



VALORACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO BASADO EN EL RECURSO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA EN LA ISLA DE GRAN CANARIA

**MÁSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA
TRABAJO FIN DE MÁSTER**

OMAYRA DEL PINO DÍAZ MOLINA

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, me gustaría agradecer a mis tutores Alejandro Ramos y Ricardo Aguasca por la labor realizada tutorizando este trabajo. Ha sido un verdadero placer trabajar con ambos en esta primera experiencia de investigación.

A continuación, agradecerle a mi familia todo el apoyo. A mis padres y mi hermano, pero en especial a mi madre Noelia, que siempre ha estado ahí con una sonrisa y una palabra de ánimo durante mi formación profesional. Nada de esto habría sido posible sin su apoyo.

A mi pareja Tomás, que siempre ha sabido darme ánimos y hacerme tener actitud positiva ante los problemas que iban surgiendo en la elaboración del trabajo. Y a mi compañero de máster José Manuel Díaz, por tantas penas y alegrías que compartimos juntos durante esta andadura académica.

Finalmente, a todos esos compañeros, amigos y familiares que siempre han estado ahí animándome.

A todos, mil gracias.

Omayra Díaz.

1 TABLA DE CONTENIDO

1	Tabla de contenido	4
1	Introducción	8
2	Antecedentes	8
3	Recurso Geotérmico	10
4	tecnologías para el uso de la energía geotérmica de baja entalpía	11
4.1	tipos de tecnologías	12
4.1.1	Sistemas Abiertos	12
4.1.2	Sistemas Cerrados.	13
4.2	bomba de calor geotérmica	22
5	Normativa de Aplicación.....	26
5.1	Directiva 2010/31/UE	26
5.2	Directiva 2009/28/CE	26
5.3	Reglamento de Instalaciones Térmicas en la Edificación.....	26
5.4	Código Técnico de la Edificación	27
6	Climatología de la isla de Gran Canaria	27
6.1	El clima	27
6.2	Tipos de Clima Existentes en Gran Canaria.....	28
6.3	Sectorización del Clima según el Código Técnico	29
7	Fundamentos térmicos del terreno	31
8	Sistema geotérmico objetivo del estudio	32
9	Transferencias de Calor	33
10	Propiedades Térmicas del Sistema.....	35
10.1	Conductividad	35
10.2	Capacidad térmica	37
10.3	Difusividad térmica	37
10.4	Convección	38
10.5	Radiación	38
11	Método de elementos finitos (fem)	41
11.1	Formulación débil del flujo de calor.....	43
11.2	Condiciones de Frontera.....	44

12	Desarrollo del Trabajo.....	46
12.1	Parametrización y definición de las variables.....	47
12.2	Condiciones de Contorno.....	49
12.3	Mallado.....	50
12.4	Simulación.....	51
12.5	Resultado y Conclusiones.....	78
13	Líneas Futuras de investigación.....	79
14	Código Freefem++.....	80
15	Bibliografía.....	84

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Energía geotérmica utilizada en usos directos en 2010	9
Ilustración 2. Diagramas de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con sondeos de captación de agua (sistema abierto)	12
Ilustración 3.. Sistema cerrado con intercambiador de calor horizontal	14
Ilustración 4. Sistema cerrado con intercambiador de calor horizontal de un bucle	14
Ilustración 5. Sistemas cerrados con intercambiadores de calor de tipo bobina	15
Ilustración 6. Sistema cerrado con colector en zanja	16
Ilustración 7. Sonda geotérmica	17
Ilustración 8. Intercambiadores verticales en sondeos (sondas geotérmicas)	18
Ilustración 9. Tipos de instalación de tubos captadores verticales en sondas geotérmicas	19
Ilustración 10. Sistema de cimentaciones energéticas	20
Ilustración 11. Tubos intercambiadores de calor integrados en un pilote para cementación	21
Ilustración 12. Esquema de funcionamiento de la bomba de calor geotérmica	23
Ilustración 13. Esquema de funcionamiento de la bomba de calor geotérmica	23
Ilustración 14. Representaciones relación temperatura-prestaciones de una bomba de calor	25
Ilustración 15. Clasificación Climática de Köpen-Geiger en Gran Canaria	29
Ilustración 16. Sectores climáticos de Gran Canaria	30
Ilustración 17. Variación de la temperatura de la Tierra en función de la profundidad a lo largo de un año	31
Ilustración 18. Sistema geotérmico del estudio	32
Ilustración 19. Transferencias de calor que intervienen en el sistema	34
Ilustración 20. Transferencias de calor que intervienen en el sistema	46
Ilustración 21. Regiones del sistema en Freefem++	48
Ilustración 22. Condiciones de frontera en Freefem++	49
Ilustración 23. Mallado en Freefem++	50
Ilustración 24. Distribución Geológica de Gran Canaria	51
Ilustración 25. Localización municipio Agaete	52
Ilustración 26. Distribución de Tª en Agaete, mes de Enero	54

<u>Ilustración 27. Distribución de temperatura Agaete en enero</u>	54
<u>Ilustración 28. Distribución de T^a en el terreno, Agaete en Agosto</u>	55
<u>Ilustración 29. Distribución T^a Agaete- Agosto</u>	56
<u>Ilustración 30. Localización del municipio de Firgas</u>	57
<u>Ilustración 31. Distribución de T^a en el terreno Firgas-Enero</u>	58
<u>Ilustración 32. Distribución de T^a en el terreno en Firgas en Enero</u>	58
<u>Ilustración 33. Distribución de T^a terreno Firgas- Agosto</u>	59
<u>Ilustración 34. Distribución de T^a en el terreno en Firgas en Agosto</u>	60
<u>Ilustración 35. Localización municipio de Mogán</u>	61
<u>Ilustración 36. Distribución de T^a en el terreno en Firgas en el mes de enero</u>	62
<u>Ilustración 37. Distribución T^a terreno Mogán- Enero</u>	63
<u>Ilustración 38. Distribución de T^a en el terreno en Mogán en el mes de Agosto</u>	63
<u>Ilustración 39. Distribución T^a terreno Mogán- Agosto</u>	64
<u>Ilustración 40. Localización municipio Vega de San Mateo</u>	65
<u>Ilustración 41. Distribución de T^a en el terreno en San Mateo mes Enero</u>	66
<u>Ilustración 42. Distribución T^a terreno San Mateo- Enero</u>	67
<u>Ilustración 43. Distribución de T^a en el terreno en San Mateo mes de Agosto</u>	67
<u>Ilustración 44. Distribución T^a terreno San Mateo- Agosto</u>	68
<u>Ilustración 45. Localización municipio de Ingenio</u>	69
<u>Ilustración 46. Distribución de T^a en el terreno de Ingenio en Enero</u>	70
<u>Ilustración 47. Distribución T^a terreno Ingenio- Enero</u>	71
<u>Ilustración 48. Distribución T^a en el terreno de Ingenio mes de Agosto</u>	71
<u>Ilustración 49. Distribución T^a terreno Ingenio-Agosto</u>	72
<u>Ilustración 50. Distribución de temperatura en el terreno</u>	73
<u>Ilustración 51. Distribución de T^a modificando la parametrización</u>	74
<u>Ilustración 52. Distribución de T^a modificando el diámetro del micropilote</u>	75
<u>Ilustración 53. Distribución de T^a con variaciones de parametrización</u>	76
<u>Ilustración 54. Distribución de T^a variación de terrenos</u>	77
<u>Ilustración 55. Distribución de T^a en Firgas con parametrización modificada</u>	77
<u>Ilustración 56. Distribución de T^a en Firgas con modificación de material</u>	78

VALORACION DEL POTENCIAL ENERGETICO BASADO EN EL RECURSO GEOTERMICO DE BAJA ENTALPÍA EN LA ISLA DE GRAN CANARIA

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de abordar del calentamiento global mediante la utilización de recursos sostenibles y las energías limpias, han favorecido al desarrollo de nuevas tecnologías para el uso de las energías renovables. La tecnología geotérmica permite obtener electricidad, calor o frío generando niveles muy bajos de gases de efecto invernadero.

