asociadas a los diapiros (véase apartado 7.1), principalmente.

No obstante, se identifican en Navarra algunos indicios o manifestaciones geotermales a partir de datos recogidos en campañas de investigación profunda (sondeos de investigación petrolífera), así como la presencia en superficie de manantiales termales en puntos localizados de la región. Estos indicios geotérmicos están relacionados en la mayoría de los casos con flujos profundos de aguas subterráneas de carácter regional (Garrido y Sánchez, 2004) asociados a unidades geológicas acuíferas cuya estructura geológica y fracturación favorecen un rápido ascenso del agua.

También son interesantes las aportaciones de Fernández et al. (1997), quienes ofrecen una revisión del flujo térmico y generación de calor interno a nivel de la Península y revisan algunos de estos parámetros a partir de estimaciones de otros autores anteriores.

La enciclopedia navarra (<http://www.enciclopedianavarra.com>) recoge la siguiente información acerca del Geotermalismo en Navarra:

*Manifestaciones que se producen de la energía geotérmica o de la energía calorífica contenida en el interior de la Tierra. Se diferencian dos tipos de energía geotérmica: la de baja temperatura, que se produce en las zonas de la corteza terrestre relativamente estables y donde los gradientes térmicos son del orden de 2-4º C cada cien metros de profundidad, y la de alta temperatura, que se manifiesta en zonas en las que debido a fenómenos geológicos de carácter estructural se pueden producir gradientes que suponen incluso los 20-30º C cada cien metros de profundidad.*

*Una de las principales manifestaciones del geotermalismo es la presencia de aguas termales en la superficie terrestre. En Navarra, los principales manantiales termales son los de Baños de Fitero\* (46º), Betelu\* (25º), Belascoain\* (26º) y los de la zona de Echauri\* (Pozo Grande 20º) e Ibero\* (Uberba 20º).*

*Las aguas termales de Fitero se encuentran asociadas a la gran estructura geológica que separa la Depresión del Ebro de la Cordillera Ibérica. Belascoáin, Ibero y Echauri vienen condicionadas por las fallas radiales del borde del diapiro de Salinas de Oro. Finalmente los manantiales de Betelu están ligados a una estructura tipo domo en materiales del Cretácico inferior abombados por causa del Triásico infrayacente.*

*Todas las aguas de los manantiales mencionadas presentan naturaleza clorurado-sódica que indica la circulación de estas aguas por materiales del Keuper, donde adquieren su mineralización. Se cree que la temperatura de las aguas viene dada por un proceso de infiltración de las aguas y tras un tiempo de residencia de unos 20-25 años en el que experimentan el calentamiento por circulación profunda, surgen a la superficie experimentando una cierta mezcla con aguas más superficiales.*

#### 4.6.1 SURGENCIAS TERMALES DE BAÑOS DE FITERO

En el Apartado 7.2.11 se describe la Unidad Hidrogeológica de Fitero, indicando las características de las formaciones geológicas involucradas, las unidades acuíferas definidas, la estructura geológica, el sistema de flujo regional y otra información necesaria para su caracterización.

La gran enciclopedia de Navarra dice así:

##### *FITERO, BAÑOS DE*

*A escasa distancia de esta población, en el límite con la Rioja se localizan los manantiales termominerales de los Baños de Fitero (Balneario Nuevo y Balneario Viejo). Surgen a través de materiales de muy baja permeabilidad, yesos, carniolas, calizas, margas, areniscas y conglomerados del Triásico, Jurásico y Cretácico inferior, aprovechando la mayor permeabilidad de determinadas fracturas. La temperatura de emergencia es de 46°C.*

*Sus aguas son fuertemente mineralizadas y extremadamente duras, de facies clorurada sódica que predomina claramente sobre la sulfatada cálcica, que también poseen. Los caudales son de orden de 30 l/seg en el Balneario Nuevo y 10 l/seg en el Balneario Viejo.*

*Los Baños Viejos figuran en los Nomenclátors de Población de 1887 (7 hab), 1910 (13), 1920 (5), 1930 (10), 1940 (7), 1950 (10) y 1960 (ninguno). Y los Baños Nuevos en los de 1910 (6 hab), 1920 y 1930 (5), 1940 (13), 1950 (25) y 1960 (5).*

Coloma, Sánchez y Martínez (1997) recogen con detalle las características de estas surgencias termales. Se incluye a continuación un breve resumen del artículo:

*En la zona en la que el río Alhama atraviesa el contacto cabalgante entre la Sierra de Cameros y la Depresión Terciaria del Ebro, y a una cota comprendida entre 501 y 440 m, se localizan una serie de surgencias que constituyen el drenaje del acuífero carbonatado jurásico en este sector. El rasgo más característico de esta zona es la presencia de aguas con una elevada temperatura de emergencia (más de 46° C) y una elevada*

*mineralización, que se utilizan con fines mineromedicinales en dos balnearios situados en el término municipal de Fitero (Navarra).*

*Los dos manantiales termales más importantes abastecen a sendos balnearios; el manantial que abastece al Balneario Virrey Palafox se ubica a una cota de 501 m, con una temperatura media del agua de 46,5° C y un caudal medio de 18 l/s y la surgencia que abastece al Balneario Gustavo Adolfo Bécquer se localiza a una cota de 499 m con una temperatura media del agua de 48,5° C y un caudal medio de 30 l/s. Estos manantiales tienen valores de caudales y temperaturas de surgencia muy constantes. Se ubican en fracturas que afectan a materiales del Grupo Tera (facies Weald) y que funcionan como vías preferentes de ascenso de los flujos termales desde los materiales acuíferos jurásicos. Las condiciones hidrogeológicas están fuertemente influidas por factores tectónicos, de manera que la surgencia tiene lugar muy por encima de la cota del río Alhama. Existen además otros dos pequeños manantiales termales con una temperatura del agua de 31°C; este hecho puede deberse a la existencia de mezcla con aguas frías y/o a la circulación de caudales menores, en conductos de menor tamaño y con un flujo más lento (en suma, con una mayor tendencia a alcanzar el equilibrio térmico con la roca, en las proximidades de la zona de surgencia); presentan un caudal de 0,5 y 1 litros respectivamente. Estos manantiales surgen también a favor de fracturas en el Grupo Tera (facies Weald). Existen, por tanto, dos tipos de circulación subterránea, una que origina las surgencias termales, procedentes de flujos profundos y de origen regional y otra circulación típicamente kárstica.*

El documento **Real Academia Nacional de Farmacia (1991)** recoge un conjunto de artículos entre los que se incluye el de *García Puertas et al* donde se concluye que: a) se trata de aguas de mineralización fuerte, b) se consideran aguas mesotermiales debido a su temperatura de surgencia comprendida entre 45-50°C, c) son aguas cloruradas, sulfatadas, sódicas, d) por contener fluor, bromo y litio, también son fluoradas, bromuradas, litínicas.

**Diputación Foral de Navarra (1982)** clasifica sus aguas como 422-1ab-1b. También cita que las aguas de Balneario Nuevo presentan una composición química más estable, denotando una menor proporción de mezcla con aguas superficiales más frías.

**Maraver y Armijo (2010), Caja de Ahorros de Navarra (1991), y Real Academia Nacional de Farmacia (1991)** incluyen información adicional sobre las aguas de Baños de Fitero.

**IGME (1982, código 00747)** incluye información sobre las aguas del Balneario de Fitero, asociadas a la unidad de la Falla Camerana, que separa dos grandes unidades estructurales, la Depresión del Ebro y la Cordillera Ibérica. Las aguas inventariadas son:

- + LO-46 (Baños Nuevos de Fitero) 52°C y 30 l/s. Keuper en contacto con calizas.
- + LO-47 (Baños Viejos de Fitero) 52°C y 16,5 l/s. A 200 m del anterior.

En lo que respecta al análisis geoquímico, los resultados son los siguientes:

<u>N°MUESTRA</u>	<u>Na/Li</u>	<u>Na/K</u>	<u>Na/Ca</u>	<u>Cl/CO<sub>3</sub>H</u>	<u>Cl/SO<sub>4</sub></u>	<u>Cl/B</u>	<u>Cl/F</u>
LO-44	45,26	14,96	0,060	0,13	0,048	64,95	57,08
LO-45	66,38	12,43	0,036	0,19	0,022	78,06	26,38
LO-46	427,46	38,95	1,61	14,53	2,18	2435,68	856,20
LO-47	450,09	47,42	1,95	15,18	2,26	2543,93	1176,65
LO-48	--	10,17	0,028	0,15	0,30	--	27,92

Fuente: IGME (1982, código 00747). Relaciones geoquímicas para las aguas de Fitero.

Este documento sintetiza los análisis geoquímicos realizados para estas aguas termales para establecer la temperatura de equilibrio agua-roca en profundidad, estimándose para las aguas de Fitero unos valores medios de 93-94°C. Estos valores son cercanos a los obtenidos por [Blasco et al \(2018\)](#) para el sistema hidrotermal de Arnedillo, que arroja valores en torno a 87 ± 12°C tras llevar a cabo los correspondientes cálculos geotermométricos.

Finalmente, otro de los artículos incluidos en el documento [Real Academia Nacional de Farmacia \(1991\)](#) es el correspondiente a *Del Pozo y García*, quienes hacen una reseña geológica del entorno de Fitero. Como dato adicional a la información ya aportada en capítulos anteriores, estos autores indican que el gradiente geotérmico establecido para esta zona es de 4,4°C / 100 metros (dato estimado a partir de registros de sondeos petrolíferos realizados por CGS en 1977), citando que la profundidad a la que se alcanzaría el equilibrio termodinámico de las aguas en contacto con los materiales del Keuper es del orden de 1.000 – 1.500 metros, pudiendo establecerse una profundidad menor si se analizase con más detalle la anomalía térmica local.

La información disponible actualmente en lo que respecta al aprovechamiento geotérmico del sistema hidrotermal de Fitero se resume en la siguiente tabla:

LOCALIDAD	TIPO	TEMPERATURA (°C)		CAPACIDAD (MW <sub>i</sub> )	UTILIZACIÓN ANUAL	
		Entrada	Salida		Energía	Factor de Capacidad
					(TJ/año)	
Lérida	E	58	25	1,24	26,11	0,66
Arnedillo	E+B	50	30	0,92	21,10	0,73
Fitero	E+B	52	30	0,73	14,50	0,63
Lugo	E+B	44	25	0,32	5,01	0,50
Orense	E	75	30	0,94	23,74	0,80
Archena	E+B	48	25	0,96	18,20	0,60
Sierra Alamilla	E+B	52	30	0,74	14,51	0,62
Montbrío	E+B	42	18	1,50	31,65	0,67
Montbrío	I	78	25	1,33	20,97	0,50
Cartagena	I	38	18	12,55	158,26	0,40
Zujar	I	45	20	1,05	13,19	0,40
<b>TOTAL</b>				<b>22,28</b>	<b>347,24</b>	

Fuente: “Guía de la Energía Geotérmica” (Llopis y Rodrigo, 2010). Nota: (E: calentamiento de espacios naturales, B: Baño y natación, inclusive balneología).

#### 4.6.2 SURGENCIAS TERMALES DE BETELU

Como se ha descrito en apartados anteriores (7.2.2), el sistema hidrotermal de Betelu se encuentra ubicado dentro de la Unidad Hidrogeológica de Aralar-Ultzama. Más concretamente, se asocia al sistema acuífero de Huici – Arrarás. De todos los manantiales definidos en este acuífero, únicamente se han identificado dos de ellos de carácter termal en las proximidades de Betelu.

La zona se caracteriza por una elevada complejidad tectónica y estructural. Se identifican grandes secuencias de pliegues anticlinales y sinclinales, en ocasiones tumbados y de orientación NO-SE que evolucionan hacia el este a orientaciones E-O e incluso NE-SO. Se suma además la presencia de estructuras diapíricas como la de Lekunberri-Albiasu y su continuación en profundidad. La estructura tipo domo descrita para el caso de los manantiales de Betelu obedece al abombamiento y agrietamiento producido sobre formaciones calcáreas del Cretácico debido a dichos emplazamientos diapíricos. La circulación profunda de agua a través de unidades acuíferas, el contacto con formaciones salinas de facies Keuper en profundidad y el ascenso rápido condicionado por la estructura geológica han favorecido la surgencia de estos manantiales termales.

Algunos documentos históricos del año 1852 describen las aguas minero-medicinales de Betelu como aguas sulfurado sódicas y cloruradas sódicas, bicarbonatadas y nitrogenadas.

La gran enciclopedia de Navarra dice así:

#### *BETELU, manantiales de*

*En las inmediaciones de esta población se localizan los manantiales termominerales conocidos por “Dama Iturri” (22°C), Iturri Santu (25°C) y Urberoa (20°C). Surgen a favor de unas fracturas que afectan a las calizas arrecifales masivas del Cretácico inferior, a las calizas del Jurásico y a los yesos del Keuper (Triás). Dichos materiales en esta zona conforman una estructura de tipo domo, continuación de la estructura diapírica de Albiásu. Sus aguas son duras y de mineralización notable. Presentan un carácter bicarbonatado cálcico y también clorurado sódico. Se explotan industrialmente para aguas de mesa. (Agua\*).*

Diputación Foral de Navarra (1982) clasifica sus aguas como 642-2a-2b. La mayor concentración de cloruros que presenta en relación a otros manantiales vecinos está relacionada con el tránsito de estas aguas a través de un sustrato rocoso salino perteneciente a facies Keuper del Triásico.

En Caja de Ahorros de Navarra (1991) se describen las tres fuentes de agua que manan en la localidad de Betelu y que se resumen de la siguiente forma: a) Aguas del manantial Iturri-Santu, sulfurado-sódicas, nitrogenadas, con temperatura de surgencia variable entre 16-24°C b) Aguas del manantial Dama Iturri de tipo clorurado-sódicas bicarbonatadas, con temperatura constante de 21°C, c) aguas del manantial Carmelo, clorurado-sódicas, magnésicas, litínicas y sulfatado-sódicas y cálcicas. Cebrián (1923) describe en este documento histórico las propiedades de cada uno de los tres manantiales descritos

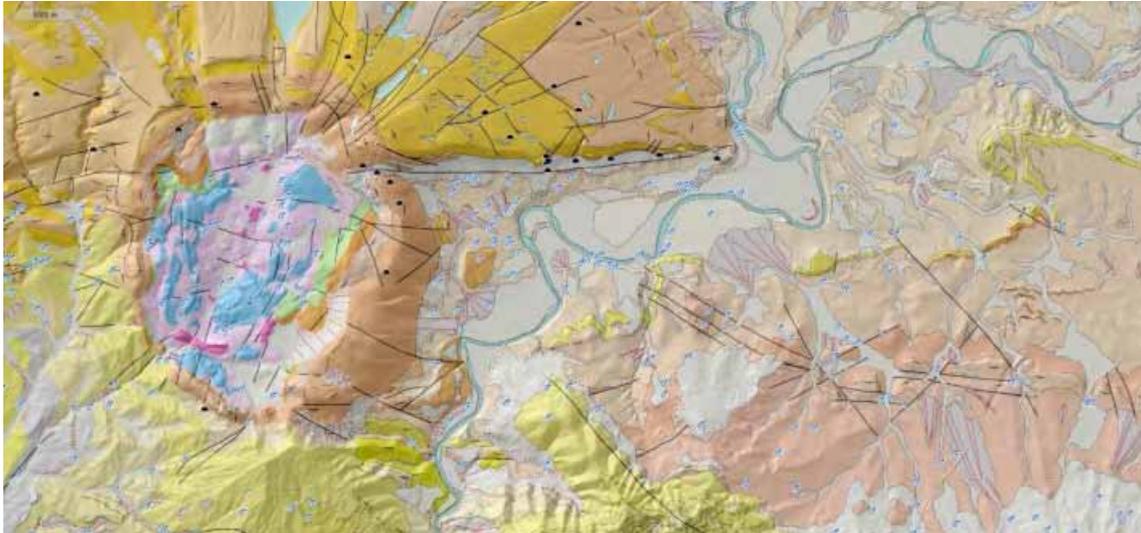
#### 4.6.3 SURGENCIAS TERMALES DE IBERO – ETXAURI – BELASCOAIN

El sistema hidrotermal Ibero-Etxauri-Belascoain se incluye en la Unidad Hidrogeológica de Urbasa-Andía, subunidad de Andía, extremo oriental y límite con el Dominio de la Cuenca de Pamplona.

Como se describe en el apartado 7.2.3, la surgencia del sistema de manantiales termales de este complejo hidrotermal está condicionado por la presencia de una estructura diapírica tipo domo cuya intrusión genera un conjunto de fallas radiales entre las que destacan la falla de Etxauri. La descarga de las aguas subterráneas de los acuíferos calizos de la época Paleoceno y Eoceno tiene lugar a lo largo del contacto entre dos fallas, la falla de Etxauri de dirección E-O y la falla de Belascoain-Etxauri-Ibero, no visible en superficie y de orientación NE-SO. Los manantiales afloran así sobre las margas eocenas más impermeables en el contacto mecánico con el acuífero confinado carbonatado.

De acuerdo con la memoria de la hoja 141-I del mapa geológico 1:25.000 del Gobierno de Navarra, el acuífero confinado Ibero-Etxauri está compartimentado en bloques de

permeabilidad baja delimitados por zonas muy tectonizadas a partir de las cuales se establece un flujo preferente de agua, con direcciones NO-SE y N-S.



Fuente: visor online IDENA (Gobierno de Navarra). Extracto geológico sector Etxauri.

La gran enciclopedia de Navarra dice así:

#### *BELASCOÁIN, BAÑOS DE*

*Balneario en la Val de Echaui, Merindad de Pamplona. Figura en los Nomenclátors de Población de 1860 (una casa habitada de dos pisos), 1887 (6 habitantes), 1910 (9), 1920 (19), 1930 (12) y 1940 (8). En el Nomenclátor de 1887, dentro de Belascoáin, se le menciona como Arrabal del Agua Caliente. (Agua\*).*

*El manantial termomineral (26°C) drena el acuífero confinado de Ibero-Echaui y surge en las margas del Eoceno, a través de una falla posiblemente originada por el diapiro de Salinas de Oro. Dicho accidente afecta también a las dolomías y calizas del Paleoceno-Eoceno, que constituyen el acuífero mencionado. Son aguas bicarbonatadas-cloruradas-sódico-cálcicas.*

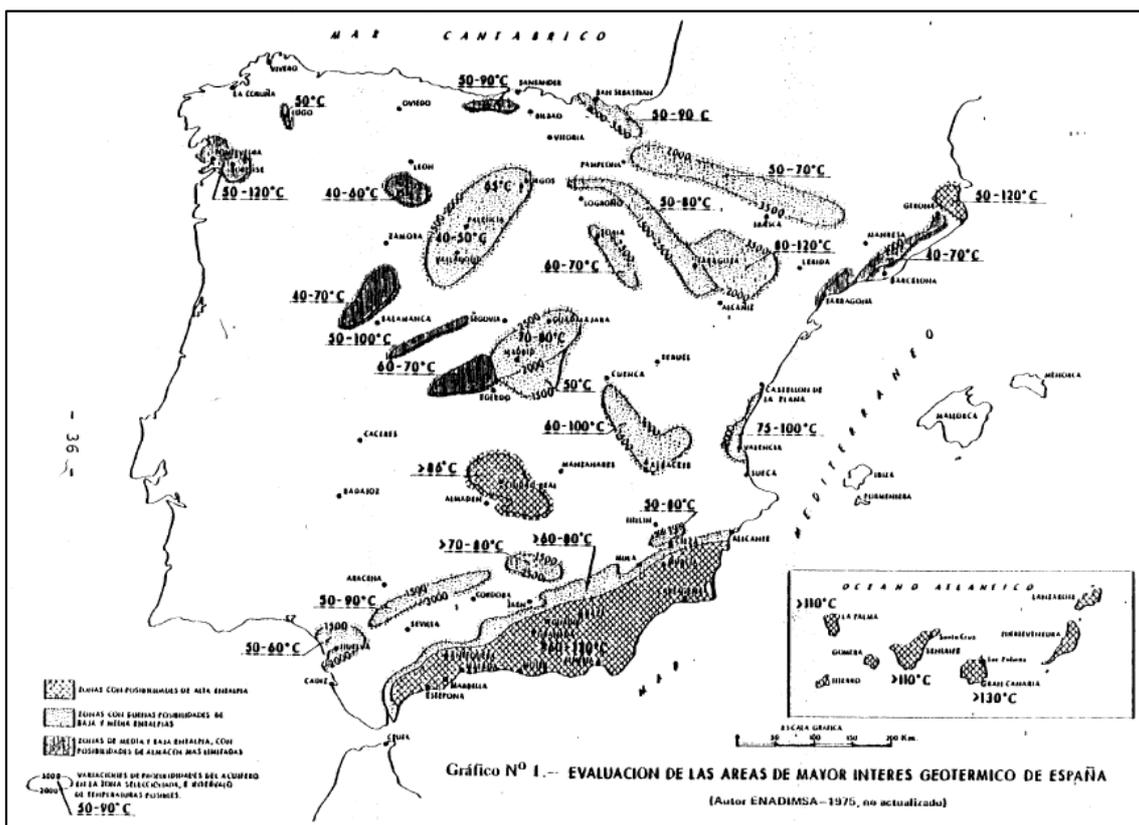
*El manantial y el pueblo se comunican por medio de un puente de piedra, construido en el siglo XVIII y situado sobre la carretera que une el pueblo de Belascoáin con la carretera provincial que va de Echaui a Puente la Reina. Atraviesa el río Arga, ya en su zona media.*

*Tiene una longitud de 80 m y una anchura total de 4 m. Consta de 5 arcos de 12 m de luz y de forma de medio punto, con tajamares triangulares a ambos lados. Al pertenecer en la actualidad a la red provincial de carreteras, conserva el tráfico de vehículos por su calzada.*

Diputación Foral de Navarra (1982) clasifica las aguas del manantial de Uberba (Ibero) como 642-1aa-2b. Están fuertemente mineralizadas, son duras o extremadamente duras y de carácter clorurado sódico-cálcico. Las aguas de Etxauri se clasifican de forma idéntica, son de mineralización notable, duras, y con importante componente clorurado-sódico. En el caso de las aguas de Belascoain, se clasifican como 642-1ab-2b, tienen mineralización notable a fuerte, son duras y de carácter clorurado-bicarbonatado sódico-cálcico. La tendencia de creciente mineralización Etxauri-Belascoain-Ibero significaría mayor contacto con el diapiro de Salinas de Oro o una creciente mezcla con aguas salinas.

#### 4.7 PRINCIPALES ZONAS DE INTERÉS GEOTÉRMICO

El Ministerio de Industria y Energía (1980) incluye el siguiente mapa de ubicación de las principales áreas de interés geotérmico:



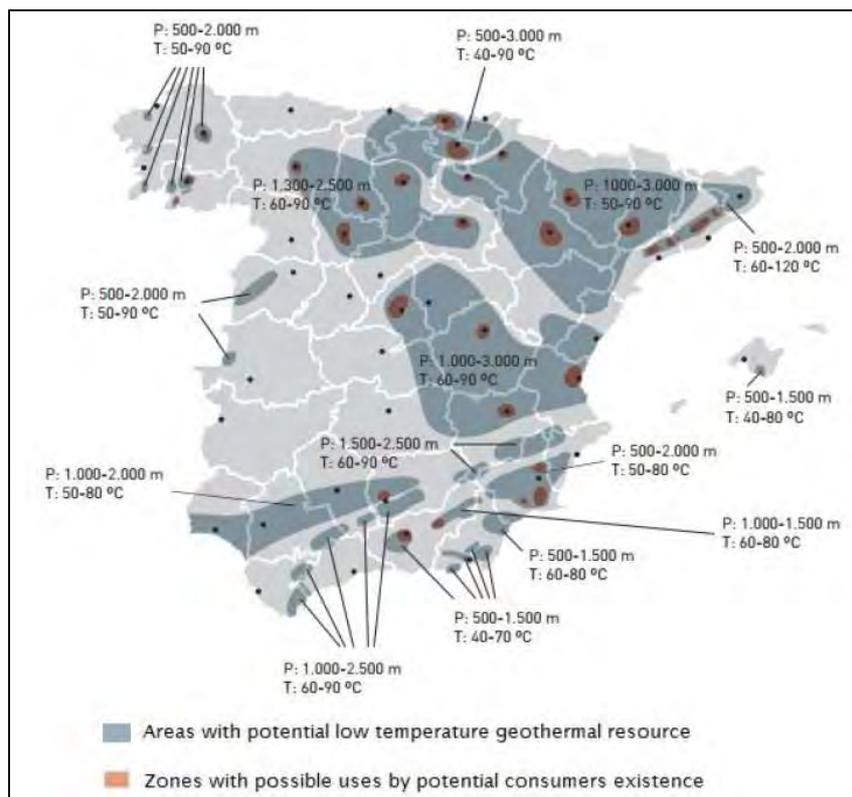
Fuente: Ministerio de Industria y Energía (1980). Evaluación de áreas de mayor interés geotérmico. En círculo, regiones con rango estimado de posibles temperaturas y profundidad a la que se encuentra. El autor del mapa es ENADIMSA (1975).

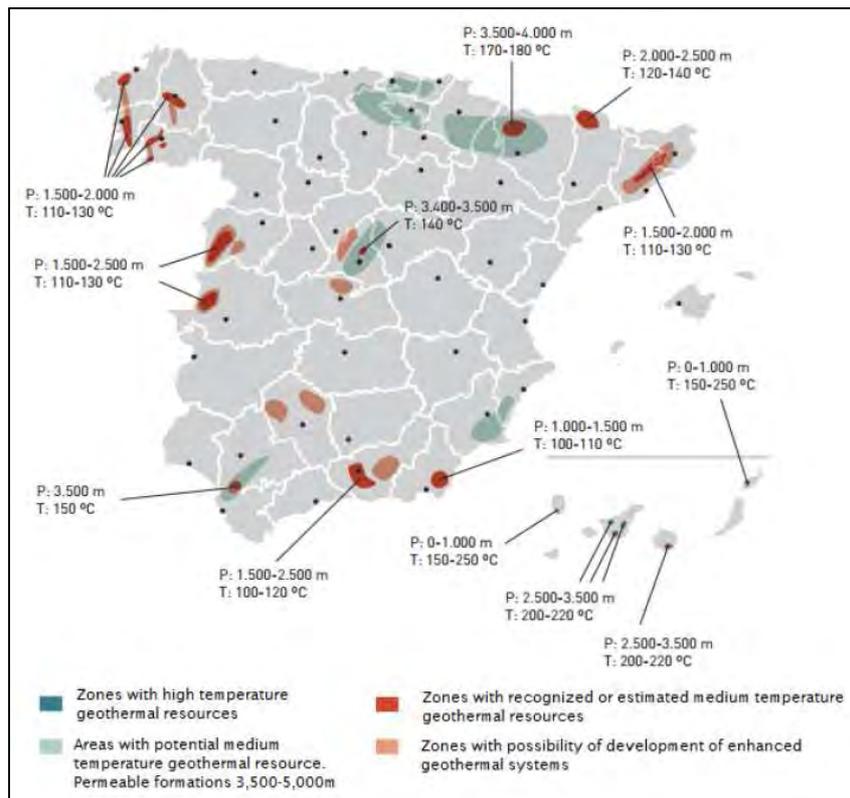
En este trabajo se citan los siguientes puntos de interés y de ámbito regional:

*El borde meridional de la fosa del Ebro, -falla Camerana-, así como la alineación de las fallas de Alhama de Aragón-Soria, la fosa de Teruel, Castellón, el área valenciana y sobretudo Albacete, parecen las zonas más propicias para localizar yacimientos geotérmicos de baja entalpía. Los almacenes estarían entre 2.000 y 3.000 m con temperaturas del agua de 60°C a 100°C.*

*En general, los bordes de la Depresión del Ebro son los más adecuados para localizar almacenes mesozoicos con aguas a 80°C. En la zona limitada por las capitales de Huesca, Zaragoza y Lérida y el río Ebro, podrían existir almacenes del Muschelkalk con agua a 80-120°C a 2.000-3.000 m.*

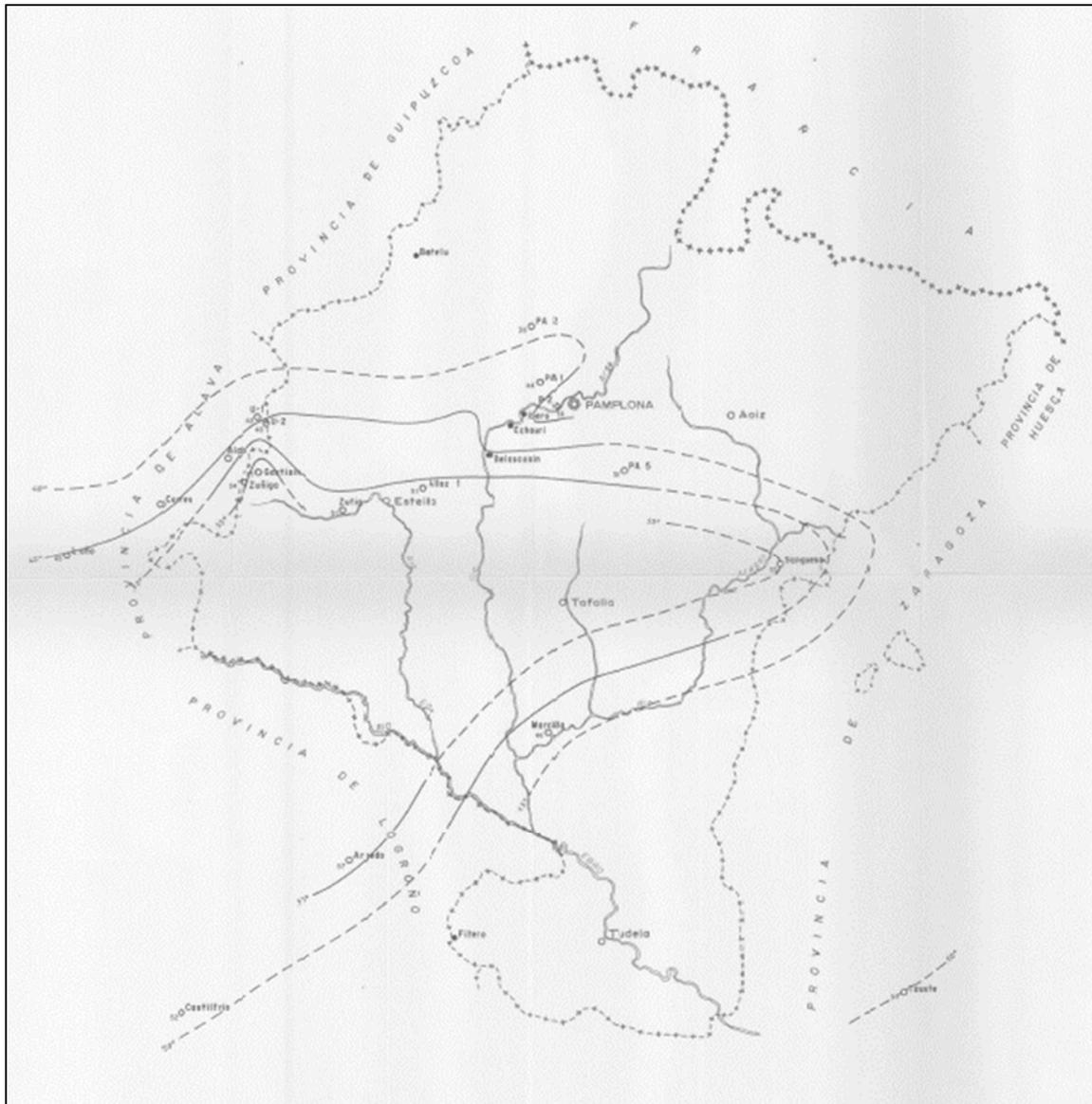
Arrizabalaga et al (2015) realizan una revisión del sector geotérmico español e incluyen los siguientes mapas de recursos geotérmicos de baja, media y alta temperatura. Se incluyen los siguientes mapas (fuente original Tecnología y Recursos de la Tierra, 2011).





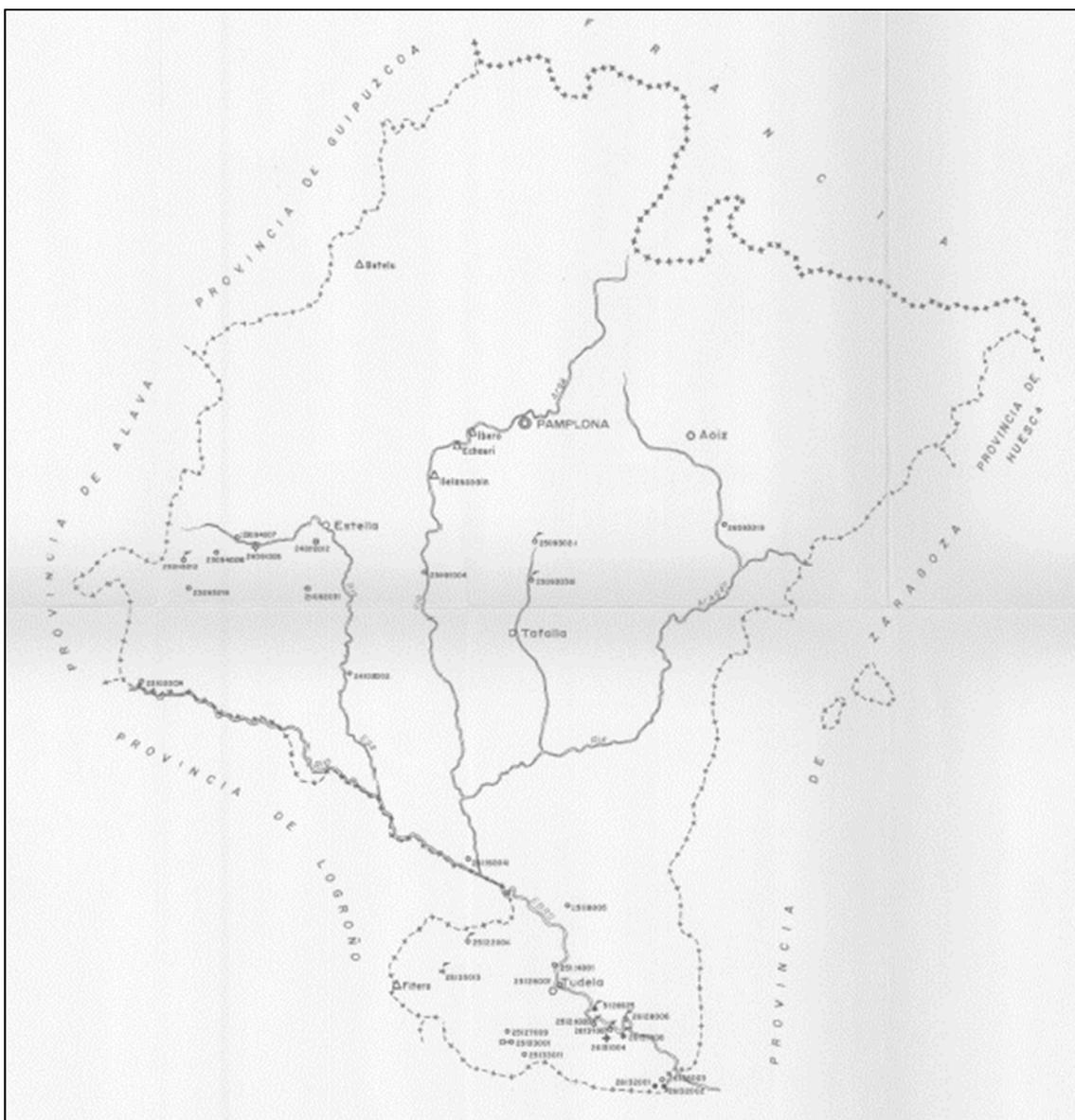
Fuente: Arrizabalaga et al (2015). Mapa 1 recursos de baja energía. Mapa 2, media y alta energía.

Otra fuente de información de gran importancia es el **“Proyecto Hidrogeológico de Navarra. Informe Técnico nº 19. Estudio geotérmico preliminar”** encargado por la Diputación Foral de Navarra a la Compañía General de Sondeos, S.A. en 1977. Por su gran interés, las principales conclusiones de este estudio se incluyen en el apartado 10 Conclusiones del presente estudio. Se incluye una figura donde se representa el mapa de isogeotermas de Navarra a 1000 metros de profundidad.



Fuente: Diputación Foral de Navarra (1977).

Los **gradientes geotérmicos** medidos a partir de los datos de 18 sondeos petrolíferos profundos, oscilan entre **mínimos de 2,5°C / 100 metros y máximos de 4,4°C / 100 metros**. Los valores máximos se distribuyen en dos zonas coincidentes con los sectores donde se han definido las anomalías térmicas (mapa siguiente). La distribución de isogradientes y flujos caloríficos permite observar dos valores máximos, uno en el sector central navarro con dirección E-O, y otro en la Ribera, en el sector próximo a la Cordillera Ibérica y con una dirección paralela a dicha unidad morfoestructural.



Fuente: Diputación Foral de Navarra (1977). Mapa de anomalías de SiO<sub>2</sub>.

El uso de los análisis de sílice (SiO<sub>2</sub>) de todas las aguas muestreadas han permitido obtener dos zonas con anomalías térmicas bien definidas: la primera en el sector central de Navarra a lo largo de un eje de dirección Este-Oeste, y la segunda en la Ribera en una banda paralela al eje del Ebro (ONO-ESE).

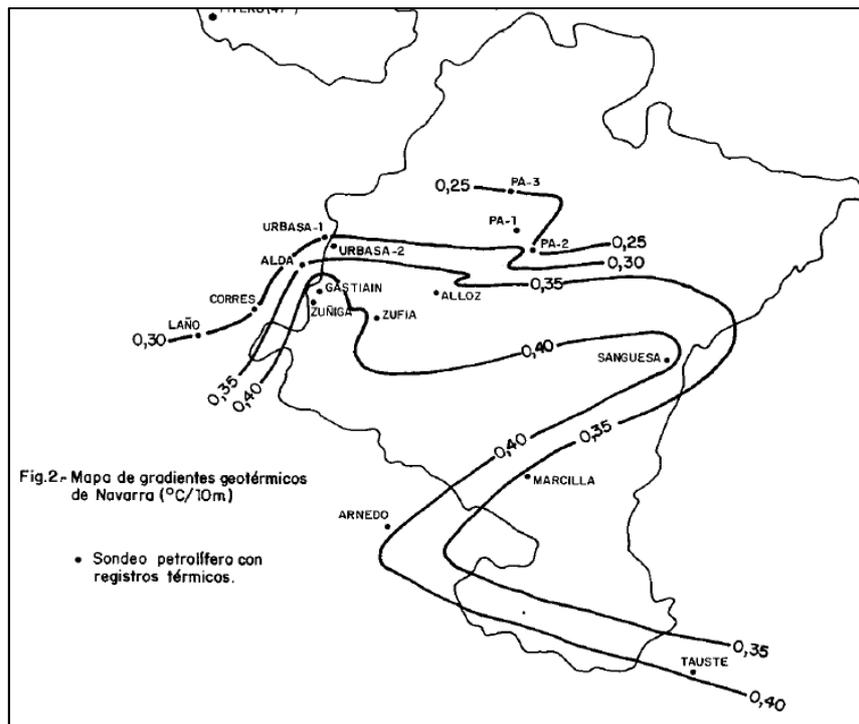
Las anomalías de sílice (SiO<sub>2</sub>) en las aguas de los aluviales del Ebro en el sector de la Ribera hacen sospechar la existencia de un flujo de agua termal ascendente que se mezcla con las aguas frías de los acuíferos locales (el propio aluvial del Ebro). El modelo hidráulico del terreno con el valle del Ebro en la posición topográficamente más deprimida y actuando como

efluente, favorece la ascensión de las aguas termales. La existencia de fracturas de zócalo al pie de la Ibérica sustenta el modelo hidrogeológico establecido para el circuito termal.

En tercer lugar, el documento “**Estudio geotérmico preliminar de Navarra**” **Albert (1979)** constituye un paso más al documento anterior, aportando cierta información adicional y cuyas conclusiones también se resumen de forma sintética en el apartado 10 Conclusiones de este trabajo. Como en el caso anterior, se incluyen algunos mapas e información adicional representativa.