En particular, la geotermia de baja entalpía ha tomado un gran reconocimiento durante estos últimos años debido a la accesibilidad que permite frente a la geotermia de alta entalpía. La sostenibilidad y la rentabilidad de los recursos geotérmicos de baja entalpía están estrictamente relacionados con un análisis adecuado de la respuesta térmica del terreno a la hora de extraer o inyectar la energía. De hecho, las metodologías de dimensionamiento y las estrategias de optimización de los sistemas geotérmicos no solo se basan en la energía requerida para el sistema sino en las variaciones térmicas del suelo. Por lo tanto, un modelo matemático preciso del comportamiento termodinámico del suelo es fundamental para optimizar el diseño de un sistema geotérmico de baja entalpía.

Por ese motivo el objetivo de este trabajo es estudiar el recurso geotérmico de baja entalpía en la isla de Gran Canaria, teniendo en cuenta las características geológicas y climatológicas de distintas zonas de la isla.

2 ANTECEDENTES

La energía geotérmica es aquella que se obtiene del interior de la tierra. El origen de este tipo de energía está vinculado con la estructura de nuestro planeta y los complejos procesos que se producen en su interior. Los usos prácticos de la geotermia pueden remontarse a la época prehistórica. Existen evidencias del uso de la energía geotérmica para cocinar o el aseo, desde la antigua Grecia o la época románica.

A finales del año 2009, el número de países que hacían uso de la misma con el fin citado era de 78, con una capacidad instalada de 50.583 MWt. Esta última cifra representa un crecimiento del 78,9% respecto a 2005, lo que significa un incremento anual medio del 12,33%, con un factor de capacidad de 0,27 (equivalente a 2.365 horas de operación a plena carga al año).

La energía térmica utilizada fue de 121.696 GWh/año (438.071 TJ/año), lo que significa un 60,2% más que en el año 2005 (9,9% de incremento anual). Ello supuso un ahorro energético por año estimado de 307,8 millones de barriles de petróleo (46,2 millones de toneladas), así como un ahorro de emisiones de 148,2 millones de toneladas de CO₂ (comparado con el empleo de petróleo para generar electricidad). La bomba de calor geotérmica representó el 49% de los usos térmicos de esta energía, mientras que el 24,9% se destinó a usos balnearios y de calentamiento de piscinas y un 14,4% a la calefacción de recintos. La siguiente figura refleja con mayor detalle esta distribución por usos térmicos.

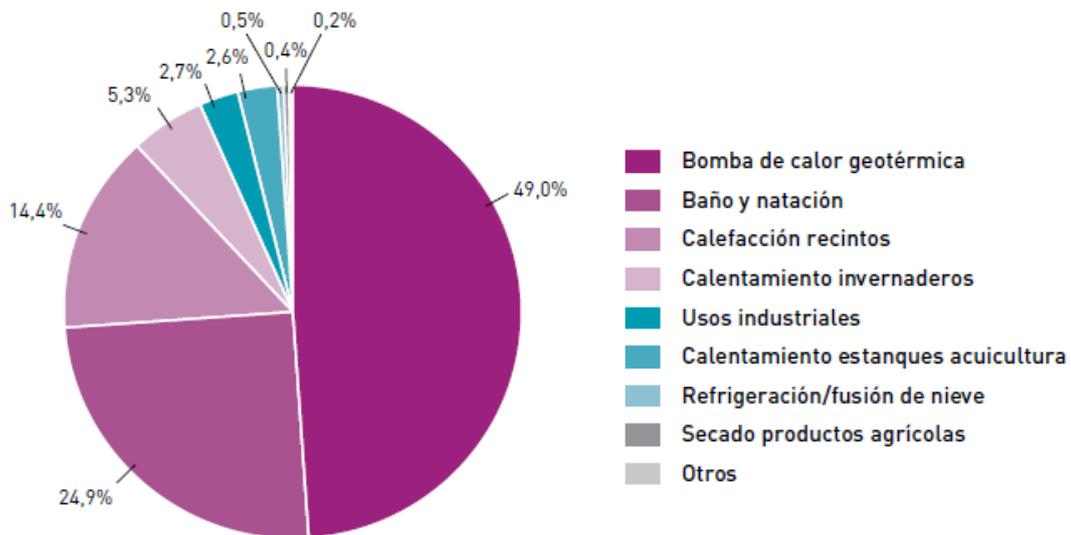


Ilustración 1. Energía geotérmica utilizada en usos directos en 2010

Es importante destacar que la generalización del uso de la bomba de calor geotérmica ha abierto la posibilidad de que esta energía pueda aprovecharse casi en cualquier lugar, tanto para calefacción como para refrigeración. De igual modo, su uso está siendo fomentado por la utilización de recursos de baja y media entalpía en centrales de generación combinada de electricidad y calor, donde aguas de temperatura inferior a 100 °C se hacen circular primero, a través de un ciclo binario (Rankine) para producir electricidad y, posteriormente, son empleadas como fuente de calor para diferentes aplicaciones (calefacción, piscinas, invernaderos, acuicultura, etc.) antes de ser reinyectadas en el acuífero. Este tipo de instalaciones, frecuentes en países del norte de Europa como Islandia, Alemania o Austria, obviamente maximizan el aprovechamiento del recurso geotérmico, así como su rendimiento económico.

Sin embargo, nuestro país cuenta entre las naciones en que tradicionalmente estos sistemas han tenido más escaso desarrollo, situación poco acorde, tanto con el potencial de dicha fuente como con el impulso que ha tenido en otros países. Sería en consecuencia relevante preguntarse por las causas específicas que explicarían la diferencia con respecto a países como Suecia, Alemania, Suiza o Austria, en los que la bomba de calor geotérmica, ya

desde finales de los años 70 y al calor de las sucesivas crisis del petróleo, ha ido consolidándose en los respectivos mercados de calefacción y refrigeración.

Los cinco países que cuentan con la mayor capacidad instalada son Estados Unidos, China, Suecia, Noruega y Alemania que, en conjunto, representan el 62,8% de la capacidad mundial.

3 RECURSO GEOTÉRMICO

Se define el recurso geotérmico como la fracción de la energía geotérmica que puede ser aprovechada de forma técnica y económicamente viable.

El concepto de recurso geotérmico es tan amplio que incluye desde el calor que puede encontrarse en los horizontes más superficiales del suelo hasta el almacenado en rocas situadas a las profundidades que podrían alcanzarse con técnicas de perforación de pozos petrolíferos.

En cuanto a sus tipos, los recursos geotérmicos se clasifican según su nivel térmico, es decir, su entalpía, el cual es el factor que condiciona su aprovechamiento. Los valores de temperatura establecidos como límite para su diferenciación pueden variar según los autores. Los admitidos por la Plataforma Tecnológica Española de Geotermia (GEOPLAT), son los que se indican en la siguiente clasificación:

- **Recursos geotérmicos de alta entalpía ($T > 150^{\circ}\text{C}$).**

Se encuentran principalmente en zonas con gradientes geotérmicos elevados y se sitúan a profundidades muy variables (son frecuentes entre 1.500 y 3.000 m). Están constituidos por vapor seco (muy pocos casos) o por una mezcla de agua y vapor, y se aprovechan fundamentalmente para la producción de electricidad.