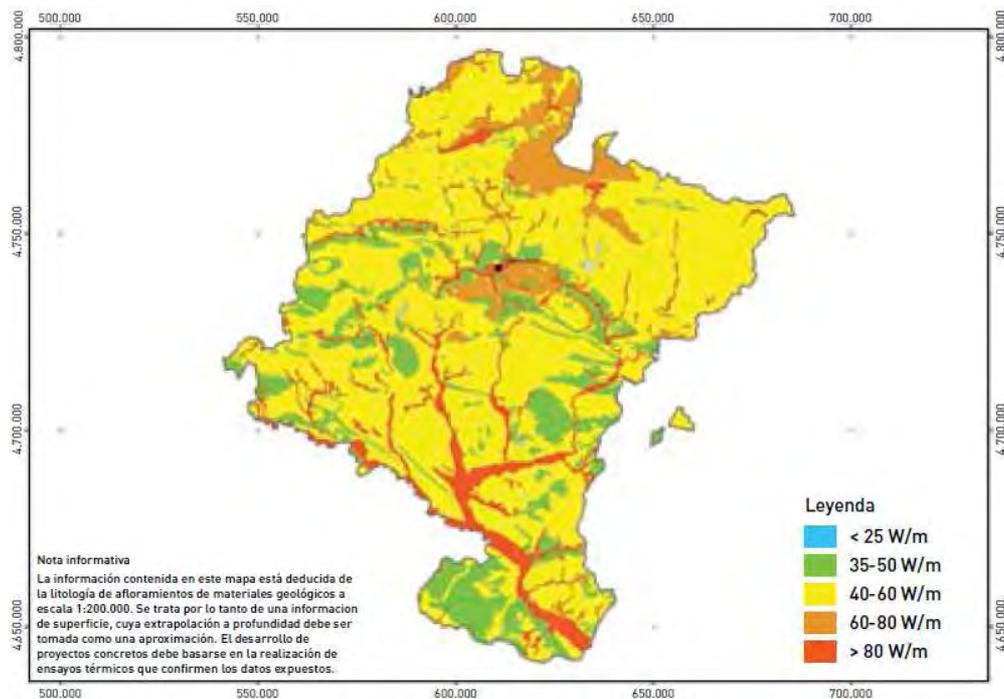
	SONDEO	COTA (m)	GRADIENTE GEOT. MEDIDO (°C/10 m)	GRADIENTE GEOT. CORREGIDO (°C/10 m)	FLUJO CALORÍF. (mWm <sup>-2</sup> )	T <sub>a</sub> a 1000 m	T <sub>a</sub> a 1000 m BAJO EL NIVEL DE MAR.
<b>NAVARRA</b>							
	Pamplona-1	427	0,19	0,31	65	44 <sup>º</sup>	57 <sup>º</sup>
	Pamplona-2	442	0,13	0,25	53	38 <sup>º</sup>	49 <sup>º</sup>
	Pamplona-3	447	0,18	0,25	53	38 <sup>º</sup>	49 <sup>º</sup>
	Pamplona Sur	487	0,26	0,36	76	49 <sup>º</sup>	66 <sup>º</sup>
	Sangüesa-1	408	0,30	0,42	88	55 <sup>º</sup>	72 <sup>º</sup>
	Alloz-1	510	0,24	0,38	80	51 <sup>º</sup>	70 <sup>º</sup>
	Zuffa-1	493	0,29	0,38	80	51 <sup>º</sup>	70 <sup>º</sup>
	Zúñiga	770	0,29	0,41	86	54 <sup>º</sup>	85 <sup>º</sup>
	Gastiaín-1	794	0,33	0,44	92	57 <sup>º</sup>	92 <sup>º</sup>
	Urbasa-2	972	0,28	0,33	69	46 <sup>º</sup>	78 <sup>º</sup>
	Marcilla-1	294	0,22	0,33	69	46 <sup>º</sup>	56 <sup>º</sup>
<b>ALAVA</b>							
	Urbasa-1	969	0,23	0,30	63	43 <sup>º</sup>	72 <sup>º</sup>
	Alda-1	841	0,24	0,33	69	46 <sup>º</sup>	74 <sup>º</sup>
	Corres-1	696	0,20	0,29	61	42 <sup>º</sup>	62 <sup>º</sup>
	Laño-1	717	0,25	0,32	67	45 <sup>º</sup>	68 <sup>º</sup>
<b>LOGROÑO</b>							
	Arnedo-1	580	0,27	0,44	92	57 <sup>º</sup>	82 <sup>º</sup>

Fuente: **Albert (1979)**. Tabla 1 – Datos térmicos de los sondeos petrolíferos de Navarra.

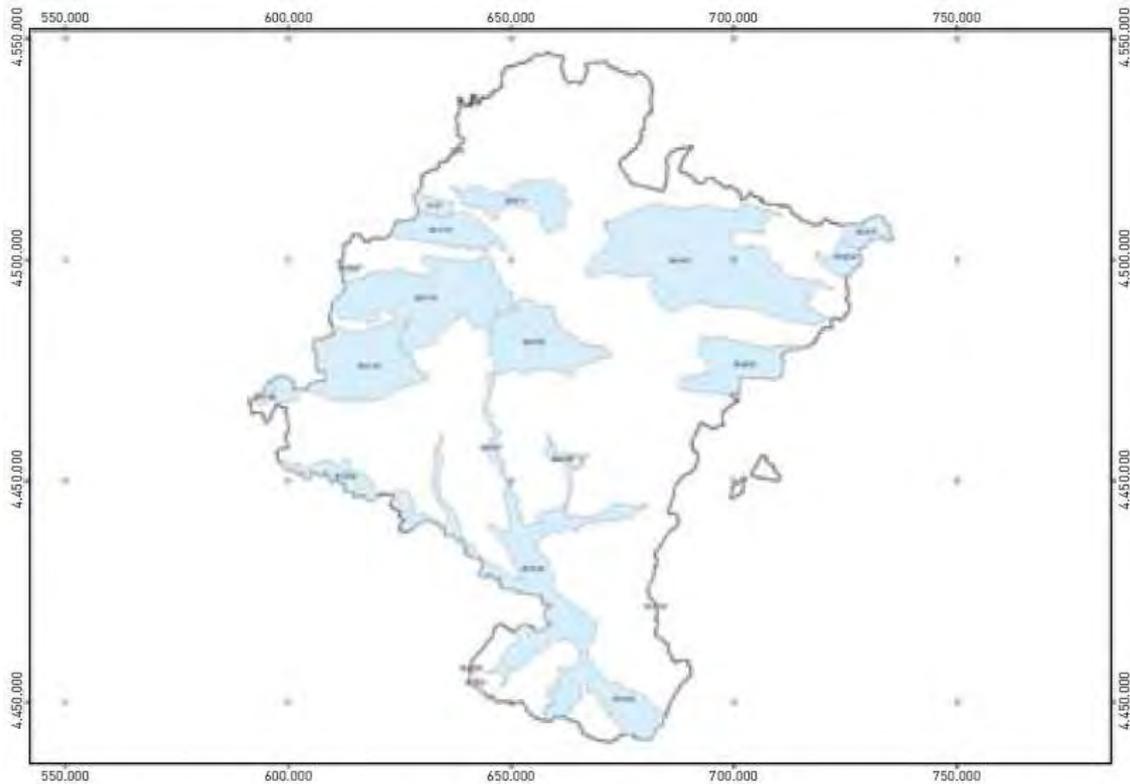


Fuente: **Albert (1979)**. Mapa de gradientes geotérmicos de Navarra.

En la obra **Tecnologías y Recursos de la Tierra (2011)** se recoge un mapa sintético de la potencia térmica superficial de la Comunidad Foral de Navarra:



Estos mismos autores incluyen un mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor. Este mapa es muy similar al representado en el apartado 7.2 donde se ubican los principales acuíferos de Navarra (Proyecto Hidrogeológico de Navarra).



En el trabajo **ENADIMSA (1985)** se resume la investigación geotérmica en el área de Jaca y sondeos recientes y cita expresamente: *“El sondeo Aoiz tiene un alto gradiente geotérmico y buenas características en sus parámetros de formación, que hacen sea interesante un estudio detallado sobre el mismo, dada la cercanía de la ciudad de Pamplona.”* Este sondeo está ubicado a 8Km al noroeste de dicha localidad, su profundidad alcanzó los 4.573 metros y sus coordenadas geográficas son: Longitud: 1º 24' 47,12" Oeste y Latitud 42º 50' 45,48". El objetivo principal fue el autóctono profundo, en el que el techo está formado por materiales eocenos cabalgados por la unidad del Mesozoico-Eoceno.

En la descripción que estos autores ofrecen para las diferentes formaciones geotérmicas de interés como recursos de baja temperatura en la Cuenca del Ebro, citan textualmente: *“Los estudios de viabilidad técnico-económica han puesto en evidencia posibilidades de aprovechamiento de los recursos de baja entalpía en los entornos urbanos de Zaragoza, Lleida, Huesca y Jaca, pudiendo incluirse también Pamplona y Logroño”.* (**Tecnologías y Recursos de la Tierra, 2011**).

IGME (1984, código 00885 “síntesis almacenes muy baja entalpía”) mencionan los acuíferos granulares de los aluviales de los ríos, que por su proximidad a núcleos urbanos podrían ser explotables energéticamente mediante bomba de calor.

Asimismo, citan que, en el área occidental del Prepirineo, abarcando a las provincias de Huesca, Zaragoza y Navarra (principalmente el área de Jaca), donde podrían encontrarse recursos geotérmicos de media energía, aunque a profundidades de 3.500 – 4.500 metros.

Según ITGE 1976, 00226 en el inventario de zonas con posibilidades de entalpía media o baja y con buenos almacenes en zonas amplias figura:

- *“PREPIRINEO, posibilidades de encontrar acuíferos a 50-70°C a profundidades entre 2.000 y 3.000 metros, por ejemplo en el Senonense de Pamplona.”*

Según los mismos autores, en el inventario de zonas con posibilidades de media y baja en áreas más limitadas, figura:

- *CORDILLERA CANTABRICA y VASCO-CANTABRICA, posibilidades localizadas en fallas y estructuras sinclinales profundas, con explotación de Mesozoico a 50-90º C.*
- *BORDE SUR DEL VALLE DEL EBRO, con posibilidades de explotar el Jurásico a 1.500 - 2.000 metros y a 50-80º C.*



## **5 APLICACIONES Y TECNOLOGÍAS GEOTÉRMICAS**

Como se viene diciendo anteriormente, las posibilidades de aprovechamiento térmico y por tanto la variedad de aplicaciones presentes viene delimitada por el recurso geotérmico, es decir, por el rango de temperatura del fluido geotermal. Así pues, se pueden distinguir dos grandes grupos de aplicaciones: la producción de energía eléctrica y la utilización directa del calor.

## 5.1 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

El funcionamiento de las centrales eléctricas geotérmicas es básicamente el mismo que el de cualquier central térmica convencional. La principal diferencia radica en el origen energético. Es importante resaltar que no cualquier tipo de yacimiento es apto para esta práctica si no que únicamente es útil la energía geotérmica proveniente de yacimientos geotérmicos de media y alta temperatura.

Evidentemente, el rendimiento neto de estas instalaciones es directamente proporcional al nivel térmico del recurso.

A continuación, se enumeran las principales centrales geotérmicas para producción de electricidad.

### 5.1.1 PLANTAS DE VAPOR SECO

Se trata de un medio de producción de energía eléctrica en el que se aprovecha de forma directa el vapor en estado de saturación o ligeramente recalentado que se encuentra en los poros de las rocas.

Los componentes principales de este sistema son los siguientes: pozo para la inyección del condensado, colector para retirar sólidos de gran tamaño, centrifugador para separar el condensado y las partículas sólidas de pequeño tamaño, puntos para el drenaje del condensado a lo largo del sistema de tuberías y por último, un filtro para eliminar partículas pequeñas y sólidos disueltos.

Este tipo de centrales tienen costes de producción muy bajos al tratarse de una conversión de energía directa que requiere un sistema simple.

Existe una variante más simple y barata de este sistema en la cual se utiliza un ciclo directo sin condensación. Es decir, el vapor procedente del pozo pasa por la turbina desde donde se libera a la atmósfera en lugar de pasar al condensador para volver a inyectarse al pozo. Esta práctica es obligatoria cuando la proporción de gases no condensables es superior al 50% o cuando el contenido total de gases excede del 10%.

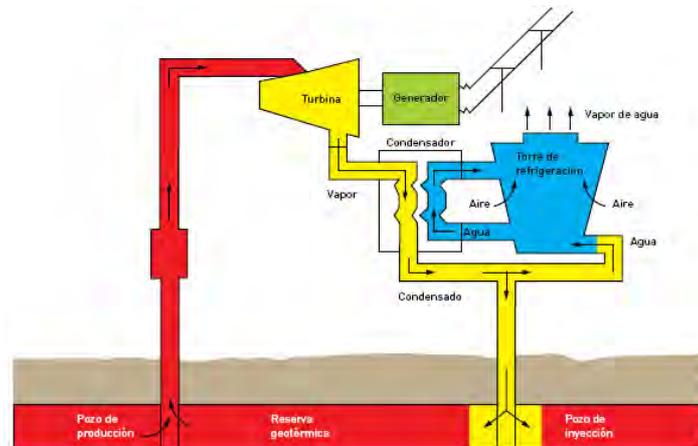


Ilustración 3 Esquema central eléctrica geotérmica de vapor seco.  
Fuente:KAGEL, A. The State of Geothermal Technology. January 2008

### 5.1.2 PLANTAS FLASH

Este segundo tipo de producción de energía eléctrica geotérmica se diferencia del proceso anterior en que el fluido extraído del subsuelo es una mezcla de vapor y salmuera. Esta mezcla vapor-líquido se separa posteriormente en unos separadores desde donde mientras la fracción vapor se conduce a la turbina, la fracción líquida es aprovechada en procesos industriales, agricultura u otras aplicaciones.

El ciclo descrito puede añadir tantas etapas como permita la entalpía del agua separada. En estos casos el vapor separado con una presión sucesivamente menor se dirige bien a la etapa de baja de una turbina multietapa o bien a otra turbina de baja presión.

El aumento de etapas en este proceso conlleva la mejora del rendimiento global del ciclo. Sin embargo, el coste asociado a la producción se ve incrementado también.

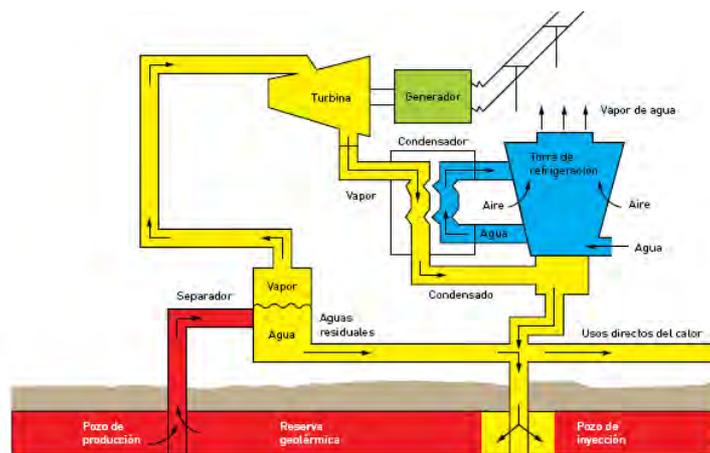


Ilustración 4 Esquema central eléctrica geotérmica de vapor flash 1 etapa  
Fuente:KAGEL, A. The State of Geothermal Technology. January 2008

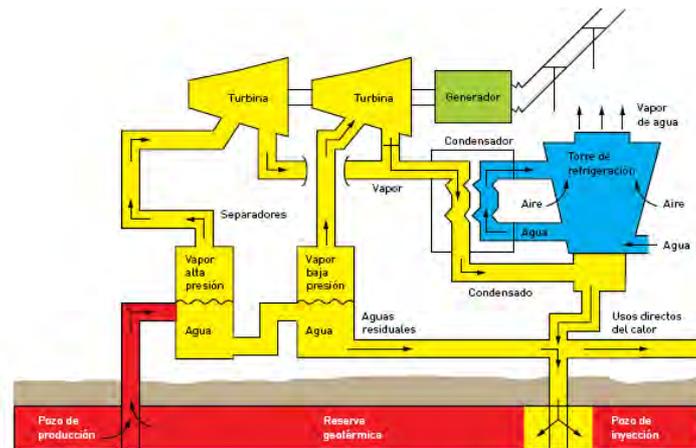


Ilustración 5 Esquema central eléctrica geotérmica de vapor flash 2 etapas  
Fuente:KAGEL, A. The State of Geothermal Technology. January 2008

### 5.1.3 PLANTAS DE CICLO BINARIO

A diferencia de las plantas de vapor seco o las plantas de vapor flash, las plantas de ciclo binario no hacen uso directo del fluido termal. Es decir, utilizan un fluido secundario en ciclo cerrado para realizar el cambio de fase.

De esta manera el fluido termal cede su calor al fluido secundario, calentándolo y vaporizándolo. Este vapor se dirige a la turbina y posteriormente vuelve a fase líquida en un condensador. El líquido resultante se bombea de nuevo al intercambiador donde vuelve a iniciar el ciclo.

Este proceso de producción de energía eléctrica es más eficiente que las plantas flash. Asimismo, provoca un menor impacto ambiental gracias a la reinyección del agua geotermal utilizada tras la finalización del ciclo, lo que además de reducir las emisiones a la atmósfera a 0, permite mantener la presión del almacén constante prolongando su tiempo de duración.

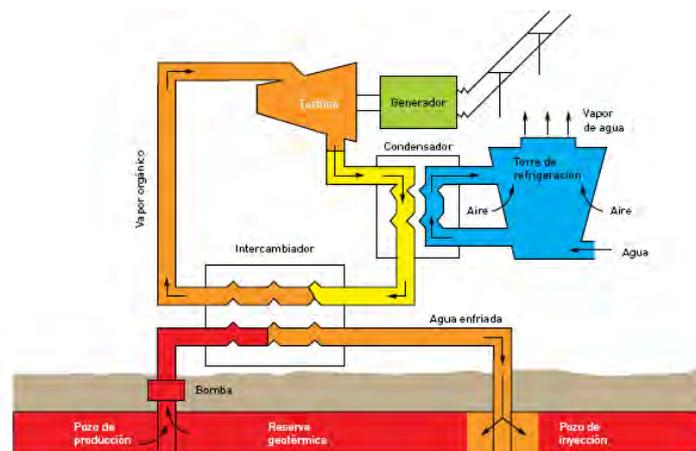


Ilustración 6 Esquema central eléctrica geotérmica de ciclo binario  
Fuente:KAGEL, A. The State of Geothermal Technology. January 2008

#### 5.1.4 PLANTAS DE CICLO COMBINADO

Las plantas de ciclo combinado resultan de la combinación de las plantas de tecnología binaria y flash para aumentar la eficacia en yacimientos con vapor a alta presión.

## 5.2 USO DIRECTO DEL CALOR

El aprovechamiento directo de la energía térmica de yacimientos de media, baja y muy baja temperatura queda reflejada en aplicaciones tan variadas como piscinas climatizadas, calefacción y refrigeración, ACS, actividades agrícolas, procesos industriales entre muchas otras. Este conjunto de aplicaciones se puede dividir en 3 grandes grupos: bombas de calor, almacenamiento subterráneo de energía térmica y un tercer grupo que agrupa aplicaciones no englobables en los dos primeros.

### 5.2.1 BOMBAS DE CALOR

Las bombas de calor utilizadas en geotermia tienen el mismo principio de funcionamiento que las convencionales. De esta forma permiten aprovechar el potencial de los yacimientos de muy baja temperatura para su utilización en sistemas de climatización (calefacción y refrigeración) y en algunos casos incluso en la producción de ACS.

A continuación, se detallan las diferentes configuraciones atendiendo a una primera clasificación en función de si el sistema es abierto o cerrado.

#### *SISTEMAS ABIERTOS*

En los sistemas abiertos el fluido térmico fluye libremente por el terreno. Por ello mismo uno de los requisitos es la permeabilidad del terreno. Esta debe ser lo suficientemente elevada como para disponer de la cantidad necesaria de agua subterránea a poca profundidad. Sin embargo, no sólo la cantidad es importante sino la calidad, es por eso que este sistema requiere que se lleven a cabo controles adicionales de ciertos parámetros como el potencial redox para evitar futuros problemas de precipitación, corrosión y obstrucción.

Para explotar la capa freática o los recursos de acuíferos poco profundos normalmente se realizan dos sondeos perforados, uno para extraer el agua subterránea y otro para reinyectarla.

En general este tipo de sistemas tienen un bajo coste de inversión y elevado rendimiento al ser relativamente simples. El único inconveniente son los trámites burocráticos que hay que llevar a cabo para su consecución.

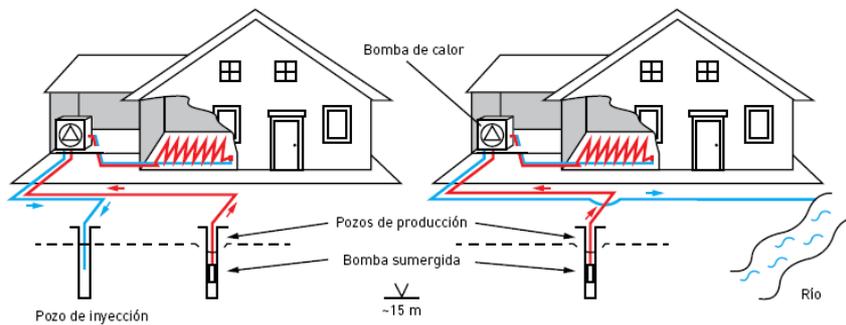


Ilustración 7 Sistema abierto.

Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. 2008

### SISTEMAS CERRADOS

Los sistemas cerrados utilizan intercambiadores que se encuentran enterrados a través de los cuales circula un fluido térmico que realiza la función de cesión y absorción de calor entre el terreno y la bomba de calor en función de si se está realizando un proceso de refrigeración o bien de calefacción. La orientación de los conductos con respecto al terreno lleva a una segunda clasificación de los mismos: sistemas horizontales y sistemas verticales.

#### 5.2.1.1 SISTEMAS HORIZONTALES

En los sistemas horizontales los conductos se disponen a lo largo del mismo plano del terreno. En general son más fáciles de instalar y tienen un coste menor al de los sistemas verticales ya que no es necesario realizar la perforación de sondeos. Sin embargo, están limitados por la superficie disponible. Es importante, además, no cubrir en exceso las tuberías alojadas ya que la radiación solar incidente en el terreno constituye el principal medio de recarga térmica.

##### 5.2.1.1.1 SERIE-PARALELO

En los casos en los que la superficie del terreno es reducida, lo habitual es que para optimizar el aprovechamiento del espacio la densidad de tuberías sea elevada. Para ello se realizan conexiones serie o paralelo como se observa en la figura. En estos casos como la proporción del terreno cubierta con tubos es muy elevada, resulta más conveniente retirar la capa superficial del terreno en su totalidad para después colocar las tuberías y volverlas a cubrir con el material retirado previamente.



Ilustración 8 Sistema cerrado horizontal en disposición serie a) y paralelo b).  
Fuente:MANDS, E; SANNER,B. Shallow Geothermal Energy

#### 5.2.1.1.2 DE UN BUCLE EN ZANJA

En cambio, en lugares dónde el terreno es barato no existe una limitación de espacio. En estos casos al no requerirse una densidad de tuberías repartidas elevada, se opta por un circuito más amplio y enterrado en zanjas de profundidad mínima 0,9m.



Ilustración 9 Sistema cerrado horizontal en disposición bucle único en zanja.  
Fuente:MANDS, E; SANNER,B. Shallow Geothermal Energy

#### 5.2.1.1.3 TIPO BOBINA

Una variante de la configuración anterior y que optimiza las zanjas trata de colocar los conductos con forma de bobina horizontal si se trata de una zanja ancha o bien vertical si es una zanja estrecha.

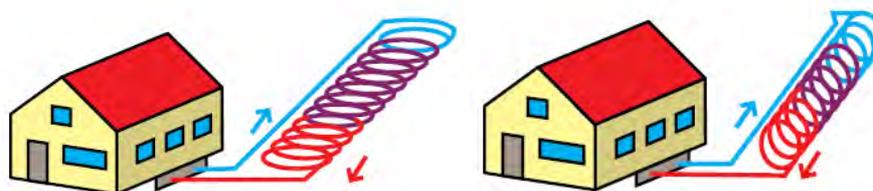


Ilustración 10 Sistemas cerrados horizontales en disposición bobina en zanja.  
Fuente:MANDS, E; SANNER,B. Shallow Geothermal Energy

#### 5.2.1.1.4 COLECTOR EN ZANJA

Por último, otra variante consiste en sujetar varias tuberías de pequeño diámetro a las paredes de la zanja. Estas tuberías confluyen en un colector que está dispuesto de forma vertical en el terreno.

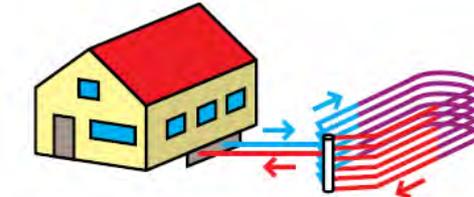


Ilustración 11 Sistema cerrado en disposición colector vertical.  
Fuente:MANDS, E; SANNER,B. Shallow Geothermal Energy

#### 5.2.1.2 SISTEMAS VERTICALES (SONDA GEOTERMICA)

Como ya se ha mencionado con anterioridad, los sistemas verticales requieren la perforación de sondeos con una profundidad que varía en función del caso. A través de dichas perforaciones se alojan las sondas geotérmicas que son los dispositivos de captación térmica. Las fuentes de recarga de la energía térmica recogida por los tubos verticales son la radiación solar para las zonas más cercanas a la superficie, y el flujo de calor geotérmico para las zonas más profundas.

Un factor que afecta positivamente a la capacidad del terreno para transmitir el calor es la presencia de agua a lo largo de él ya que la conductividad térmica se ve aumentada. Por ello, si al realizar el sondeo se determina la ausencia de agua, es recomendable rellenar los alrededores de la sonda con gravas o arenas permeables.

Los tubos captadores alojados en el interior de la sonda se instalan de varias formas posibles como se detalla a continuación.

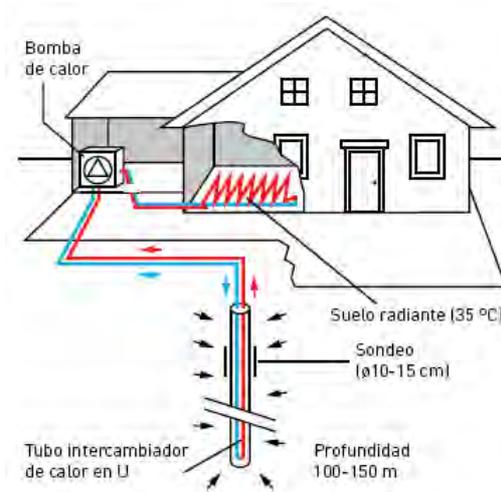


Ilustración 12 Sistema cerrado vertical.

Fuente:LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. 2008

#### 5.2.1.2.1 CON TUBOS EN U

Este sistema se basa en la unión de dos tubos en su base formando un codo de 180° cuyas salidas se conectan al circuito primario de la bomba de calor. Como se puede apreciar en la imagen, en función del diámetro de la perforación, es posible la colocación de más de 1 par de tubos.

La ventaja principal de este tipo de instalación es el bajo coste del material empleado en la conformación de los tubos.

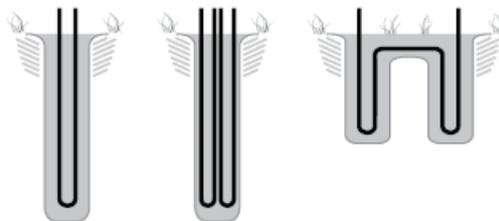


Ilustración 13 Tipos de instalación de tubos captadores verticales en sondas geotérmicas.

Fuente:LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. 2008

#### 5.2.1.2.2 CON TUBOS COAXIALES

Otra opción consiste básicamente en ubicar un tubo concéntrico al otro en lugar de paralelamente como se ha visto en el caso anterior.

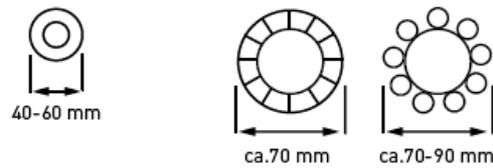


Ilustración 14 Secciones de tubos coaxiales en sistemas verticales.  
Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. 2008

### 5.2.1.2.3 CIMENTACIONES

Este método es una variante de los sistemas verticales cerrados que consiste en aprovechar los pilotes de cimentación como sonda geotérmica. En el interior del pilote se inserta una red de tubos intercambiadores en forma de U por los que se hace circular el fluido térmico, a veces agua con anticongelante. Estas tuberías, como de costumbre se conectan al circuito cerrado de la bomba de calor.

La principal desventaja de este sistema es la prácticamente imposibilidad que tiene la reparación de los tubos captadores una vez instalado y hormigonado el pilote. Es por esta razón que es común prever tubos captadores extra en caso de que algún otro quede inutilizado.

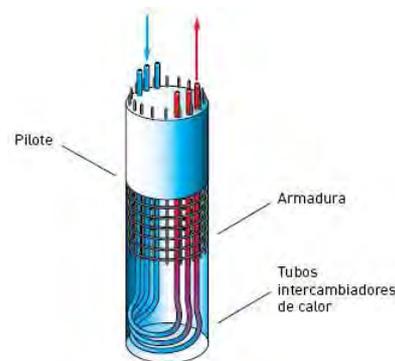


Ilustración 15 Pilote de cimentación como sonda geotérmica.  
Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. 2008

### 5.2.2 OTROS

Existen varios métodos que no pueden clasificarse como abiertos o cerrados como los siguientes:

### 5.2.2.1 POZOS TIPO COLUMNA

El agua se bombea desde el fondo de un pozo y después de abandonar la bomba de calor se filtra a través de la grava que rellena su anillo. Este tipo de sistema requiere perforaciones a gran profundidad que conlleva un alto coste asociado y por lo tanto no resulta adecuado para instalaciones de pequeña envergadura.



Ilustración 16 Pozo tipo columna.  
Fuente:MANDS,E; SANNER,B. Shallow Geothermal Energy

### 5.2.2.2 AGUAS DE MINAS Y TÚNELES

Las obras de tunelación que atraviesan montañas y drenan las aguas subterráneas que se encuentran así como las antiguas explotaciones mineras subterráneas representan dos oportunidades para aprovechar el potencial térmico de sus aguas. Estas aguas se encuentran prácticamente a la misma temperatura todo el año y son de fácil acceso.

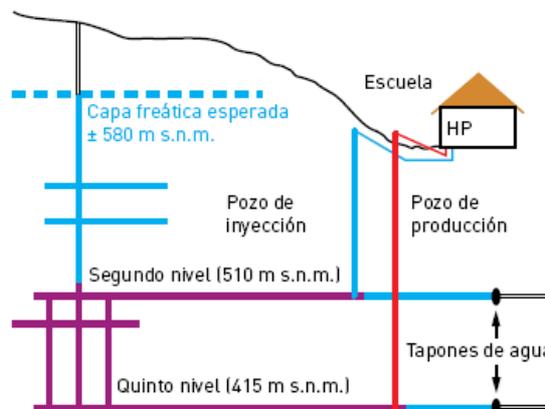


Ilustración 17 Bomba de calor con agua de mina.  
Fuente:MANDS,E; SANNER,B. Geothermal Heat Pumps

### 5.2.2.3 SISTEMA TIERRA-AIRE

También conocidos como pozos canadienses o provenzales utilizan la inercia térmica de la tierra para refrescar el aire que entra en la vivienda en verano, y calentarlo en invierno. De esta forma se consigue la reducción de la carga térmica del aire de ventilación de un edificio.

Esta técnica no requiere excavaciones a grandes profundidades permitiendo hacer uso del subsuelo en prácticamente cualquier lugar no necesitando por lo tanto de una inversión muy elevada. Además, el mantenimiento es reducido y se limita a una simple limpieza de la tubería, cambio del filtro o purgación del depósito de condensado cada cierto tiempo.

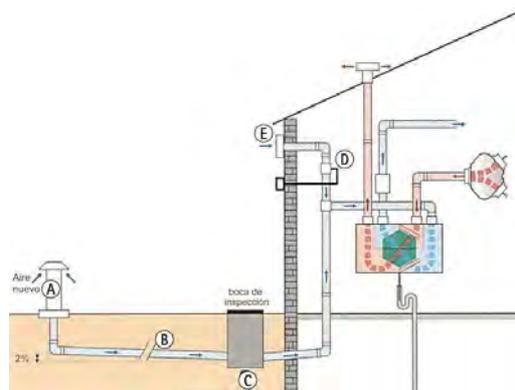


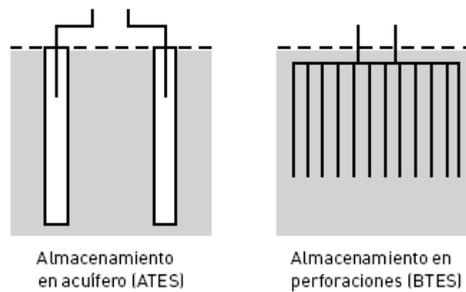
Ilustración 18 Pozo canadiense.

### 5.2.3 ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO DE ENERGÍA TÉRMICA

Es posible asimismo el almacenamiento de frío, calor o ambos de forma subterránea. Estos métodos también se dividen en sistemas abiertos o cerrados.

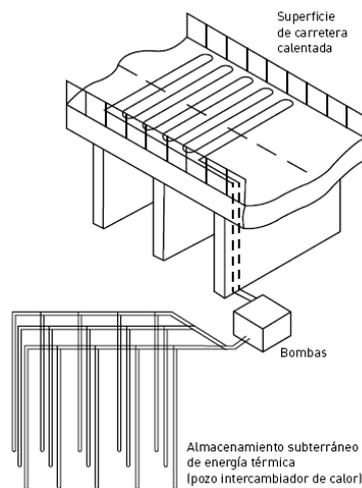
Por un lado, un ejemplo de sistema abierto son los acuíferos. Estas cavidades se caracterizan por su gran porosidad, su media-baja conductividad y transividad hidráulicas y su casi nulo flujo de aguas subterráneas.

Por otro lado, el almacenamiento en perforaciones y tuberías constituye un tipo de sistema cerrado. Este método requiere un terreno con algo de calor específico, conductividad térmica media y ausencia de flujo de agua asimismo.



**Ilustración 19 Almacenamiento subterráneo de calor.**  
Fuente:MANDS,E; SANNER,B. Geothermal Heat Pumps

Un ejemplo práctico de esta aplicación es el almacenamiento del calor procedente de la radiación solar en la superficie de las calles sobre todo en meses estivales y su posterior utilización en invierno para derretir el hielo y la nieve acumulados siguiendo el esquema mostrado en la siguiente imagen.



**Ilustración 20 Sistema de deshielo de carreteras.**  
Fuente:MANDS,E; SANNER,B. Geothermal Heat Pumps

#### 5.2.4 YACIMIENTOS PROFUNDOS

Ocasionalmente el potencial geotérmico de baja entalpía se encuentra a grandes profundidades (2.000m) por lo que su acceso es mediante perforación.

Tras la realización del sondeo se obtiene un flujo de agua que se sube a la superficie a través de bombeo. Haciendo circular dicho flujo por un intercambiador de calor se consigue ceder el calor a otro fluido que forma parte de un circuito cerrado secundario correspondiente a la red de distribución. El fluido geotérmico después de ceder su calor se reinyecta en el yacimiento para evitar el deterioro ambiental.

El agua extraída de estos pozos al circular caliente a través de la roca, adquiere un gran contenido en sal disuelta. Por ello, con el fin de evitar problemas de corrosión, precipitación y obstrucción de tuberías han de eliminarse los minerales disueltos.

Otro aspecto clave a tener en cuenta es que los sondeos de extracción e inyección en superficie pueden encontrarse a poca distancia entre si, en cambio, a medida que van ganando profundidad, la distancia entre ellos debe aumentar también. La principal razón es que el avance del frente frío producido por la inyección del fluido alcance al punto de extracción.

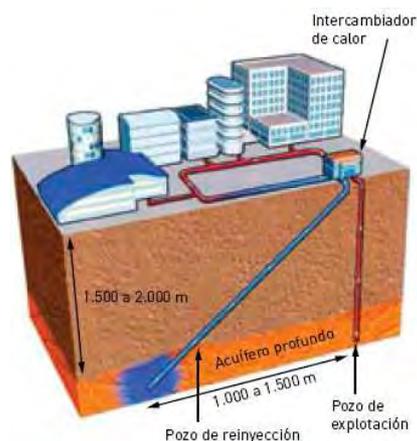


Ilustración 21 Sistema explotación de yacimientos profundos.

Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. 2008

## 5.2.5 OTROS USOS

### 5.2.5.1 USO INDUSTRIAL

Existen numerosos procesos, independientemente del tipo de industria del que se trate que requieren grandes necesidades de aporte de calor. Ejemplo de ello son los procesos de evaporación, secado, esterilización, destilación, lavado, descongelamiento, extracción de sales, pasteurización de leche, extracción de productos químicos, recuperación de productos petrolíferos, extracción de CO<sub>2</sub>, entre muchos otros.

### 5.2.5.2 USO AGRÍCOLA

En el terreno de la agricultura la geotermia se puede emplear tanto para aplicaciones en campo abierto como en invernaderos.

En lo que respecta la utilización de la geotermia en campo abierto es muy común la combinación de calefacción del suelo con el regadío. El control de la temperatura en regadío resulta crucial ya que tiene una gran influencia en la composición química del agua. De esta

forma se consigue prevenir posibles daños causados por el descenso de la temperatura ambiente, prolongar la temporada de cultivo a la par que aumentar el crecimiento de las plantas, aumentar la producción y esterilizar el suelo.

No obstante, la aplicación más extendida de la geotermia en agricultura se encuentra en los invernaderos. La climatización de los invernaderos permite obtener las condiciones óptimas de crecimiento de vegetales y flores fuera de su temporada natural. Los métodos para climatizar los invernaderos son variados y algunos de ellos se representan en la imagen siguiente.

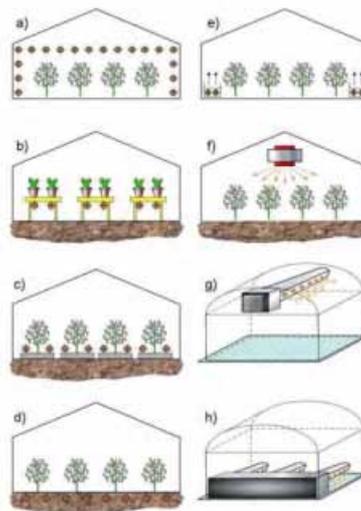


Ilustración 22 Climatización de invernaderos.

Fuente: Mary H. Dickson y Mario Fanelli. ¿Qué es la energía geotérmica?

### 5.2.5.3 SECADO DE ALIMENTOS Y MADERA

El secado de alimentos permite un tiempo más prolongado de conservación de los mismos a la vez que la manipulación de alimentos frescos requiere un mayor coste en transporte y manipulación. Es por esta razón que la industria del secado de alimentos se ha ido extendiendo con el tiempo.

Habitualmente el secado de alimentos se realiza en autoclaves con convección de aire caliente. Este aire caliente obtiene su energía al realizar el intercambio de calor a través de un intercambiador de placas con el agua procedente del subsuelo.

Pero no se emplea el secado únicamente en la industria alimentaria sino que esta práctica se extiende también en el fraguado de piezas de hormigón y en el secado de madera.

Los procesos de secado artificiales requieren grandes cantidades de aire caliente por lo que el coste del suministro energético a través de medios convencionales es elevado. Por ello, la utilización del calor geotérmico puede producir un abaratamiento de los mismos.

#### *5.2.5.4 USO EN ACUICULTURA Y CRIANZA DE ANIMALES*

Así como se utiliza el calor geotérmico para el cultivo de plantas, también se utiliza para climatizar el agua en piscifactorías. Las especies acuáticas son mucho más sensibles a la temperatura que el resto de especies terrestres.

Normalmente el agua procedente del subsuelo no puede ser empleada directamente en la cría de las especies acuáticas y por ello es necesario realizar previamente el intercambio de calor a un circuito secundario que constituye el agua de las piscifactorías.



## 6 SITUACIÓN ACTUAL DE LA GEOTÉRMIA

## 6.1 GEOTERMIA EN EL MUNDO

El actual sistema energético a nivel mundial está basado en la generación de energía a partir de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón vegetal y mineral, y el gas. La generación de energía a partir de estas materias está siendo ampliamente replanteada por varias razones: son recursos limitados que se encuentran en puntos concretos del planeta, su uso a gran escala está provocando graves efectos sobre el medio ambiente y la salud de los seres humanos, y se están agotando las reservas naturales comprometiendo el futuro de las nuevas generaciones.

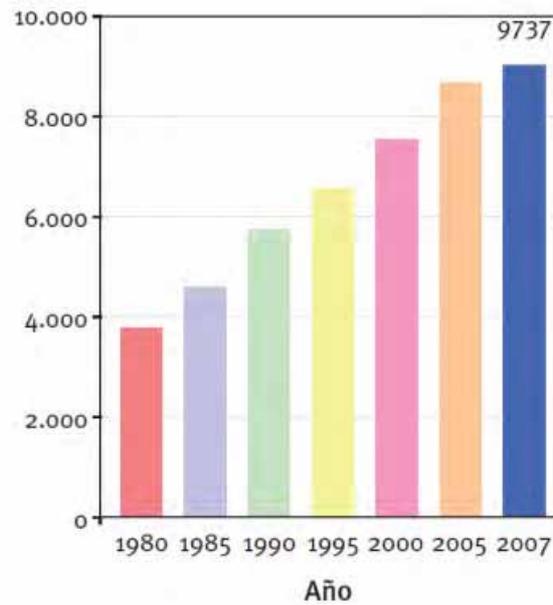
A diferencia de otras fuentes de energía renovables, la geotérmica no tiene su origen en la radiación solar sino en la diferencia de altas temperaturas que existen en el interior de la Tierra y que van desde los 15°C de la superficie a los 4.000°C que rigen en el núcleo.