- **Recursos geotérmicos de media entalpía ($T: 100-150^{\circ}\text{C}$).**

Pueden localizarse en zonas con un gradiente geotérmico elevado a profundidades inferiores a los 2.000 m, y en cuencas sedimentarias a profundidades entre los 3.000 y 4.000 m. Su temperatura permite el uso para la producción de electricidad mediante ciclos binarios. También pueden aprovecharse para uso térmico en calefacción y refrigeración en sistemas urbanos y en procesos industriales.

- **Recursos geotérmicos de baja entalpía ($T: 30-100^{\circ}\text{C}$).**

Se localizan habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades entre 1.500 y 2.500 m, o a profundidades inferiores a los 1.000 m en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. Su utilización se centra en los usos térmicos en sistemas de calefacción/climatización y ACS urbanos, y en diferentes procesos industriales. Los fluidos geotérmicos raras veces se utilizan directamente, lo más frecuente es el aprovechamiento de su energía mediante intercambiadores y/o bombas de calor. Suelen requerir una demanda importante de energía calorífica en las proximidades.

- **Recursos geotérmicos de muy baja entalpía ($T < 30^{\circ}\text{C}$).**

Las temperaturas de estos recursos suelen acercarse a la media anual del lugar donde se captan. Corresponden a la energía térmica almacenada en las aguas subterráneas, incluidas las provenientes de labores mineras y drenajes de obras civiles, siempre para uso exclusivamente energético y no consuntivo del agua, y en el subsuelo poco profundo (normalmente, a menos de 200 m, incluyendo las captaciones de calor asociadas a elementos constructivos de la edificación). En este último caso, la energía renovable puede captarse de manera muy eficiente dada la estabilidad térmica del subsuelo frente a la oscilación estacional del ambiente, como consecuencia de la transmisión de calor hacia las zonas más externas de la corteza. Dicha transmisión hace posible que, a partir de 8-10 m de profundidad, la temperatura del terreno se mantenga prácticamente estable durante todo el año. Su aplicación son los usos directos del calor: aporte energético a sistemas de ventilación, calefacción y refrigeración de locales y/o procesos, con o sin utilización de una bomba de calor.

4 TECNOLOGÍAS PARA EL USO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA

Dada su estabilidad térmica frente a los cambios estacionales, el subsuelo, en sus primeros 100-200 m, resulta un medio adecuado para proporcionar y almacenar energía térmica. De hecho, a 10-20 m de profundidad, su temperatura se mantiene prácticamente constante, incrementándose según el gradiente geotérmico al aumentar la profundidad (3 °C cada 100 m). Las tecnologías para aprovechar esta energía almacenada en los primeros metros de la corteza terrestre son básicamente dos:

- **Bomba de calor geotérmica**, o bomba para calor de fuente terrestre (GHP: Geothermal Heat Pump).

- **Almacenamiento subterráneo de energía térmica** (UTES: Underground Thermal Energy Storage).

En ambos casos, las tecnologías desarrolladas para aprovechar el calor del subsuelo son función de la accesibilidad del recurso geotérmico, y pueden clasificarse en dos tipos principales que, a su vez, incluyen diferentes subtipos:

- **Circuitos abiertos**, basados en el uso de aguas subterráneas, que suponen la captación de agua de un acuífero para su aprovechamiento. En este caso, el agua subterránea es el medio de transporte del calor.

- **Circuitos cerrados**, cuyo fundamento es el empleo de un fluido, básicamente, agua con algún aditivo, para extraer el calor de los materiales existentes a poca profundidad en el subsuelo. Implican la instalación de un intercambiador en el terreno para el aprovechamiento energético, cuya pared separa el fluido termoportador de la roca y del agua subterránea.

4.1 TIPOS DE TECNOLOGÍAS

4.1.1 Sistemas Abiertos

Se caracterizan porque el portador del calor, el agua subterránea, fluye libremente en el subsuelo y actúa, además de como fuente de calor, como medio para el intercambio del mismo. El principal aspecto técnico de este tipo de sistemas es el relativo a los sondeos perforados para explotar la capa freática o los recursos de acuíferos poco profundos situados por debajo de ésta. En la mayoría de los casos, son necesarios dos sondeos, explotación mediante doblete de sondeos, uno para extraer el agua subterránea y otro para reinyectarla en el mismo acuífero de la que se obtuvo.

El sondeo de captación, equipado con una bomba sumergible, conduce el agua subterránea hasta la bomba de calor, desde donde, una vez enfriada tras extraer su energía, se devuelve al acuífero de origen o se vierte a un cauce superficial.

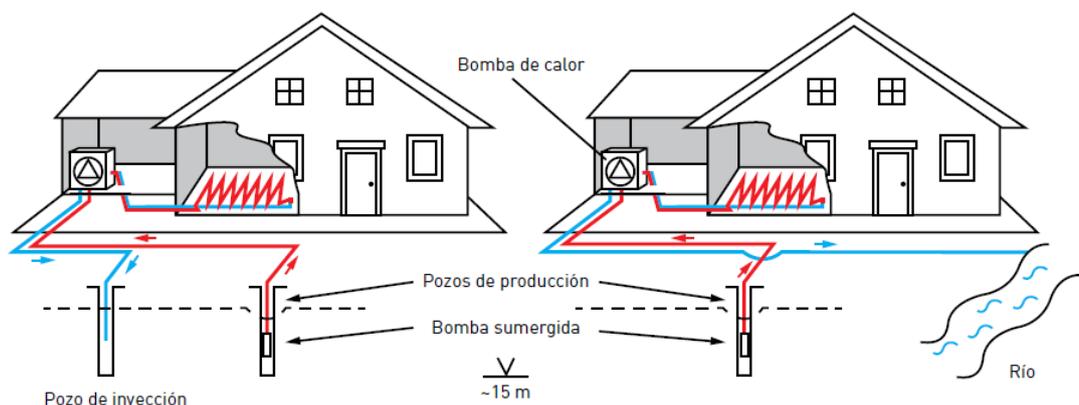


Ilustración 2. Diagramas de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con sondeos de captación de agua (sistema abierto)

Con el fin de evitar el enfriamiento continuo del agua subterránea, los sondeos de producción e inyección deben situarse, respectivamente, aguas arriba y aguas abajo del flujo subterráneo, y a la distancia adecuada, de acuerdo con los modelos de transmisión de calor.

Para la aplicación de estos sistemas se requiere una permeabilidad suficientemente elevada del terreno, que permita obtener la cantidad necesaria de agua subterránea a poca profundidad, y una cierta calidad de esta última, circunstancia que supone el control de ciertos parámetros, como el contenido de hierro y el potencial redox, para evitar problemas de corrosión, precipitación y obstrucción de conducciones, que, a largo plazo, podrían afectar al funcionamiento de la instalación.

Estos sistemas, bastante difundidos en España, sobre todo en zonas con acuíferos aluviales con buenas productividades y piezometrías someras, son sencillos, con bajos costes de inversión y elevados rendimientos, aunque con el inconveniente de que su explotación está sujeta a una tramitación administrativa compleja y dilatada.

4.1.2 Sistemas Cerrados.

Se basan en el empleo de intercambiadores enterrados, con un fluido termoportador en su interior que cede la energía del subsuelo a la bomba y viceversa. Por tanto, es el fluido que circula por el intercambiador en circuito cerrado el que se lleva a la bomba de calor y no el agua subterránea, como sucedía en el caso de los sistemas abiertos.

Los sistemas cerrados ofrecen la posibilidad de aprovechar el calor acumulado en los materiales de los niveles más externos de la corteza terrestre, en las situaciones en que la impermeabilidad del terreno o la profundidad de los niveles no permite explotar la energía de las aguas del subsuelo. Son de dos tipos, horizontales y verticales, en función de cómo se sitúen los intercambiadores en el terreno.

4.1.2.1 *Sistemas Horizontales*

Los circuitos cerrados con intercambiador de calor horizontal son los sistemas cerrados más fáciles de instalar, aunque, en ocasiones, están sujetos a limitaciones de espacio. Por este motivo, en el centro y el oeste de Europa, las tuberías se disponen siguiendo un diseño relativamente denso, conectándose en serie o en paralelo.

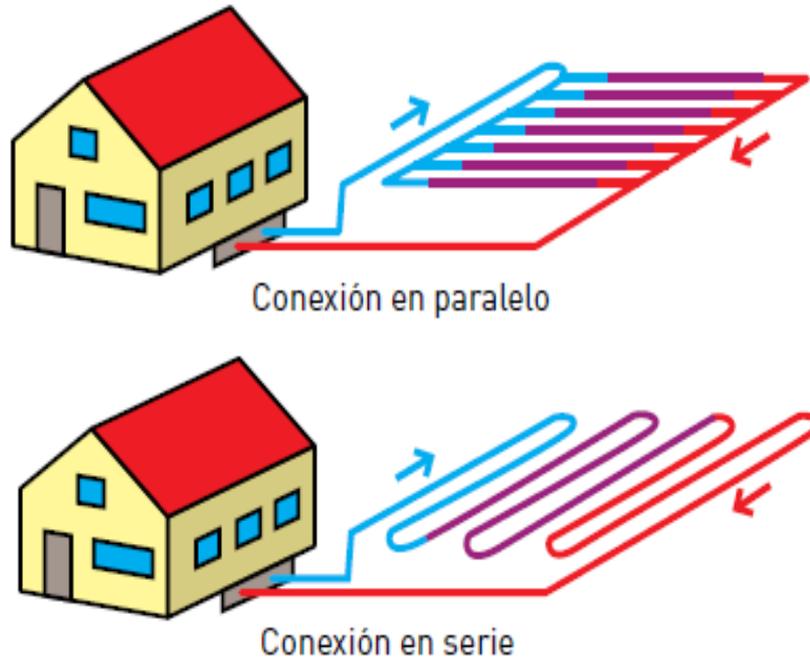


Ilustración 3.. Sistema cerrado con intercambiador de calor horizontal

En estas distribuciones con alta densidad de tuberías, lo habitual es retirar completamente la capa superficial del terreno, colocar las conducciones y, finalmente, cubrirlas con la tierra retirada. En el norte de Europa y de América, donde el terreno es más barato, se prefiere un circuito más amplio, con tuberías situadas en zanjas.



Ilustración 4. Sistema cerrado con intercambiador de calor horizontal de un bucle

Las tuberías, normalmente de polietileno, de 25 a 40 mm de diámetro, por las que circula el líquido de intercambio térmico, agua o agua glicolada, se instalan en zanjas a una profundidad mínima de 0,90 metros, en disposiciones que incluyen hasta seis tubos por zanja, aunque lo habitual es que sólo se coloquen dos.

Para solventar los problemas de espacio que se plantean con este tipo de colectores, se han desarrollado unos intercambiadores de calor especiales para ubicar en el terreno, que resultan ser los más adecuados para sistemas que trabajan con bombas de calor para usos en calefacción y refrigeración. Un tipo de estos intercambiadores, conocido como slinky, que se basa en la colocación de bobinas de polietileno en el terreno, extendiendo las sucesivas espiras e intercalando tierra seleccionada o arena. Dichas espiras pueden disponerse horizontalmente, en una zanja ancha, o verticalmente, en una zanja estrecha.

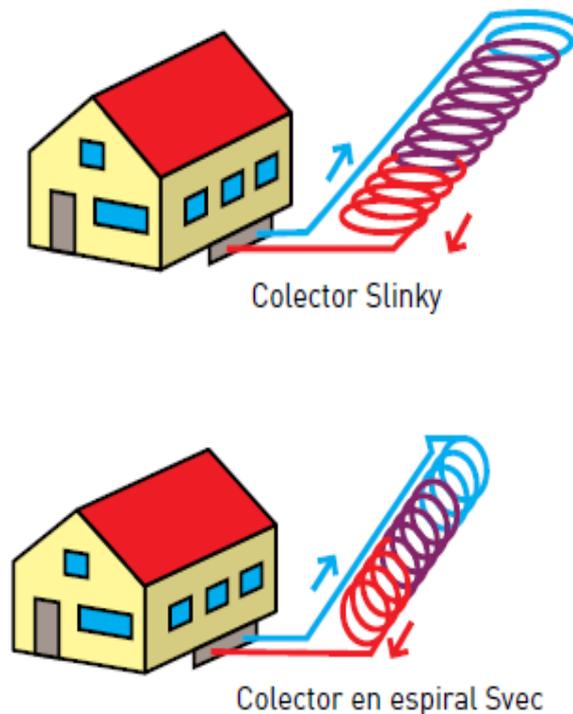


Ilustración 5. Sistemas cerrados con intercambiadores de calor de tipo bobina

Estos colectores son ampliamente utilizados en EEUU pero sólo uno de sus tipos, el colector en zanja (trench collector), ha alcanzado cierta distribución en Europa, sobre todo en Austria y el Sur de Alemania. Este consiste en sujetar varias tuberías de pequeño a las paredes bastante inclinadas de una zanja, a varios metros de profundidad.

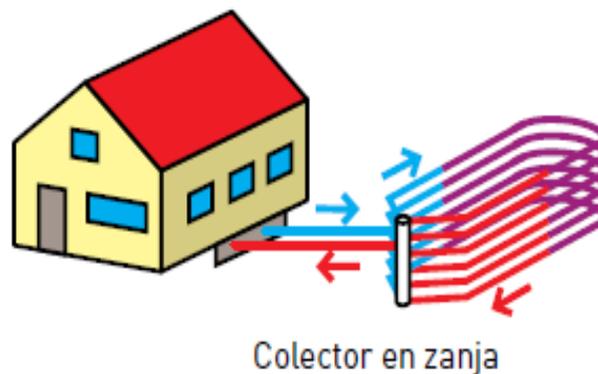


Ilustración 6. Sistema cerrado con colector en zanja

La radiación solar, al incidir sobre la superficie terrestre, constituye el principal medio de recarga térmica de estos sistemas, por lo que es importante no cubrir la superficie situada por encima de las tuberías situadas en el terreno.

Normalmente, estos sistemas tienen un coste inferior al que supone la perforación de sondeos, pero presentan el inconveniente de requerir una considerable superficie con espesores ripables superiores a 1 metro, lo que no siempre es fácil de conseguir, además de estar sometidos a importantes variaciones de temperatura y humedad, que afectan al rendimiento estacional.

Una variante de los sistemas cerrados con intercambiador horizontal son los denominados sistemas de expansión directa, en los que el intercambio térmico se realiza mediante la circulación del fluido refrigerante directamente por el circuito situado en el terreno. La ventaja de esta tecnología, limitada a las unidades más pequeñas, es que evita uno de los procesos de intercambio de calor, ofreciendo, de este modo, la posibilidad de mejorar la eficacia del sistema. En Francia y Austria, la expansión directa también se ha combinado con la condensación directa en los sistemas de calefacción de suelos.