En la siguiente tabla se indica el potencial geotérmico estimado de cada continente distinguiendo entre recursos de alta y baja temperatura, según datos de la Internacional Geothermal Association (2001).

	Recursos de alta T <sup>2</sup> para generación de electricidad (Ktep/año de electricidad)		Recursos de baja T <sup>2</sup> para uso directo (Mtep/año de calor)
	Tecnología convencional	Tecnología convencional y binaria	
Europa	1.574	3.182	>8.800
Asia	2.554	5.074	>7.600
África	1.049	2.064	>5.700
América del Norte	1.144	2.322	>2.800
América del Sur	2.408	4.816	>5.700
Oceanía	993	1.806	>2.600
<b>Potencial mundial</b>	<b>9.632</b>	<b>19.264</b>	<b>&gt;33.200</b>

Tabla 1 Potencial geotérmico mundial por continentes.  
Fuente: International Geothermal Association 2001

En la siguiente tabla se presenta la evolución, desde el año 1980, de la potencia mundial instalada de origen geotérmico para producción de electricidad y el incremento evolutivo a lo largo de estos años. Se puede observar que, durante el periodo 2005-2007, la potencia ha aumentado alrededor de 820 MW, siguiendo un incremento lineal de aproximadamente entre 200 y 250 MWe por año.



Gráfica 1 Potencia mundial instalada de energía geotérmica (MW).

País	1995 (MW)	2000 (MW)	2005 (MW)	2007 (MW)
Estados Unidos	2.817	2.228	2.544	2.687
Filipinas	1.227	1.909	1.931	1.969
Indonesia	310	590	797	992
México	753	755	953	953
Italia	632	785	790	810
Japón	414	547	535	535
Nueva Zelanda	286	437	435	472
Islandia	50	170	322	421
Resto de países	344	553	757	898
<b>Total</b>	<b>6.855</b>	<b>7.974</b>	<b>9.064</b>	<b>9.737</b>

Tabla 2 Potencia eléctrica geotérmica instalada a nivel mundial desde 1995 a 2007: Principales productores.  
Fuente: International Geothermal Association 2001, Euroserv'Er Septiembre 2007

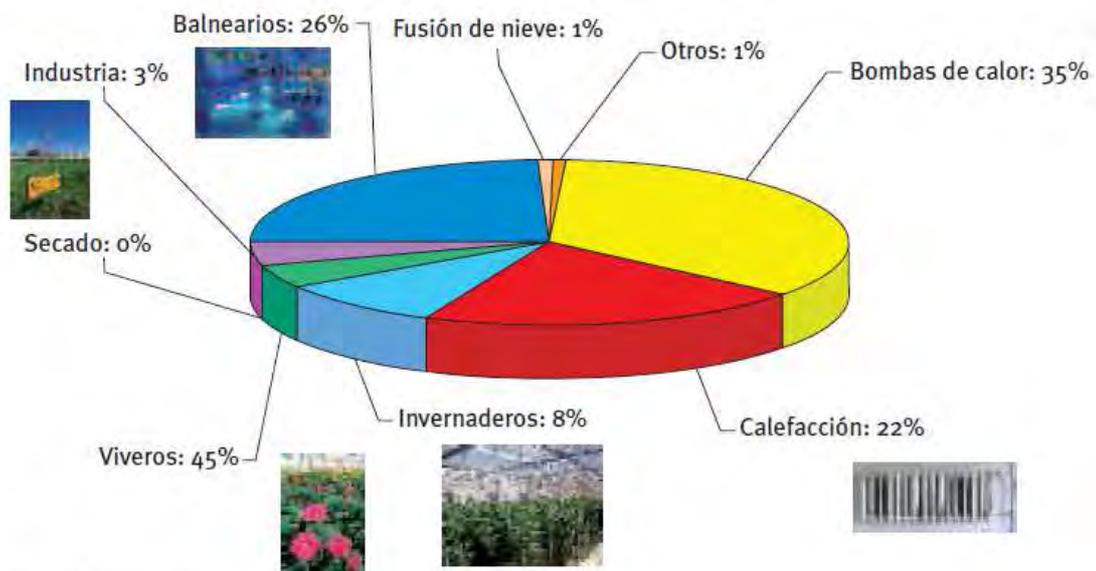
En cuanto a los usos no eléctricos, la contribución de la geotermia de baja temperatura es más difícil de cuantificar por la gran diversidad de aplicaciones y por ser de menor entidad. El incremento experimentado ha sido superior que el de alta temperatura, pasando de 8.664 MWt en 1995 a una capacidad instalada de 15.145 MWt, que corresponde a 199.699 TJ/años de energía utilizada en el mundo durante el año 2000, lo que representa un incremento del 74,8%. El número de países que utiliza en forma directa la energía geotérmica se incrementa desde entonces, como también la capacidad total instalada y la energía utilizada.

País	Potencia térmica instalada (MWt)	Energía (TJ/año)	Potencia térmica instalada (MWt)	Energía (TJ/año)
	1995		2000	
USA	1.874,00	13.890,00	3.766,00	20.302,00
China	1.915,00	16.981,00	2.282,00	37.908,00
Islandia	1.443,00	21.158,00	1.469,00	20.170,00
Japón	319,00	6.942,00	1.167,00	26.933,00
Turquía	140,00	1.987,00	820,00	15.756,00
Suiza	110,00	3.470,00	547,30	2.386,00
Hungría	340,00	5.861,00	427,70	4.086,00
Alemania	32,00	303,00	397,00	1.568,00
Resto países	2.431,00	41.849,00	4.269,00	61.590,00
<b>Total</b>	<b>8.604</b>	<b>112.441</b>	<b>15.145</b>	<b>190.699</b>

Tabla 3 Principales productores a nivel mundial de energía geotérmica para aplicaciones directas años 1995-2001  
Fuente: International Geothermal Association

Como se puede observar en la gráfica, Estados Unidos también tiene el liderazgo mundial en la utilización de los recursos geotérmicos de baja temperatura seguido de China, Islandia, Japón y Turquía; estos países representan el 63,5% del total.

El uso térmico más común en el mundo corresponde a bombas de calor, con un 35% frente a la potencia total instalada, seguido de balnearios, sistemas de calefacción, invernaderos, acuicultura y procesos industriales.



Fuente: Lund y Freeston, 2001

Gráfica 2 Aplicaciones de uso directo de la energía geotérmica en el año 2000.

## 6.2 GEOTERMIA EN EUROPA

La Unión Europea tiene como objetivo prioritario la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables. Esto se debe a razones de seguridad y diversificación del suministro de energía, de protección del medio ambiente y de cohesión económica y social.

El marco legislativo de las Energías Renovables en la Unión Europea está basado en el “Libro Blanco para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables”, desarrollado en 1997 por parte de la Comisión de las Comunidades Europeas. En este año se promulgó la Directiva 2001/77/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad. En esta Directiva se proponen objetivos indicativos para cada Estado miembro, que en el caso de España coinciden con los objetivos del Plan de Fomento de las Energías Renovables 2000-2010, asumidos por el Plan de Energías Renovables 2005-2010.

El objetivo general fijado por la Unión Europea marca la aportación de fuentes de energías renovables en un porcentaje del 12% de la energía primaria demandada en la UE en el año 2010.

Los principales yacimientos de energía geotérmica en Europa se encuentran en Italia, Islandia, Francia, Austria, Hungría, Bulgaria y, en menor grado, en Alemania y Suiza.

La capacidad de potencia eléctrica instalada de energía geotérmica en la Unión Europea alcanzaba los 854,6 MWe en el año 2006, lo que supone 10 MWe más con respecto al año 2005 y se estima que se han alcanzado los 863 MWe en el 2007 (en estos datos no se incluye Islandia), y, en menor grado, en Alemania y Suiza.

Italia es uno de los principales países del mundo en relación a los recursos geotérmicos, ocupando el quinto puesto a nivel mundial. La energía geotérmica se desarrolló para su aprovechamiento como energía eléctrica en 1904 en Toscana, donde la producción continúa en la actualidad. En 1913 se construyó la primera central para la generación de energía comercial a partir de recursos geotérmicos en Larderello, con una potencia de 250 kWe. En el año 2006 tenía una capacidad de 810 MWe instalados; en el 2007 la potencia instalada es de 910 MWe (según datos de la Conferencia final del proyecto Engine), con una producción de energía de las instalaciones en operación de 5.527 GWh.

El desarrollo geotérmico en Italia se ha financiado casi enteramente con fondos privados, solamente el 1% fueron derivados de fuentes públicas.

Portugal es el segundo país europeo en producción de electricidad a partir de recursos geotérmicos. Esta explotación se está desarrollando en el archipiélago volcánico de las Azores, en la isla de San Miguel. Actualmente tiene una potencia instalada de 28 MWe, con una producción de electricidad en el año 2006 de 85 GWh.

Francia es otro de los países de la Unión Europea a la cabeza de potencia eléctrica instalada de energía geotérmica, desarrollando su explotación en la isla de Guadalupe y en Soultz-sous-Forets, zona situada en la parte francesa del Foso del Alto Rin, elegida esta última como uno de los primeros lugares de investigación en Europa en el área de “roca caliente seca”, porque se encuentra justo en el centro de las anomalías térmicas de la zona centro de Europa.

Después de Francia, cabe destacar Austria y Alemania, en los cuales el potencial geotérmico es explotado en centrales híbridas para generar electricidad y para uso directo del calor.

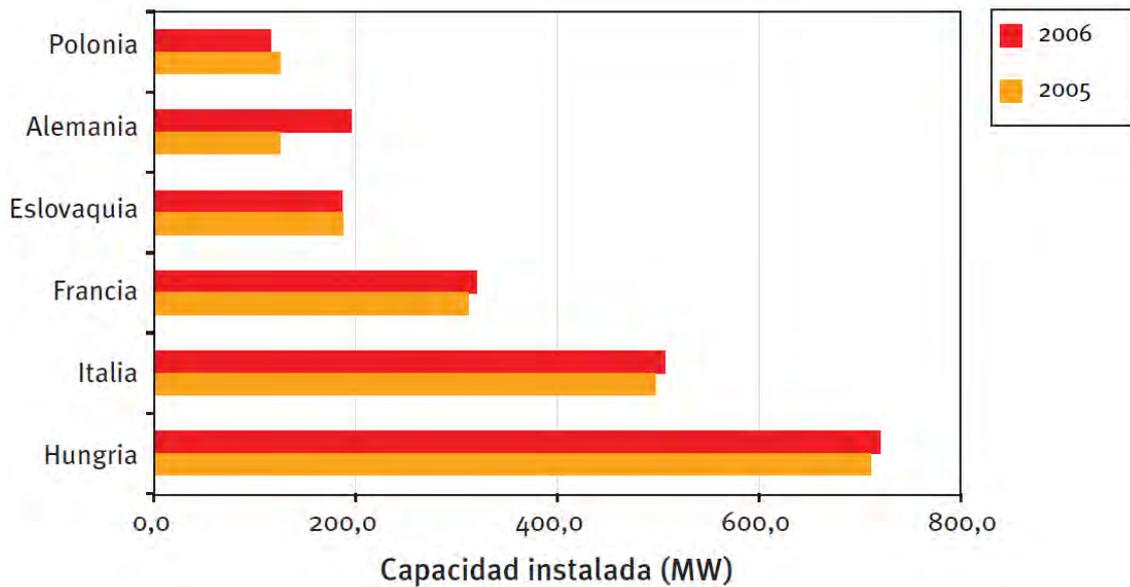
País	2000 (MWe)	2005 (MWe)	2006 (MWe)	2007 (MWe)
Italia	785,0	810,5	810,5	811,0
Portugal	16,0	18,0	28,0	28,0
Francia	4,2	14,7	14,7	15,0
Austria	0,0	1,2	1,2	1,0
Alemania	0,0	0,2	0,2	8,0
<b>Total</b>	<b>805,2</b>	<b>844,6</b>	<b>854,6</b>	<b>863,0</b>

Gráfica 3 Evolución de la potencia eléctrica instalada (MW)

En la Unión Europea, las aplicaciones ligadas al uso directo del calor de la energía geotérmica se han desarrollado en 16 de los 25 países.

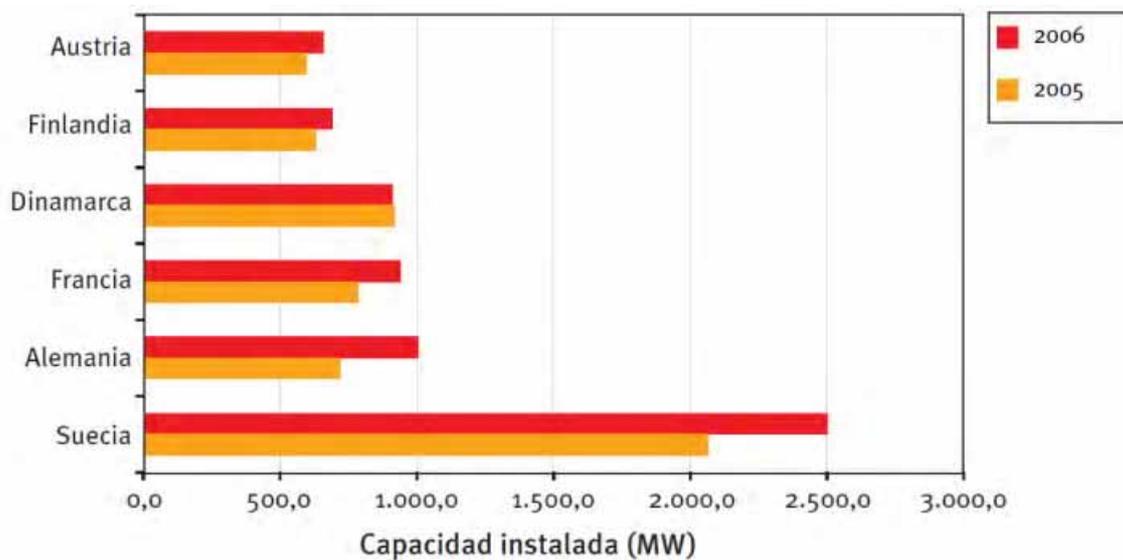
Hungría es el primer país en utilización directa del calor proveniente de energía geotérmica seguido de Italia y Francia. Los principales usos por orden de relevancia son baños termales y piscinas, seguido de calefacción de distrito y calefacción para invernaderos.

Con respecto a la producción de calor, las estimaciones y previsiones futuras de la geotermia de baja y media temperatura son mucho más complicadas de realizar, sobre todo en casos como baños termales, piscinas e invernaderos, donde la energía utilizada para estas aplicaciones no es sistemáticamente contabilizada.



Gráfica 4 Escenario europeo de energía geotérmica de uso directo

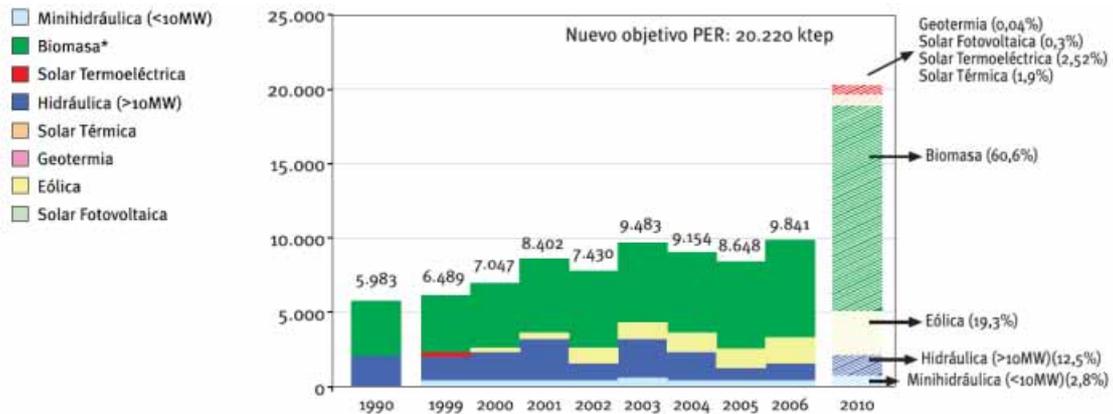
Las previsiones para la geotermia de muy baja entalpía, mediante la utilización de la bomba de calor, son mucho más favorables y se espera un importante despegue en los próximos años, pues existe una gran diversidad de bombas de calor geotérmicas y la Unión Europea está apostando por este tipo de aplicación en el mundo. Suecia es el país de la UE con mayor capacidad instalada de bombas de calor geotérmicas, seguido de Alemania y Francia.



Gráfica 5 Escenario europeo de energía geotérmica con bomba de calor

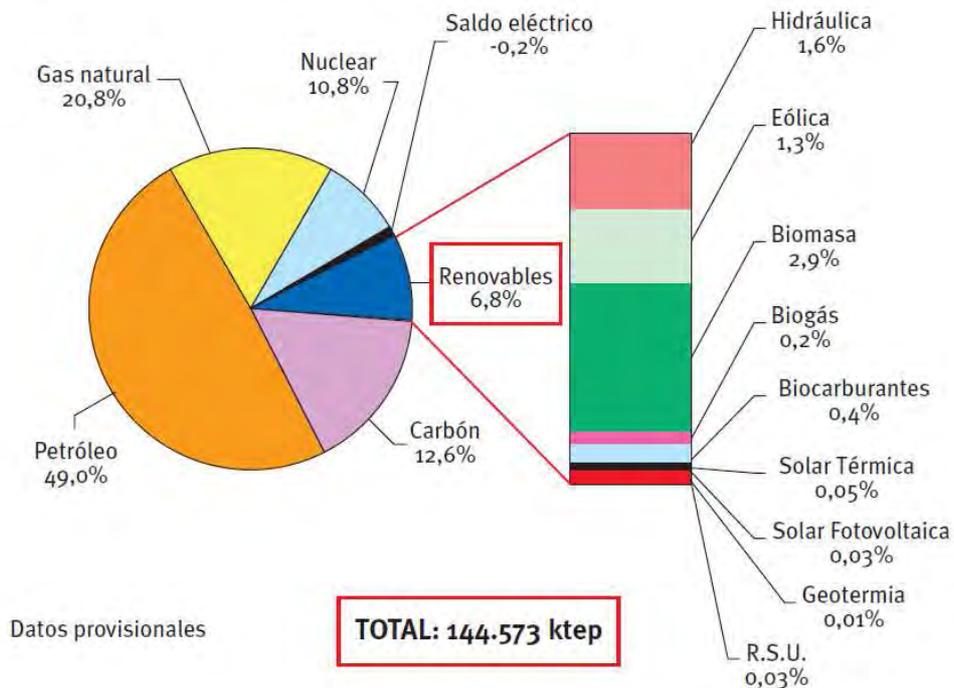
### 6.3 GEOTERMIA EN ESPAÑA

La energía geotérmica en España presenta todavía una escasa penetración, a pesar de su gran potencial de utilización, tanto para usos térmicos a escala doméstica como a escala industrial para generación de energía eléctrica.



\*Incluye R.S.U., biogás y biocarburantes. Datos 2006, provisionales. Fuente: IDAE

Gráfica 6 Consumo primario (ktep) de energías renovables en España Fuente:IDAE



Gráfica 7 Balance de energía primaria en España. Año 2006 Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio/ IDAE

La energía geotérmica se comenzó a investigar en España tras la crisis energética de 1973. La evaluación del potencial geotérmico del subsuelo en España es acometida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), que elaboró en 1975 el primer avance que constituye el Inventario General de Manifestaciones Geotérmicas en el Territorio Nacional en el que se aborda la evaluación del potencial geotérmico del subsuelo.

Hasta mediados de los 80, la fase investigadora llevada a cabo por el IGME y otras entidades, se concentra en la delimitación de las zonas en las que se localizan los tres tipos clásicos de yacimientos geotérmicos, sin entrar en los temas de Roca Caliente Seca. A finales de los 90, los esfuerzos de los inversores declinaron y el único organismo que ha seguido activo en el tema ha sido el IGME.

La síntesis de la información elaborada permitió reseñar diversas zonas de interés que quedan recogidas en el siguiente mapa y cuadro complementario:



Ilustración 23 Áreas geotérmicas definidas en España como resultado del Programa de Investigación Geotérmica

Fuente: Instituto Geológico y Minero de España

**Yacimientos geotérmicos de interés en España ordenados de acuerdo con su temperatura.**

Yacimientos geotérmicos	Baja temperatura $T < 100^{\circ}\text{C}$	Almacenes sedimentarios profundos	<b>Cuenca del Tajo:</b> Madrid <b>Cuenca del Duero:</b> León, Burgos y Valladolid <b>Área Prebética e Ibérica:</b> Albacete y Cuenca
		Zonas intramontañosas y volcánicas	<b>Galicia:</b> zonas de Orense y Pontevedra <b>Depreseiones catalanas:</b> Vallés, Penedés, La Selva y Ampurdán <b>Depresiones internas de las Cordilleras Béticas:</b> Granada, Guadix, Baza, Cartagena, Mula, Mallorca <b>Canarias:</b> isla de Gran Canaria
	Media temperatura $100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$		<b>Cordilleras Béticas:</b> Murcia, Almería, Granada <b>Cataluña:</b> Vallés, Penedés, La Selva y Olot <b>Galicia:</b> áreas de Orense y Pontevedra <b>Pirineo Oriental:</b> zona de Jaca-Sabiñánigo
	Alta temperatura $T > 150^{\circ}\text{C}$		<b>Islas Canarias:</b> Tenerife, Lanzarote y La Palma

Con estos amplios conocimientos de los recursos geotérmicos en España, disponibles a finales de los 80, se plantearon distintos proyectos basados en el uso de la energía geotérmica para calefacción (viviendas, locales, agricultura,...) que utilizaban fluidos con elevadas salinidades a profundidades del orden de los 2.000 m, similares a los que en esos momentos se llevaban a cabo en otros países de la UE, lo que encareció notablemente los proyectos y quebró la rentabilidad económica de los mismos, máxime en una situación de clara competencia con otras fuentes de energía y en una época de precios energéticos no excesivamente elevados. Tan solo cabe destacar la puesta en marcha de pequeños proyectos geotérmicos en instalaciones ligadas a balnearios partiendo del propio fluido termal.

Finalmente, el desarrollo de esta área geotérmica acabó paralizándose, no debido a factores del subsuelo, sino a la deficiente planificación y gestión de los proyectos de aprovechamiento, probablemente por desconocimiento de las peculiaridades del recurso y por planteamientos empresariales y financieros inadecuados.

Actualmente, en España sólo existen proyectos de aprovechamiento geotérmico para uso térmico en instalaciones balnearias, calefacción en invernaderos o para calefacción de viviendas con una potencia en el año 2006 de 22,3 MWt, lo que supone 8,3 Ktep para aplicaciones directas del calor, según fuentes del Euroserv´Er.

Las instalaciones de bombas de calor, muy habituales en otros países europeos, no han tenido en España hasta la fecha el empuje necesario para su despegue, motivado por las críticas que algunos sectores plantean a este tipo de aprovechamientos en función de su consumo de energía eléctrica.



## **7 ESTUDIO SOBRE INSTALACIONES GEOTÉRMICAS EXISTENTES EN NAVARRA**

## 7.1 LISTADO DE INSTALACIONES EXISTENTES EN NAVARRA

A continuación, se adjunta una tabla con un listado detallado de las instalaciones de geotermia localizadas en Navarra.

Este listado se ha generado consultando diferentes fuentes:

- Listado de instalaciones subvencionadas por el Gob. Navarra a través de la Dirección general de Industria de Navarra.
- Listados del programa PAREER-CRECE del IDAE.
- Listados de obras de empresa como:
  - GRUPO VISIONA BD
  - NAPARTEC
  - GEALIA NOVA
  - TELLUS
- Consultas a empresas mantenedoras del ámbito de la Comunidad Foral de Navarra.

En el presente listado se omiten los datos de particulares únicamente recogiendo las ubicaciones de las instalaciones geotérmicas identificadas, en color rosa se identifican las instalaciones de mayor potencia y más representativas, en color blanco se identifican el resto de instalaciones principalmente correspondientes a viviendas unifamiliares.



	PROPIEDAD	SectorAplicacion	Aplicacion	Profundidad	Fabricante Bomba	Modelo Bomba	Potencia Bomba Calor (W)	Dirección	Localidad	Presupuesto
1	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Climatización	80	NIBE	1120/12	12000	DONANTES DE SANGRE	ABUITAS	27.770,26
2	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción-Climatización	100	TONON FORTY	EPH-19-1C GENIUS	19000	EUIZEA, 3	AIZOAIN	20.618,90
3	PARTICULAR	Vivienda habitual		240	TONON FORTY		19000	EUIZPEA, D (PARCELA 523 POLIGONO 16)	AIZOAIN	28.462,00
4	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Climatización	100	IMMOSOLAR	IS-SW 17	17000	LA ASUNCION, 14	ALDABA	52.087,53
5	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	0	SOFATH	MT9-10-HMI134	16120	LA VIA, PARC. 1	ANCIN	9.770,70
6	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	78	GEOVIA INDUSTRIES, S.A.S.	ISARA 10 MONO OPTIMA	10160	FERNANDO URKIA, 40	ARBIZU	18.288,00
7	PARTICULAR	Vivienda habitual		240	TONONFORTY		22400	CLANZOZ/N	ARRE	33.555,20
8	AYUNTAMIENTO DE BERRIOPLANO	INSTALACIONES DEPORTIVAS/CULTURALES	ACS-Calefacción-Climatización	5100	CLIMAVENETA	ERACS-WQ/8 1502	381000	AUZALOR, 1	ARTICA	250.000,00
9	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	100	WATERLOTTE	AI 1 5009-3	9300	SAN PEDRO, S/N	ASTITZ	32.050,11
10	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	0	FRANCE GEOTHERMIE	MAROA 10 MONO AGUA	10500	726	AZKARATE (ATALLO)	11.556,84
11	PARTICULAR	Vivienda habitual		300	MS LIZARRA		14000	C/NUEVA 2	BEARIN	22.736,00
12	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	0	SOFATH	NATEA MT7.10-MT4.10	11100	Bº ILEKUETA - CASA SARROGAINA	BERA	16.535,34
13	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	0	SOFATH	NATEA MT7.10 MONO ACS	7150	POL. 7, PARC. 332, Bº ZIA-PEÑABORDA	BERA	13.277,59
14	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	0	SOFATH	NATEA MT7.10-MT2.10	9600	POUG. 6, PARC. 332, Bº ZIA-PEÑABORDA	BERA	15.154,83
15	PARTICULAR	Vivienda habitual	Climatización	368	NIBE	FIGHTER 1330-20	23000	AVDA. MADRID, 19 - A 1º	CASCANTE	22.129,58
16	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción-Climatización	0	GIORDANO	SUNEO G14	13370	JOSE IBARRA, 2	CASEDA	12.519,00
17	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción-Climatización	0	GIORDANO	SUNEO G14	13370	JOSE IBARRA, 6	CASEDA	12.519,00
18	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción-Climatización	80	TONON FORTY	MAMY GEO 042	25000	BIDEPEA, 47	CIZUR MAJOR	43.470,00
19	FUNDACIÓN CULTURA Y ASISTENCIA	INSTALACIONES DEPORTIVAS/CULTURALES	ACS-Climatización	100	IMMOSOLAR	IS-SW 143	143000	PARC. D3, UNIDAD D38, CRTA. PAMPLONA, S/N (COLEGIO)	CIZUR MENOR	222.008,06
20	ADANIA GRUPO EMPRESARIAL, S.L.	OFICINAS/ADMINISTRATIVO	Climatización	100	IMMOSOLAR	IS/SW 27	27000	POL. IND. CORDOVILLA, C/B 4	CORDOVILLA	47.525,35
21	HOTEL SAYOA, S.A. (ASADOR ERRELEKU)	HOSTELERÍA	Climatización	100	IMMOSOLAR	IS/SN 44	44000	SAN COSME Y SAN DAMIÁN, 1	CORDOVILLA	49.761,47
22	PARTICULAR	Vivienda habitual		100	THERMIA VARME AB		7200	CL TEJERIA Nº 29	DICASTILLO	11.692,80
23	COLEGIO MARISTAS	EDUCATIVO	Climatización-ACS	1650	NIBE	F1345-24	24000	Paseo de Champagnat, 2	EGÜES	-
24	CLINICA UBARMIN	HOSPITALARIO	Climatización-ACS	6750	CLIMAVENETA	ERACS2-WQ1902	480000	Carretera de Aoiz, s/n	EL CANO	-
25	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	0	SOFATH	CASIANE 12.10 MONO+ACS	12050	CASA ALITE, Bº SALTUE	ELIZONDO	12.791,52
26	PARTICULAR	Vivienda habitual		270	SOFATH		23260	C/ ERREKALDEA Nº 11	ENDERIZ	23.036,60
27	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Climatización	70	NIBE	1120/12	12000	SAN ISIDORO	ETXARRI DE ETXAUARI	10.507,94
28	PARTICULAR	Vivienda habitual	ACS-Calefacción	210	SOFATH	NATEA(GT 24,3 X GT 34)	12200	BIZHANHALE	ETXARRI-ARANATZ	22.760,38
29	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	75	DIMPLEX	SI 9MER	9000	PARC. R26	ETXAUARI	16.885,15
30	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	75	DIMPLEX	SI 9MER	9000	PARC. R27	ETXAUARI	16.885,15
31	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	75	DIMPLEX	SI 9MER	9000	PARC. R28	ETXAUARI	16.885,15
32	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	75	DIMPLEX	SI 9MER	9000	PARC. R25	ETXAUARI	16.885,15
33	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	75	CIATESA	AGEO 40H	9000	GOTXEBIDEA, 9	ETXAUARI	16.999,62
34	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	75	CIATESA	AGEO 40H	9000	GOTXEBIDEA, 11	ETXAUARI	16.999,62
35	PARTICULAR	Vivienda habitual		160	CIATESA		45000	NAGUSIA 15	GARTZAIN	25.578,00
36	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Climatización	110	NIBE	1330/22	22000	GIJURUMENDI	GORRAIZ	27.203,35
37	PARTICULAR	Vivienda habitual	ACS-Calefacción	320	NIBE	FIGHTER 1240-12	11500	SAN MARTIN, 7	GORRAIZ DE ARCE	19.408,94
38	PARTICULAR	Vivienda habitual	ACS-Calefacción	420	SOFATH	NATEA MT07.19 ACS	8540	BARRIO SARROLA, POL. 2 PARC. 305	IGANTZI	5.522,59
39	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	80	TONON FORTY	MAMY 061 GEO	19000	PARC. 141, POUIG. 9 BASABURUA	IGOA	34.369,60
40	CENIFER	EDUCATIVO	Didáctica-Calefacción	100	CIATESA/BOREALS/VAILLANT	GEOTHER PLUS VWS 81/2	8100	Calle Aduana, s/n	IMARCOAIN	-
41	CENTRO DE ESQUI NORDICO LARRA BELAGUA	INSTALACIONES DEPORTIVAS/CULTURALES	Calefacción-ACS	1500	NIBE	1330/40	78000	Carretera Isaba / Francia, Km. 55	ISABA	-
42	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	0	VAILLANT	GEOTHER PLUS VWS 102/2	10500	MAÑETA, 42	LAKUNTZA	12.896,03
43	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	170	THERMIA	THERMIA CONFORT 10 RF	8900	PORTACELAY, 3	LARRASOÑA	14.463,71
44	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	100	RHOSS	THHEB	22400	FUERTE DE ISABEL II, 7 - CHALET 1	LERIN	20.812,57
45	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	100	RHOSS	THHEB	22400	FUERTE DE ISABEL II, 7 - CHALET 2	LERIN	20.812,57
46	PISCINAS DE LESAKA	INSTALACIONES DEPORTIVAS/CULTURALES	ACS-Climatización	36	CARRIER	3RW110	109000	ANTOIU KALEA S/N	LESAKA	76.754,00



	PROPIEDAD	SectorAplicacion	Aplicacion	Profundidad	Fabricante Bomba	Modelo Bomba	Potencia Bomba Calor (W)	Dirección	Localidad	Presupuesto
47	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	125	FRANCE-GEOTHERMIE	ISARA 08 MONO RST	8350	SAN ADRIAN, 3	LUNBIER	20.048,28
48	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	110	DIMPLEX	SI 9MER	9100	doctor sendra, 2 - 1ª a	MARCILLA	22.290,88
49	ESCUELA INFANTIL DE MARCILLA	EDUCATIVO	ACS-Calefacción-Climatización	20	CLIMAVENETA	NECS-WN/80252	77000	EL CID, 2 (RECINTO ESCOLAR)	MARCILLA	83.239,52
50	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción-Climatización	100	TONON FORTY	EPH-29-1C GENIUS	29000	SANTA BRIGIDA, S/N	MARCILLA	26.198,95
51	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	Climatización	180	THERMIA	DIPLOMAT OPTIMUM	7900	PASEO FORZOSO, 6	MELIDA	14.246,83
52	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	110	DIMPLEX	SI 9MER	9100	castejon, 10	MIRANDA DE ARGA	27.791,68
53	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	0	GREENHEISS	EARTH 9	12000	SAN FRANCISCO, 33 A	MUGIRO	68.978,00
54	COLEGIO LUIS AMIGO	EDUCATIVO	Calefacción	800	ECOFORST	ECOGEO 70	70000	Ctra Tajonar, Km 2	MULTILVA BAJA	-
55	AYUNTAMIENTO DE NOAIN	OFICINAS/ADMINISTRATIVO	Climatización	1650	NIBE	1330/40	78000	Plaza de los Fueros, 3	NOAIN	-
56	SANCO GESTION SOCIAL, S.L.	RESIDENCIAL PUBLICO	ACS-Calefacción-Climatización	4050	IMMOSOLAR	IS-SW 143	286000	CTRA. PAMPLONA-FRANCIA, KM. 11 (SAYOA)	OLABE	150.000,00
57	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	100	VALLANT	VWS 141/2	16200	543	OLAZ	29.160,00
58	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción-Climatización	100	DIMPLEX	SI 14 TE	14000	AVDA. ESTERIBAR, 143 BAIJO	OLUKI	11.315,25
59	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	70	NIBE	1220/12	12000	EUNTZEANDIA, 48	OROIEN	25.460,79
60	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Climatización	80	NIBE	FIGHTER 1127,12	12000	ARZANEGUI, 29 BAIJO	ORORRIA	19.133,29
61	PARTICULAR	Vivienda habitual	ACS-Climatización	120	NIBE	FIGHTER 1140-12	11500	CTRA. ASIAIN,12 420-B POL.3 OLZA	ORORRIA	8.597,55
62	POLIDEPORTIVO MUNICIPAL DE OTEIZA	INSTALACIONES DEPORTIVAS/CULTURALES	Calefacción-ACS	800	IDM	TERRA MAX 700	89000	Calle Iturchipia 5/N	OTEIZA	-
63	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	100	CLIVET	GAIJA ACQUA	6900	BERRIOPLANO, 8	PAMPLONA	12.420,00
64	PARTICULAR	Vivienda habitual		30	SOFATH		2750	CL RIPABURUA 3	PAMPLONA	3.190,00
65	NAVARRA ARENA PABELLON	INSTALACIONES DEPORTIVAS/CULTURALES	Climatización-ACS	3300	DAIKIN	EWWP065KAW1MB	260000	Plaza Aizagerria, nº 1	PAMPLONA	-
66	RESIDENCIA COMUNITARIA RECOLETOS BELOSO ALTO	RESIDENCIAL PUBLICO	Climatización-ACS	700	INMOSOLAR	-	57000	Plaza Angel Maria Pascual 4	PAMPLONA	-
67	GUARDERIA MILAGROSA	EDUCATIVO	Calefacción	1650	CLAUSIUS	H7-100	100000	Pza. Alfredo Floristan, 1	PAMPLONA	-
68	C.I.P. VIRGEN DEL CAMINO	EDUCATIVO	Didáctica-Calefacción	100	TCHY	THHEV t 05-1 t 2	8000	Calle de Imárcain, 1	PAMPLONA	-
69	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Climatización	85	NIBE	1140/8	8000	AVDA. MURU-ASTRAIN	PATERNAIN	14.080,64
70	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	80	TONON FORTY	MAMY 041 GEO	12000	SELVA DE IRATI, 31-33	PERALTA	27.000,00
71	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	90	DIMPLEX	SI 7MER	6300	Iruizun, 7 - 4ª dcha	PERALTA	23.816,41
72	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Climatización	175	THERMIA	DIPLOMAT	10700	FRANCISCO DE JASO, 9 (URBANIZACION SARIA)	PUNTE LA REINA	22.125,84
73	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción	80	DIMPLEX	DIMPLEX SI7	7000	RAMON Y CAJAL, 9 B	RIBAFORADA	24.084,01
74	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Climatización	100	dimplex	si 9 mer	9000	CAMINO EGUABATI, S/N	SAGASETA	32.045,24
75	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción-Climatización	90	ENERTRES/DM	TERRA 12 S/W-HGL	14200	ALBAR, 80	SANTACARA	21.992,52
76	COPROPIETARIOS CLAUROSOS 53-75 Y CL LA JOTA 38-60	24 VIVIENDA UNIFAMILIARES	ACS-Climatización	90	NIBE	1320/40-1320/20	63000	LA JOTA	TUDELA	55.399,66
77	PARTICULAR	VIVIENDA HABITUAL	ACS-Calefacción-Climatización	100	ERW	ERW 2030C	20300	AVDA. MERINDEDES, PARC. 1787	TUDELA	35.047,13
78	PARTICULAR	Vivienda habitual	ACS-Climatización	140		FIGHTER 1120-12	12000	MENDIKOA, 4	UIHARTE ARAKIL	8.706,39
79	BUSTINCE PEREZ LUIS Y GOROSTIZA YUNTA, ESTIBALIZ	RESIDENCIAL PUBLICO	ACS-Calefacción	120	DIMPLEX	SI 17TE	16900	villeta, 15	UIJUE	47.930,98
80	PARTICULAR	Vivienda habitual		85	ERW		6650	CL BAZTAN Nº 14	VALTIERRA	10.799,60
81	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción-Climatización	0	SOFATH	CASIANE 07 MONO ACS	7000	HARITZONDOA ETXEA	ZIGA	12.602,09
82	PARTICULAR	RESIDENCIAL	ACS-Calefacción	0	SOFATH	CA09	9400	TEJERIA, 1	ZUBIELQUI	14.100,00

## 7.2 VISITAS A INSTALACIONES GEOTERMICAS

Como se ha visto anteriormente en el listado adjunto, se identifican 81 instalaciones de geotermia en Navarra.

Para estudiar el estado actual de las instalaciones existentes en Navarra, se realiza una planificación respecto a esta lista, para hacer una serie de visitas a ciertas instalaciones.

Es inviable visitar todas las instalaciones, además se considera irrelevante la información que pueden proporcionar un gran número de ellas, ya que se tratan en gran parte de instalaciones muy similares ubicadas en viviendas unifamiliares en los diferentes pueblos de la geografía navarra.

Se ha tratado de contactar con varias de las propiedades de viviendas unifamiliares mediante un procedimiento costoso, ya que únicamente se disponía de los datos del registro del Gob. Navarra. Por lo que se hubo de buscar una metodología de contacto previo, labor muy dificultosa.

Tras numerosos intentos y ciertas reticencias por parte de las propiedades de las viviendas, se opto por centrar los esfuerzos debido a lo limitado de los plazos de ejecución del estudio por visitar y contactar con los mantenedores o responsables de las instalaciones de mayor calado. Por estas razones únicamente se ha podido visitar una instalación en una vivienda unifamiliar.

Por ello, se considera importante para la realización de este estudio, la visita y análisis del comportamiento de las instalaciones más representativa de la Comunidad Foral.

Para ello, se han considerado todas las instalaciones existentes en el listado anterior que se ubiquen en edificios de uso terciario, hospitalario, hostelería y restauración, educativo, residencial público, deportivos o culturales y oficinas o administrativos, son de mayor importancia en cuanto a las instalaciones geotérmicas instaladas que el resto.