4.1.2.2 *Sistemas Verticales*

Los sistemas cerrados con intercambiador vertical suponen la perforación de sondeos de profundidad variable, normalmente, entre 60 y 200 metros y un diámetro de 10 a 15 cm, en los que se introducen colectores de calor, es decir, un doble tubo en el caso más sencillo, por los que circula el fluido. Estos dispositivos verticales de captación de calor se denominan sondas geotérmicas.

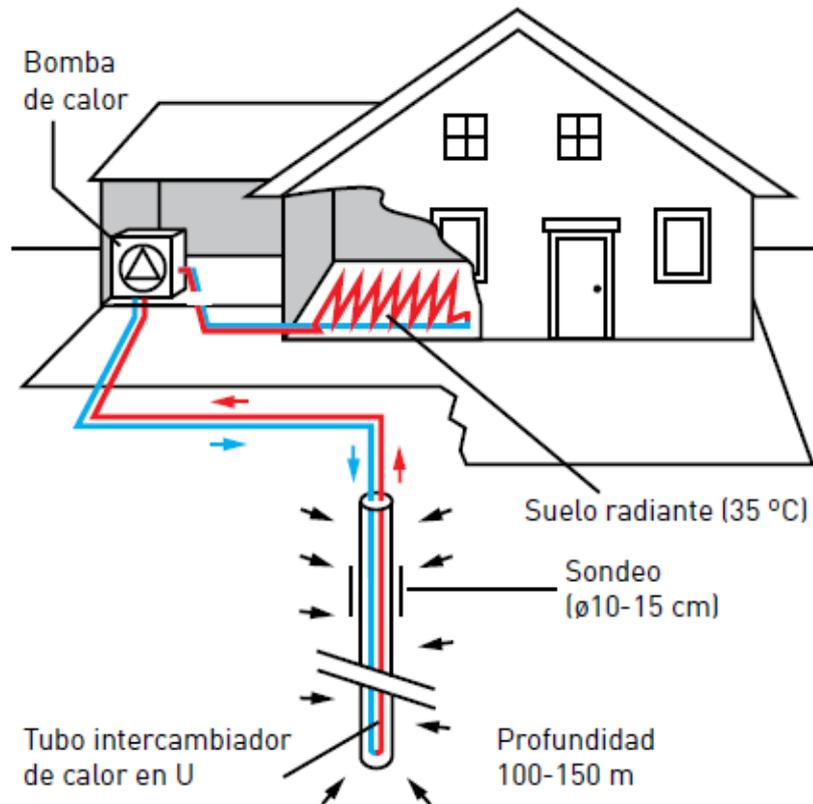


Ilustración 7. Sonda geotérmica

Los tubos captadores se introducen en los sondeos tras finalizar la perforación. Habitualmente, se instalan tuberías de polietileno o polipropileno, cuyo diámetro varía entre 3/4" (25 mm) y 2" (63 mm), en función del caudal circulante y la longitud del circuito.

La fuente de recarga de la energía térmica captada por los intercambiadores verticales es, en la zona superficial, la radiación solar y, en la zona inferior, el flujo de calor geotérmico, con cierta influencia del agua subterránea circulante o de las aguas percoladas. Durante el funcionamiento de la bomba de calor geotérmica, se registra un descenso de la temperatura del terreno en torno al sondeo, al que hay que unir el derivado de la denominada resistencia térmica del propio sondeo, del que son responsables el material de relleno del mismo y las paredes del intercambiador. Para reducir las pérdidas de temperatura en los sondeos, éstos deben rellenarse con algún material que permita la transmisión de calor a los tubos captadores situados en su interior, además de la circulación del agua que pudiera haber en el terreno debido a la existencia de algún nivel freático a poca profundidad o a la presencia de aguas someras procedentes de filtraciones pluviométricas. Teniendo en cuenta que la presencia de agua en el terreno aumenta considerablemente la capacidad para transmitir el calor geotérmico, en el caso de que en el sondeo no la haya, lo más recomendable es un relleno de gravas o arenas permeables para incrementar la conductividad térmica. También es adecuado el relleno con materiales térmicamente mejorados, desarrollados para disminuir las referidas pérdidas.

Para el diseño de una sonda geotérmica, se requiere el conocimiento previo de la conductividad térmica del terreno, la humedad natural del suelo, la presencia o no de aguas subterráneas y el tipo de prestaciones de la instalación prevista. Además, resulta clave la

potencia de extracción de calor por metro lineal de sonda. En los casos en que se precisan potencias mayores a las habituales, entre 20 y 70 W/m, pueden emplearse campos de sondas geotérmicas, en número de 4 a 50, con profundidades que oscilan entre 50 y 200 metros, dependiendo de la potencia requerida y de las condiciones geológicas locales. Los colectores de las sondas pueden disponerse junto a las edificaciones o debajo de ellas, o bien, las tuberías pueden conectarse en zanjas en el terreno.

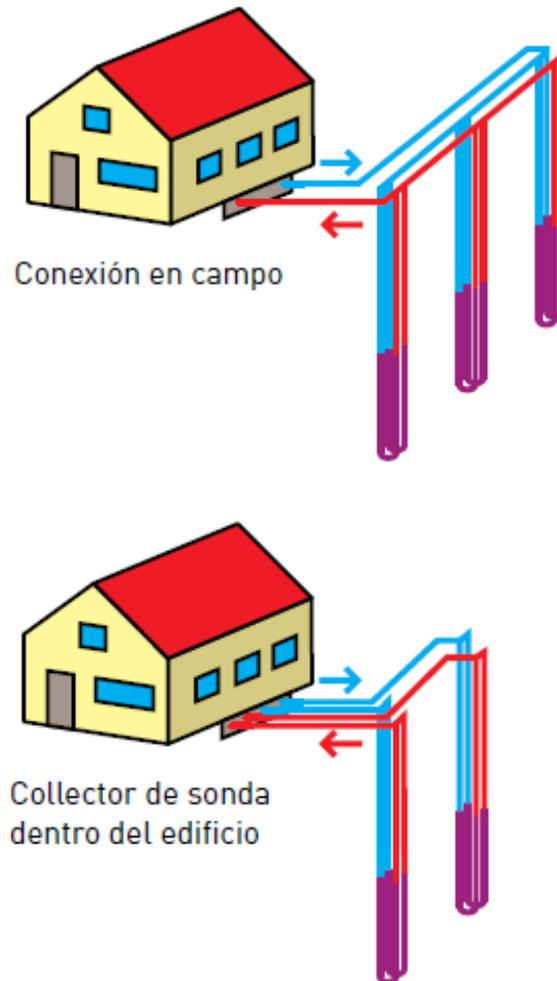


Ilustración 8. Intercambiadores verticales en sondeos (sondas geotérmicas)

Las instalaciones que disponen de bomba de calor acoplada a circuitos cerrados con intercambiadores verticales son de dimensiones muy variadas: desde viviendas unifamiliares con un solo intercambiador hasta grandes edificios que requieren campos con un importante número de sondas geotérmicas. Una de las instalaciones con mayor número de intercambiadores verticales instalados en Europa para dar servicio a un único edificio corresponde a las oficinas centrales de Control del Tráfico Aéreo Alemán (Deutsche Flugsicherung): un total de 154 perforaciones de 70 m de profundidad.

Para el diseño de intercambiadores verticales conectados a instalaciones individuales o de pequeño tamaño puede recurrirse a tablas, datos empíricos y normas generales (los hay en Suiza y Alemania), mientras que, en el caso de instalaciones de mayor envergadura, es necesario calcular el número y la longitud de los dispositivos necesarios (existen programas para PC en Europa y EEUU que permiten realizar estos cálculos; en casos complicados, pueden hacerse simulaciones con modelos numéricos).

Los tubos captadores pueden instalarse de diversas maneras en el interior del sondeo, pudiendo considerarse dos tipos básicos de intercambiadores verticales:

- **Con tubos en U.** El sistema de captación consiste en un par de tubos unidos en su base mediante un codo de 180°, cuyas salidas se conectan al circuito primario de las bombas de calor geotérmicas. En cada sondeo pueden instalarse, dependiendo de su diámetro de perforación, hasta cuatro de estos pares de tubos en U, existiendo también la posibilidad de dar a estos pares un mayor recorrido a lo largo de varias sondas, como se observa en la siguiente figura. La ventaja de esta configuración es el bajo coste del material de los tubos, circunstancia que ha contribuido a que los intercambiadores verticales de este tipo sean los más utilizados en Europa.

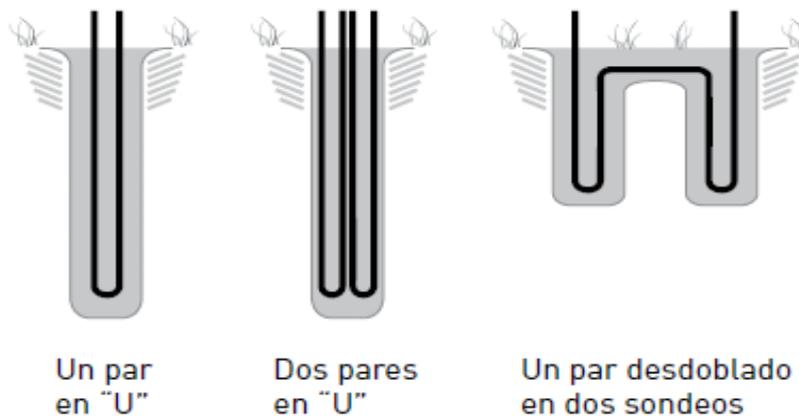


Ilustración 9. Tipos de instalación de tubos captadores verticales en sondas geotérmicas.

- **Con tubos coaxiales.** El sistema de captación, en su disposición más simple, consta de dos tubos concéntricos de diferente diámetro. Existen configuraciones más complejas que incluyen un mayor número de tubos colectores.

La estabilidad de la temperatura en los primeros metros del subsuelo, hecho ya señalado con anterioridad, permite el aprovechamiento de la energía térmica transmitida desde el interior de la Tierra hasta las capas más superficiales de la corteza terrestre, mediante los captadores ubicados en las perforaciones. Esta circunstancia y el bajo índice de ocupación

del terreno que presenta este sistema se muestran como las principales ventajas del mismo. Su principal inconveniente son los costes iniciales de implantación.

Una variante de este sistema son las cimentaciones energéticas, que aprovechan las estructuras de cimentación profunda de los edificios para captar y disipar la energía térmica del terreno. En este caso, los propios pilotes de la cimentación actúan como sondas geotérmicas, convirtiendo a la estructura en un campo de ellas. Los pilotes utilizados pueden ser prefabricados o montados in situ, con diámetros que varían entre 40 cm y más de 1 m.

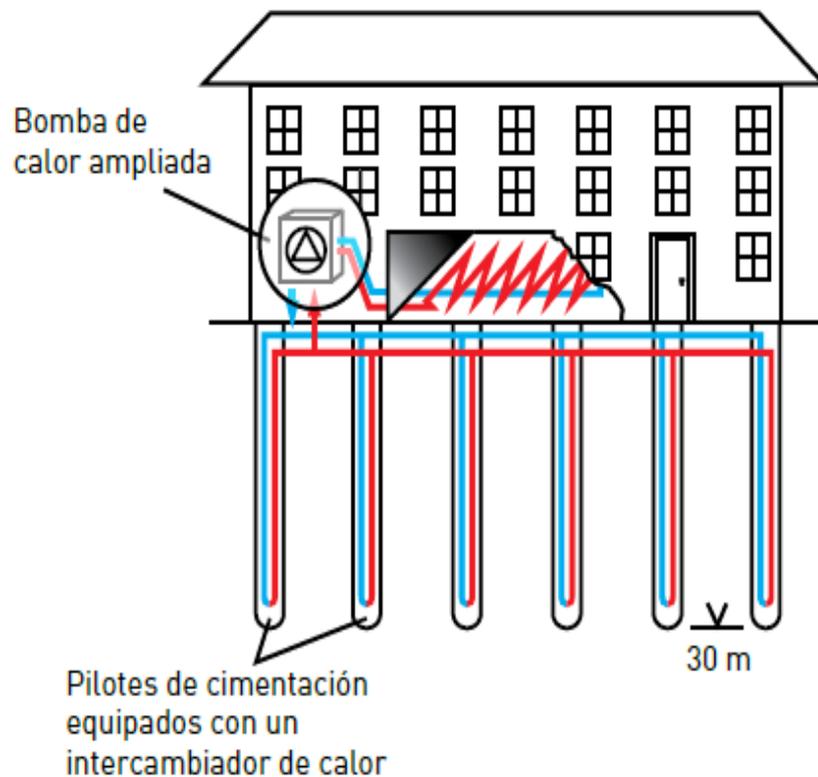


Ilustración 10. Sistema de cimentaciones energéticas

En estos sistemas, también denominados cimientos geotérmicos, energéticos o termoactivos, geoestructuras o pilotes intercambiadores de calor, se inserta, en la totalidad o en una parte de los pilotes, una red de tubos de polietileno, propileno o PVC, que se conforman como conductos en U y por los que se hace circular agua con un anticongelante, que se conectan en circuito cerrado a una bomba de calor o una máquina de refrigeración. En cada pilote, sujetos a la armadura metálica de éste, pueden situarse varios pares de tubos independientes, que convergen en superficie en un colector común. Una vez colocada la armadura del pilote en la excavación, éste se rellena con hormigón, de forma maciza o dejando el centro hueco.

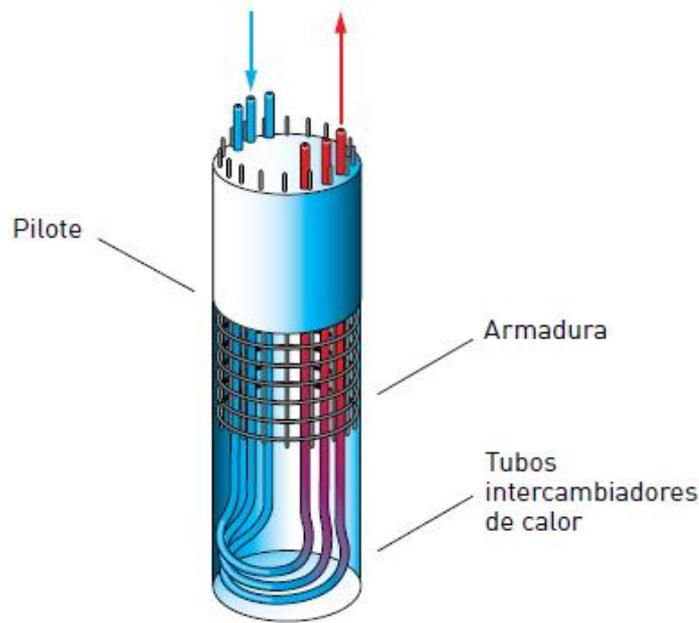


Ilustración 11. Tubos intercambiadores de calor integrados en un pilote para cementación

Las redes de tubos intercambiadores constituyen la alimentación a la bomba de calor geotérmica, una o varias, en función de las necesidades del edificio al que se va a dar servicio, conformando la instalación de climatización e, incluso, de agua caliente sanitaria.