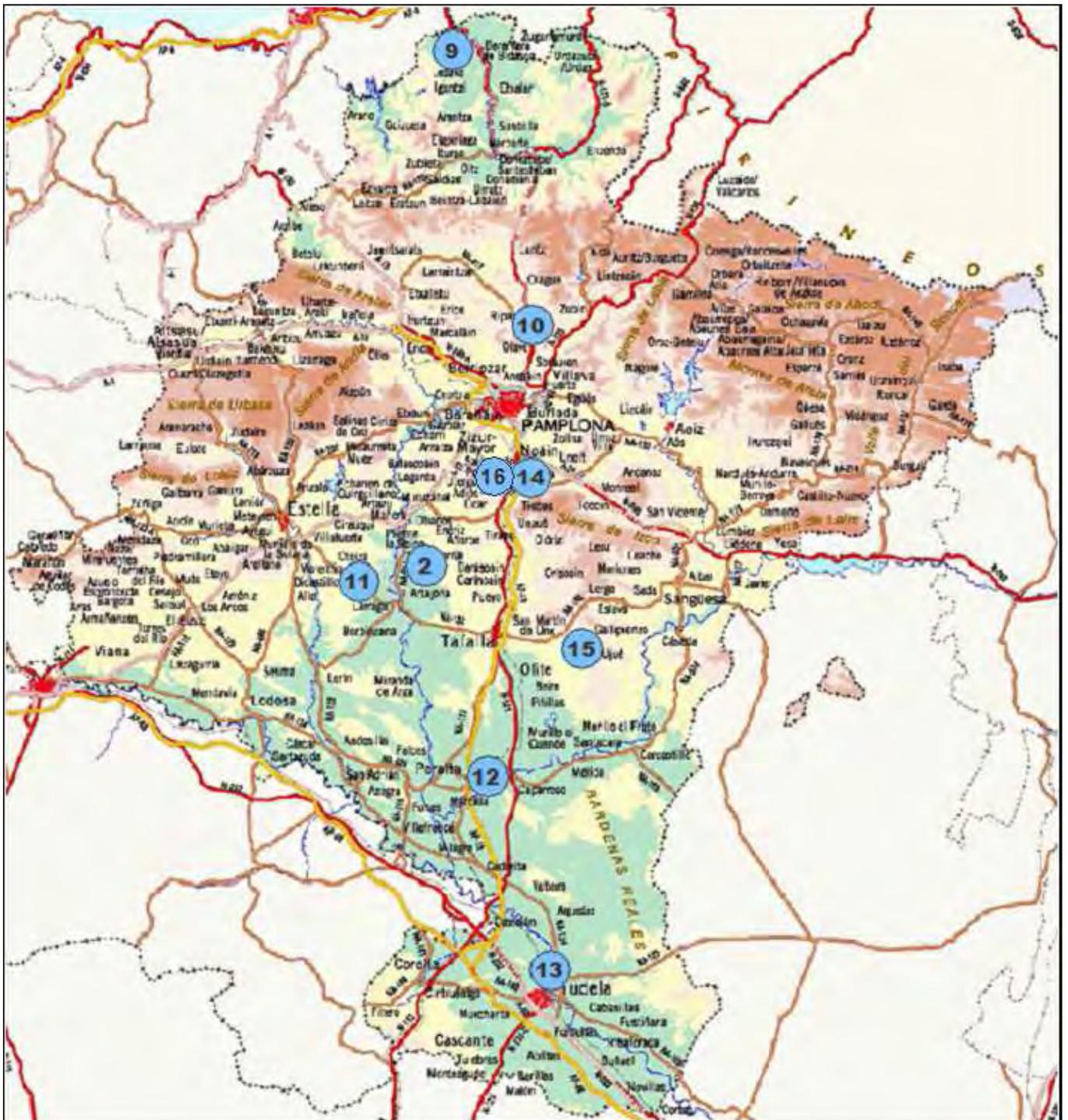
En el listado anterior se han identificado 19 instalaciones de interés.

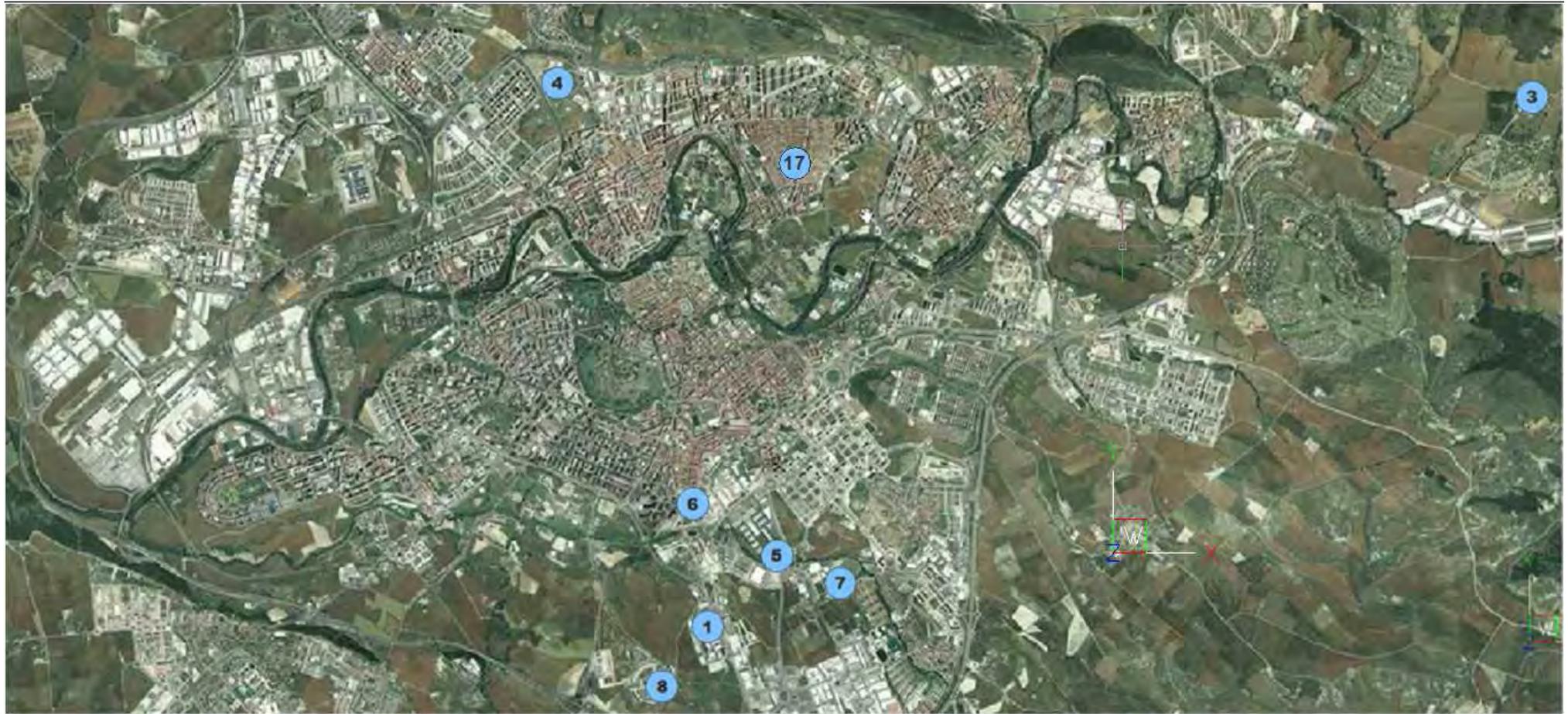
Tras tratar de contactar con los responsables de estas instalaciones para poder visitar las mismas y obtener datos sobre ellas, se han podido concertar 14 visitas a edificios de interés con instalaciones geotérmicas. Además, se va a visitar una vivienda unifamiliar particular para poder tener una referencia en este sentido y una instalación con centralizada con 24 unifamiliares.

El listado completo de instalaciones a visitar es el siguiente:

1. OFICINAS ADANIA RESIDENCIAL-CORDOVILLA
2. VIVIENDA UNIFAMILIAR-PUENTE LA REINA
3. CLINICA UBARMÍN-ELCANO
4. CIUDAD DEPORTIVA ARTICA-BERRIOPLANO
5. PABELLON NAVARRA ARENA-PAMPLONA
6. ESCUELA INFANTIL MILAGROSA-PAMPLONA
7. COLEGIO LUIS AMIGÓ-MUTILVA BAJA
8. ASADOR ERRELEKU-CORDOVILLA
9. PISCINAS MUNICIPALES-LESAKA (No se ha realizado finalmente esta visita)
10. CENTRO SAYOA-OLAVE
11. POLIDEPORTIVO MUNICIPAL-OTEIZA
12. ESCUELA INFANTIL-MARCILLA
13. COMUNIDAD 24 UNIFAMILIARES-TUDELA
14. AYUNTAMIENTO NOAIN-NOAIN
15. APARTAMENTOS TURISTICOS-UJUE
16. CENIFER (Centro de Referencia Nacional en Energías Renovables y Eficiencia Energética)
17. C.I.P. VIRGEN DEL CAMINO

A continuación, se muestran mapas de Navarra y de la Comarca de Pamplona con la ubicación de cada una de las instalaciones visitadas.





**VISITA-1**

**OFICINAS ADANIA RESIDENCIAL**

<b>Ubicación:</b>	Polígono Industrial, Calle B, 4, 31191 Cordovilla, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Oficinas		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2009		
<b>Potencia instalada</b>	26 kW	<b>Nº pozos</b>	2
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	IMMOSOLAR IM-SW 27	<b>Abastece a...</b>	Sistema de climatización del edificio
<b>Estado de la instalación</b>	Fuera de servicio. Causas: cese de uso de las estancias en las que se encuentra la instalación.		

**Descripción de la visita**

**Fotos**





Fotografías tomadas en la visita:

- Bomba de calor geotérmica.
- Depósito de inercia y bombas hidráulicas de recirculación.
- Arqueta de pozo geotérmico.
- Placa identificativa y de características técnicas de la bomba de calor.

#### Esquema de principio

No se proporciona

#### Descripción sistema

El sistema consta de un equipo tipo bomba de calor geotérmica, que recibe las sondas geotérmicas instaladas en el almacén contiguo mediante la tipología de sondas geotérmicas en pozos verticales.

Desde la bomba de calor parte un primario de tuberías hasta un depósito de inercia térmica. Desde este depósito por medio de bombas hidráulicas se impulsa el agua hasta los diferentes fancoils de conductos ubicados en las oficinas.

La instalación no proporciona ACS.

#### Observaciones

La instalación está abandonada, ya que la empresa inquilina de esta sección de oficinas integrada en las instalaciones pertenecientes a ADANIA RESIDENCIAL, ya no se encuentra en esta ubicación. Por lo tanto, esta instalación abastece a estancias sin uso. Según comenta la propiedad las oficinas están desocupadas desde hace varios años, y la instalación no funciona desde entonces.

Parece una instalación de muestra, ya que la empresa que la instalo, se dedicaba al diseño e instalación de instalaciones geotérmicas. Para las reducidas dimensiones de las estancias, se considera una instalación innecesaria.

Una vez que está ya instalada, si algún día se alquilasen dichas oficinas, se podría revisar el estado de los equipos para poder plantear su puesta en funcionamiento, aunque cualquier inversión de cierto calado desaconsejaría su implantación ya que el tamaño de las oficinas no hace viable conseguir un periodo de amortización razonable.

**VISITA-2**

**VIVIENDA UNIFAMILIAR EN PUENTE LA REINA**

<b>Ubicación:</b>	Calle Francisco de Jaso 9, Puente la Reina (Navarra)		
<b>Tipo de edificio</b>	Vivienda unifamiliar		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2009		
<b>Potencia instalada</b>	8,9 kW	<b>Nº pozos</b>	2 (120 +60 metros)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	THERMIA DIPLOMAT 10	<b>Abastece a...</b>	Instalación de suelo radiante/refrescante y producción de ACS
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento		

**Descripción de la visita**

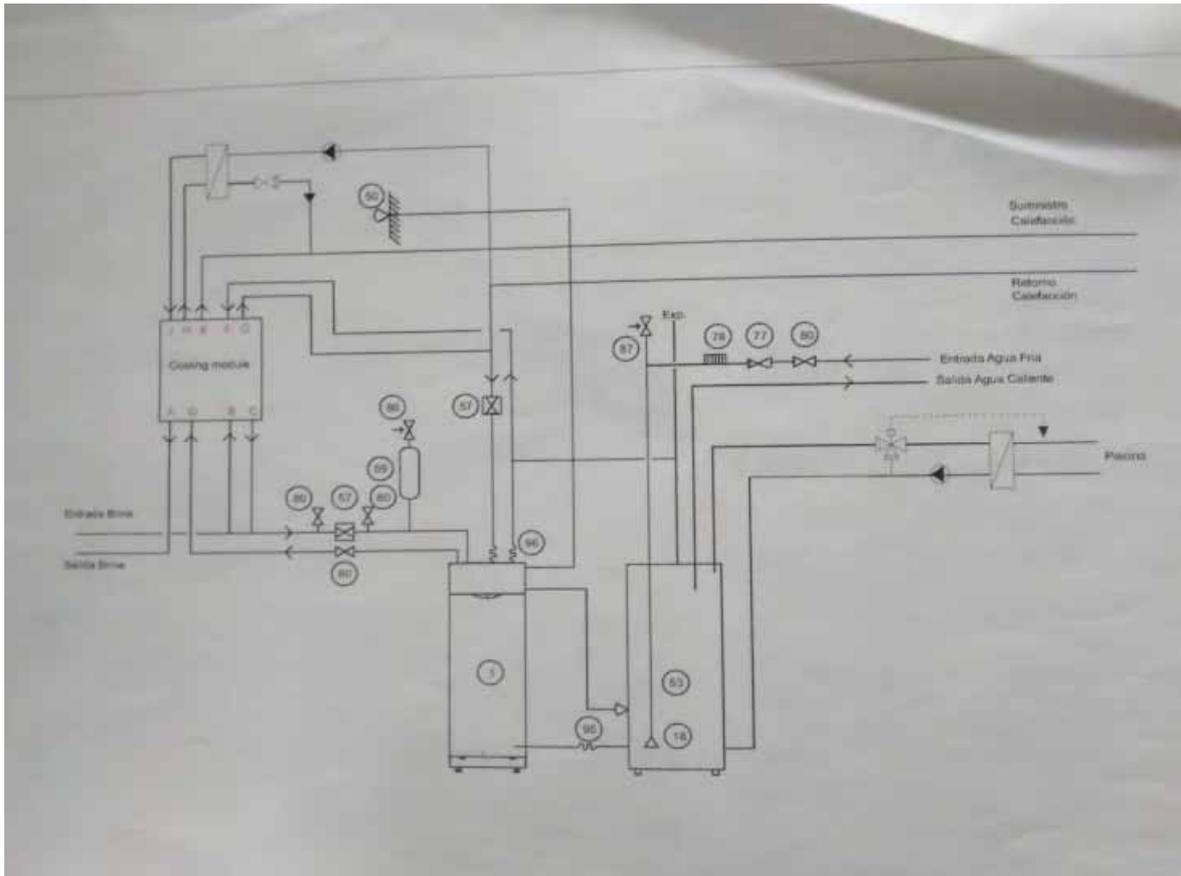
**Fotos**



Fotografías tomadas en la visita:

- Bomba de calor geotérmica + módulo de enfriamiento y depósito de inercia.
- Colector de suelo radiante/refrescante en la vivienda.
- Arqueta de pozo geotérmico y sondas geotérmicas.

### Esquema de principio



### Descripción sistema

El funcionamiento consiste en 2 pozos geotérmicos conectados al equipo tipo bomba de calor y al módulo de enfriamiento.

En modo calefacción la bomba recibe el agua recirculada por las sondas geotérmicas realizando y genera energía térmica de calefacción. Esta energía se almacena en un depósito de inercia del que las bombas hidráulicas de calefacción mueven el agua hasta los colectores de suelo radiante.

El agua caliente sanitaria se genera en el depósito de ACS que está apoyado por una resistencia eléctrica.

Además, la instalación cuenta con un módulo de enfriamiento pasivo, por el que en época de verano los pozos trabajan directamente contra este módulo por medio de un intercambiador de energía agua-agua. De esta forma se refrigerada de forma natural con agua procedente de las sondas geotérmicas el agua del circuito cerrado de calefacción/refrigeración. Proporcionando energía frigorífica suficiente para refrescar el suelo de la vivienda.

También se dispone de una bomba hidráulica que mediante una válvula motorizada de 3 vías es capaz de mandar el agua caliente a la piscina de la vivienda para generar un pequeño calentamiento de la misma.

### Observaciones

La instalación funciona correctamente, y los usuarios disfrutan de gran confort térmico en el interior de la vivienda.

La propiedad expresa su satisfacción con el sistema implementado, la instalación esta acompañada de un capo de placas fotovoltaicas que además han generado un ahorro en la factura eléctrica del 50%. Este tipo de sistema combinado es óptimo en las instalaciones de bombas de calor ya que el consumo de climatización es exclusivamente eléctrico.

Se es consciente por parte de la propiedad de la dificultad de recuperar la inversión realizada en la instalación geotérmica, debido a la fuerte inversión realizada.

Se quiere dejar constancia de que este tipo de instalaciones en viviendas unifamiliares se deben plantear cuando la propiedad está muy concienciada con el ahorro energético, y quizás no tanto buscando una rápida amortización de la inversión.

Se quiere dejar constancia de que el segundo pozo geotérmico no pudo ser de la profundidad planteada ya que la broca de la perforadora se averió y hubo que finalizar la perforación de este segundo pozo.

**VISITA-3**

**CLINICA UBARMIN**

<b>Ubicación:</b>	Carretera de Aoiz, s/n, 31486 Elcano, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Hospital		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2010		
<b>Potencia instalada</b>	480 kW	<b>Nº pozos</b>	45 (6750 metros en total)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	CLIMAVENETA ERACS2-WQ 1902	<b>Abastece a...</b>	Sistema de climatización del Edificio y ACS
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento, a media potencia. Causa: 1 de los 2 compresores de la bomba de calor esta averiada desde hace varios meses.		

**Descripción de la visita**

**Fotos**

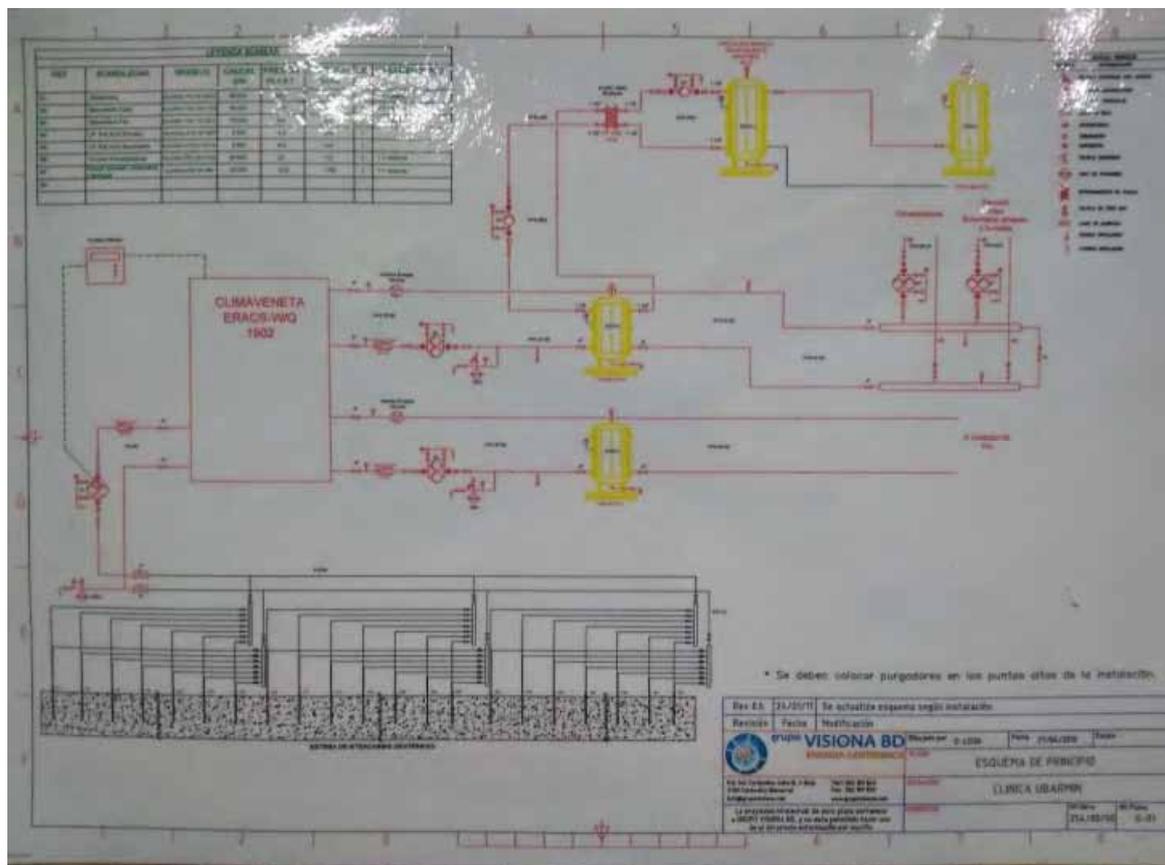


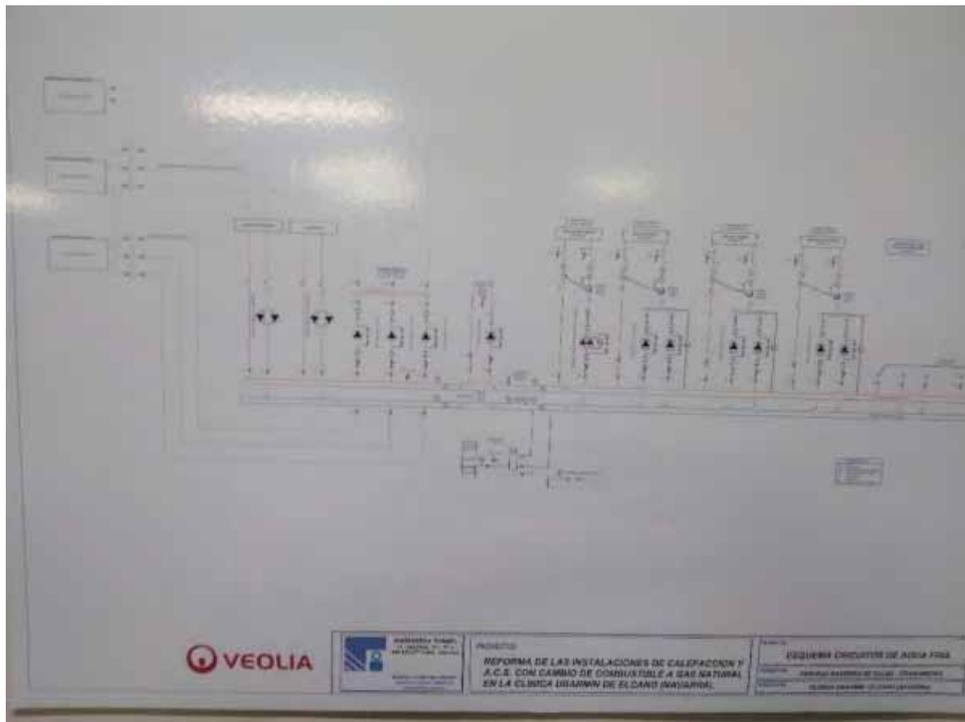


Fotografías tomadas en la visita:

- Depósito de inercia de frío.
- Bomba de calor de geotérmica.
- Interior de la bomba de calor geotérmica.
- Arqueta de pozo geotérmico y colector con sondas geotérmicas.

### Esquema de principio





### Descripción sistema

Los 45 pozos geotérmicos se agrupan en 6 arquetas con colectores de sondas geotérmicas verticales ubicadas en la parte trasera del edificio.

Las sondas agrupadas se introducen mediante bomba hidráulica en la sala de instalaciones, donde se conducen hasta la bomba de calor. El equipo instalado es bastante complejo y de alta potencia unos 480 kW, dispone de doble etapa de compresión, recuperación térmica en la generación de calor y frío.

La instalación cuenta con 2 depósitos de inercia de calor y de frío. Estos depósitos almacenan la energía generada por la bomba de calor geotérmica. A partir de ahí se montan colectores de alta temperatura de calor y de baja temperatura de calos y un colector de frío.

Los colectores de calor están abastecidos también y en su mayor parte por la instalación de calderas de gas natural existente en el edificio. Estos colectores abastecen a todas las unidades terminales existentes en el edificio, fancoils de conductos y climatizadoras.

El sistema está pensado para que la primera energía que entre en funcionamiento sea la geotermia, luego entrarían las calderas de gas natural.

La instalación geotérmica también apoya a la producción de ACS, realizando un precalentamiento del agua de red o de recirculación antes de pasar por calderas.

La instalación de producción de frío esta también apoyada mediante varias enfriadoras de alta potencia, ya que sería imposible climatizar un hospital únicamente con el uso de la instalación geotérmica.

### Observaciones

Es importante recalcar que la instalación se planteó y diseño por medio de la fórmula de contrato de servicios energéticos, mediante el cual la inversión corre por cuenta de la empresa que realiza la instalación recuperando su inversión en el tiempo basado en los ahorros diarios.

El funcionamiento de la instalación geotérmica según los técnicos de mantenimiento de la clínica Ubarmin es bastante deficiente, teniendo el equipo múltiples averías. Además, el Servicio técnico autorizado de la maquina no responde a los avisos y no suministra las piezas de los equipos que se averían de forma rápida y eficaz. De esta forma la instalación no ha funcionado a pleno rendimiento mucho tiempo, concretamente durante la visita realizada a la instalación se encontraba funcionando con un sol compresor de los dos de los que dispone.

En máquinas con estas potencias tan grandes este es un gran problema, ya que las inversiones son muy grandes y la recuperación de la inversión depende en gran medida del número de horas que trabaje el equipo y el ahorro que pueda generar.

También indican problemas de la maquina al alternar el ciclo frigorífico y pasar de generación de calor a frio y viceversa. Según su experiencia se provoca por un fallo de diseño en la válvula de 4 vías que realiza el bypass hidráulico.

Las calderas aportan casi el 80% de la generación de calor mientras que la instalación de geotermia aporta únicamente el 20%. Aunque en determinados periodos y debido a las referidas averías, la geotermia no aporta al sistema.

El principal problema de esta instalación es la falta de apoyo del servicio de mantenimiento del propio hospital y del suministrador del equipo de geotermia y la empresa que realizo la instalación, retrasándose muchísimo las reparaciones de las averías y dificultando el normal funcionamiento de la instalación.

La complejidad del equipo parece que afecta a su fiabilidad, ya que según expresan los técnicos mantenedores la bomba de calor de geotermia ha sufrido múltiples averías a lo largo del tiempo.

La propiedad muestra su opinión satisfactoria acerca de la instalación y los ahorros obtenidos cuando funciona, aunque muestran su malestar sobre la atención recibida por la empresa diseñadora e instaladora de la instalación de geotermia y el servicio técnico de la máquina.

Se aportan datos de consumo eléctrico del equipo y de la energía que genera.

FECHA LECTURA	CONTADOR CALOR	CONTADOR FRIO	CONTADOR ELECTRICO
31/01/2016	2.962.057	3.230.672	1.674.669
29/02/2016	3.067.718	3.310.572	1.704.094
31/03/2016	3.150.885	3.378.647	1.726.668
30/04/2016	3.217.383	3.465.273	1.752.695
31/05/2016	3.260.765	3.555.239	1.780.132
30/06/2016	3.287.681	3.638.848	1.807.132
28/07/2016	3.306.201	3.732.165	1.836.728
31/08/2016	3.329.563	3.855.710	1.874.216
30/09/2016	3.353.074	3.944.370	1.899.697
31/10/2016	3.390.182	4.023.460	1.925.220
30/11/2016	3.460.409	4.086.210	1.949.444
30/12/2016	3.548.796	4.111.152	1.974.755
31/01/2017	3.709.294	4.111.152	2.017.896
28/02/2017	3.795.560	4.111.152	2.042.360
31/03/2017	3.838.256	4.113.834	2.056.219
30/04/2017	3.863.891	4.114.058	2.064.505
31/05/2017	3.878.925	4.145.269	2.077.502
30/06/2017	3.884.527	4.185.893	2.088.230
31/07/2017	3.889.114	4.233.486	2.101.205
31/08/2017	3.893.675	4.263.464	2.109.799
30/09/2017	3.897.695	4.270.464	2.112.345
31/10/2017	3.900.922	4.272.350	2.113.489
29/11/2017	3.963.954	4.272.509	2.128.849
29/12/2017	3.977.119	4.272.509	2.132.049

Lecturas de contador de frio y calor de la bomba de calor y energía eléctrica consumida desde 01/2016 hasta 12/2017

Se estima con los datos aportados un Rendimiento del equipo en la producción de energía térmica conjunta tanto calorífica como de frio de 4,94.

**VISITA-4**

**CIUDAD DEPORTIVA ARTICA-BERRIOPLANO**

<b>Ubicación:</b>	Calle Auzalor, 1, 31013 Artica, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Centro deportivo-piscinas aire libre		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2010		
<b>Potencia instalada</b>	394 kW	<b>Nº pozos</b>	34 (5100 metros)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	CLIMAVENETA ERACS2-WQ 1502	<b>Abastece a...</b>	Sistema de climatización del Edificio y ACS
<b>Estado de la instalación</b>	Fuera de servicio. Causa: Avería de la bomba de calor.		

**Descripción de la visita**

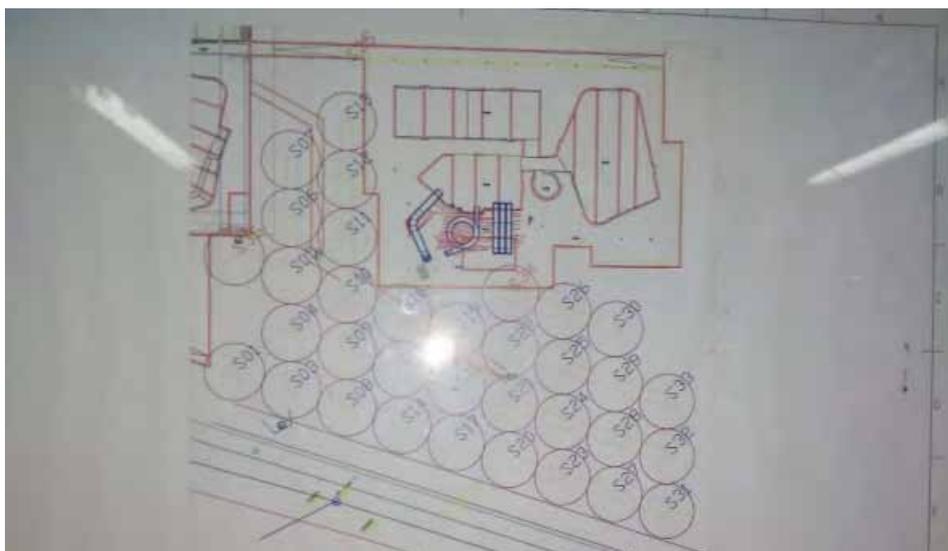
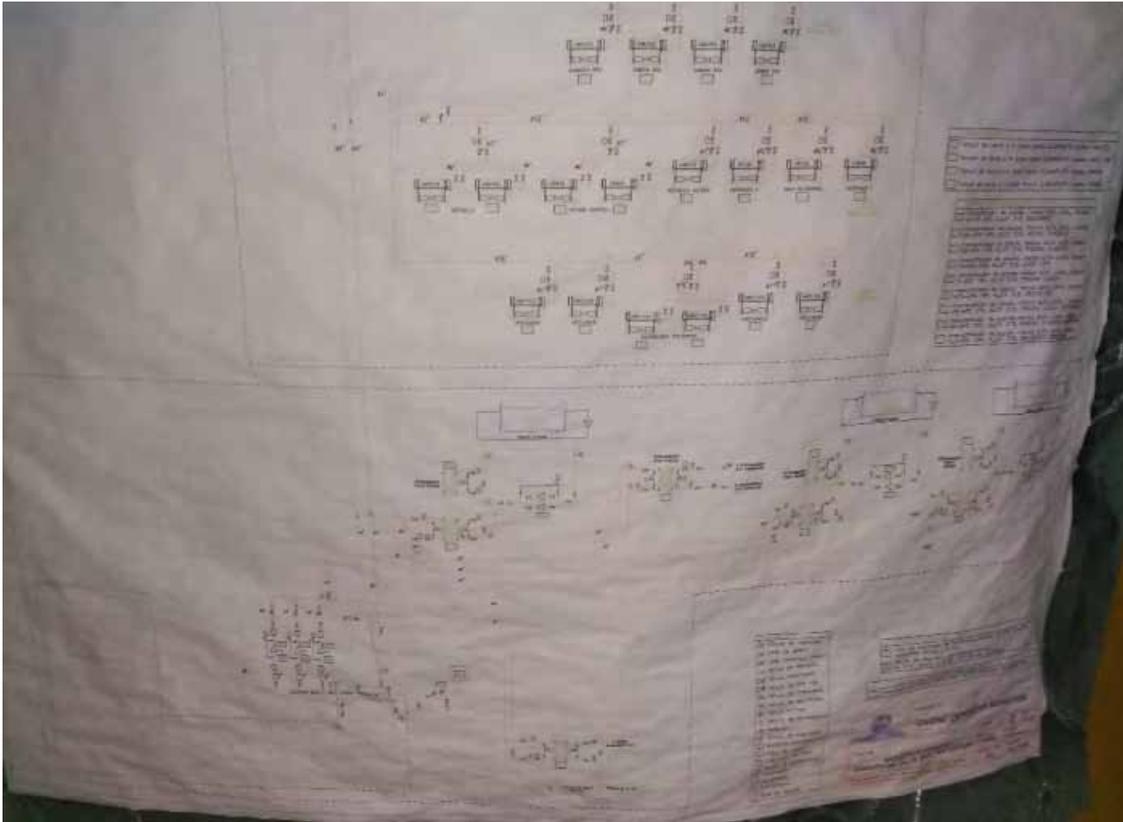
**Fotos**



Fotografías tomadas en la visita:

- Bomba de calor de geotérmica.
- Placa de características técnicas de la bomba de calor.
- Instalación completa de geotermia.
- Arqueta de pozo geotérmico en el interior del recinto de piscinas

### Esquema de principio



### Descripción sistema

Las piscinas de ártica cuentan con 34 perforaciones geotérmicas en la superficie de hierva de las piscinas verano.

Estas perforaciones disponen varias arquetas donde se unen en un colector las diferentes sondas geotérmicas de cada pozo.

La bomba de calor instalada de 394 kW térmicos genera agua caliente y fría que manda a sendos depósitos de inercia para almacenamiento térmico. Desde hay se lleva a colector de baja y alta temperatura en el caso de la instalación de calefacción y al colector de frío.

La instalación geotérmica no vierte en el colector de alta temperatura únicamente abastecido por las calderas de gas de la instalación.

Desde el colector de baja temperatura se lleva agua caliente hasta los fancoils para la climatización de espacios, se realiza un recalentamiento de ACS y de los vasos de piscinas.

El resto de la energía la aportan las calderas.

### Observaciones

Desde su implantación la instalación trabajo a pleno rendimiento 2 años seguidos, después empezó a sufrir averías en los componentes de bomba de calor.

El servicio de mantenimiento de las piscinas expresa su malestar por el mal servicio que reciben por parte del servicio técnico autorizado de la marca de la bomba de calor y por la relación con la empresa instaladora, esto hace que los tiempos en recibir repuestos para la subsanación de averías se alarguen mucho.

Cuando la instalación de geotermia funciona notan un ahorro muy importante en la facturación energética, y muestran su satisfacción en lo referente al desempeño energético de la misma.

Los últimos 2 años no ha trabajado correctamente debido a las averías.

La instalación no se encuentra monitorizada y no pueden dar datos de consumo, ni eléctrico ni aporte térmico.

**VISITA-5**
**PABELLON NAVARRA ARENA**

<b>Ubicación:</b>	Plaza Aizagerría, nº 1, 31006 Pamplona, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Pabellón deportivo, usos múltiples		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2013		
<b>Potencia instalada</b>	260 kW	<b>Nº pozos</b>	33
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	DAIKIN EWWP065KAW1MB	<b>Abastece a...</b>	Sistemas centralizados de climatización mediante suelo radiante/fancoils, climatizadoras y producción de ACS
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento.		

**Descripción de la visita**
**Fotos**




Fotografías tomadas en la visita:

- Instalación geotérmica general.
- Arqueta de pozos geotérmicos
- Placa identificativa de una bomba de calor.
- Intercambiador de placas de la instalación geotérmica.
- Depósitos de inercia de calor y frío de la instalación.

#### Esquema de principio



### Descripción sistema

Las sondas geotérmicas conducen el agua hasta los pozos geotérmicos en los que realizan el intercambio térmico contra el suelo. Después el agua se conduce hasta los equipos de geotermia donde se aprovecha la energía captada del suelo, y se genera calor o frío con un rendimiento muy alto.

En este caso se instalan 2 equipos de 130 Kw de potencia térmica cada uno, estos equipos generan agua caliente o fría para los procesos de climatización del polideportivo. El edificio dispone de suelo radiante, fancoils y principalmente climatizadoras de gran tamaño que son las que climatizan la pista central.

El agua caliente o fría generada en las bombas de calor se vierte en los 2 depósitos de inercia de 5000 litros existente para almacenar calor y frío.

Debido a las grandes demandas energéticas de la instalación, la misma se apoya en otros 2 sistemas de generación, en este caso 2 calderas de biomasa de alta potencia y una caldera de gas natural de alta potencia.

El funcionamiento del sistema consiste en trabajar la mayor parte del tiempo generando energía mediante la instalación geotérmica, salvo en los periodos de alta rigurosidad climática o con demandas térmicas muy altas debido al uso del edificio. En estos casos se pondrían en marcha estos sistemas que son capaces de generar la potencia instantánea suficiente para llegar a temperaturas de confort en todo el complejo.

### Observaciones

Desde su instalación en 2013 el edificio no ha tenido uso, se ha puesto en funcionamiento en 2018. Durante estos 5 años de inactividad en el edificio, se han realizado las labores necesarias de mantenimiento de la instalación geotérmica.

Debido a esto la instalación funciona correctamente a día de hoy. El personal de mantenimiento comenta que la instalación geotérmica funciona durante todo el año, y prácticamente sola en los periodos de entretiempos, primavera y otoño. Cuando las condiciones climáticas son más extremas y cuando se producen eventos en el edificio, es necesario pasar a la generación mediante biomasa y gas natural.

Esto es normal, ya que los equipos terminales implementados fancoils y climatizadoras, cuando tienen que trabajar a plena potencia necesitan temperaturas de agua más extremas para poder llegar a su máximo poder de climatización. La geotérmica no puede producir agua a más de 45°C en esta instalación, de ahí el uso del resto de tecnologías.

No se obtiene datos de rendimiento y de consumo, ya que el edificio no dispone de un sistema complejo de monitorización que permita conocer los datos necesarios para el estudio del rendimiento de los equipos geotérmicos.

No se han podido levantar las arquetas de los pozos geotérmicos ya que, según la sindicación de los técnicos de mantenimiento del edificio, es necesario maquinaria pesada para ello debido al elevado peso de las mismas.

En una instalación como esta parece razonable pensar a falta de datos, que se obtiene un buen desempeño energético en el uso de la geotermia. El elevado rendimiento de las bombas de calor en la producción de energía hace que, en periodos bastante prolongados del año, el edificio se abastezca únicamente de energía geotérmica. La instalación que no es la más grande de las visitadas, y está diseñada para cubrir una base del consumo anual y no para los picos de consumo debe de generar ahorro económico importantes, ya que esta tipología de funcionamiento es acertada para conseguir reducir el consumo energético.

**VISITA-6**

**ESCUELA INFANTIL MUNICIPAL MILAGROSA**

<b>Ubicación:</b>	Pza. Alfredo Floristan, 1. Pamplona		
<b>Tipo de edificio</b>	Escuela infantil		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2009		
<b>Potencia instalada</b>	100 kW	<b>Nº pozos</b>	11 (1650 TOTAL)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	CLAUSIUS H7-100	<b>Abastece a...</b>	Sistema de suelo radiante y ACS
<b>Estado de la instalación</b>	Fuera de servicio. Causa: Bomba de calor averiada. No se realiza la reparación por problemas con el servicio técnico de la misma.		

**Descripción de la visita**

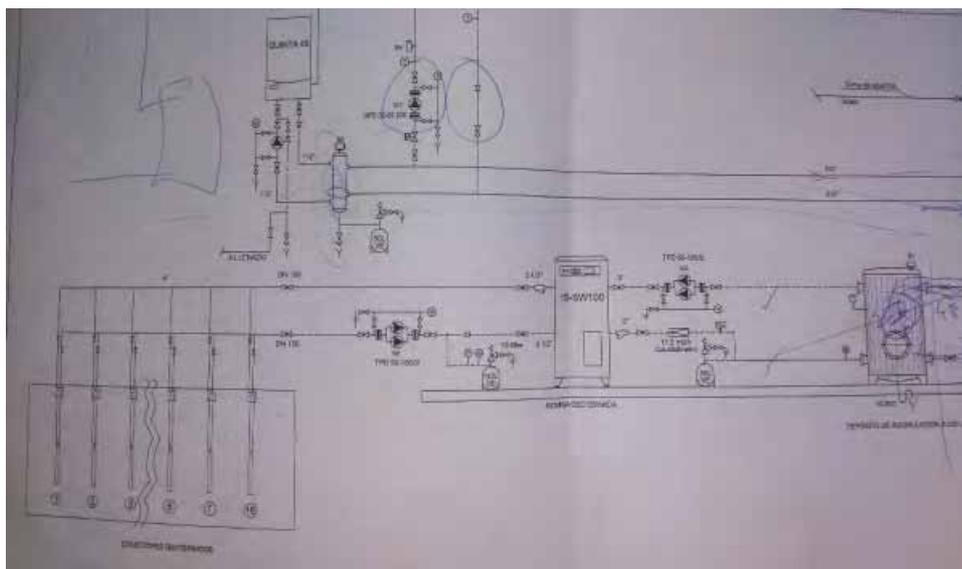
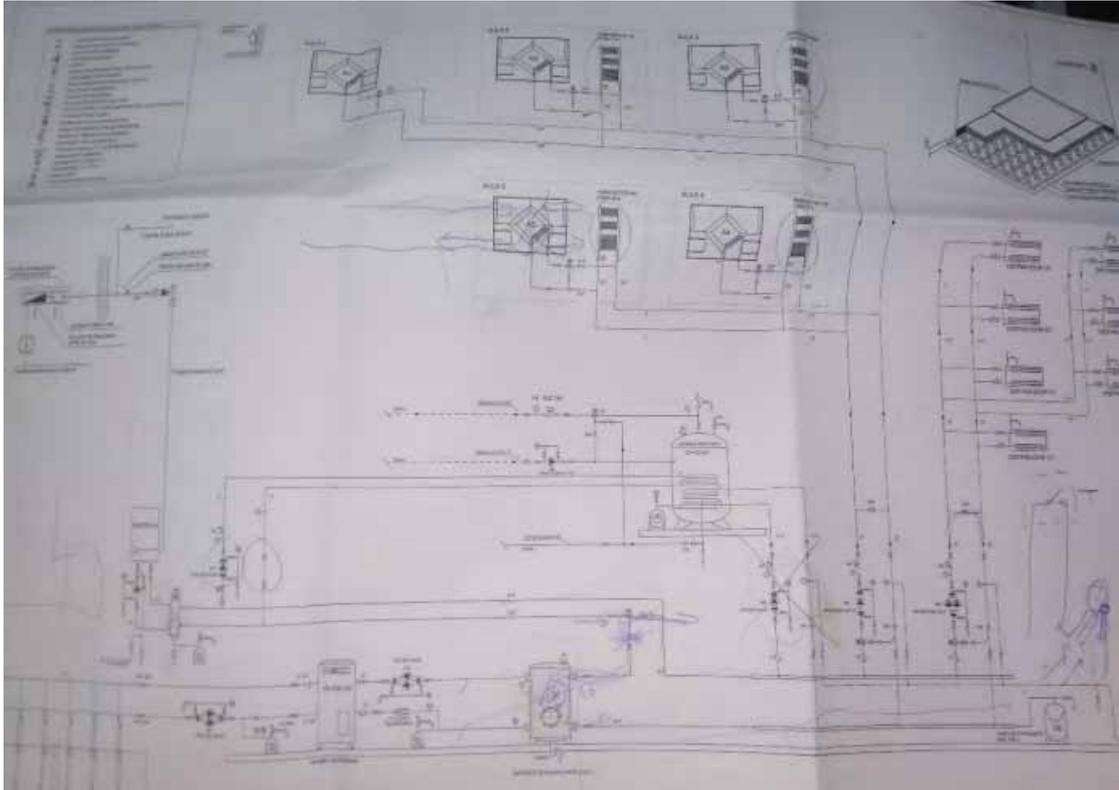
**Fotos**



Fotografías tomadas en la visita:

- Bomba de calor (interior).
- Depósito de inercia de la instalación geotérmica.
- Depósito de acumulación de ACS
- Colector de sondas geotérmicas.

### Esquema de principio



### Descripción sistema

El sistema consiste en una bomba de calor geotérmica (100 kW) de mediana potencia, apoyada por una caldera de gas natural de condensación.

En la plaza existente frente a la guardería se ubican 11 pozos geotérmicos con sondas verticales. Estos pozos disipan energía en el terreno. La bomba de calor vierte la energía generada en un depósito de inercia para calor.

Desde la instalación geotérmica se manda agua caliente a baja temperatura hasta un colector de impulsión de calefacción hasta los circuitos de suelo radiante de la guardería, también hay algún radiador de baja temperatura y recuperadores de calor para la ventilación con baterías de agua caliente

Además, la instalación cuenta con un interacumulador de producción de ACS.

### Observaciones

La instalación de geotermia no funciona, el equipo está averiado, y tanto el servicio técnico de la bomba de calor como la empresa instaladora no responden a los requerimientos de los mantenedores de la guardería. Esta situación se está dilatando en el tiempo por lo que el ayuntamiento parece que ha emprendido acciones legales contra estas marcas.

Por todo ello, la instalación lleva un año parada y se funciona únicamente con la caldera de condensación.

Se tuvo una primera máquina que se averió y se tuvo que cambiar por otra nueva, y este es el equipo existente que aun siendo nueva está dando problemas.

**VISITA-7**

**COLEGIO LUIS AMIGÓ**

<b>Ubicación:</b>	Ctra Tajonar, Km 2, 31192 Mutilva Baja, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Colegio		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2015		
<b>Potencia instalada</b>	70 kW	<b>Nº pozos</b>	8 (800 EN TOTAL)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	ECOFORST ECOGEO 70KW	<b>Abastece a...</b>	Sistema de calefacción suelo radiante/fancoils
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento.		

**Descripción de la visita**

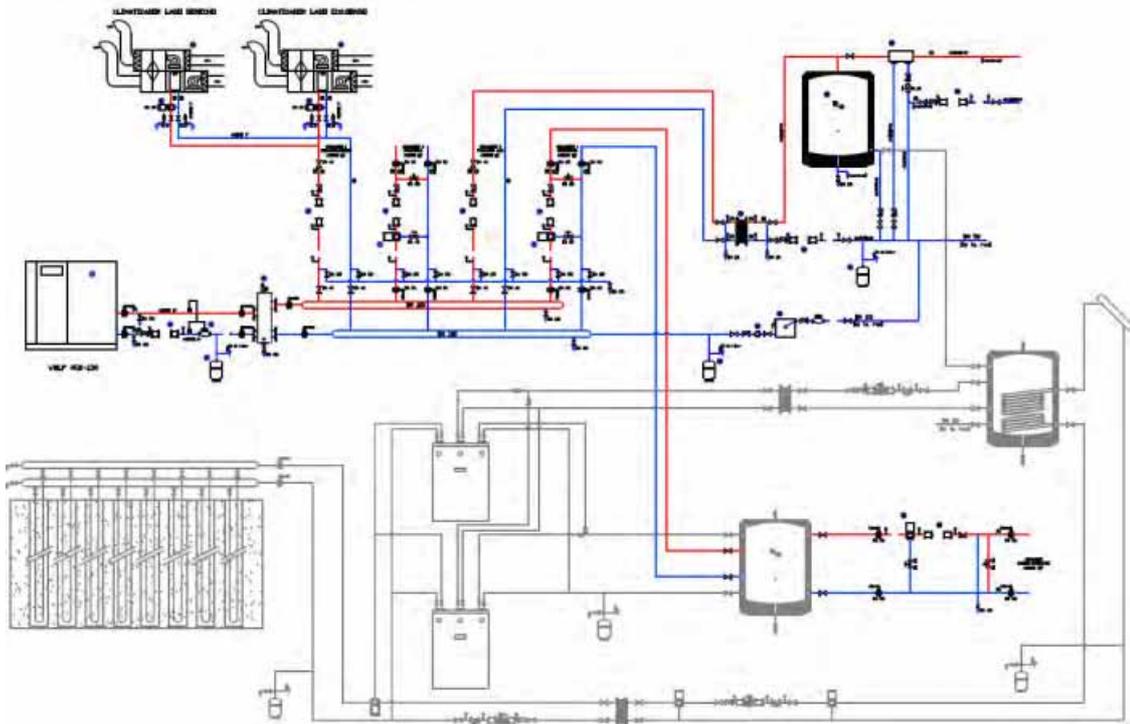
**Fotos**



Fotografías tomadas en la visita:

- Bomba de calor.
- Bombas hidráulicas de la instalación.
- Centralita de control de la bomba de calor
- Colector de sondas geotérmicas.

### Esquema de principio



### Descripción sistema

La instalación dispone de 8 pozos verticales geotérmicos con sondas geotérmicas de circuito cerrado. Los pozos se realizaron en la excavación de la obra por lo que no se dispone de arquetas, el colector de las zonas se monta en la propia sala de instalaciones.

Se instala una bomba de calor marca ECOFOREST de 70 kW de potencia térmica que abastece a un depósito de inercia térmica.

Desde el depósito de inercia se proporciona agua caliente a la instalación que cuenta con circuitos de suelo radiante para las diferentes aulas y espacios del colegio. En algunas zonas se montan unidades tipo fancoils para calefactar las estancias.

Se monta un módulo de intercambio térmico que permite disipar el calor sobrante de las placas solares térmicas en verano en el suelo a través de los pozos geotérmicos.

La instalación se apoya con una caldera de condensación que además se encarga de la generación de ACS y el apoyo al sistema de calefacción.

#### **Observaciones**

La instalación funciona correctamente. En el momento en el que se realiza la visita se puede proceder a verificar el rendimiento instantáneo del equipo, este equipo es bastante moderno y tiene posibilidad de entrar a un menú de configuraciones y datos bastante amplio en el cual se puede verificar el COP del equipo, durante visita trabajaba a un COP de 5,8 en la producción de calor.

Es un valor muy alto y hay que reseñar que el equipo estaba trabajando a un rango de modulación bajo, condición óptima para conseguir un mejor rendimiento.

El técnico de mantenimiento describe problemas en la presión de las sondas geotérmicas, pudiendo ser debidas a una fuga en alguno de los circuitos geotérmicos.

También menciona que la regulación de la instalación geotérmica no estaba bien montada desde el principio y los primeros años no se conseguía trabajar de forma correcta, después de muchos problemas se consigue regular bien la instalación, y el nivel de satisfacción actual de los técnicos de mantenimiento de la instalación es elevado.

NO se monitoriza la instalación y no se tiene control de los consumos.

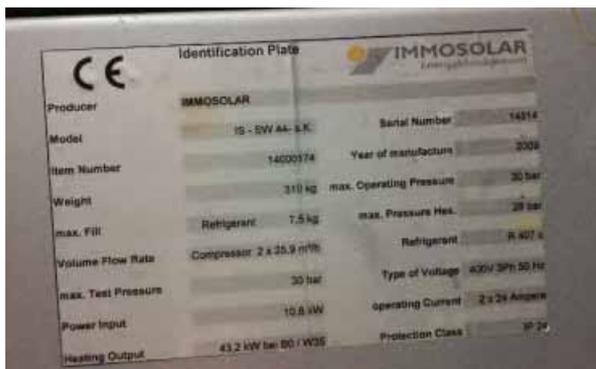
**VISITA-8**

**ASADOR ERRELEKU**

<b>Ubicación:</b>	Calle San Cosme y San Damián, 1, 31191 Cordovilla		
<b>Tipo de edificio</b>	Restaurante		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2009		
<b>Potencia instalada</b>	43,2 kW	<b>Nº pozos</b>	6 (600 metros total)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	IMMOSOLAR IS-SW 44	<b>Abastece a...</b>	Suelo radiante y sistema de refrigeración por fancoils
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento, a media potencia. Causa: 1 de los 2 compresores de la bomba de calor esta averiada desde hace 1 año.		

**Descripción de la visita**

**Fotos**



Fotografías tomadas en la visita:

- Placa de características de la bomba de calor.
- Bombas de calor geotérmica.
- Colector de pozos geotérmicos.
- Depósitos de inercia en serie y vasos de expansión.



#### Esquema de principio

No se proporciona.

#### Descripción sistema

Se instala una bomba de calor geotérmica conectada a 6 perforaciones realizadas en el jardín del restaurante, no se instalan arquetas geotérmicas y se instala un colector en la sala de instalaciones.

La bomba de calor abastece a un depósito de inercia de 600 litros, desde el que parten los circuitos de suelo radiante y de fancoils que calefactan las estancias del restaurante. La instalación está planteada para dar calor y frío a las estancias.

La instalación no trabaja para proporcionar ACS y se dispone de una caldera de gas, para la producción de ACS.

#### Observaciones

La instalación está montada en una sala de instalaciones bastante estrecha lo cual dificulta el manejo y mantenimiento de los equipos.

La bomba de calor está actualmente averiada, tiene 2 etapas de compresión y uno de los compresores está averiado, por lo tanto, la capacidad de la bomba de calor está mermada a la mitad de la potencia nominal.

Se les da un periodo de reposición de las piezas averiadas de 14 semanas, en las cuales no podrán funcionar a plena potencia. La propiedad expresa su malestar tanto con el diseño original de la instalación, en el que se infra dimensionaba el depósito de inercia no siendo capaz de abastecer a la instalación. Cierta tiempo después se les insta a instalar otro depósito de inercia.

Desde el principio han tenido problemas con el servicio técnico del equipo y no se ha respondido a sus requerimientos en lo que a la puesta a punto de la instalación se refiere.

Esto ha generado gran descontento y recelos sobre la instalación geotérmica en la propiedad, viendo el sistema como ineficaz.

No se dispone de ningún tipo de lectura de consumos ni datos.

<b>VISITA-9</b>			
<b>PISCINA MUNICIPAL LESAKA</b>			
<b>Ubicación:</b>	Komentu kalea, 2, 31770 Lesaca, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Piscinas municipales		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2009		
<b>Potencia instalada</b>	-kW	<b>Nº pozos</b>	-
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	-	<b>Abastece a...</b>	-
<b>Estado de la instalación</b>	Fuera de servicio Causa: Implantación de la instalación fallida.		
<b>Descripción de la visita</b>			
<b>Fotos</b>			
No se obtienen fotografías de la instalación.			
<b>Esquema de principio</b>			
No se obtiene esquema hidráulico de la instalación.			
<b>Descripción sistema</b>			
No se obtiene descripción de la instalación.			
<b>Observaciones</b>			
<p><b>Tras hablar con el ayuntamiento de Lesaka para concertar una visita a la instalación, se decide no visitar dicha instalación debido a las explicaciones del personal del ayuntamiento.</b></p> <p><b>Estos nos indican que la instalación geotérmica este fuera de servicio y no ha funcionado nunca, no conocen explicaciones sobre este hecho y se nos emplaza a una conversación telefónica con el mantenedor de la instalación para poder obtener más datos sobre la situación actual de la instalación.</b></p> <p><b>A la fecha de finalización del presente informe nos ha sido imposible contactar con el servicio de mantenimiento de la instalación.</b></p>			

**VISITA-10**

**CENTRO SAYOA**

<b>Ubicación:</b>	Ctra Pamplona-Irun Km 11 - 31799 - Olave(Navarra)		
<b>Tipo de edificio</b>	Centro psicogeriatrico		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2009		
<b>Potencia instalada</b>	200 kW	<b>Nº pozos</b>	27 (4050 metros)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	IMMOSOLAR IS-SW 100 a.K.	<b>Abastece a...</b>	Sistema de climatización por suelo radiante y refrescante/precalentamiento ACS
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento.		

**Descripción de la visita**

**Fotos**

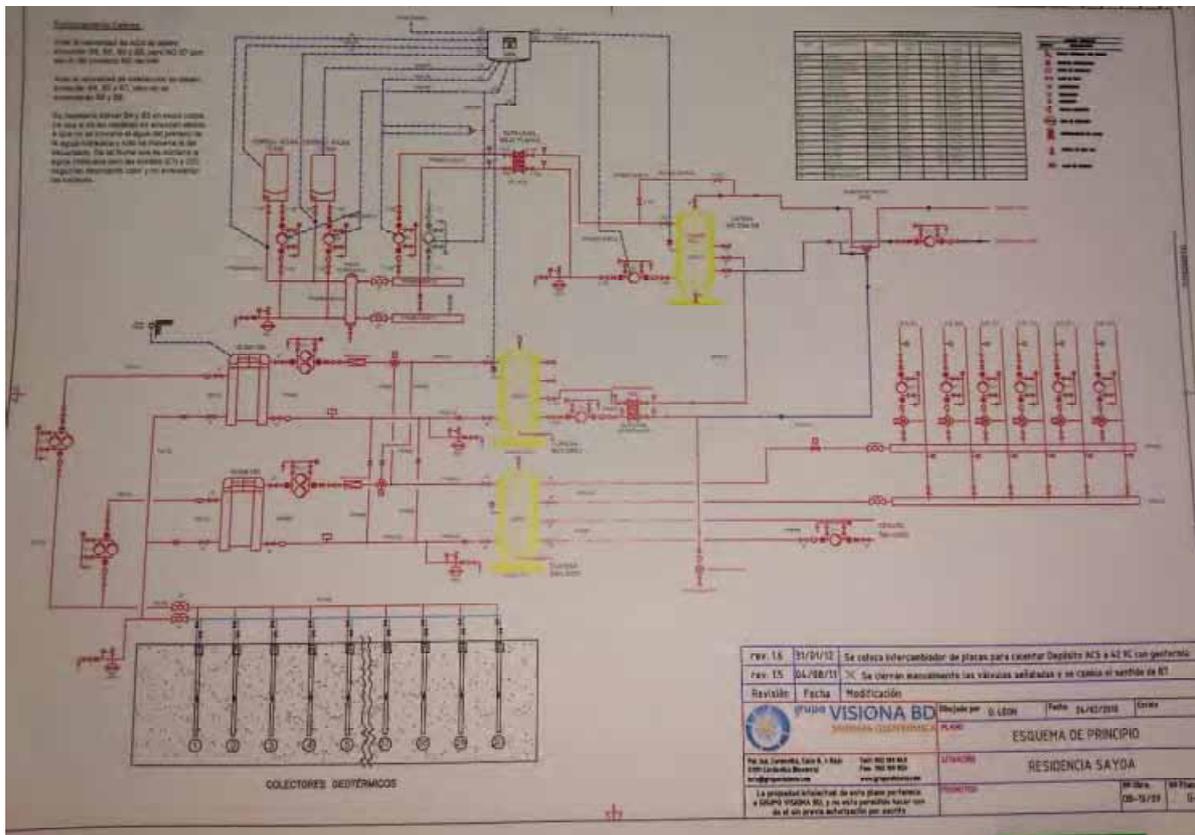




Fotografías tomadas en la visita:

- Bombas de calor geotérmica.
- Depósitos de inercia.
- Colector de pozos geotérmicos.

### Esquema de principio





#### Descripción sistema

La instalación cuenta con 2 equipos tipo bomba de calor geotérmica, abastecidos por 27 pozos geotérmicos de sondas verticales en circuito cerrado.

La instalación abastece a dos depósitos inercia térmica para el almacenamiento de calor y frío. Alimentando finalmente a los sistemas de suelo radiante/refrescante y de fancoils que se encargan de climatizar la residencia.

Para la generación de ACS se dispone de calderas de gas, y el sistema geotérmico realiza un precalentamiento del agua de red, llevándola hasta unos 40°C.

#### Observaciones

La instalación está en funcionamiento. La regulación del sistema siempre ha sido defectuosa según los técnicos de mantenimiento, aunque han ido mejorándola poco a poco.

No están contentos con el diseño inicial de la instalación. Aunque no han tenido problema de averías y la instalación parece rendir satisfactoriamente.

No hay datos de consumo energético ni eléctrico, ni seguimiento de rendimientos.

**VISITA-11**

**PISCINAS MUNICIPALES DE OTEIZA**

<b>Ubicación:</b>	Calle Iturchipia S/N, Oteiza		
<b>Tipo de edificio</b>	Piscinas municipales		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2009		
<b>Potencia instalada</b>	89,1 kW	<b>Nº pozos</b>	8 (800 metros total)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	ID ENERGY SYSTEMS TERRA MAX 700	<b>Abastece a...</b>	Sistema de calefacción del edificio y ACS
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento, únicamente para el sistema de calefacción y ACS.		

**Descripción de la visita**

**Fotos**



Fotografías tomadas en la visita:

- Bomba de calor geotérmica.
- Placa de características técnicas de la bomba
- Depósitos de inercia de la instalación geotérmica tanto de calefacción como de ACS.
- Arqueta de pozo geotérmico abierta mostrando colector de sondas geotérmicas.

#### Esquema de principio

No se proporciona.

#### Descripción sistema

El sistema dispone de dos depósitos de inercia térmica uno para el circuito de agua de calefacción y otro para un circuito primario de producción de ACS. El sistema primario de ACS se conecta por medio de un intercambiador de placas de agua a un circuito secundario, donde se genera agua caliente sanitaria de forma instantánea.

#### Observaciones

Actualmente la instalación funciona correctamente, aunque se debió de modificar todo el diseño de la sala de instalación, modificándose el esquema de principio, y pasándose a generar agua caliente sanitaria de forma instantánea, instalando un intercambiador de placas más grande con mayor poder de intercambio térmico.

Según manifiesta el servicio de manteniendo de las piscinas, la bomba de calor instalada en primera instancia se averió, y se debió de sustituir por un equipo nuevo.

Es reseñable que la empresa instaladora no consiguió hacer funcionar la instalación correctamente, y tras años de deficiencias en las prestaciones de la misma, el propio servicio de mantenimiento de las instalaciones consiguió hacer funcionar la instalación de forma adecuada al uso necesario.

El planteamiento de la instalación parece inadecuado para la simplicidad del edificio, y probablemente la bomba de calor está sobredimensionada, ya que la propiedad manifiesta que únicamente se calefactan unos 200 m<sup>2</sup>.

Por otra parte, se deja constancia de la opinión acerca de la instalación geotérmica implantada en la instalación por parte del servicio de mantenimiento del ayuntamiento de Oteiza, por la cual expresan su descontento con la instalación diseñada en 1ª instancia. Sin embargo, una vez corregidos por ellos mismos los errores en la instalación y tras muchos años de pruebas, expresan su satisfacción con el sistema y como se parecían los ahorros energéticos esperados.

Debido al sobredimensionamiento de la instalación y a los sucesivos años de mal funcionamiento, acompañado de un consumo no muy exhaustivo de las instalaciones, se cree que la inversión acometida en este caso no ha sido amortizada.

En instalaciones como esta de poco consumo energético y donde predomina la demanda de ACS, no es muy recomendable el uso de este tipo de instalaciones, ya que no son las que mejor se adaptan a las necesidades del edificio.





#### Esquema de principio

No se proporciona.

#### Descripción sistema

El sistema geotérmico es de pozos abiertos. Únicamente dispone de 2 pozos de unos 30 metros cada uno. Uno de ellos de bombeo y otro de vertido. En este sistema se capta agua subterránea mas abajo de la capa freática. Y esta agua tras ser filtrada se hace pasar por 2 intercambiadores de placas de agua para ceder energía térmica a un circuito primario conectado las bombas de calor geotérmicas. De esta forma se separa hidráulicamente los 2 circuitos, de esta forma no se introduce agua freática con posibles partículas en suspensión en las bombas de calor geotérmicas, evitándose así posibles averías de los equipos.

A partir de aquí la instalación funciona como cualquier sistema de bombas de calor conectando las salidas de energía térmica de la bomba con un depósito de inercia para acumulación de energía.

Después este se conecta por medio de bombas hidráulicas a los diferentes circuitos de suelo radiante del edificio. El sistema no aporta refrigeración ni ACS.

Es vital la separación hidráulica entre el sistema de pozos y el primario de las bombas de calor, así como la instalación de un filtro de particular para la propia protección de los intercambiadores de placas.

**Observaciones**

La instalación funciona correctamente, no se describen por parte de la empresa mantenedora ninguna incidencia relevante. El sistema abierto minimiza la inversión en pozos geotérmicos y mientras disponga de la necesaria autorización de la Confederación Hidrográfica del Ebro, como es el caso de la presente instalación. Esta baja inversión hace mucho más fácil de amortizar la inversión inicial que en un sistema cerrado, aunque no siempre se puede optar por este tipo de soluciones, siendo imprescindible tener un nivel freático adecuado y autorización de los organismos competentes.

**VISITA-13**
**24 UNIFAMILIARES EN TUDELA**

<b>Ubicación:</b>	Carretera de Aoiz, s/n, 31486 Elcano, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Hospital		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2009		
<b>Potencia instalada</b>	78 kW	<b>Nº pozos</b>	10
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	NIBE FIGHTER 1330 (2)	<b>Abastece a...</b>	Sistema de climatización del Edificio y ACS
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento.		

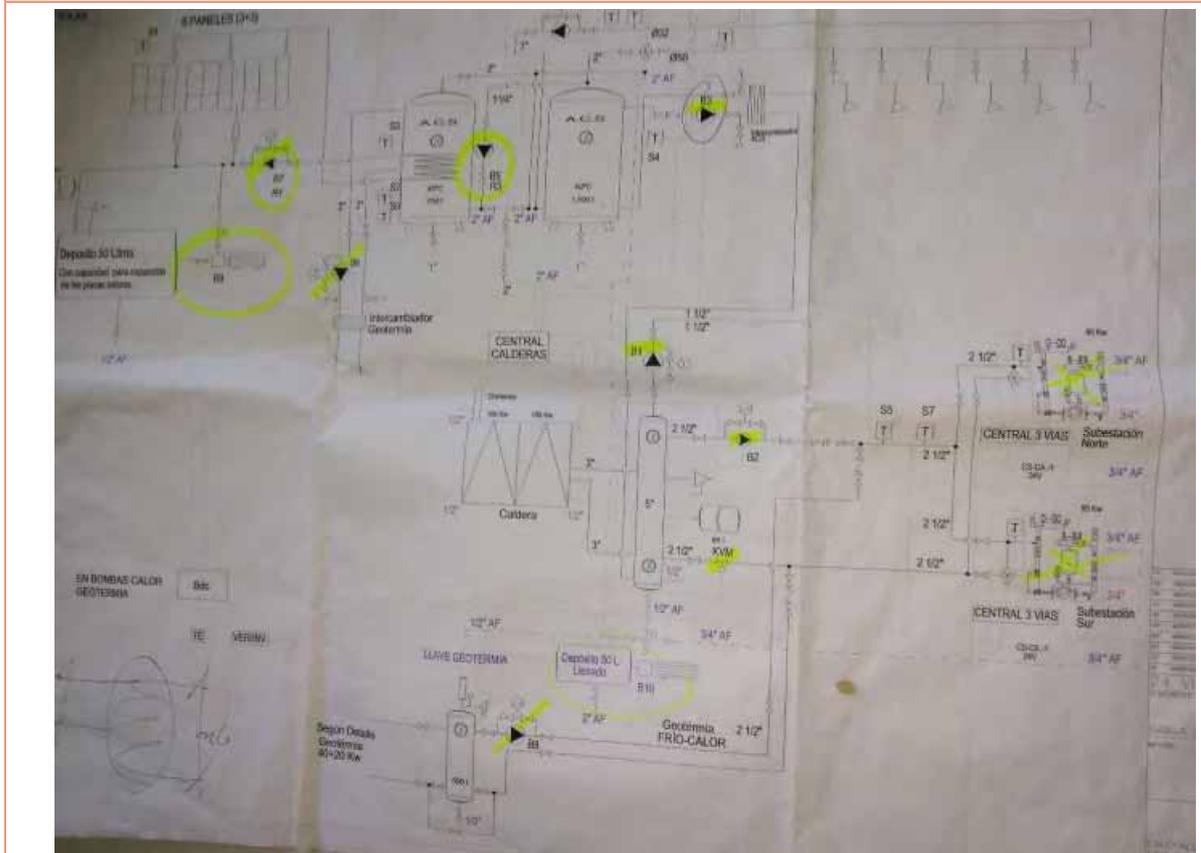
**Descripción de la visita**
**Fotos**




Fotografías tomadas en la visita:

- Bomba de calor geotérmica.
- Modulo hidronico de la bomba de calor geotérmica.
- Colector de sondas geotérmicas (10 pozos)
- Depósito de inercia de la instalación geotérmica.

### Esquema de principio



### Descripción sistema

El sistema abastece a 24 vivienda unifamiliares que disponen de un sistema de generación de calor centralizado.

El sistema se compone de una instalación de geotermia para la producción de calor y frío que abastece a los suelos radiantes y refrescantes de las viviendas. Un sistema de placas solares térmicas para la generación de ACS y una caldera de condensación de gas natural para el apoyo al sistema de calefacción y generación de ACS.

La instalación geotérmica consta de 10 pozos verticales con sondas geotérmicas, que se conectan a 2 equipos de bombas de calor geotérmica con sendas unidades hidrónicas. Desde las unidades hidrónicas se llevan los circuitos térmicos hasta un depósito de inercia para calor o frío, desde el que se distribuye a la instalación de suelo radiante de las viviendas.

Cuando el sistema no es capaz de abastecer las demandas de las viviendas se pone en marcha la caldera de condensación.

El ACS no se conecta con el sistema de geotermia y únicamente se abastece desde la instalación solar térmica y la caldera de gas natural existente.

### Observaciones

La instalación funciona correctamente, aunque se echa de menos algún sistema de monitorización que pudiese cuantificar los consumos de cada una de las partes que integran la instalación. De esta forma se podrían incluir programadores que optimizaran los funcionamientos de los equipos para conseguir el mejor desempeño energético, minimizando el consumo energético y el coste energético.

La instalación presenta ciertas deficiencias de diseño, no se implementó correctamente la posibilidad de apoyar a la producción de ACS mediante la geotermia, y el Servicio técnico Autorizado de las bombas de calor es inexistente, en palabras de los técnicos mantenedores de la instalación, que han tenido problemas con las bombas por este motivo.

Se sugiere a la propiedad la implementación de contadores de energía la salida de las bombas de calor geotérmicas y de un contador de energía eléctrica consumida de las mismas, para poder medir el rendimiento de la instalación. También se sugiere la implementación de termómetros en los colectores de las sondas geotérmicas para poder cuantificar el potencial de intercambio térmico de ellos pozos.

**VISITA-14**

**AYUNTAMIENTO DE NOAIN**

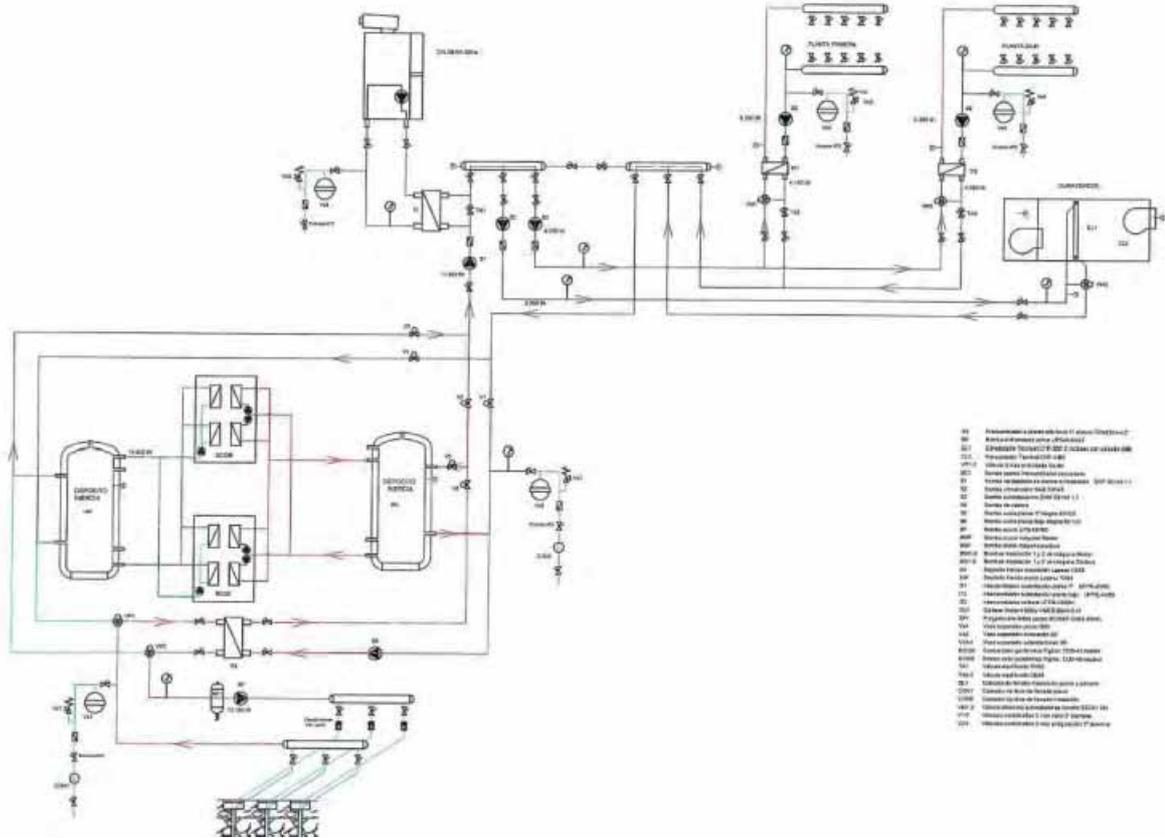
<b>Ubicación:</b>	Plaza de los Fueros, 3, 31110 Noáin, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Edificio administrativo		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2010		
<b>Potencia instalada</b>	(2x39) 78 kW	<b>Nº pozos</b>	14 (2800 metros total)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	NIBE FIGHTER 1330-40	<b>Abastece a...</b>	Sistema de climatización por suelo radiante y fancoils
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento, no a pleno rendimiento, una de las bombas esta averiada.		

**Descripción de la visita**

**Fotos**



### Esquema de principio



### Descripción sistema

La instalación cuenta con 14 pozos geotérmicos profundos de 200 metros cada uno. Se montan sondas geotérmicas verticales de circuito cerrado que se unen en un colector general en la sala de instalaciones.

Las sondas conectan con la bomba de calor geotérmica en este caso 2 equipos en cascada de 79 kW en conjunto. Trabajan contra 2 depósitos de inercia para almacenar frío y calor, utilizado en el suelo radiante/refrescante y los fancoils y unidades de tratamiento de aire primario ubicados en el edificio.

Una caldera de condensación de gas se ocupa de apoyar al sistema.

### Observaciones

Desde el principio la instalación no ha trabajado correctamente, teniendo problemas de regulación que impedían un correcto funcionamiento de la misma.

La empresa instaladora y mantenedora original y el servicio técnico de las bombas de calor no ofreció un servicio satisfactorio alargándose en el tiempo esta situación, con el consiguiente descontento de la propiedad del edificio.

Años más tarde y con la participación de terceras personas y otras empresas de mantenimiento

ajenas a la instalación original se pudieron corregir los fallos de diseño, optimizándose la instalación.

A día de hoy la propiedad muestra cierta satisfacción con el desempeño energético de la instalación, mostrándonos datos de consumos entre años en los que la geotermia no ha funcionado y a los últimos años en los que sí ha funcionado, esto acompañado de varias medidas de ahorro energético muestra una bajada interesante en el consumo.

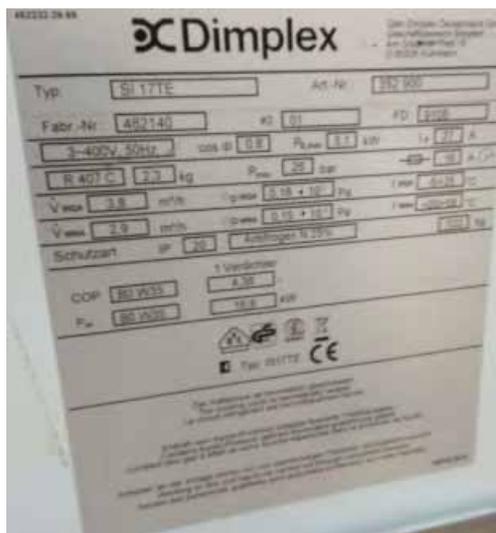
Se adjuntan consumos totales de electricidad y gas desde 2012, no se pueden sacar rendimientos de equipos, ya que no están individualizados, aunque se puede sacar alguna conclusión.

Mes / Año	2012				2013				2014			
	Electricidad		Gas		Electricidad		Gas		Electricidad		Gas	
	kwh	euros	kwh	euros	kwh	euros	kwh	euros	kwh	euros	kwh	euros
Enero	8.572	1.476			5.044	961			11.246	1.770	1.573	205
Febrero	10.990	1.830	45.221	2.567	6.923	1.310	54.778	3.771	12.680	1.437	0	97
Marzo	8.825	1.491			6.730	1.260	7.929	560	10.484	1.202	0	97
Abril	6.874	1.262	32.072	1.891	5.895	1.152	24.127	1.489	8.914	1.126	0	100
Mayo	4.244	900			3.816	868			7.854	1.185	0	121
Junio	4.596	939	7.201	551	2.759	645	22.028	1.395	5.603	980	0	100
Julio	15.488	2.728			3.474	813			4.099	864	0	128
Agosto	16.414	2.945	2.367	289	9.804	1.781	56	189	3.456	796	0	93
Septiembre	11.971	2.245			3.429	883			3.235	767	0	97
Octubre	12.037	2.331	6.613	566	4.180	1.008	0	102	4.189	881	0	107
Noviembre	13.616	2.464			4.036	1.050	5.975	475	8.333	1.374	0	111
Diciembre	6.041	1.130	28.379	1.983	8.207	1.547	20.688	1.294	8.833	1.337	224	113
	119.668	21.741	121.853	7.847	64.297	13.278	135.581	9.275	88.926	13.719	1.797	1.369
		<b>241.521</b>		29.588		<b>199.878</b>		22.553		<b>90.723</b>		15.088

Mes / Año	2015				2016				2017			
	Electricidad		Gas		Electricidad		Gas		Electricidad		Gas	
	kwh	euros	kwh	euros	kwh	euros	kwh	euros	kwh	euros	kwh	euros
Enero	12.030	1.952	134	123	9.194	1.222	167	71	12.011	2.185	0	6
Febrero	12.914	1.906	1.650	121	9.013	1.096	1.157	91	8.656	1.368	6	6
Marzo	8.501	1.298	3.069	213	7.369	928	4.638	336	7.674	1.143	30	11
Abril	8.018	1.296	4.014	206	5.168	698	4.895	354	5.464	903	9	13
Mayo	4.833	924	2.382	71	2.368	519	5.730	413	4.107	792	25	15
Junio	1.334	334	0	10	2.197	531	2.648	196	2.669	609	8	13
Julio	2.235	609	0	12	2.054	528	0	11	2.566	595	0	13
Agosto	2.557	627	0	10	2.397	571	0	11	3.129	659	0	13
Septiembre	2.979	670	0	11	3.036	627	248	28	3.580	722	165	23
Octubre	3.849	775	1.275	104	4.963	913	276	30	5.063	967	145	23
Noviembre	7.569	1.238	4.305	323	8.794	1.362	76	16	10.032	1.600	40	15
Diciembre	10.082	1.540	526	49	10.197	1.650	4	11	11.761	1.828	11	14
	76.901	13.169	17.355	1.253	66.750	10.646	19.839	1.569	76.712	13.371	439	165
		<b>94.256</b>		14.422		<b>86.589</b>		12.215		<b>77.151</b>		13.536

**VISITA-15**
**APARTAMENTOS TURÍSTICOS EN UJUE**

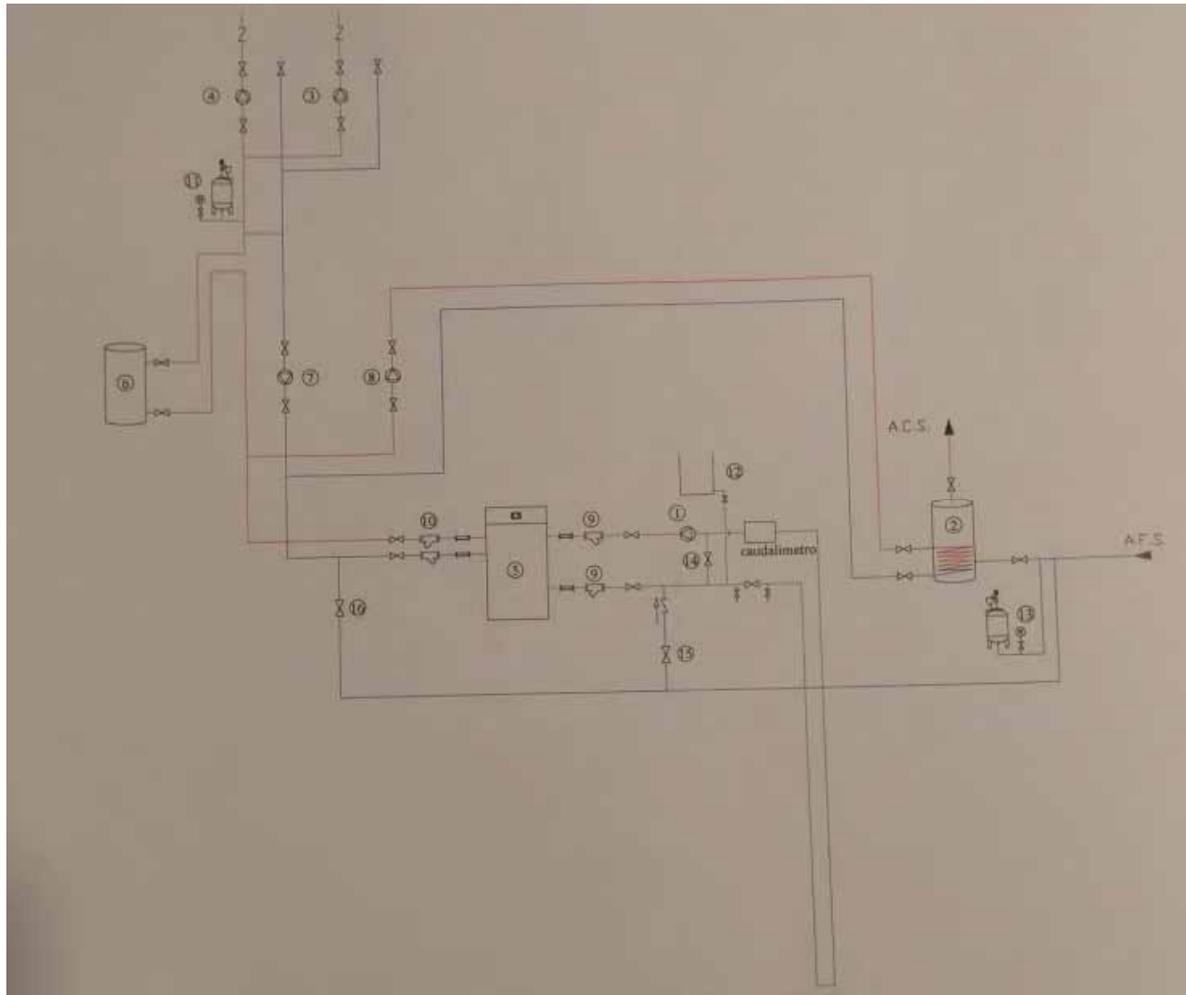
<b>Ubicación:</b>	Calle San Isidro nº 32		
<b>Tipo de edificio</b>	Apartamentos turísticos		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2010		
<b>Potencia instalada</b>	17 kW	<b>Nº pozos</b>	4 (512 metros total)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	IEP GEOTERMIA	<b>Abastece a...</b>	Sistema de climatización por suelo radiante/refrescante/fancoils y ACS
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento.		