Para implantar una instalación geotérmica de estas características, es preciso el conocimiento previo de diversos factores, entre los que cabe citar las características del terreno que definen su potencial geotérmico y la velocidad de flujo de la capa freática, de la que depende, directamente, la capacidad de un conjunto de pilotes intercambiadores para almacenar energía térmica estacionalmente.

Esta tecnología, que hace años solo se utilizaba en viviendas individuales y plurifamiliares, es, en la actualidad, una de las más empleadas para calentar y refrigerar edificios de grandes dimensiones. Ofrece, como ventajas, un considerable ahorro de trabajo, al desarrollarse de forma conjunta los proyectos de climatización y de construcción, y de espacio, al situarse todo el circuito de intercambio debajo del edificio a climatizar. Su principal inconveniente es la dificultad que presenta la reparación de los tubos captadores una vez instalado y hormigonado el pilote. Por este motivo, lo habitual es sobredimensionar el número de pares de tubos captadores para, en caso de que alguno quede inutilizado, contar con el mínimo necesario para garantizar el suministro de calor a las bombas geotérmicas.

4.2 BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA

En general, una bomba de calor es una máquina que transfiere el calor desde un foco frío a otro caliente utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña.

La bomba de calor geotérmica extrae calor del subsuelo a una temperatura relativamente baja, aumentándola, mediante el consumo de energía eléctrica, para posibilitar su uso posterior en sistemas de calefacción. Existe la opción de invertir el proceso en verano, inyectando en la tierra el calor absorbido en la refrigeración de la instalación a climatizar. Esta tecnología representa, en la mayoría de los casos, la única posibilidad de aprovechamiento de los recursos de muy baja entalpía ($T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), asociados a la geotermia somera y presentes bajo cualquier terreno en cualquier lugar del Planeta, que son los que mejor se adaptan a las necesidades de climatización de edificios.

La bomba de calor puede transferir el calor desde las fuentes naturales del entorno a baja temperatura (foco frío) hacia las dependencias interiores que se pretenden calefactar, o para emplearlo en procesos que precisan calor en la edificación o en la industria. Asimismo, ofrece la posibilidad de aprovechar los calores residuales de procesos industriales como foco frío, circunstancia que permite disponer de una fuente a temperatura conocida y constante que mejora el rendimiento del sistema.

Las bombas de calor geotérmicas funcionan del mismo modo que las bombas de calor convencionales (aire-aire y aire-agua), de manera que pueden calentar, refrigerar y, si están adecuadamente equipadas, proporcionar agua caliente sanitaria, pero con mayor eficacia que éstas. Según el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), las GHP utilizan entre un 25% y un 50% menos de electricidad que los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración, reduciendo el consumo energético, reduciendo las emisiones correspondientes de un 45% a un 70%, si se comparan con éstos.

Por tanto, la ventaja que poseen las bombas de calor frente a otros sistemas, reside en su capacidad para aprovechar la energía existente en el ambiente (foco frío), tanto en el aire como en el agua o la tierra, y que le permite calefactar las dependencias interiores (foco caliente) con una aportación relativamente pequeña de energía eléctrica.

Cuando se realiza la transferencia de calor en sentido inverso, es decir, desde el recinto que requiere frío hacia el ambiente que se encuentra a temperatura superior, la bomba de calor trabaja en modo refrigeración.

La bomba de calor geotérmica extrae energía térmica del suelo en invierno transfiriéndola al interior, mientras que en verano extrae el calor del interior y lo devuelve al subsuelo

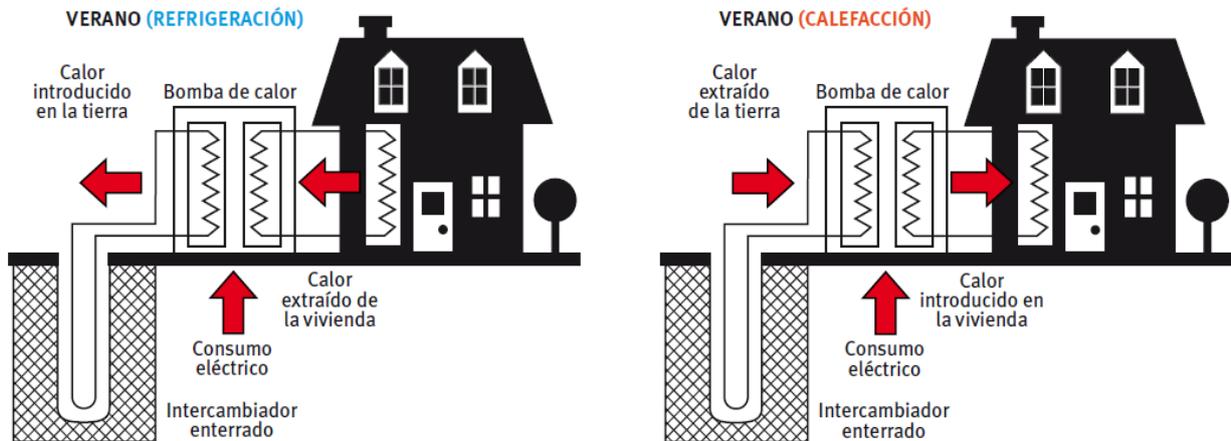


Ilustración 12. Esquema de funcionamiento de la bomba de calor geotérmica

Por lo tanto, en invierno el evaporador recoge el calor externo y lo introduce dentro de la edificación, mientras que, en verano, este mismo actúa tomando el calor de la vivienda y arrojándolo al exterior a través del condensador.