**Descripción de la visita**
**Fotos**


Fotografías tomadas en la visita:

- Conexión de las sondas geotérmicas en el interior del edificio.
- Instalación de geotermia para los apartamentos.
- Placa de características técnicas de la bomba de calor geotérmica.

### Esquema de principio



### Descripción sistema

La instalación abastece a 4 apartamentos turísticos y una vivienda de unos 100 m<sup>2</sup> cada uno. La instalación es únicamente geotérmica, sin ningún tipo de apoyo.

Hay 4 pozos verticales de sondas geotérmicas de circuito cerrado, de unos 128 metros cada uno. Estos pozos abastecen a una bomba de calor geotérmica de 17 kW. La bomba genera la energía térmica necesaria para calefactar los apartamentos mediante un suelo radiante/refrescante y para la producción de ACS.

Para ello, se disponen de 2 depósitos unos de inercia para la calefacción y refrigeración y otro para

la acumulación de ACS.

Además, se instala un módulo de enfriamiento pasivo, por el cual se puede generar el agua fría para el refrescamiento del suelo, mediante el agua directamente recirculada por los pozos geotérmicos.

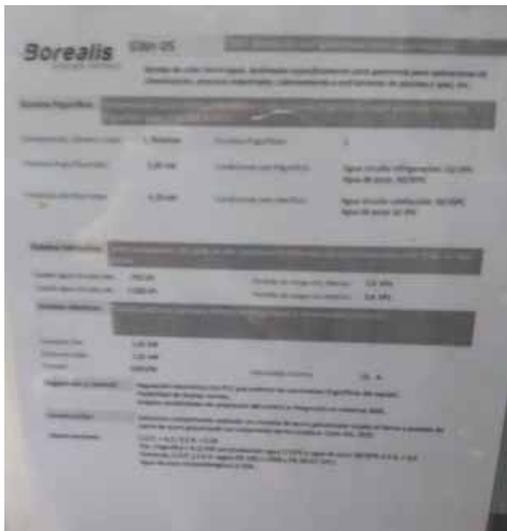
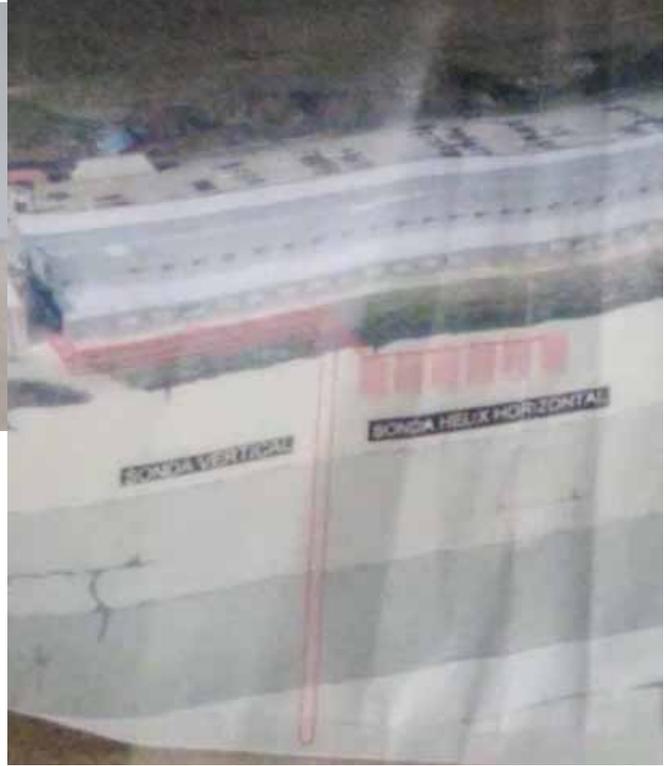
#### **Observaciones**

La instalación funciona correctamente, está bien dimensionada y no está generando problemas en los usuarios. Se encuentran bien atendidos en lo referente a mantenimiento de los equipos, por lo que nunca han tenido los equipos parados.

Se considera una solución óptima para un establecimiento de este tipo, ubicado en un pequeño pueblo donde no siempre es accesible la incorporación de infraestructuras del tipo gas natural o GLP.

La propiedad muestra su satisfacción con el desempeño de la instalación y notan como el consumo energético es el adecuado, confirmando sus expectativas de ahorro energético.

VISITA-16			
CENIFER			
Ubicación:	Calle Aduana, s/n, 31119 Imarcoain, Navarra		
Tipo de edificio	Educativo		
Instalación			
Tipología	3 Bombas de calor geotérmica (agua-agua) mediante una sonda geotérmica vertical y una sonda en hélice en circuito cerrado		
Año de instalación	2016		
Potencia instalada	17 kW	Nº pozos	2 1 sonda vertical 120m. 1 sonda en hélice 3 circuitos con 3 hélices (5mx1m).
Modelo Bomba Geotermia	IEP GEOTERMIA CIATESA VAILLANT	Abastece a...	Sistema de climatización por suelo radiante/ sistemas didácticos
Estado de la instalación	En funcionamiento.		
Descripción de la visita			
Fotos			





**CIATESA** P.C. (Llave de Anillo) 14350 MONTILLA (CORDOBA) 0800061778

WCU	CF 20	WU	3000000	P.P.	30	bar	h	1
INTERCAMBIADORES INTERIORES								
1.2	kW (FRIO)	0.2	kW (CALOR)	0.22	bar	h	10	bar
INTERCAMBIADORES EXTERIORES								
WPE	X	WPE		W.P.	30	bar	h	X
RECUPERADORES DE CALOR								
X	kW (CALOR)			W.P.	X	bar	h	X
COMPRESORES								
W-RTC	0.60	kg		PCBO (RUNC)	75	kg		
FASES								
WRO	230	V		50	Hz		1.35	kg
WRO	3.5	A (PC)		13.5	A (PC)		4.7	kg
WRO	3.3	A (PK)		13.5	A (PK)		4.7	kg
WRO	LINE	60	602					

Fotografías tomadas en la visita:

- Instalación geotérmica para suelo radiante de laboratorio.
- Esquema de sondas geotérmicas
- Placa de la bomba geotérmica VAILLANT
- Bomba de calor CIATESA
- Bomba de calor BOREALIS (IEP GEO)
- Hoja de características técnicas bomba de calor BOREALIS (IEP GEO)
- Sondas geotérmicas
- Distribuidores de tuberías.
- Placa de características Bomba de calor CIATESA

#### Esquema de principio

No se proporciona.

#### Descripción sistema

La instalación cuenta con 3 bombas de calor:

Una bomba de calor para suelo radiante marca VAILLANT geoTHERM VWS 81/2 de 8 kW que se alimenta a través de 2 pozos geotérmicos experimentales, uno de 120 metros de profundidad con una sonda doble y otro con una sonda de hélice de 3 circuitos a una profundidad de 5 metros y 1 metro de diámetro. La energía intercambiada de estos pozos y de una instalación solar térmica se almacena en un depósito de inercia. Desde este depósito se alimenta el primario de la bomba de calor. Y luego se intercambia la energía en intercambiador para alimentar al colector de suelo radiante del laboratorio. Es una instalación de climatización, aunque a modo de ejemplo.

En el laboratorio de geotermia se ubican las otras 2 bombas de calor geotérmicas muy pequeñas también alimentadas por los anteriores pozos para realización de prácticas por los alumnos y sin ningún tipo de uso en el edificio.

#### Observaciones

La instalación funciona correctamente, aunque es difícil de valorar su funcionalidad, son instalaciones de ejemplo y únicamente se usan para enseñanza de los alumnos del centro.

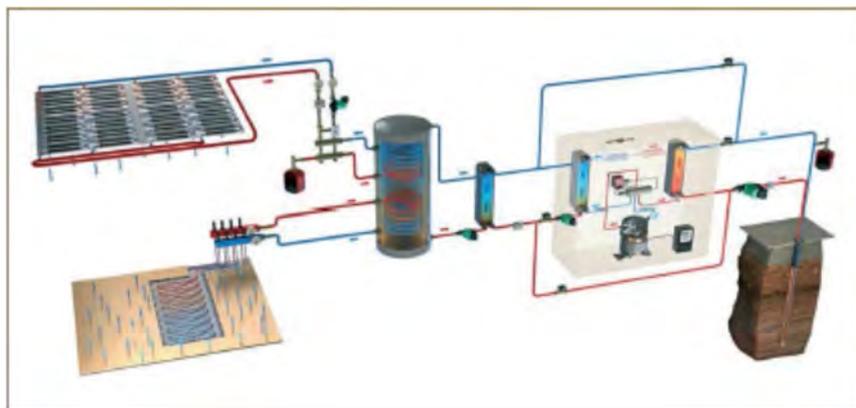
**VISITA-17**

**C.I.P. VIRGEN DEL CAMINO**

<b>Ubicación:</b>	Calle de Imárcoain, 1, 31015 Pamplona, Navarra		
<b>Tipo de edificio</b>	Educativo		
<b>Instalación</b>			
<b>Tipología</b>	Bomba de calor geotérmica (agua-agua) mediante sondas geotérmicas verticales en circuito cerrado		
<b>Año de instalación</b>	2013		
<b>Potencia instalada</b>	6 kW	<b>Nº pozos</b>	2 (200 metros total)
<b>Modelo Bomba Geotermia</b>	TCHEY·THHEV t 05·1 t 2	<b>Abastece a...</b>	Sistema de climatización por suelo radiante/techo refrescante
<b>Estado de la instalación</b>	En funcionamiento.		

**Descripción de la visita**

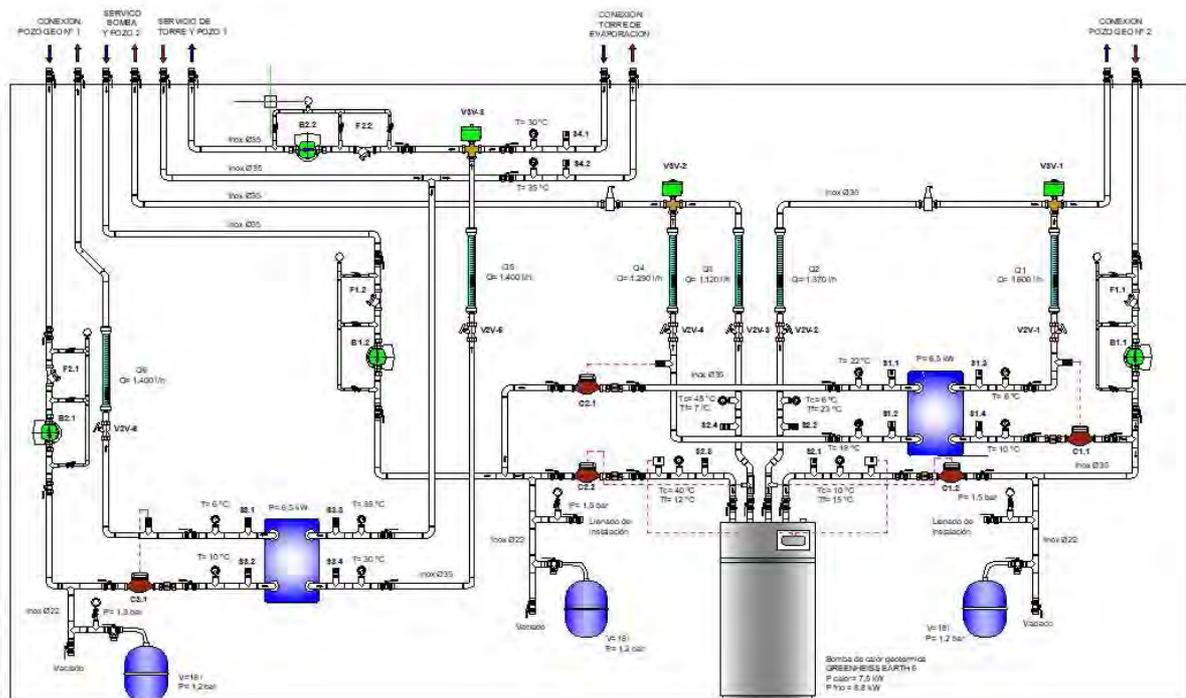
**Fotos**



Fotografías tomadas en la visita:

- Conexión de las sondas geotérmicas en el interior del edificio.
- Instalación de geotermia para los apartamentos.
- Placa de características técnicas de la bomba de calor geotérmica.

### Esquema de principio



### Descripción sistema

La instalación abastece a un suelo radiante y a un techo refrescante para climatizar alguna estancia, dado la potencia de la bomba no se puede utilizar en mucha superficie, únicamente se usa en una estancia de pruebas.

Por ello el sistema es bastante complejo y con infinitud de posibilidades, debido a su uso didáctico.

Dispone de dos intercambiadores para trabajar contra el suelo y el techo radiante/refrescante.

### Observaciones

A modo de comentario se manifiesta por parte del profesorado que gestiona el equipo ciertos problemas con los flujostatos del equipo, durante su uso.

La instalación funciona correctamente, aunque es difícil de valorar su funcionalidad, son instalaciones de ejemplo y únicamente se usan para enseñanza de los alumnos del centro.

## **8 ANÁLISIS DE DATOS SOBRE LAS INSTALACIONES EXISTENTES EN NAVARRA**

## 8.1 ANALISIS DE INSTALACIONES EXISTENTES

### 8.1.1 ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES EXISTENTES POR USO

Clasificando las instalaciones de geotermia existentes en Navarra por tipología de uso se llega a la conclusión de que la gran mayoría, un 76% de ellas están destinada a abastecer las necesidades energéticas de residencias privadas, bien viviendas unifamiliares o bien bloques de viviendas. En segundo plano y con porcentajes similares se encuentran el resto de usos.

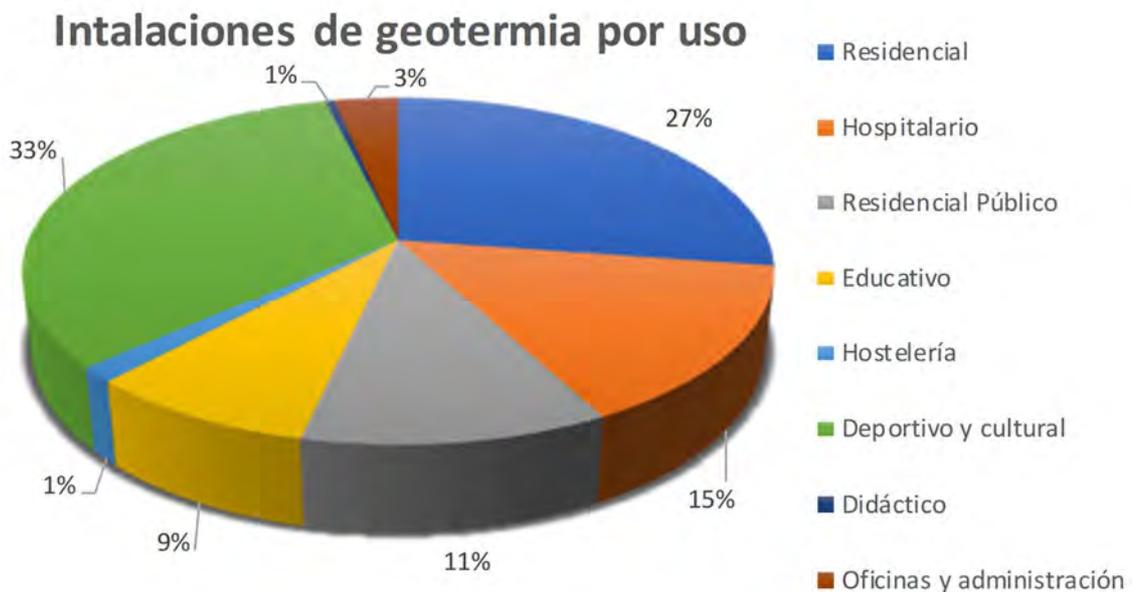
Intalaciones de geotermia por uso	
Uso	nº
Residencial	63
Hospitalario	1
Residencial Público	3
Educativo	4
Hostelería	1
Deportivo y cultural	6
Didáctico	3
Oficinas y administración	2



No obstante, si la clasificación se hace en base a la potencia instalada en cada tipo de uso, los porcentajes varían acusadamente. Así pues, aunque como se ha visto, las instalaciones en el ámbito doméstico son las más numerosas (63), con respecto a la potencia instalada sólo ocupan un 27%. Esto es porque la mayoría de ellas son instalaciones de muy pequeña

potencia. Al contrario, sucede con usos como el deportivo y cultural y hospitalario, que con 6 y 1 instalaciones consiguen fracciones de potencia instalada del 33% y 15% respectivamente.

Potencia instalada de geotermia por uso	
Uso	Kw
Residencial	879,37
Hospitalario	480
Residencial Público	359,9
Educativo	271
Hostelería	44
Deportivo y cultural	1060
Didáctico	15
Oficinas y administración	105

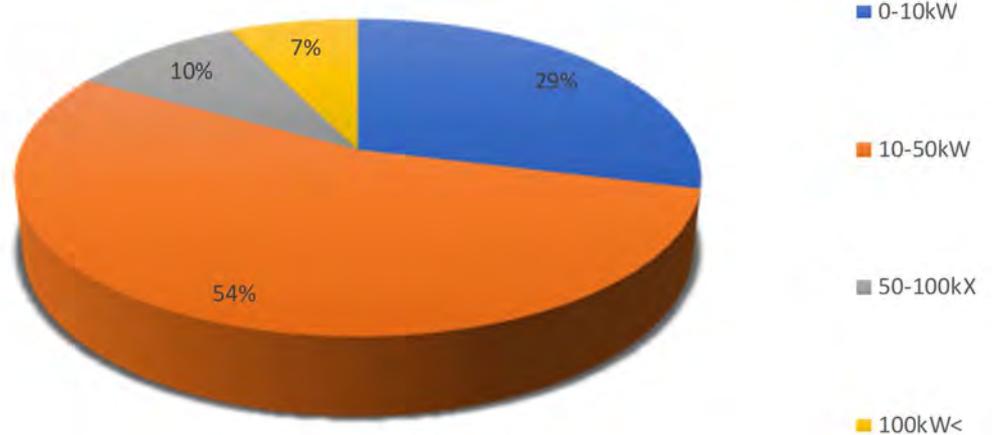


### 8.1.2 ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES EXISTENTES POR POTENCIA INSTALADA

La potencia instalada de las instalaciones existentes en Navarra es amplia. De todas ellas, algo más de la mitad se encuentran en el rango de potencia de entre 10-50kW seguidas por un 26% de ellas que forman el grupo de las instalaciones de menor potencia, 0-10kW.

Instalaciones de geotermia por potencia instalada	
Potencia instalada (kW)	nº
0-10kW	24
10-50kW	45
50-100kW	8
100kW<	6

## Instalaciones de geotermia por potencia instalada



### 8.2 ANÁLISIS DE INSTALACIONES VISITADAS

***Las instalaciones didácticas de los centros educativos de C.I.P. Virgen del Camino y CENIFER no se incluye los siguientes análisis, ya que son instalaciones didácticas de muy poco tamaño y no se pueden analizar como una instalación convencional.***

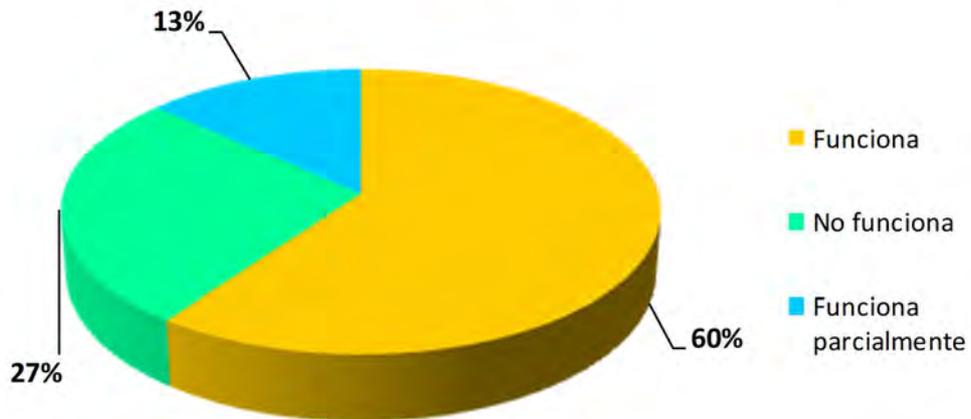
#### 8.2.1 ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES VISITADAS ATENDIENDO AL FUNCIONAMIENTO

En lo que concierne al funcionamiento de las instalaciones de geotermia que se han podido visitar, sólo el 60% de ellas funciona sin problemas. El 27% y 13% restantes se corresponden con instalaciones que o bien no funcionan o bien funcionan a carga parcial ya que alguno de los equipos que constituyen la instalación están averiados.

Es preciso mencionar que muchas de estas instalaciones no se encuentran en funcionamiento por problemas relacionados con el dimensionamiento de la instalación y con el mantenimiento de ella.

Estado de las instalaciones geotérmicas visitadas	
Estado de las instalaciones geotérmicas visitadas	nº
Funciona	9
No funciona	4
Funciona parcialmente	2

### ESTADO DE LAS INSTALACIONES GEOTÉRMICAS VISITADAS

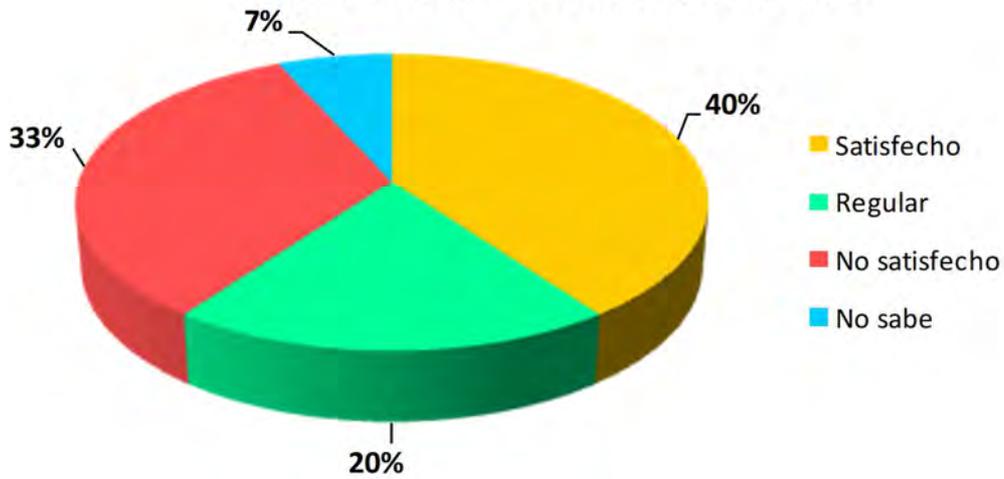


#### 8.2.2 ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES VISITADAS ATENDIENDO A LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO

La actitud de satisfacción de los usuarios de las instalaciones geotérmicas visitadas está muy ligada al funcionamiento de la instalación. Sin embargo, es importante destacar que de todas las instalaciones que funcionan no todos los usuarios se sienten completamente satisfechos de esta tecnología.

Satisfacción de los usuarios	
Estado	nº
Satisfecho	6
Regular	3
No satisfecho	5
No sabe	1

### SATISFACCIÓN DE LOS USUARIOS DE LAS INSTALACIONES GEOTÉRMICAS VISITADAS

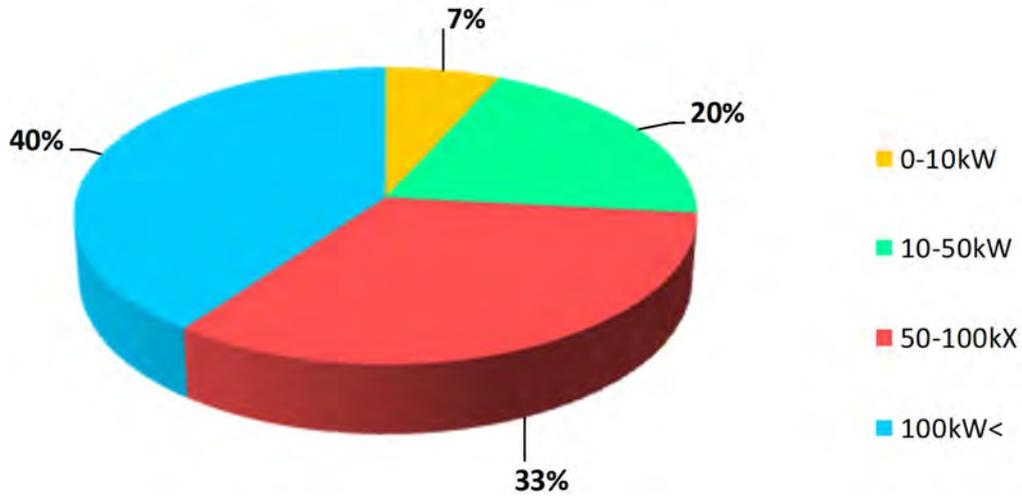


#### 8.2.3 ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES VISITADAS POR POTENCIA

De las instalaciones visitadas un 40% y un 33% se corresponden con instalaciones que entran en los rangos de potencia más altos, es decir, más de 100kW o entre 50 y 100kW, respectivamente.

Potencia de las instalaciones geotérmicas visitadas	
Potencia instalada (kW)	nº
0-10kW	1
10-50kW	3
50-100kW	5
100kW<	6

### POTENCIA DE LAS INSTALACIONES GEOTÉRMICAS VISITADAS

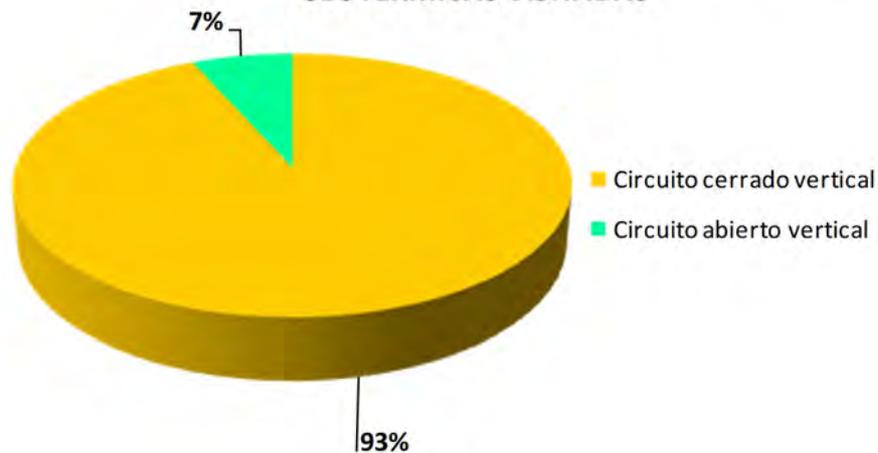


#### 8.2.4 ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES VISITADAS POR TIPO DE SISTEMA INSTALADO

Se destaca que prácticamente la totalidad de las instalaciones visitadas, un 93%, se corresponden con una tipología de instalación de circuito cerrado vertical. Únicamente 1 de ellas era de circuito abierto vertical.

Tipología de sistemas de las instalaciones geotérmicas visitadas	
Tipo de instalación	nº
Circuito cerrado vertical	14
Circuito abierto vertical	1

### TIPOLOGÍA DE SISTEMAS DE LAS INSTALACIONES GEOTÉRMICAS VISITADAS





## **9 ANÁLISIS COMPARATIVOS DE COSTES DE INSTALACIONES**

## 9.1 ANÁLISIS EN INSTALACIONES DE BAJO CONSUMO

### VIVIENDA UNIFAMILIAR DE 200m<sup>2</sup>

El cálculo de este apartado se ha realizado utilizando como ejemplo una vivienda unifamiliar tipo de 200 m<sup>2</sup> de superficie, 4 dormitorios y 5 usuarios. Las demandas anuales en kWh de calefacción, refrigeración y ACS que se han estimado son las siguientes:

$$\text{Demanda calefacción} = 70 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 200\text{m}^2 = 14.000 \text{ kWh/año}$$

$$\text{Demanda refrigeración} = 25 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 200\text{m}^2 = 5.000 \text{ kWh/año}$$

$$\begin{aligned} \text{Demanda ACS} &= 5 \frac{\text{ duchas}}{\text{ día}} \cdot 28 \frac{\text{ l}}{\text{ ducha}} \cdot 365 \frac{\text{ días}}{\text{ año}} \cdot 50 \cdot 0,001163 \cdot 1,20 \\ &= 3.565,75 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

La inversión inicial necesaria para cada tecnología ha sido calculada incluyendo el coste de las unidades terminales de la vivienda, en este caso suelo radiante. En primer lugar, se calcula la diferencia económica entre cada inversión y el sistema convencional. En segundo lugar, se estima para cada tipo de tecnología un consumo de energía final a partir de los rendimientos asociados a cada tecnología y el coste anual asociado al consumo. Por último, a partir del primer y segundo pasos se llega a estimar el ahorro anual que se consigue al utilizar cada instalación en lugar del sistema convencional.

	Instalación	Coste inicial	Diferencia stma convencional	Rendimientos	C.E.F	C.E.P nr	kg CO2	Coste anual	Ahorro respecto al stma.convencional año1
C	Geotermia	36.847,80	16.347,80	4,5	3.111,11	6.244,00	2.229,11	311,11 €	446,03 €
R				5,5	909,09	1.824,55	651,36	90,91 €	109,09 €
ACS				3,5	1.018,79	2.044,71	729,96	101,88 €	33,11 €
Total								503,90 €	588,23 €
C	Aerotermia	24.742,00	4.242,00	3,8	3.684,21	7.394,21	2.639,73	368,42 €	388,72 €
R				3,6	1.388,89	2.787,50	995,14	138,89 €	61,11 €
ACS				2,5	1.426,30	2.862,59	1.021,94	142,63 €	-7,64 €
Total								649,94 €	442,19 €
C	Biomasa	23.000,00	2.500,00	0,95	14.736,84	1.252,63	22,55	632,21 €	124,93 €
R				2,5	2.000,00	4.014,00	1.433,00	200,00 €	0,00 €
ACS				0,95	3.753,43	319,04	5,74	161,02 €	-26,03 €
Total								993,23 €	98,90 €
C	Convencional	20.500,00	-	0,98	14.285,71	17.000,00	4.284,00	757,14 €	
R				2,5	2.000,00	4.014,00	1.433,00	200,00 €	
ACS				0,98	2.546,97	3.030,89	763,79	134,99 €	
Total								1.092,13 €	

Cabe destacar que el sistema convencional cuenta además con sistema solar térmico que abastece al unifamiliar en un 30% del ACS total. Por tanto, este 30% no se tiene en cuenta en el cálculo del coste anual del sistema convencional.

Por otro lado, los precios utilizados en el cálculo son:

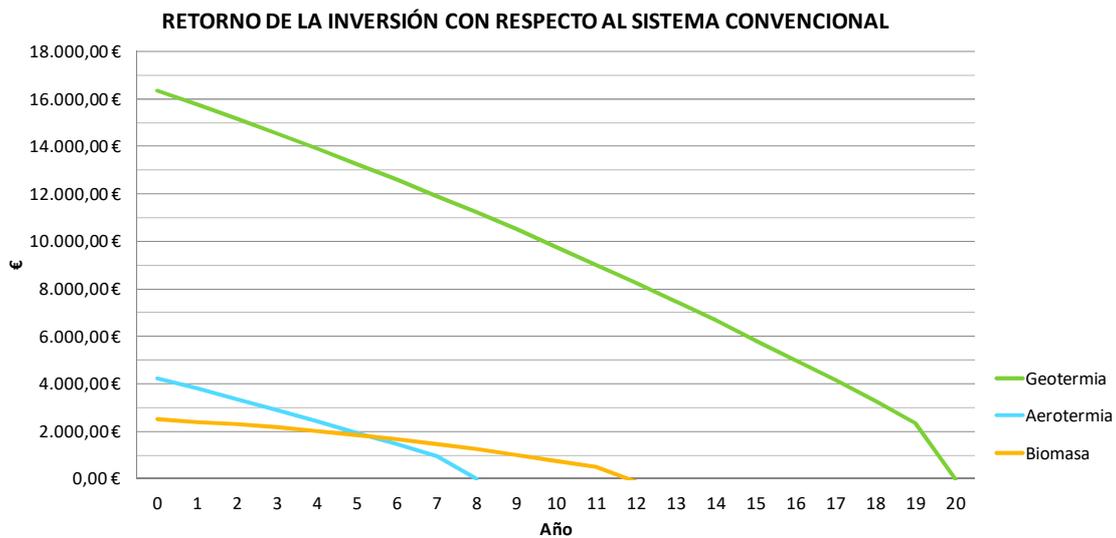
$$kWh \text{ eléctrico} = 0,1 \text{ €}$$

$$kWh \text{ gas} = 0,053 \text{ €}$$

$$kWh \text{ pelets} = 0,0429 \text{ €}$$

Hay que mencionar que se ha considerado un aumento anual sucesivo en el precio de la electricidad, del gas y de los pelets del 4%, 3% y 1,5%, respectivamente.

Como se comprueba mediante la gráfica siguiente, las instalaciones de aerotermia son las que antes recuperan la inversión, 8 años; seguidas de las de biomasa, 12 años. Por el contrario, las de geotermia no consiguen amortizarse hasta pasados 20 años.



Los valores calculados utilizados para la gráfica se recogen en la tabla adjunta a continuación.



	GEOTERMIA				AEROTERMIA				BIOMASA			
	C	R	ACS	Total	C	R	ACS	Total	C	R	ACS	Total
Coste año1	311,11	90,91	101,88	503,90	368,42	138,89	142,63	649,94	632,21	200,00	161,02	993,23
Ahorro año1	446,03	109,09	33,11	588,23	388,72	61,11	-7,64	442,19	124,93	0,00	-26,03	98,90
Total amortizado				588,23				442,19				98,90
Por amortizar				15.759,57				3.799,81				2.401,10
Coste año2	323,56	94,55	105,95	524,05	383,16	144,44	148,34	675,94	641,69	208,00	163,44	1.013,13
Ahorro año2	456,30	113,45	33,09	602,84	396,70	63,56	-9,30	450,96	138,16	0,00	-24,40	113,77
Total amortizado				1.191,07				893,15				212,66
Por amortizar				15.156,73				3.348,85				2.287,34
Coste año3	336,50	98,33	110,19	545,02	398,48	150,22	154,27	702,98	651,32	216,32	165,89	1.034,53
Ahorro año3	466,76	117,99	33,02	617,77	404,77	66,10	-11,06	459,81	151,93	0,00	-22,68	129,26
Total amortizado				1.808,84				1.352,96				341,92
Por amortizar				14.538,96				2.889,04				2.158,08
Coste año4	349,96	102,26	114,60	566,82	414,42	156,23	160,44	731,09	661,09	224,97	168,38	1.054,44
Ahorro año4	477,39	122,71	32,91	633,01	412,93	68,74	-12,93	468,74	166,26	0,00	-20,87	145,39
Total amortizado				2.441,85				1.821,69				487,31
Por amortizar				13.905,95				2.420,31				2.012,69
Coste año5	363,96	106,35	119,18	589,49	431,00	162,48	166,86	760,34	671,01	233,97	170,90	1.075,88
Ahorro año5	488,21	127,62	32,75	648,58	421,17	71,49	-14,93	477,74	181,17	0,00	-18,97	162,19
Total amortizado				3.090,44				2.299,43				649,51
Por amortizar				13.257,36				1.942,57				1.850,49
Coste año6	378,51	110,60	123,95	613,07	448,24	168,98	173,53	790,75	681,07	243,33	173,47	1.097,87
Ahorro año6	499,22	132,73	32,54	664,49	429,50	74,35	-17,04	486,80	196,67	0,00	-16,98	179,69
Total amortizado				3.754,92				2.786,23				829,19
Por amortizar				12.592,88				1.455,77				1.670,81
Coste año7	393,65	115,03	128,91	637,59	466,17	175,74	180,47	822,38	691,29	253,06	176,07	1.120,42
Ahorro año7	510,41	138,03	32,28	680,72	437,90	77,33	-19,29	495,93	212,78	0,00	-14,88	197,90
Total amortizado				4.435,65				3.282,17				1.027,09
Por amortizar				11.912,15				959,83				1.472,91
Coste año8	409,40	119,63	134,07	663,10	484,82	182,77	187,69	855,28	701,66	263,19	178,71	1.143,55
Ahorro año8	521,79	143,56	31,95	697,30	446,37	80,42	-21,67	505,12	229,53	0,00	-12,69	216,84
Total amortizado				5.132,95				3.787,29				1.243,94
Por amortizar				11.214,85				454,71				1.256,06
Coste año9	425,78	124,42	139,43	695,63	504,21	190,08	195,20	889,49	712,18	273,71	181,39	1.167,28
Ahorro año9	533,35	149,30	31,57	714,22	454,92	83,63	-24,20	514,35	246,95	0,00	-10,39	236,56
Total amortizado				5.847,17				4.301,64				1.480,49
Por amortizar				10.500,63				-59,64				1.019,51
Coste año10	442,81	129,39	145,01	717,21					722,86	284,66	184,11	1.191,64
Ahorro año10	545,09	155,27	31,13	731,49					265,04	0,00	-7,98	257,06
Total amortizado				6.578,65								1.737,55
Por amortizar				9.769,15								762,45
Coste año11	460,52	134,57	150,81	745,89					733,71	296,05	186,87	1.216,63
Ahorro año11	557,02	161,48	30,61	749,11					283,83	0,00	-5,46	278,37
Total amortizado				7.327,76								2.015,92
Por amortizar				9.020,04								484,08
Coste año12	478,94	139,95	156,84	775,73					744,71	307,89	189,68	1.242,28
Ahorro año12	569,12	167,94	30,02	767,08					303,35	0,00	-2,82	300,53
Total amortizado				8.094,84								2.316,45
Por amortizar				8.252,96								183,55
Coste año13	498,10	145,55	163,11	806,76					755,88	320,21	192,52	1.268,61
Ahorro año13	581,41	174,66	29,35	785,42					323,62	0,00	-0,06	323,56
Total amortizado				8.880,26								2.640,02
Por amortizar				7.467,54								-140,02
Coste año14	518,02	151,37	169,64	839,03								
Ahorro año14	593,87	181,64	28,60	804,11								
Total amortizado				9.684,37								
Por amortizar				6.663,43								
Coste año15	538,74	157,43	176,42	872,59								
Ahorro año15	606,50	188,91	27,76	823,18								
Total amortizado				10.507,54								
Por amortizar				5.840,26								
Coste año16	560,29	163,72	183,48	907,49								
Ahorro año16	619,31	196,47	26,83	842,61								
Total amortizado				11.350,15								
Por amortizar				4.997,65								
Coste año17	582,71	170,27	190,82	943,79								
Ahorro año17	632,29	204,33	25,80	862,41								
Total amortizado				12.212,56								
Por amortizar				4.135,24								
Coste año18	606,01	177,08	198,45	981,55								
Ahorro año18	645,43	212,50	24,67	882,59								
Total amortizado				13.095,16								
Por amortizar				3.252,64								
Coste año19	630,25	184,17	206,39	1.020,81								
Ahorro año19	658,73	221,00	23,42	903,15								
Total amortizado				13.998,31								
Por amortizar				2.349,49								
Coste año20	655,46	191,53	214,64	1.061,64								
Ahorro año20	672,19	229,84	22,06	924,09								
Total amortizado				14.922,40								
Por amortizar				1.425,40								
Coste año20	681,68	199,19	223,23	1.104,10								
Ahorro año20	685,80	239,03	20,58	945,41								
Total amortizado				15.867,81								
Por amortizar				479,99								
Coste año20	708,95	207,16	232,16	1.148,27								
Ahorro año20	699,56	248,59	18,96	967,11								
Total amortizado				16.834,92								
Por amortizar				-487,12								

## 9.2 ANÁLISIS EN INSTALACIONES DE GRAN CONSUMO

### HOSPITAL DE 10.000m<sup>2</sup>

El cálculo de este apartado se ha realizado utilizando como ejemplo un hospital tipo de 10.000 m<sup>2</sup> de superficie. Las demandas anuales en kWh de calefacción, refrigeración y ACS que se han estimado son las siguientes:

$$\text{Demanda calefacción} = 80 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 10.000\text{m}^2 = 800.000 \text{ kWh/año}$$

$$\text{Demanda refrigeración} = 60 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 10.000\text{m}^2 = 600.000 \text{ kWh/año}$$

$$\text{Demanda ACS} = 200.000 \text{ kWh/año}$$

La inversión inicial necesaria para cada tecnología ha sido calculada incluyendo el coste de las unidades terminales de la vivienda, en este caso suelo radiante. En primer lugar, se calcula la diferencia económica entre cada inversión y el sistema convencional. En segundo lugar, se estima para cada tipo de tecnología un consumo de energía final a partir de los rendimientos asociados a cada tecnología y el coste anual asociado al consumo. Por último, a partir del primer y segundo pasos se llega a estimar el ahorro anual que se consigue al utilizar cada instalación en lugar del sistema convencional.

	Intalación	Coste inicial	Diferencia stma convencional	Rendimientos	C.E.F	C.E.P nr	kg CO2	Coste anual	Ahorro respecto al stma.convencional año1
C	Geotermia	250.000,00 €	140.000,00 €	4	200.000,00	401.400,00	143.299,80	20.000,00 €	12.653,06 €
R				5	120.000,00	240.840,00	85.979,88	12.000,00 €	18.000,00 €
ACS				3	66.666,67	133.800,00	47.766,60	6.666,67 €	-952,38 €
Total									38.666,67 €
C	Aerotermia	150.000,00 €	40.000,00 €	3,3	242.424,24	486.545,45	173.696,73	24.242,42 €	8.410,64 €
R				3,1	193.548,39	388.451,61	138.677,23	19.354,84 €	10.645,16 €
ACS				2	100.000,00	200.700,00	71.649,90	10.000,00 €	-4.285,71 €
Total									53.597,26 €
C	Biomasa	180.000,00 €	70.000,00 €	0,95	842.105,26	71.578,95	1.288,42	24.421,05 €	8.232,01 €
R				2	300.000,00	602.100,00	214.949,70	30.000,00 €	0,00 €
ACS				0,95	210.526,32	17.894,74	322,11	6.105,26 €	-390,98 €
Total									60.526,32 €
C	Convencional	110.000,00 €	-	0,98	816.326,53	971.428,57	244.800,00	32.653,06 €	
R				2	300.000,00	602.100,00	214.949,70	30.000,00 €	
ACS				0,98	142.857,14	170.000,00	42.840,00	5.714,29 €	
Total									68.367,35 €

Cabe destacar que el sistema convencional cuenta además con sistema solar térmico que abastece al unifamiliar en un 30% del ACS total. Por tanto, este 30% no se tiene en cuenta en el cálculo del coste anual del sistema convencional.

Por otro lado, los precios utilizados en el cálculo son:

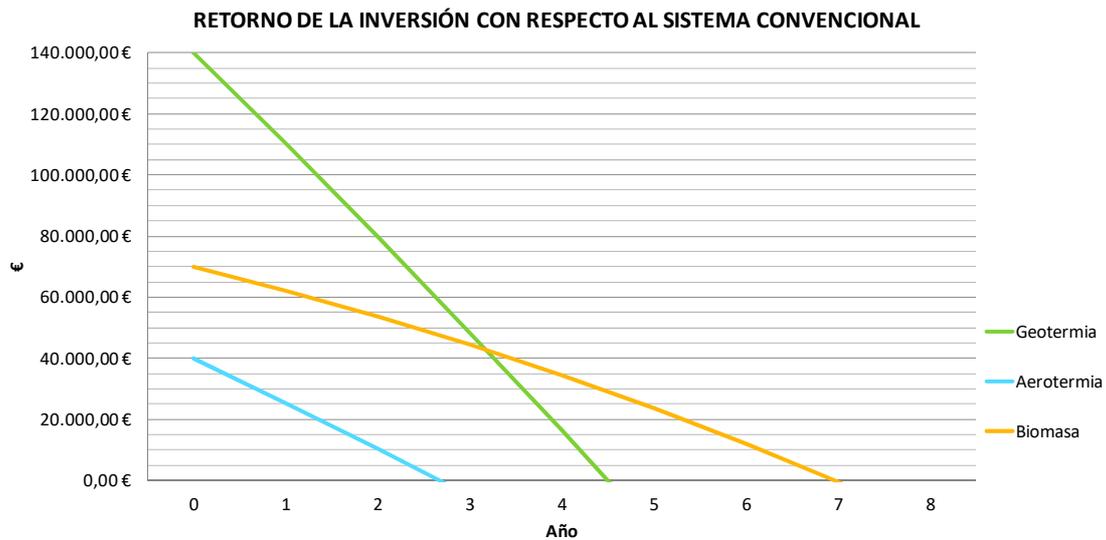
$$kWh \text{ eléctrico} = 0,1 \text{ €}$$

$$kWh \text{ gas} = 0,04 \text{ €}$$

$$kWh \text{ pelets} = 0,029 \text{ €}$$

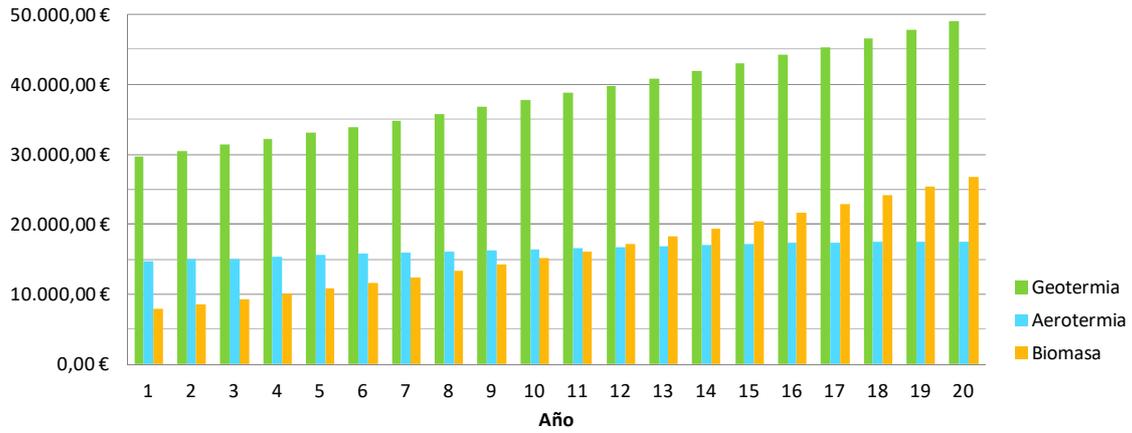
Hay que mencionar que se ha considerado un aumento anual sucesivo en el precio de la electricidad, del gas y de los pelets del 4%, 3% y 1,5%, respectivamente.

Como se comprueba mediante la gráfica siguiente, las instalaciones de aerotermia son las que antes recuperan la inversión, 3 años; seguidas de las de geotermia, 5 años y las de biomasa, en 7 años.



Resulta interesante representar en una gráfica el ahorro obtenido anualmente con cada tipo de instalación. Esto muestra que a pesar de ser la aerotermia la tecnología que antes recupera su inversión, la geotermia es la que más ahorros genera una vez superado el periodo de amortización.

**EVOLUCIÓN DEL AHORRO GENERADO CON RESPECTO AL SISTEMA CONVENCIONAL**



Los valores calculados utilizados para la gráfica se recogen en la tabla adjunta a continuación.



	GEOTERMIA				AEROTERMIA				BIOMASA			
	C	R	ACS	Total	C	R	ACS	Total	C	R	ACS	Total
Coste año1	20.000,00	12.000,00	6.666,67	38.666,67	24.242,42	19.354,84	10.000,00	53.597,26	24.421,05	30.000,00	6.105,26	60.526,32
Ahorro año1	12.653,06	18.000,00	-952,38	29.700,68	8.410,64	10.645,16	-4.285,71	14.770,08	8.232,01	0,00	-390,98	7.841,03
Total amortizado				29.700,68				14.770,08				7.841,03
Por amortizar				110.299,32				25.229,92				62.158,97
Coste año2	20.800,00	12.480,00	6.933,33	40.213,33	25.212,12	20.129,03	10.400,00	55.741,15	24.787,37	31.200,00	6.196,84	62.184,21
Ahorro año2	12.832,65	18.720,00	-1.047,62	30.505,03	8.420,53	11.070,97	-4.514,29	14.977,21	8.845,28	0,00	-311,13	8.534,16
Total amortizado				60.205,71				29.747,30				16.375,19
Por amortizar				79.794,29				10.252,70				53.624,81
Coste año3	21.632,00	12.979,20	7.210,67	41.821,87	26.220,61	20.934,19	10.816,00	57.970,80	25.159,18	32.448,00	6.289,79	63.896,97
Ahorro año3	13.009,63	19.468,80	-1.148,38	31.330,05	8.421,03	11.513,81	-4.753,71	15.181,12	9.482,45	0,00	-227,51	9.254,94
Total amortizado				91.535,77				44.928,42				25.630,13
Por amortizar				48.464,23				-4.928,42				44.369,87
Coste año4	22.497,28	13.498,37	7.499,09	43.494,74	27.269,43	21.771,56	11.248,64	60.289,63	25.536,57	33.745,92	6.384,14	65.666,63
Ahorro año4	13.183,60	20.247,55	-1.254,94	32.176,21	8.411,45	11.974,36	-5.004,49	15.381,32	10.144,32	0,00	-139,99	10.004,33
Total amortizado				123.711,98				60.309,74				35.634,46
Por amortizar				16.288,02				-20.309,74				34.365,54
Coste año5	23.397,17	14.038,30	7.799,06	45.234,53	28.360,21	22.642,42	11.698,59	62.701,22	25.919,62	35.095,76	6.479,90	67.495,28
Ahorro año5	13.354,14	21.057,45	-1.367,58	33.044,01	8.391,10	12.453,33	-5.267,11	15.577,33	10.831,69	0,00	-48,42	10.783,27
Total amortizado				156.755,99				75.887,07				46.417,73
Por amortizar				-16.755,99				-35.887,07				23.582,27
Coste año6	24.333,06	14.599,83	8.111,02	47.043,91	29.494,62	23.548,12	12.166,53	65.209,27	26.308,41	36.499,59	6.577,10	69.385,10
Ahorro año6	13.520,79	21.899,75	-1.486,60	33.933,95	8.359,23	12.951,47	-5.542,11	15.768,59	11.545,44	0,00	47,32	11.592,76
Total amortizado				190.689,94				91.655,66				58.010,49
Por amortizar				-50.689,94				-51.655,66				11.989,51
Coste año7	25.306,38	15.183,83	8.435,46	48.925,67	30.674,40	24.490,05	12.653,19	67.817,64	26.703,04	37.959,57	6.675,76	71.338,36
Ahorro año7	13.683,08	22.775,74	-1.612,30	34.846,52	8.315,06	13.469,53	-5.830,03	15.954,55	12.286,43	0,00	147,40	12.433,82
Total amortizado				225.536,46				107.610,21				70.444,31
Por amortizar				-85.536,46				-67.610,21				-444,31
Coste año8	26.318,64	15.791,18	8.772,88	50.882,70	31.901,38	25.469,65	13.159,32	70.530,34	27.103,58	39.477,95	6.775,90	73.357,43
Ahorro año8	13.840,51	23.686,77	-1.745,03	35.782,26	8.257,77	14.008,31	-6.131,47	16.134,61	13.055,57	0,00	251,96	13.307,52
Total amortizado				261.318,71				123.744,82				83.751,83
Por amortizar				-121.318,71				-83.744,82				-13.751,83
Coste año9	27.371,38	16.422,83	9.123,79	52.918,00	33.177,43	26.488,43	13.685,69	73.351,56	27.510,13	41.057,07	6.877,53	75.444,74
Ahorro año9	13.992,54	24.634,24	-1.885,11	36.741,68	8.186,49	14.568,64	-6.447,00	16.308,12	13.853,79	0,00	361,15	14.214,94
Total amortizado				298.060,39				140.052,95				97.966,77
Por amortizar				-158.060,39				-100.052,95				-27.966,77
Coste año10	28.466,24	17.079,74	9.488,75	55.034,72	34.504,53	27.547,97	14.233,12	76.285,62	27.922,79	42.699,35	6.980,70	77.602,84
Ahorro año10	14.138,60	25.619,61	-2.032,90	37.725,32	8.100,31	15.151,38	-6.777,27	16.474,42	14.682,05	0,00	475,15	15.157,20
Total amortizado				335.785,71				156.527,37				113.123,97
Por amortizar				-195.785,71				-116.527,37				-43.123,97
Coste año11	29.604,89	17.762,93	9.868,30	57.236,11	35.884,71	28.649,89	14.802,44	79.337,04	28.341,63	44.407,33	7.085,41	79.834,36
Ahorro año11	14.278,10	26.644,40	-2.188,77	38.733,72	7.998,27	15.757,44	-7.122,92	16.632,79	15.541,36	0,00	594,12	16.135,47
Total amortizado				374.519,43				173.160,16				129.259,44
Por amortizar				-234.519,43				-133.160,16				-59.259,44
Coste año12	30.789,08	18.473,45	10.263,03	59.525,56	37.320,10	29.795,88	15.394,54	82.510,52	28.766,75	46.183,62	7.191,69	82.142,06
Ahorro año12	14.410,39	27.710,17	-2.353,12	39.767,45	7.879,37	16.387,74	-7.484,63	16.782,48	16.432,72	0,00	718,22	17.150,94
Total amortizado				414.286,87				189.942,64				146.410,38
Por amortizar				-274.286,87				-149.942,64				-76.410,38
Coste año13	32.020,64	19.212,39	10.673,55	61.906,58	38.812,90	30.987,72	16.010,32	85.810,94	29.198,25	48.030,97	7.299,56	84.528,78
Ahorro año13	14.534,81	28.818,58	-2.526,34	40.827,05	7.742,56	17.043,25	-7.863,12	16.922,68	17.357,20	0,00	847,64	18.204,84
Total amortizado				455.113,92				206.865,32				164.615,23
Por amortizar				-315.113,92				-166.865,32				-94.615,23
Coste año14	33.301,47	19.980,88	11.100,49	64.382,84	40.365,42	32.227,23	16.650,74	89.243,38	29.636,23	49.952,21	7.409,06	86.997,49
Ahorro año14	14.650,65	29.971,32	-2.708,87	41.913,11	7.586,70	17.724,98	-8.259,11	17.052,57	18.315,89	0,00	982,56	19.298,46
Total amortizado				497.027,03				223.917,89				183.913,69
Por amortizar				-357.027,03				-183.917,89				-113.913,69
Coste año15	34.633,53	20.780,12	11.544,51	66.958,16	41.980,04	33.516,32	17.316,76	92.813,12	30.080,77	51.950,29	7.520,19	89.551,26
Ahorro año15	14.757,16	31.170,18	-2.901,14	43.026,19	7.410,65	18.433,98	-8.673,39	17.171,23	19.309,91	0,00	1.123,18	20.433,09
Total amortizado				540.053,22				241.089,12				204.346,78
Por amortizar				-400.053,22				-201.089,12				-134.346,78
Coste año16	36.018,87	21.611,32	12.006,29	69.636,48	43.659,24	34.856,97	18.009,44	96.525,64	30.531,98	54.028,31	7.633,00	92.193,28
Ahorro año16	14.853,54	32.416,98	-3.103,62	44.166,90	7.213,17	19.171,33	-9.106,76	17.277,74	20.340,42	0,00	1.269,68	21.610,10
Total amortizado				584.220,12				258.366,86				225.956,87
Por amortizar				-444.220,12				-218.366,86				-155.956,87
Coste año17	37.459,62	22.475,77	12.486,54	72.421,94	45.405,61	36.251,25	18.729,81	100.386,67	30.989,96	56.189,44	7.747,49	94.926,89
Ahorro año17	14.938,95	33.713,66	-3.316,79	45.335,82	6.992,97	19.938,19	-9.560,06	17.371,10	21.408,61	0,00	1.422,26	22.830,88
Total amortizado				629.555,95				275.737,96				248.787,75
Por amortizar				-489.555,95				-235.737,96				-178.787,75
Coste año18	38.958,01	23.374,81	12.986,00	75.318,82	47.221,83	37.701,30	19.479,00	104.402,14	31.454,81	58.437,01	7.863,70	97.755,53
Ahorro año18	15.012,53	35.062,21	-3.541,16	46.533,57	6.748,70	20.735,71	-10.034,16	17.450,26	22.515,72	0,00	1.581,14	24.096,86
Total amortizado				676.089,52				293.188,21				272.884,61
Por amortizar				-536.089,52				-253.188,21				-202.884,61
Coste año19	40.516,33	24.309,80	13.505,44	78.331,57	49.110,70	39.209,35	20.258,17	108.578,22	31.926,63	60.774,50	7.981,66	100.682,79
Ahorro año19	15.073,32	36.464,70	-3.777,25	47.760,76	6.478,95	21.565,14	-10.529,98	17.514,11	23.663,02	0,00	1.746,53	25.409,55
Total amortizado				723.850,28				310.702,33				298.294,16
Por amortizar				-583.850,28				-270.702,33				-228.294,16
Coste año20	42.136,98	25.282,19	14.045,66	81.464,83	51.075,13	40.777,73	21.068,49	112.921,35	32.405,53	63.205,48	8.101,38	103.712,39
Ahorro año20	15.120,36	37.923,29	-4.025,63	49.018,02	6.182,21	22.427,75	-11.048,46	17.561,50	24.851,81	0,00	1.918,65	26.770,46
Total amortizado				772.868,30				328.263,83				325.064,62
Por amortizar				-632.868,30				-288.263,83				-255.064,62



## 10 CONCLUSIONES

## 10.1 CONCLUSIONES GEOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS

- 1) Este estudio ha permitido redescubrir **documentos históricos** de gran valor en relación al potencial geotérmico de Navarra. Los dos documentos más relevantes son los siguientes: a) **Proyecto Hidrogeológico de Navarra. Informe Técnico nº 19. Estudio geotérmico preliminar**. Encargado por la Diputación Foral de Navarra en el año 1977 y realizado por la empresa Compañía General de Sondeos, S.A.; b) **Estudio Geotérmico preliminar de Navarra**, elaborado por José F. Albert Bertrán en 1979. Se exponen a continuación las conclusiones más relevantes extraídas de ambos estudios:

*Proyecto Hidrogeológico de Navarra. Informe Técnico nº 19. Estudio geotérmico preliminar (Diputación Foral de Navarra, 1977):*

- + Las manifestaciones geotérmicas asociadas a manantiales de aguas termales en Navarra son Fitero (46°C), Betelu (25°C), Belascoain (26°C), Ibero (20°C) y Etxauri (20°C).
  - Las aguas termales de Fitero están asociadas a la estructura geológica que pone en contacto la Cordillera Ibérica con la Depresión del Ebro.
  - Las aguas termales de Betelu están asociadas a una estructura geológica tipo domo relacionada con el diapiro de Albiasu.
  - Las aguas termales del eje Ibero-Etxauri-Belascoain están asociadas a la estructura geológica marcada por la presencia de fallas radiales vinculadas al diapiro de Salinas de Oro.
- + No se deduce ninguna relación espacial entre la actividad sísmica y la ubicación de las manifestaciones termales en Navarra.
- + Todas las aguas termales anteriormente definidas tienen una composición química de marcado carácter clorurado-sódico. La formación evaporítica en facies Keuper (Triásico superior) está relacionada con esta mineralización.
- + Los análisis isotópicos han permitido deducir procesos de mezcla con aguas superficiales más frías.
- + El régimen térmico de los manantiales termales es muy constante en el tiempo frente a la pluviometría y oscilaciones térmicas de los lugares en los que afloran, observándose una variabilidad máxima de 2°C.
- + Los análisis isotópicos de tritio han permitido deducir unos tiempos de residencia del agua en el interior del macizo que oscila entre 20-25 años.
- + El modelo hidráulico asociado a todos los manantiales termales definidos se resume en: infiltración del agua en el macizo rocoso con un tiempo de residencia 20-25 años, calentamiento por circulación profunda favorecido por la estructura geológica, y rápido ascenso a la superficie como fluido hidrotermal con cierto porcentaje de mezcla con aguas superficiales más frías.
- + Los procesos de mezcla con aguas superficiales más frías anteriormente comentados, provoca que el uso de geotermómetros químicos sólo haya sido aplicable a las aguas de Fitero y Betelu.

- + La temperatura del equilibrio químico agua-roca en profundidad para Fitero es de 80°C frente a los 47°C de temperatura en superficie. Se estima que dicha temperatura de equilibrio podría ser algo mayor teniendo en cuenta el proceso de mezcla superficial.
- + La temperatura del equilibrio químico agua-roca en profundidad para Betelu es de 34°C frente a los 25°C de temperatura en superficie.
- + En el caso de Belascoain, Ibero y Echauri, los indicios hacen suponer que la temperatura de equilibrio está próxima a la temperatura de salida (20-25°C).
- + El uso de los análisis de sílice (SiO<sub>2</sub>) de todas las aguas muestreadas han permitido obtener dos zonas con anomalías térmicas bien definidas: la primera en el sector central de Navarra a lo largo de un eje de dirección Este-Oeste, y la segunda en la Ribera en una banda paralela al eje del Ebro (ONO-ESE).
- + Los gradientes geotérmicos medidos a partir de los datos de 18 sondeos petrolíferos profundos, oscilan entre mínimos de 2,5°C/100 metros y 4,4°C/100 metros. Los valores máximos se distribuyen en dos zonas coincidentes con los sectores donde se han definido las anomalías térmicas. La población de datos utilizado (18) es insuficiente para el trazado preciso de las isóneas, por lo que este mapa de gradientes debe considerarse como orientativo.
- + La anomalía térmica de la Ribera se explica a partir de un modelo hidrogeológico basado en un área de recarga en la Cordillera Ibérica, una circulación profunda por zonas con mayor gradiente geotérmico, un ascenso a partir de las fracturas de zócalo profundas al pie de la Ibérica, y el ascenso de dichas aguas termales a favor de dichas fracturas en puntos de la superficie de menor carga, bien a través de los aluviales del Ebro y afluentes, o bien directamente por las fracturas de borde de contacto entre la Cordillera Ibérica y la Depresión del Ebro en forma de manantiales termales como Fitero y Arnedillo.
- + Se han estudiado otras aguas como las de Elgorriaga y Los Llanos (Estella), no observándose procesos termales asociados en ninguno de los casos.
- + El estudio de los valores de conductividad térmica de las rocas del subsuelo ayudaría a determinar los mapas de flujo térmico en los lugares o zonas donde se han identificado las anomalías geotérmicas.
- + Se sospecha que el calentamiento del agua termal asociada a las zonas de diapiros como es el caso de Ibero-Etxauri-Belascoain se deba a la mayor conductividad térmica de los materiales evaporíticos atravesados sin que intervenga ningún proceso geotérmico anómalo.

Estudio geotérmico preliminar de Navarra (Albert, 1979):

- + Los valores promedio del flujo calorífico de Navarra son muy variables y oscilan entre 53 y 88 mW/m<sup>2</sup> respecto a la media peninsular (82 mW/m<sup>2</sup>).

- + La neotectónica distensiva con sismicidad asociada y el vulcanismo reciente son inexistentes. El mapa nacional de anomalías de Bouguer establece potencias corticales superiores a 35 km en todo el territorio.
  - + Las manifestaciones termales de Navarra son Fitero (47°C), Betelu (25°C), Belascoain (26°C), Ibero (21°C) y Etxauri (20°C).
  - + Los fenómenos de mezcla con aguas superficiales más frías en la mayoría de las manifestaciones termales de Navarra, han provocado que solamente en el caso de Fitero haya sido emplear con éxito cálculos geotermométricos.
  - + Las únicas aguas termales que presentan un cierto grado de interés geotérmico son las de Fitero, cuya temperatura interna se cifra en los 80°C. El ligero termalismo de aguas como las de Belascoain, Ibero o Etxauri puede ser debido a un efecto de la mayor conductividad térmica de los materiales evaporíticos a los que se hallan asociados, sin que medie ningún proceso geotérmico. Los indicios obtenidos mediante geotermometría hacen prever que la temperatura de equilibrio en profundidad es cercana a la temperatura de superficie, reduciendo su interés geotérmico.
  - + Se realizaron más de 4.000 análisis de todas las aguas inventariadas en Navarra utilizando tres técnicas geotermométricas ( $\text{SiO}_2$ , Na/K y Na-K-Ca), con el fin de detectar posibles fluidos cuya temperatura de muestreo fuera fría pero que hubiesen sufrido algún proceso geotérmico en profundidad. Los resultados fueron negativos, no reflejando procesos térmicos o al menos, no habiendo sido detectados debido a falta de equilibrio termodinámico agua-roca en profundidad o bien debido a procesos de mezcla con aguas superficiales más frías.
  - + La modelización de las aguas utilizando el geotermómetro de  $\text{SiO}_2$  hizo sospechar la existencia de un flujo termal regional ascendente en la zona de la Ribera, y que posteriormente se mezcla con aguas superficiales más frías de los aluviales del Ebro. En el caso de la zona central de Navarra, las anomalías de  $\text{SiO}_2$  son muy ligeras.
  - + El calentamiento del agua termal en las zonas de diapiros puede deberse simplemente a la mayor conductividad térmica de los materiales evaporíticos atravesados respecto a otros materiales sedimentarios.
- 2) La elaboración de este informe ha permitido además acceder a otros documentos relevantes como el Atlas Geotérmico de Aragón (Gobierno de Aragón, 2001), de gran interés, dado además que la región comparte aspectos comunes de la Geología regional. Entre otras aportaciones, describe las principales formaciones geológicas que pueden considerarse como “formaciones de potencial interés geotérmico”. Éstas son principalmente: Granitos paleozoicos del Pirineo axial, Areniscas y conglomerados del Periodo Triásico (facies Buntsandstein), Rocas carbonatadas del Periodo Triásico medio (facies Muschelkalk), Rocas carbonatadas del Periodo Jurásico inferior (Lias), Rocas carbonatadas del Jurásico medio-superior (Dogger-Malm), Rocas carbonatadas del

Cretácico superior, Rocas carbonatadas del Periodo Paleoceno-Eoceno y Materiales carbonatados y detríticos terciarios de relleno de cuenca.

En Navarra se identifican la práctica totalidad de las formaciones geológicas consideradas como geotérmicas que se acaban de citar en el párrafo anterior, bien en afloramientos en superficie o bien detectadas en profundidad a través de las campañas de investigación geológica.

Entre las regiones geotérmicas de Aragón (que también comparten Comunidades limítrofes como Navarra) se citan la Cuenca de Jaca en la Depresión Intermedia (sinclinatorio de Jaca-Tremp), donde se asocia el manantial termal de Tiermas y otros indicios termales en sondeos profundos, y la Región Noribérica (Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica) sector occidental, donde se asocian los manantiales termales de Fitero (Navarra) y Arnedillo (Rioja). Cabría citar además, la Región Vasco-Cantábrica oriental.

Las principales Unidades Hidrogeológicas de Navarra son de carácter carbonatado y detrítico (principalmente aluviales de los ríos, en el segundo caso). Dichas unidades hidrogeológicas son: Norte, Aralar, Urbasa (incluye Andía), Larra, Pamplona-Ochagavía, Leyre, Alaiz, Lóquiz, Sur, Ebro y afluentes y finalmente, Fitero. En cada una de las Unidades Hidrogeológicas definidas en este trabajo se han descrito las principales formaciones acuíferas y los manantiales principales asociados a ellos.

- 3) Las manifestaciones termales más frecuentes están asociadas a flujos subterráneos de tipo regional. Estos flujos regionales están asociados a unidades geológicas de elevada permeabilidad, potencia y extensión regional. El movimiento del agua subterránea a través de estas formaciones puede alcanzar grandes profundidades alcanzando una mayor temperatura de acuerdo al gradiente geotérmico. El posterior ascenso del agua hacia zonas de descarga arrastra el calor adquirido. La disposición verticalizada de los estratos otorga un contexto favorable para que dicho ascenso sea rápido. Esta disposición favorece además un mejor sellado de los flujos termales y dificulta la mezcla con aguas más frías. Esta disposición verticalizada de los estratos suele estar asociada a un contexto de fuerte tectonización y grandes fracturas y estructuras profundas, constituyendo vías preferentes para el ascenso de los flujos termales. Las anomalías positivas detectadas en sondeos profundos pueden poner de manifiesto la presencia de niveles con flujos subterráneos ascendentes que contribuyen al transporte y ascenso rápido del calor hacia la superficie (Garrido y Sánchez, 2004).
  
- 4) Las áreas donde se han identificado indicios o manifestaciones termales en Navarra, y que a priori podrían constituir áreas de investigación preferente en relación a su posible exploración de interés geotérmico son:

- Sector occidental de la Región Nordibérica (Dominio tectónico de la Cadena Ibérica en Navarra). En este sector se ubica el sistema hidrotermal de Baños de Fitero.
- Dominio tectónico Vasco-Cantábrico, subdominio del Arco Vasco, área del Manto de los Mármoles (domo de Huici y diapiro de Albiasu). En este sector se ubica el sistema hidrotermal de Betelu.
- Dominio de la Cuenca de Pamplona sector occidental, en el límite del Dominio Vasco-Cantábrico, subdominio del Bloque Alavés, Área de la Sierra de Andía, asociado a la estructura diapírica de Salinas de Oro. En este sector se ubica el sistema hidrotermal de Ibero – Etxauri – Belascoain.
- Sectores en los que se definen los depósitos detríticos aluviales del Ebro y afluentes en el Dominio de la Depresión del Ebro, en áreas donde se identificaron anomalías geoquímicas de  $\text{SiO}_2$  (Albert, 1979), preferentemente en aquellos tramos donde se detectase el mayor espesor de aluvial. Deberá prestarse atención al hecho de que algunas de las áreas del aluvial del Ebro están catalogadas como zonas sensibles y zonas vulnerables por la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Dominio Surpirenaico, en posibles áreas del sector navarro que pudieran estar relacionadas con el sistema hidrotermal de Tiermas (Zaragoza), en torno a zonas de fracturación similares a las observadas en dicha localidad y situadas más al oeste, dentro del territorio navarro.
- Sectores donde se detectaron anomalías positivas del gradiente geotérmico en sondeos profundos de investigación petrolífera. Por ejemplo, en el Dominio de la Depresión del Ebro, Sector oriental, en posibles áreas en torno al sondeo petrolífero profundo Sangüesa-1, donde se detectó una anomalía geotérmica positiva a casi 800 metros de profundidad en materiales terciarios. También en el Dominio Vasco-Cantábrico, Subdominio del Bloque Alavés, Área de la Sierra de Lóquiz, en torno a la localidad de Gastiain, donde se han identificado valores ligeramente superiores del gradiente geotérmico, como en el caso de Sangüesa.
- De forma más general, en Dominios Vasco-Cantábrico, Norpirenaico y Cuenca de Pamplona, en entornos próximos a estructuras diapíricas donde la verticalización de las formaciones rocosas acuíferas que pudieran estar involucradas y la complejidad tectónica y estructural puedan favorecer ascensos rápidos de flujos subterráneos de carácter regional profundo. Los principales diapiros inventariados son los de: Estella, Alloz, Salinas de Oro, Arteta, Anoz, Iza, Lekunberri-Albiasu, Beruete, Otzola, Echalecu y Lizaso.

Cabe resaltar que algunas de las manifestaciones termales descritas ya están siendo explotadas a través de complejos balneoterápicos, plantas embotelladoras, puntos de abastecimiento, etc. Por dicha razón, deberá tenerse en cuenta la legislación vigente y las posibles interferencias y afecciones que una futura explotación geotérmica podría ocasionar a las

explotaciones existentes y a los usos actuales de las aguas subterráneas y superficiales.

Todas las zonas citadas constituyen posibles áreas preferentes de cara a futuras investigaciones de interés geotérmico, pudiendo ser descartadas en fases posteriores de investigación si la nueva información geológica exploratoria no ofreciese datos concluyentes de interés geotérmico o no considerase rentable la explotación del supuesto yacimiento.

- 5) Las nuevas técnicas desarrolladas en la actualidad, permiten otorgar mayor valor a zonas catalogadas como recursos geotérmicos de baja y muy baja temperatura, como es el caso de las manifestaciones geotérmicas en Navarra. Algunos autores (Arrizabalaga et al, 2015 y Tecnología y Recursos de la Tierra, 2011) asignan recursos geotérmicos potenciales de media temperatura en formaciones geológicas permeables, aunque se encuentran ubicadas a profundidades superiores a 3.500 metros.

De acuerdo con la información recopilada por diferentes autores, se estiman temperaturas en un intervalo amplio de 50-90°C a partir de profundidades que en casi todos los casos son superiores a 2.000 metros.

El Instituto Geológico y Minero de España, a través del Proyecto “Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España” (IGME 2010), define varios sectores como potenciales almacenes geológicos: Almacén Roncal-Illón, Almacén Leyre-Berdún, Almacén Rioja Norte, Almacén Arnedo y Almacén Magallón. A título informativo, en los dos primeros (Roncal-Illón y Leyre-Berdún) establece un gradiente geotérmico de 2,7°C/100 metros, arrojando unos valores de temperatura de 59°C a 1.720 metros (Almacén Roncal) y de 48°C a 1.300 metros (Almacén Leyre-Berdún).

- 6) Teniendo en cuenta que los yacimientos geotérmicos definidos constituyen potenciales recursos de baja o muy baja temperatura, los futuros proyectos de explotación geotérmica deberían tener en cuenta la metodología y técnicas adecuadas de prospección para obtener la máxima información posible para el tipo de yacimiento considerado. Se recomienda además la implementación integrada de técnicas geológicas, hidrogeológicas, geotécnicas, geofísicas y geoquímicas que permitan una para una caracterización detallada del modelo geológico del terreno. La utilización y alcance de cada una de las técnicas descritas dependerá de la fase de investigación del yacimiento geotérmico.

- 7) Además de enfocar las futuras campañas de investigación geotérmica en estas potenciales zonas de interés donde se han identificado los diferentes indicios geotérmicos, y dado que las nuevas tecnologías ofrecen mayores oportunidades para la explotación de recursos geotérmicos de baja y muy baja energía, podría ser interesante plantear un segundo enfoque metodológico para nuevos proyectos de infraestructuras que contemplen a priori una posible utilización de la potencial energía geotérmica en su diseño.

Dicho enfoque consiste en implantar una metodología de investigación en la parcela sobre la que se prevé ubicar la nueva infraestructura, implementando en la exploración geológica-geotécnica habitual, nuevas investigaciones o ensayos de carácter hidrogeológico, geoquímico geofísico y geotérmico que permitiesen evaluar de forma más eficiente todo el perfil del terreno y su potencial aportación como recurso geotérmico, incluyendo el espesor y litologías atravesadas, posibles unidades acuíferas y niveles freáticos o piezométricos existentes, variaciones de dichos niveles (inclusive ensayos de permeabilidad, ensayos de bombeo, etc) y propiedades térmicas del terreno (datos bibliográficos a partir de observaciones directas del perfil atravesado o ensayos de respuesta térmica del terreno). Existen numerosas referencias bibliográficas para otorgar valores eficaces a los parámetros térmicos de suelos y rocas, entre los que caben citar la norma UNE 100715-1:2014, la norma ISO 17628:2015, Guías de Geotermia (Pahud, 2002), Guías técnicas (IDAE, 2012), Atlas de Energía Geotérmica (Gobierno de Aragón, 2001), Manuales técnicos (Tecnología y Recursos de la Tierra, 2011 / IGME, 1984 / Sundberg, 1988), entre otros.

Indudablemente, todas estas técnicas que tienen por objetivo aportar información adicional que pudiese tener interés de carácter geotérmico para explorar su aplicabilidad sobre la infraestructura a construir, dependerá de la tipología y dimensiones de dicha infraestructura y su cimentación, independientemente de si la región en la que se encuentra tal infraestructura pertenece o no a una zona de mayor potencial geotérmico. Un ejemplo de este enfoque metodológico es la implementación de cimentaciones termoactivas aprovechando elementos estructurales convencionales de cimentación y sostenimiento, como pilotes, losas, muros pantalla de hormigón, etc.

En general, las técnicas recomendadas para recursos geotérmicos de muy baja energía se pueden resumir en colectores horizontales enterrados, sondas geotérmicas verticales, sondeos de explotación de acuíferos someros, cimentaciones geotérmicas y otras más específicas en túneles, entre otras.

- 8) En términos generales, los parámetros del terreno que aportarían valor al proyecto de la instalación geotérmica podrían ser: georreferenciación exacta de los puntos de investigación, medida de la temperatura del agua subterránea (niveles freáticos y

piezométricos), medida de la temperatura del terreno, análisis químicos de las aguas (específicos para una interpretación geoquímica enfocada a la geotermometría, química y/o isotópica), espesores de suelo, grado de saturación de las formaciones rocosas atravesadas para precisar los valores de conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica de los mismos, e incluso ensayos de respuesta térmica in situ según normativa de referencia.

Sin lugar a dudas, la modelización del flujo subterráneo constituirá un objetivo prioritario. Algunas experiencias en acuíferos aluviales urbanos utilizan códigos de modelización del flujo subterráneo para lo cual ha sido necesario disponer de la siguiente información: porosidad, espesor saturado, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, capacidad calorífica, conductividad térmica, dispersividad (transversal y longitudinal), además de datos de infiltración y descarga para la estimación de caudales. Para este mismo caso, las variaciones del nivel de los ríos y su conexión con las variaciones de temperatura entre el agua del acuífero y el agua superficial, hacen necesario conocer la distancia crítica a la cual en la cual el río tiene influencia termal sobre el acuífero subterráneo. Más aún, la modelización de nuevas instalaciones geotérmicas debería contemplar además las posibles interferencias con sistemas de captación geotérmica adyacentes, con el fin de diseñar una instalación más eficiente y evitar así sobreestimaciones de capacidad.

- 9) Los métodos geotermométricos constituyen una herramienta fundamental para determinar el equilibrio termodinámico de agua-roca en profundidad. Las experiencias de este tipo de metodología donde se combinan técnicas de geotermometría química, isotópica y modelización geoquímica en macizos rocosos de naturaleza carbonatada y evaporítica, han arrojado valores coherentes que otorgan mayor validez a las estimaciones de la temperatura del reservorio en profundidad. Otra importante línea de investigación enfocada al interés geotérmico podría estar dirigida hacia el estudio y análisis detallado de las mediciones periódicas que se toman en la red de estaciones de la red de seguimiento de aguas subterráneas, así como de la red de control de piezometría, manantiales, pozos, etc. El objetivo de este análisis sería observar pautas como la regularidad de los caudales, la estabilidad de la temperatura y su variabilidad a lo largo del tiempo y su estacionalidad, además de las variaciones en las concentraciones de los principales elementos químicos analizados, incluyendo posibles análisis isotópicos. La principal implementación sería una modelización geoquímica junto al uso de diferentes técnicas geotermométricas combinadas con el fin de detectar posibles procesos geotérmicos en profundidad que pudieran quedar enmascarados por otros procesos posteriores de mezcla con aguas más frías. Dada la ingente cantidad de información que sería necesario procesar, debería establecerse una priorización de aquellos puntos de análisis asociados o cercanos a las áreas potencialmente de mayor interés para la exploración geotérmica.

- 10) Las experiencias en la explotación de formaciones geotérmicas de muy baja energía asociadas a los acuíferos aluviales en Comunidades limítrofes como Aragón, y que además forman parte de la misma Cuenca Hidrográfica, son un referente para decisiones futuras en este tipo de técnicas de geotermia somera. El estudio e interpretación de los resultados obtenidos en las explotaciones geotérmicas en uso y los impactos generados, han puesto de manifiesto la necesidad de integrar todas las técnicas disponibles para diseñar un proyecto geotérmico eficiente, valorando tanto los impactos generados por la explotación como las posibles interferencias y afecciones con instalaciones geotérmicas adyacentes.
- 11) Además, a partir de diversas fuentes bibliográficas consultadas, se ha puesto de manifiesto la necesidad de valorar posibles impactos negativos en los parámetros del terreno y las aguas (principalmente en sistemas abiertos), tales como la variación de los niveles freáticos, modificación del pH, alcalinidad, temperatura, oxigenación, cambios en la cinética de las reacciones químicas, tasas de intercambio de CO<sub>2</sub>, grado de movilidad de algunos elementos químicos, etc. Tales modificaciones tendrían mayor o menos incidencia en función del salto térmico.

Otros impactos que podrían afectar a la instalación geotérmica en función de la geología del terreno atravesado podrían ser por ejemplo procesos de precipitación de calcita en pozos de inyección, arrastre de arenas en aluviales detríticos finos, procesos de corrosión y colapsos en los alrededores de los pozos de bombeo por disolución de litologías yesíferas y salinas.

La legislación medioambiental debe ser un punto relevante en el diseño y explotación de este recurso geotérmico con el fin de evitar el deterioro y/o modificación de los parámetros físico-químicos (aunque sea de forma local) del mayor recurso natural de Navarra: el agua. Las aguas subterráneas están íntimamente ligadas con el medio ambiente, tanto en sus aspectos de generación como de preservación y constituyen una de las fórmulas que permiten incrementar la oferta de agua de manera rápida en situaciones extremas, si bien están también expuestas a los procesos de contaminación que, aunque con un mayor grado de protección frente a ella que las superficiales, su detección desde que se produce puede tardar mucho tiempo, tratándose además de un fenómeno masivo cuya solución puede ser compleja y costosa (IGME, 2012).

- 12) El análisis de numerosas fuentes bibliográficas ha puesto de relieve en la importancia de georeferenciar todos los recursos de la información disponibles a través de un Sistema de Información Geográfica. Las investigaciones de carácter geológico pueden tener muy diversos enfoques en función del objetivo de cada investigación, pero todos

ellos constituyen una visión del conjunto que permiten diseñar un modelo tridimensional más o menos preciso del modelo del terreno en base a la intensidad de las campañas de investigación. Los datos aparentemente sesgados de diferentes fuentes de información y que aportan datos concretos de un aspecto geológico (hidrogeología, estratigrafía, petrología, geofísica, etc) pueden cobrar enorme relevancia si se combinan en una única base de datos georeferenciada. Los Servicios de Información Geográfica (GIS) por tanto, constituyen una herramienta indiscutible para mejorar la eficiencia de la información, tanto disponible hasta el momento como futuros datos aportados por investigaciones futuras. En este sentido, se considera oportuno realizar una labor de implementación de las capas vectoriales actualmente existentes en los sistemas de información geográfica regional, incorporando nueva información relacionada con el geotermalismo. El análisis bibliográfico también ha puesto de manifiesto la ventaja añadida de integrar los datos de carácter geológico y climático.

Algunos trabajos específicos (SchellSchmidt and Hurter, 2003) recomiendan integrar cuatro grandes tipos de mapas de isóneas georeferenciadas: profundidad del techo del reservorio geotermal, espesor del reservorio geotermal, temperatura a techo del reservorio y porosidad del mismo (para definir permeabilidad y transmisividad).

Aportaciones adicionales que otorgasen más información relevante de carácter geotérmico podrían ser la ubicación de las manifestaciones geotermales superficiales.

En áreas de interés geotérmico somero para recursos de muy baja energía, podría llevarse a cabo un mapa de isotermas donde se integre la ubicación de los puntos de información (pozos de agua, pozos de captación geotérmica, piezómetros) y la evolución de la temperatura del agua subterránea, influenciada por los sistemas de captación geotérmica en uso. Adicionalmente, podría llevarse a cabo una cartografía de riesgo (integrada con la anterior) donde se reflejen los puntos de mayor impacto térmico y su influencia en la calidad de las aguas. En este caso, se trataría de una medida de evaluación constante para asegurar la calidad del acuífero y las posibles anomalías.

## 10.2 CONCLUSIONES SOBRE LAS INSTALACIONES DE GEOTERMIA EN NAVARRA

- 1) Tras el exhaustivo estudio geológico e hidrológico de los suelos de Navarra presentado anteriormente, y en lo referente a la implantación de instalaciones de aprovechamiento de energía geotérmica, podemos concluir que, a falta de investigaciones de mayor calado, que a día de hoy únicamente se pueden explotar recursos de baja o muy baja temperatura.

Esto quiere decir que los únicos usos planteables de recursos geotérmicos en Navarra son del tipo balneoterapia en sitios muy puntuales (ya mencionados anteriormente) y de forma más generalizada mediante bombas de calor geotérmicas para calefacción, climatización y generación de ACS en edificios y cultivos.

- 2) Las instalaciones de geotermia en Navarra son su mayoría en viviendas unifamiliares, únicamente un 20% se implementa en edificios terciarios de otros usos. Aunque la potencia instalada de estos equipos no llega al 30% del total. Se puede decir que la instalación más representativa en Navarra es la una vivienda unifamiliar con un sistema para climatización y producción de ACS mediante una bomba de calor geotérmica de unos 10 kW de potencia nominal, con uno o dos pozos verticales de alrededor de unos 100 metros de profundidad con sondas geotérmicas de circuito cerrado.
- 3) Este tipo de instalaciones en viviendas actualmente no son muy rentables, como se ha podido ver en el análisis comparativo anterior aun siendo la instalación más eficiente de todas no es capaz de recuperar la inversión afrontada con los ahorros económicos producidos en un periodo razonable. La proliferación de estas instalaciones está claramente determinada por las subvenciones existentes en los años anteriores. Sin subvenciones directas el parque geotérmico en viviendas no ha crecido significativamente en los últimos años. Las razones de este hecho, son el abaratamiento y aumento de rendimientos de otras tecnologías renovables del tipo aerotermia y biomasa, algo que no ocurre en la misma medida en la geotermia debido al coste fijo de la instalación de pozos geotérmicos.
- 4) Una posible solución para el abaratamiento de las instalaciones geotérmicas y de esta forma mejorar sus periodos de amortización es intentar introducir instalaciones de circuito abierto en lugar de circuito cerrado. En viviendas unifamiliares en las que se instalen piscinas exteriores se podrían instalar bombas de calor de geotermia, trabajando contra la piscina, ahorrando la inversión en las perforaciones, y resultando un rendimiento general similar al de una instalación convencional con pozos verticales. Otra solución podría ser la de pozos de poca profundidad bajo el nivel freático en sistema abierto, bombeando agua del subsuelo y vertiéndola en otro pozo poco profundo. En este caso se deberían tener en cuenta las posibles afecciones

medioambientales provocadas, así como la notificación de dicha afección a la confederación hidrográfica correspondiente y a las entidades de control preceptivas. En los apartados anteriores ya se han comentado de forma teórica estas posibles afecciones, y realizando estudios más exhaustivos podría determinarse el nivel de afectación de este tipo de instalaciones.

También se debería de estudiar en obras de cierto calado en la comunidad Foral de Navarra la implantación de sistemas geotérmicos mediante sondas horizontales o pilotajes, de esta forma se podría ahorrar parte de la inversión la realización de pozos en profundidad, y aprovechar ciertas etapas previas de las obras en fase de excavación para la introducción de sondas geotérmicas. Para este tipo de instalaciones se deberían realizar estudios previos de cara a clasificar la calidad de los suelos como medio transmisor de calor. De esta forma se podría pensar en este tipo de instalaciones en suelos con buena transmitancia térmica y sin posibles problemas de existencia de yesos y bicarbonatos que pudieran dar lugar a problemas de colmatación y precipitación de sales, provocando el temido efecto de agotamiento de un pozo.

- 5) En lo referente al parque de instalaciones visitado para la confección del presente estudio, se debe resaltar la percepción general de que la implantación de estas instalaciones no fue la adecuada. Todos los indicios llevan a pensar que las subvenciones instauradas hacia 2009, hicieron un efecto llamado muy acusado. De forma que unas pocas empresas relacionadas con el sector de las energías renovables y la climatización, crecieron al albor de estas subvenciones, promocionando estas instalaciones rápidamente e instalando múltiples instalaciones en muy pocos años. Este crecimiento ciertamente desmedido, visto con perspectiva, parece haber generado muchos problemas en los usuarios de las instalaciones visitadas. Es muy común ver instalaciones que directamente no funcionan o que tienen problemas de diseño inicial, malos dimensionamientos y regulación climáticas de eficientes. En muchos casos las propiedades de los edificios tras muchos años de requerimientos a las empresas antes mencionadas y escasos resultados, consiguieron tener sus instalaciones a punto con la ayuda de otros profesionales del sector. Es bastante común que los propietarios de las instalaciones referida consideren una mala inversión la implantación de sistemas geotérmicos que hicieron en su día.

Una vez las instalaciones están puestas a punto y no sufren averías, los usuarios de forma general manifiestan su percepción de ahorro tanto energético como económico con sus instalaciones de geotermia.

- 6) Unido al punto anterior, en el que se comenta el nivel de satisfacción de los usuarios de estas instalaciones. Se piensa en una posible rectificación de la situación actual de las instalaciones, quizás dentro de una política energética sostenible y razonable pueda estar la corrección de una problemática generada en años anteriores, y en lugar de generar más instalaciones geotérmicas convencionales con la dedicación de recursos públicos a la promoción de esta tecnología, centrarse en la reforma y rehabilitación de las instalaciones existentes.

La mayoría de las instalaciones que no funcionan es por averías en alguno de ellos componentes de las bombas de calor geotérmicas. Esta problemática radica en la falta de atención por parte de los servicios técnicos autorizados de las marcas de los equipos instalación en los años comentados. Hay que decir que los equipos son de marcas de pequeño-mediano tamaño que se ubican en Centroeuropa, y generalmente delegan el servicio técnico en instaladoras ubicadas en cualquier parte del territorio nacional, que quizás no conozcan el producto en profundidad. Como se ha podido ver en el análisis de las instalaciones esto genera muchos problemas entre los diferentes entes que explotan las instalaciones.

- 7) Una implantación poco generalizada, y muy eficiente y económica de un sistema geotérmico podría ser implantación en los edificios de viviendas de sistemas de ventilación mediante precalentamientos de aire generados con la instalación de pozos canadienses o provenzales. Esta solución es muy sencilla técnicamente y mejora sustancialmente la eficiencia energética de los sistemas de ventilación en viviendas.
- 8) En grandes instalaciones es vital, que la instalación no esté parada, y las averías se resuelvan de forma rápida. A diferencia de las instalaciones planteadas en viviendas unifamiliares, en grandes edificios terciarios con demandas de climatización muy grandes, los periodos de amortización de una instalación geotérmica son relativamente rápidos. Siendo una solución muy viable, aunque siempre acompañada de instalaciones de apoyo, para llegar a los picos de consumo. Este caso se está dando en las grandes instalaciones geotérmicas en Navarra, con la consecuente pérdida económica y energética.
- 9) En la actualidad y sobre todo en pequeñas y medianas potencias de climatización y producción de ACS, otras tecnologías renovables como la aerotermia o la biomasa le están ganando la partida a las instalaciones de geotermia. La principal razón es el menor coste de inversión inicial de las mismas en comparación con el coste de implantación de las instalaciones geotérmicas. Además, en los últimos años, la aerotermia una tecnología muy similar con la única diferencia que utiliza la energía del aire en lugar de la de la tierra, ha aumentado mucho sus rendimientos y rangos de actuación en lo referente a temperaturas, por lo que son equipos que se adaptan a cualquier clima. Las diferencias de rendimiento existentes hace 15 o 20 años se están reduciendo, y cuando las demandas energéticas de los edificios se van reduciendo debido a mejores diseños y soluciones de eficiencia energética, hace despreciable la mejora de rendimiento de las instalaciones geotérmicas.

- 10) Sin embargo, se considera como una buena política energética promover la introducción de instalaciones geotermias de alta potencia en edificios institucionales con grandes demandas de calor y de frío y en los que planteen unidades terminales de climatización de baja temperatura, del tipo hospitales, edificios administrativos, pabellones polideportivos o piscinas. Los grandes consumos de estos edificios hacen posible rentabilizar la inversión en los sistemas con un rendimiento más alto, este es el caso de la geotermia, siempre se deberán de estudiar los casos y optimizar los diseños para implementar diferentes elementos de generación térmica basados en diferentes tecnologías, a poder ser renovables.

### 10.3 CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ De acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas, los gradientes geotérmicos medidos a partir de los datos de sondeos petrolíferos profundos, oscilan entre mínimos de 2,5°C/100 metros y 4,4°C/100 metros.
- ✓ Los yacimientos geotérmicos que pueden encontrarse en Navarra son de baja y muy baja temperatura. De acuerdo con la información recopilada por diferentes autores, de acuerdo al gradiente geotérmico se estiman temperaturas en un intervalo amplio de 50-90°C a partir de profundidades que en muchos casos son superiores a 2.000 metros.
- ✓ Serán necesarias nuevas fases y campañas de investigación para evaluar todas las zonas citadas como posibles áreas preferentes interés geotérmico, pudiendo ser descartadas en fases posteriores de investigación si la nueva información geológica exploratoria no ofreciese datos concluyentes de interés geotérmico o no considerase rentable la explotación del supuesto yacimiento.
- ✓ Las manifestaciones geotérmicas asociadas a manantiales de aguas termales en Navarra son Fitero (46°C), Betelu (25°C), Belascoain (26°C), Ibero (20°C) y Etxauri (20°C). Otros indicios geotérmicos son anomalías geotérmicas positivas en sondeos profundos, así como anomalías químicas de SiO<sub>2</sub> en acuíferos detríticos de la Ribera.
- ✓ Algunas de las manifestaciones termales descritas ya están siendo explotadas a través de complejos balneoterápicos, plantas embotelladoras, puntos de abastecimiento, etc. Por dicha razón, deberá tenerse en cuenta la legislación vigente y las posibles interferencias y afecciones que una futura explotación geotérmica podría ocasionar a las explotaciones existentes y a los usos actuales de las aguas subterráneas y superficiales
- ✓ Para instalaciones de media o baja potencia los periodos de amortización de la inversión inicial son menores con tecnologías como la aerotermia y la biomasa respecto de una instalación geotérmica.
- ✓ En instalaciones de gran potencia, a largo plazo, se producen mayores ahorros energéticos y económicos con instalaciones de geotermia.
- ✓ Es de vital importancia para la rentabilidad de una instalación geotérmica, evitar lo máximo posibles las paradas de la instalación tanto por averías como por proceso, por ello es muy importante un buen dimensionamiento y un excelente mantenimiento y reposición de piezas.

- ✓ Actualmente en Navarra las instalaciones geotérmicas existentes no se encuentran bien atendidas por los servicios técnicos de las marcas de las bombas de calor existentes y por algunas de las empresas que diseñaron estas instalaciones.
- ✓ Sería vital para la imagen de la geotermia en Navarra, ayudar a los propietarios de las instalaciones que apostaron en su día por la geotermia, ayudados por una política pública de subvenciones, ayudar a corregir los fallos de funcionamiento de las instalaciones existentes, siendo estos bastante graves y provocando mucha frustración en los usuarios.
- ✓ Si se aplicase una nueva política de subvenciones de esta tecnología, se debería de tratar de limitar el número de instalaciones a realizar cada año, y tratar de diversificar el mercado generado para las empresas instaladoras, de forma que las instalaciones que se monten no dependan de una o dos empresas, como ocurrió en la anterior convocatoria. Esto como se ha visto en el presente informe generó una serie de problemáticas difíciles subsanar.
- ✓ Las instalaciones montadas en los años comentados no tienen ningún tipo de sistema de monitorización y contaje de energía, de forma que en la mayor parte de los casos no se puede ni obtener datos de rendimiento y consumo.
- ✓ Sería interesante que en nuevas instalaciones de geotermia que se ejecuten si se promueven por medio de organismos públicos se inste a instalar equipos de monitorización y medida de la instalación geotérmica, de forma que se puede hacer un seguimiento de los consumos y rendimientos de las instalaciones.
- ✓ Finalmente comentar que la energía geotérmica en Navarra a falta de investigaciones en campo de mayor calado se limita al aprovechamiento en baja y muy baja temperatura para uso en climatizaciones y producción de ACS en edificios, y para ser una tecnología rentable y aprovechable se debe introducir en edificios con consumo energético elevado de calor y de frío y estable a lo largo del año.



## 11 BIBLIOGRAFIA

**AENOR (2014):** Norma UNE 100715-1:2014 Anejo G (normativo) Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte 1 Sistemas de circuito cerrado vertical.

**Albert, J.F. (1979):** Estudio geotérmico preliminar de Navarra. II Simposio Nacional de Hidrogeología. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos IV. Sección quinta: Técnicas Especiales. Pamplona, 22-26 de octubre de 1979, 511-531.

**Arrizabalaga, I., De Gregorio, M., García de la Noceda, C., Hidalgo, R. y Urchueguía, F. (2015):** Country Update for the Spanish Geothermal Sector. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

**Auqué, L.F., Fernández, J., Tena, J., Mandado, J., Gimeno, M.J. y Tolosa, P. (1989):** Análisis de los estados de equilibrio termodinámico en el reservorio de las surgencias termales de Fitero (Navarra) y Arnedillo (Rioja). Revista de la Sociedad Geológica de España, 2, 1-2. 125-132.

**BIDUR (2011):** Documento de síntesis: Estudio de evaluación de recursos subterráneos, análisis de demandas e identificación de presiones e impactos sobre las aguas. Proyecto INTERREG IVA BIDUR. Acción 2. Disponibilidad del recurso agua, superficial y subterránea. Coordinación: Gestión Ambiental Viveros y Repoblaciones de Navarra, S.A. IDRENA.

**Blasco, M., Auqué, L.F., Gimeno, M.J., Acero, P. y Asta, M. (2017):** Geochemistry, geothermometry and influence of the concentration of mobile elements in the chemical characteristics of carbonate-evaporitic thermal systems. The case of the Tiermas geothermal system (Spain). Chemical Geology 466 (2017) 696–709.

**Blasco, M., Gimeno, M.J. y Auqué, L.F. (2018):** Low temperature geothermal systems in carbonate-evaporitic rocks: Mineral equilibria assumptions and geothermometrical calculations. Insights from the Arnedillo thermal waters (Spain). Science of the Total Environment 615 (2018) 526–539.

**Bonte, M., Van Breukelen, B. y Stuyfzand, P. (2013):** Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production.

**Caja de Ahorros de Navarra (1991):** El agua en Navarra. ISBN 84-87120-15-6. 323pp.

**Castiella, J. (1985):** Geología. Aguas Subterráneas. Curso de perfeccionamiento sobre ciencias naturales. Sociedad de Ciencias Naturales Gorosti. Curso 1984-1985. Comunidad Foral de Navarra. Departamento de Educación y Cultura. Servicio de Enseñanzas no universitarias. 64pp.

**CGS (1986):** Estudio geoquímico del sistema hidrotermal de Yesa. Elaborado por Albert Bertrán y encargado por el Gobierno de Navarra, Servicio de Obras Públicas, Sección de Recursos hidráulicos y Geología.

**Chandler, A., Swanberg, A. y Morgan, P. (1978):** The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and Regional Heat Flow: A new heat flow map of the United States. *Pageoph*, Vol. 117 (1978/79).

**CHE e IGME (2014):** Análisis del impacto térmico generado por los pozos de climatización en las aguas subterráneas de la ciudad de Zaragoza. Convenio específico de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Ebro y el Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Ministerio de Economía y Competitividad, Gobierno de España. 1309pp.

**CHE / OPH (1995):** Asistencia Técnica para la Delimitación de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del Ebro (Plan Hidrológico). Clave 09.820.023/041111. Realizado por INTECSA. Memoria, planos y documentación adjunta.

**Coloma, P., Martínez-Gil, F. y Sánchez, A. (1997):** Las aguas mineromedicinales de las cuencas riojanas orientales como patrimonio hidrogeológico. *Zubía*, 15 (55-62).

**Coloma, P., Sánchez, J., Martínez, J. y Pérez, A. (1997):** Sistemas de flujo subterráneo regional en el acuífero carbonatado mesozoico de la Sierra de Cameros, Sector oriental. *Revista Estudios Geológicos* 53, 159-172.

**Coloma, P., Sánchez, J., Martínez, J. y Pérez, A. (1997):** El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro. *Revista Sociedad Geológica de España* 10 (3-4), 205-218.

**Coloma, P., Sánchez, J. y Martínez, F. (1996):** Procesos geotérmicos causados por la circulación del agua subterránea en el contacto entre la Sierra de Cameros y la Depresión terciaria del Ebro. *Geogaceta* 20 (3), 749-752.

**Coloma, P., Sánchez, J. y Martínez, F. (1995):** El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión terciaria del Ebro (sector riojano). *Geogaceta* 17, 1995.

**Cuchí-Oterino, J., Baeza, J. y García de la Noceda, C. (2000):** Overview of hydrogeothermics in Spain. *Environmental Geology* 39 (5) March 2000, 482-487.

**Del Valle, J. (1993):** Acuíferos de la Cuenca de Pamplona. Informe fechado como "Lekeitio, 26 de Agosto de 1993".

**Del Valle, J. y Villanueva, F. (1988):** Síntesis geológica de Navarra. Editado por Gobierno de Navarra, Departamento de Educación y Cultura. 125 pp. ISBN 84-235-0834-X

**Diputación Foral de Navarra (1977):** Proyecto Hidrogeológico de Navarra. Informe Técnico nº 19. Estudio geotérmico preliminar. Encargado por la Diputación Foral de Navarra en el año 1977 y realizado por la empresa Compañía General de Sondeos, S.A.

**Diputación Foral de Navarra (1982):** Las aguas subterráneas en Navarra. Proyecto Hidrogeológico. Dirección de Obras Públicas. Servicio Geológico. ISBN 84-235-0574-X. 230 pp.

**ENADIMSA (1985):** Seguimiento de sondeos de hidrocarburos. Investigación geotérmica del área de Jaca y sondeos recientes. Departamento. Hidrogeología, Geotermia y Medio Ambiente. 42 pp.

**Farouki, O. (1981):** Thermal properties of soils. CRREL Monograph 81-1. United States Army Corps of Engineers. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire, U.S.A. 151pp.

**Fernández, J., Auqué, L.F., Sánchez, V. y Guaras, B. (1988):** Las aguas termales de Fitero (Navarra) y Arnedillo (Rioja). II Análisis comparativo de la aplicación de técnicas geotermométricas químicas a aguas relacionadas con reservorios carbonatado-evaporíticos. Estudios Geológicos 44, 453-469.

**Fernández, M., Marzán, I., Correia, A. y Ramalho, E. (1997):** Heat flow, heat production, and lithospheric thermal regime in the Iberian Peninsula. Tectonophysics 291 (1998) 29-53.

**Floristán, A. (1995):** Geografía de Navarra. Tomos I a V. Editado por Diario de Navarra. Tomo I "El Solar I" y Tomo II "El Solar II. 660 pp. ISBN obra completa 84-89103-05-4.

**Fossen, H. (2016):** Structural Geology. Second Edition. ISBN 978-1-107-05764-7. Editorial Cambridge University Press. 510pp.

**Fouillac, C. y Michard, G. (1981):** Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. Geothermics, Vol. 10, Nº 1, pp. 55 – 70.

**Fournier, R. (1977):** Chemical geothermometers and mixing models for Geothermal systems. Geothermics, Vol. 5, pp. 41-50.

**Fournier, R. y Potter, R. (1982):** A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. Geothermal Resources Council Bulletin. November 1982.

**Galgaro, A., Di Sipio, E., Teza, G., Destro, E., De Carli, M., Chiesa, S., Zarrella, A., Emmi, G. y Manzella, A. (2015):** Empirical modeling of maps of geo-exchange potential for shallow geothermal energy at regional scale. Geothermics 57 (2015) 173–184.

**García-Gil, A. Epting, J., Alcaraz, M., Serrano, A., Sánchez, A., Montlleó, M., Rodríguez, G. y Lao, J. (2015):** GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account. Renewable Energy 77 (2015) 268-278.

**García-Gil, A. Epting, J., Ayora, C., Garrido, E., Vazquez-Suñe, E., Huggenberger, P. y Cristina, A. (2016):** A reactive transport model for the quantification of risks induced by groundwater heat pump systems in urban aquifers. Journal of Hydrology 542 (2016) 719–730.

**García-Gil, A., Epting, J., Garrido, E., Vazquez-Suñe, E., Mateo, J., Sánchez, A., Huggenberger, P. y Marazuela, M.A. (2016):** A city scale study on the effects of intensive groundwater heat pump systems on heavy metal contents in groundwater. *Science of the Total Environment* 572 (2016) 1047–1058.

**García-Gil, A., Vazquez-Suñe, E., Garrido E., Sánchez, A. y Mateo-Lázaro, J. (2014):** The thermal consequences of river-level variations in an urban groundwater body highly affected by groundwater heat pumps. *Science of the Total Environment* 485–486 (2014) 575–587.

**García-Gil, A., Garrido, E., Sánchez, A., Vazquez-Suñe, E. y Mateo, J. (2017):** La modelización tridimensional del flujo del agua subterránea y transporte de calor en la gestión de recursos geotérmicos someros en zonas urbanas. *Geogaceta*, 61. 59-62.

**García-Gil, A., Vazquez-Suñe, E., Garrido, E., Sánchez, A. y Mateo-Lázaro, J. (2015):** Relaxation factor for geothermal use development – Criteria for a more fair and sustainable geothermal use of shallow energy resources. *Geothermics* 56 (2015) 128–137.

**Garrido, E., García-Gil, A., Vazquez-Suñe, E. y Sánchez, A. (2016):** Geochemical impacts of groundwater heat pump systems in an urban alluvial aquifer with evaporitic bedrock. *Science of the Total Environment* 544 (2016) 354–368.

**Garrido, E. y Sánchez, A. (2004):** Contexto hidrogeológico de las manifestaciones geotérmicas y de aguas termales en la Cuenca del Ebro. VIII Simposio de hidrogeología. Asociación Española de Hidrología Subterránea. Tomo XXVI. ZARAGOZA, 18 - 22 de octubre de 2004. 411-420.

**Garrido, E., Sánchez, A. y Coloma, P. (2010):** Aprovechamiento geotérmico somero del acuífero aluvial urbano de Zaragoza: primeros resultados. *Geogaceta*, 49, 2010.

**Gestión Ambiental de Navarra, S.A. (2012):** Las aguas subterráneas en las cuencas cantábricas de Navarra. ISBN 978-84-616-6582-2. 135pp.

**Gobierno de Aragón (2001):** Atlas de la Energía Geotérmica en Aragón. Departamento de Industria, Comercio y Desarrollo. ISBN 84-7753-894-8. 190 pp.

**Gobierno de Navarra (2011):** Plan especial de protección civil ante el riesgo sísmico en la Comunidad Foral de Navarra “SISNA”. Departamento de Presidencia, Justicia e Interior y Agencia Navarra de Emergencias. Febrero 2011. Proyecto RISNA (UPM). 235pp.

**Gobierno de Navarra (2010):** La diversidad geológica de Navarra. Patrimonio geológico. Departamento de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones. 238 pp. ISBN 978-84-235-3247-6.

**Gobierno de Navarra (1992):** Mapa Geológico de Navarra 1:25.000. Memoria y Mapas de las Hojas 141-I (Cizur), 89-IV (Leiza).

**Cebrián, J. (1923):** Aguas minero-medicinales de Betelu (Navarra). Documento propiedad del Gobierno de Navarra y disponible a través del enlace: [https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=2ahUKEwizu4rHqOXeAhVCz4UKHYJrCLoQFjADegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.navarra.es%2Fappsext%2Fbnd%2FGN\\_Ficheros\\_PDF\\_Binadi.aspx%3FFichero%3DBGN00Ca289\\_2400000000000000000410.pdf&usg=AOvVaw2Z4bgD0zQ6UoXkIs-\\_RG0D](https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=2ahUKEwizu4rHqOXeAhVCz4UKHYJrCLoQFjADegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.navarra.es%2Fappsext%2Fbnd%2FGN_Ficheros_PDF_Binadi.aspx%3FFichero%3DBGN00Ca289_2400000000000000000410.pdf&usg=AOvVaw2Z4bgD0zQ6UoXkIs-_RG0D).

**González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002):** Ingeniería Geológica. Editorial Prentice Hall. ISBN: 84-205-3104-9. 715pp.

**IDAE (2012):** Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado. ISBN: 978-84-96680-60-9. Guía redactada por la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. 52pp.

**IDAE e IGME (2008):** Manual de Geotermia. Convenio de colaboración entre el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). ISBN: 978-84-96680-35-7. 192pp.

**IGME (2012):** Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica. Loreto Fernández Ruiz, ed. Nipo 474-11-028-8. 481pp.

**IGME (2010):** ALGECO2 Project: elección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en España. [WWWDocument]. URL. <http://info.igme.es/algeco2/>.

**ITGE (1976):** Inventario general de manifestaciones geotérmicas en el territorio nacional. Código 00226.

**IGME (2004):** Estudio del impacto hidrogeológico de la inyección profunda de salmuera procedente de las operaciones mineras de Potasas de Subiza (Navarra). Informe H8.001.4 del proyecto 20030048. Responsable Gerardo Ramos González.

**IGME (2001):** Las aguas minerales de España. ISBN 84-7840-424-4. Capítulo 6.16 Navarra. 406-413.

**IGME (1996):** Metodología de los perímetros de protección de las aguas minerales y minero medicinales. Jornadas de aguas minerales y minero-medicinales en España.

**IGME (1985):** Análisis metodológico de las técnicas geoquímicas empleadas en la prospección geotérmica. Ministerio de Industria y Energía, Secretaría de la Energía y Recursos minerales. 417pp.

**IGME (1985):** Análisis y valoración de las técnicas geofísicas aplicadas a la investigación geotérmica. Investigación bibliográfica de los métodos geofísicos en exploración geotérmica.

Ministerio de Industria y Energía, Secretaría de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 01291. 32pp.

**IGME (1984):** Convenio con Enadimsa para el desarrollo de trabajos de investigación geotérmica dentro del programa 234 otras fuentes de energía. Tecnología de pruebas de producción en yacimientos geotérmicos. Informe final. Ministerio de Industria y Energía, Secretaría de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00885.

**IGME (1984):** Convenio con Enadimsa para el desarrollo de trabajos de investigación geotérmica dentro del programa 234 otras fuentes de energía. Síntesis almacenes muy baja entalpía. Informe final. Ministerio de Industria y Energía, Secretaría de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00885.

**IGME (1984):** Convenio con Enadimsa para el desarrollo de trabajos de investigación geotérmica dentro del programa 234 otras fuentes de energía. Investigación campos rocas calientes secas. Informe final. Ministerio de Industria y Energía, Secretaría de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00885.

**IGME (1982):** estudio de las manifestaciones termales de Extremadura-Salamanca-Aragón-Rioja, orientadas a su posible explotación como recursos geotérmicos. Ministerio de Industria y Energía, Comisaria de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00747. 185pp.

**ITGE (1976):** Investigación general de manifestaciones geotérmicas en el territorio nacional. Dirección General de Minas e Industrias de la Construcción. Plan nacional de la Minería. Programa nacional de investigación minera. Código del documento 0225. 648pp y Anejos 1 y 2.

**IGME (1981):** Estudio de las posibilidades de explotación de energía geotérmica en almacenes profundos de baja y media entalpía del territorio nacional. Ministerio de Industria y Energía, Comisaria de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00660. 219pp.

**IGME (1982):** Utilización de los recursos geotérmicos de baja y media entalpía en industria, agricultura y vivienda. Ministerio de Industria y Energía, Comisaria de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00749. 280pp.

**IGME (1982):** Posibilidades de utilización de Energía geotérmica de baja y media entalpía en España. PARTE I: metodología general. Ministerio de Industria y Energía, Comisaria de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00751. 129pp.

**IGME (1982):** estudio de los problemas de corrosión y encostramiento en la explotación de los recursos geotérmicos de baja y media entalpía. Ministerio de Industria y Energía, Comisaria de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00750. 64pp.

**IGME (1982):** informe sobre el control informático y mantenimiento del archivo de análisis químicos de interés geotérmico. Ministerio de Industria y Energía. Código del documento 37018. 43pp.

**IGME (1982):** Actualización de los trabajos de síntesis contenidos en los fondos documentales del IGME. Dirección de Planificación y Gestión. Servicio de Informática, Documentación y Difusión. Código del documento: 00711. 297pp.

**IGME (1981):** posibilidades geoquímicas y mineras de las aguas termales en España. Trabajo realizado por GEOPRIN, S.A. 117pp.

**IGME (1981):** Metodología de medidas, ensayos y análisis en pozos geotérmicos. Ministerio de Industria y Energía, Comisaría de la Energía y Recursos minerales. Código del documento: 00800. 145pp.

**Jocal (2003):** Sondeo para captación de aguas subterráneas en Bigüezal (Navarra). Informe geológico y constructivo. Realizado por Perforaciones Jocal, S.L.

**Lago, M., Sanz, T. y Majarena, U. (2015):** El vulcanismo y su potencial geotérmico: perspectiva geológica. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2015 (23.1). (edición electrónica): 2385-3484 – Pags. 80-87.

**Lasheras, E., Lago, M., García, J. y Arranz, E. (1999):** Emplazamiento de sills y diques del Pérmico superior en el Macizo de Cinco Villas (Pirineo Navarro). Geogaceta, 25 (1999). 123-126.

**Llopis, G. y Rodrigo, V. (2010):** Guía de la Energía Geotérmica. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid y Dirección General de Industria, Energía y Minas. Consejería de Economía y Consumo. Comunidad de Madrid.

**López, I. (2014):** Evaluación ambiental de proyectos geotérmicos. I Curso Online de Especialista en Geotermia somera y certificación energética de edificios. Organizado por el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.

**Maraver, F. y Armijo, F. (2010):** Vademécum II de aguas mineromedicinales españolas. Editorial Complutense. ISBN: 978-84-7491-998-1. 366pp.

**Marini, L. (2004):** Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy. 106pp. Laboratorio di Geochimica, Università degli Studi di Genova, Genova.

**Marini, L., Chiodini, G. y Cioni, R. (1986):** New geothermometers for carbonate-evaporite geothermal reservoirs. Geothermics, Vol. 15, No. 1, pp. 77- 86.

**Martín-Gil, J., Martín-Ramos, P. y Martín-Gil, F. (1999):** Sobre las aguas minerales naturales de España: Asociaciones entre su composición química y localización geográfica. Geographicalia, 37. pp. 1-7.

**Méndez, J.A. (2009):** Balnea. Memoria de las aguas minero-medicinales española (siglos XIX y XX). Número 3 Extraordinario. Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid. ISBN 978-84-669-3061-1. 620 pp.

**Migliani, S., Orehounig, K. y Carmeliet, J. (2018):** A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood. *Energy and Buildings* 159 (2018) 462–473.

**Ministerio de Industria y Energía (1980):** Plan Nacional de Investigación de otras fuentes energéticas. Comisaria de la energía y recursos minerales. Dirección General de Minas. Código del documento 50232. 57pp.

**Molinero, J., Guimerá, J., Arcos, D., Bayer, M., Vilanova, E., Tincopa, M., Nardi, A., Von Igel, W. y Grandia, F. (2013):** Aproximación metodológica para la investigación geotérmica: desde la exploración inicial hasta la modelización del yacimiento. Barcelona, 18-19 abril 2013.

**Pahud, D. (2002):** Geothermal energy and heat storage. Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana. Dipartimento Costruzioni e Territorio. Laboratorio di Energia, Ecologia ed Economia. 133 pp.

**Peréx, M.J. y Unzu, M. (1992):** Termalismo y habitat en el Valle Medio del Ebro en época antigua. *Espacio, Tiempo y Forma, Serie 11, Hª Antigua, t. V, 1992*, págs. 295-308.

**Porowski, A. (2018):** Mineral and Thermal Waters. R.A. Meyers (ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. © Springer Science+Business Media LLC 2018.

**Possemiers, M., Huysmans, M. y Batelaan, O. (2014):** Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 2 (2014) 20–34.

**Real Academia Nacional de Farmacia (1991):** Monografía XVIII Balneario de Fitero. Monografías de aguas mineromedicinales. Instituto de España. 141pp.

**Rodríguez, R. y Díaz, M. (2009):** Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method. *Renewable Energy, Volume 34, Issue 7, July 2009, Pages 1716-1725*.

**Sánchez Guzmán, J. (2008):** Yacimientos geotérmicos. Investigación y explotación. I Congreso de la Energía Geotérmica en la edificación y la industria. Madrid, 15-16 Octubre 2008. Tecnología y Recursos de la Tierra, S.A. Organizado por la Comunidad de Madrid y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

**Sánchez Guzmán, J. (1985).** Yacimientos geotérmicos. Tipos y métodos de investigación en Energía Geotérmica. Instituto de Ingeniería de España, pp. 13-28.

**Sánchez Navarro, J.A. y Coloma, P. (1998):** Hidrogeología de los manantiales termales de Arnedillo. Zubía. Monográfico 10, (11-25). Logroño, 1998.

**Sánchez Navarro, J.A., Coloma, P. y Pérez, A. (2004):** Evaluation of geothermal flow at the springs in Aragón (Spain), and its relation to geologic structure. *Hydrogeology Journal* (2004) 12:601–609.

**Sánchez Navarro, J.A., Coloma, P., Pérez, A. y De Leiva, A. (2000):** Evaluación del flujo geotérmico en manantiales de Aragón. *Geogaceta*, 27. 155-158.

**Santesteban, I. (1986):** Detección de los conductos preferenciales de circulación en macizos karsticos. *KOBIE (Serie Ciencias Naturales)*. Bilbao. Nº XV.

**Sanz, E. y Yélamos, J. (1998):** Methodology for the study of unexploited aquifers with thermal waters. Application to the aquifer of the Alhama de Aragón hot springs. *Groundwater*, volume 36, nº6. Noviembre-Diciembre, 1998.

**SchellSchmidt and Hurter (2003):** Atlas of Geothermal Resources in Europe. European Geothermal Conference 2003 (Szeged, 2003 Hungary).

**Somogyi, V., Sebestyén, V. y Nagy G. (2017):** Scientific achievements and regulation of shallow geothermal systems in six European countries – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68(2017), 934–952.

**Sundberg, J. (1988):** Thermal properties of rocks and soils. *Geologiska institutionen Publ. A* 57 1988. University of Göteborg. 327pp.

**TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A. (2011):** Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020. Coordinación y revisión IDEA. 236pp.

#### Fuentes de información consultadas

- Gobierno de Navarra, Departamento de Desarrollo Económico, Dirección General de Industria, Energía e Innovación, Servicio de Energía, Minas y Seguridad Industrial.
- Gobierno de Navarra, Departamento de Desarrollo Económico, Dirección General de Obras Públicas, Servicio de Estudios y Proyectos.
- Gobierno de Navarra, Departamento de Desarrollo Económico, Dirección General de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Servicio de Economía Circular y Agua y Servicio de Innovación y Conocimiento en Sostenibilidad Territorial y Ambiental.
- Universidad de Zaragoza, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Geológicas, Área de Petrología y Geoquímica, Área de Hidrogeología y Área de Geodinámica.
- Instituto Geológico y minero de España (IGME), Área de Investigación de Recursos Minerales.
- IGME (Servicio de Información de Geología del Subsuelo, recursos energéticos y almacenamiento de CO<sub>2</sub>).

- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).
- IRENA (International Renewable Energy Agency).
- IEA (International Energy Agency).
- EGEC (European Geothermal Energy Council).
- IGA (International Geothermal Association).
- European Commission. Intelligent Energy Europe.
- World Energy Council.
- APPA (Asociación de Empresas de Energías Renovables).
- FENERCOM (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid).
- GEOPLAT.
- GRUPO VISIONA NAVARRA.
- CREGE (Laboratoire de géothermie, Univ. de Neuchâtel, Suiza).
- ReGeoCities Project
- Empresa INGEO, Investigación Geotérmica.
- Publicaciones en Revistas Científicas relacionadas con la energía geotérmica.
- Visores temáticos online con información georeferenciada con información relevante de aplicación a la geotermia:
  - Global Atlas for Renewable Energy (IRENA).
  - IDENA (Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra).
  - SITNA (Sistemas de Información Territorial de Navarra). Mapa geológico.
  - NAVARRA.ES (Meteorología y Climatología de Navarra). Estaciones.
  - IGME (visor cartográfico multicapa de información geológica).
  - IGME (Almacenes geológicos potenciales de CO<sub>2</sub>).
  - SITEBRO (Geoportal de la Confederación Hidrográfica del Ebro).
  - MAPAMA. Red de Seguimiento Calidad de aguas subterráneas: Red de Control de estado químico, Red piezométrica, Unidades Hidrogeológicas. Red de Seguimiento de Calidad de aguas superficiales: Estaciones de aforo.