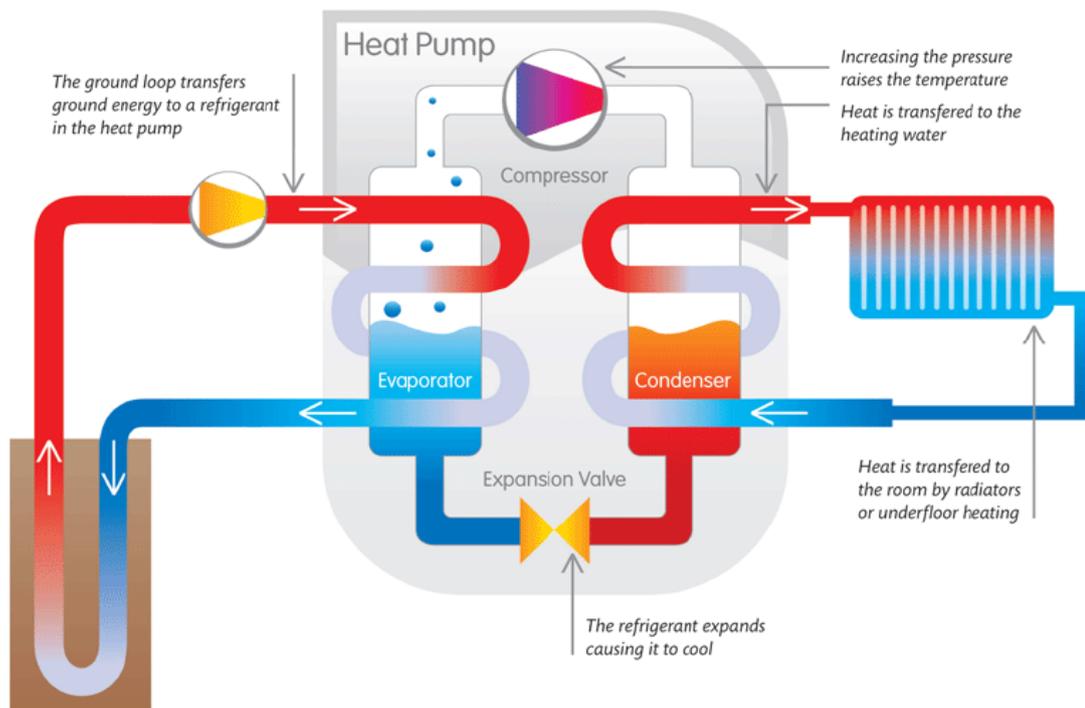


Ilustración 13. Esquema de funcionamiento de la bomba de calor geotérmica

Las especificaciones de la bomba de calor fijan varios parámetros de diseño del intercambiador de calor enterrado, ya que nos determinan el calor intercambiado con el suelo y el caudal circulante por el intercambiador de calor, además de fijar el rendimiento del sistema (Coefficient of Performance COP) de acuerdo con sus curvas características de potencia-temperatura.

El COP de una bomba de calor representa la relación entre la capacidad térmica de la misma (Q) y la potencia eléctrica consumida para suministrarla (W). Su definición para los modos de calefacción y refrigeración es la siguiente, así como la relación entre el calor absorbido o inyectado al terreno.

$$COP_{calefacción} = \frac{Q_{calefacción}}{W_{calefacción}} \quad (Ec. 1)$$

$$Q_{absorbido} = Q_{calefacción} - W_{calefacción} \quad (Ec. 2)$$

$$COP_{refrigeración} = \frac{Q_{refrigeración}}{W_{refrigeración}} \quad (Ec. 3)$$

$$Q_{inyectado} = Q_{refrigeración} - W_{refrigeración} \quad (Ec. 4)$$

La selección de la bomba de calor se realiza a partir de un cálculo de cargas térmicas de acuerdo a las exigencias de diseño y dimensionado especificadas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas.

Tanto la potencia calorífica o frigorífica de la bomba de calor como la eficiencia energética (COP, Coefficient of Performance, razón de la potencia calorífica o frigorífica suministrada por la bomba de calor y su consumo eléctrico) pueden variar según la temperatura de trabajo, independiente de las eficiencias mecánicas y térmicas de los distintos componentes de la máquina.

A continuación, se puede observar la base física de la relación temperatura-prestaciones para una bomba de calor trabajando en modo calor. En la gráfica a la izquierda se ve el aumento de entalpía del refrigerante en la etapa de compresión [1 – 2], que corresponde al trabajo del compresor. Si se aumenta la temperatura de evaporación, y por lo tanto la presión (gráfica a la derecha), el compresor tiene que trabajar menos para llegar a la misma presión (y por lo tanto a la temperatura) en el condensador y el gasto de electricidad disminuye. En refrigeración se puede ahorrar energía del mismo modo bajando la temperatura del condensador. El suelo, comparado con el aire, ofrece una fuente de calor a mayor temperatura en invierno, cuando está conectado al evaporador. En verano, cuando intercambia calor con el condensador, forma un sumidero de calor a menor temperatura.

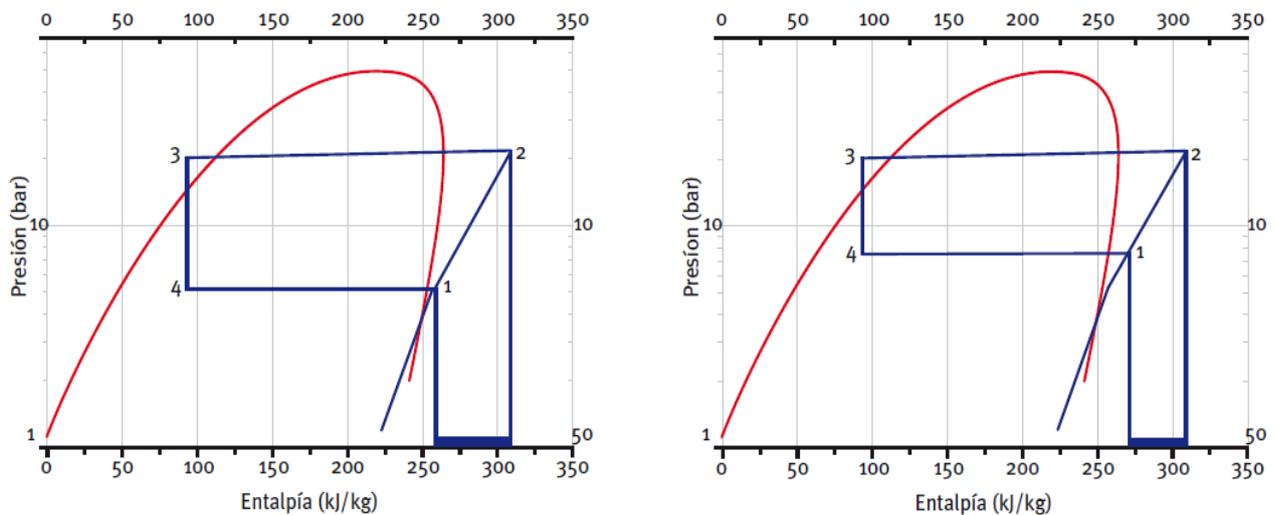


Ilustración 14. Representaciones relación temperatura-prestaciones de una bomba de calor

Cuando la bomba de calor opera en modo calefacción, una buena parte del calor que se utiliza en la aplicación es calor extraído indirectamente del sol que previamente ha sido almacenado por el subsuelo. La parte de calor que proviene del gradiente geotérmico del subsuelo, es decir, del interior de la tierra, es relativamente pequeña o incluso nula.

Por tanto, un aumento del COP de la bomba implica automáticamente que se está utilizando una mayor proporción de energía renovable térmica, según la tipología y profundidad del circuito. En este sentido, la capacidad de producción de calor de origen renovable de una bomba de calor es muy grande en comparación con otras tecnologías, aunque usualmente se requiera para posibilitar tal flujo, de la introducción de una cierta cantidad de energía ya sea eléctrica o térmica.

En refrigeración el énfasis debe ponerse en que el uso del suelo como sumidero de calor puede mejorar sustancialmente el COP en comparación con enfriadoras basadas en el aire como foco. Al no haber muchas alternativas tecnológicas, la bomba de calor geotérmica es una de las pocas opciones reales para producir un ahorro sustancial en climatización.

Por otro lado, y al menos en parte, el calor aportado en el suelo durante el proceso aumenta la temperatura del mismo y contribuye a mejorar la eficiencia del proceso inverso, el de calefacción. Por tanto, una bomba de calor con intercambiador de calor enterrado en modo frío supone una opción real de mejora energética y ahorro y produce almacenamiento de calor de origen renovable.

5 **NORMATIVA DE APLICACIÓN**

En este apartado se explica brevemente la normativa actual que afecta al empleo de energías renovables, y en particular a la geotermia de baja entalpía.

5.1 DIRECTIVA 2010/31/UE

La directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios comenta la situación energética que vive la Unión Europea a día de hoy, señalando apuntes tales como es que el 40% de la energía consumida en esta zona, procede del sector residencial.

Por esa razón, tiene como objetivo principal fomentar la eficiencia energética en los edificios, tanto existentes, como de nueva construcción, y siempre tomando en consideración las distintas climatologías de cada Estado miembro. Así mismo, propone el establecimiento de una serie de requisitos mínimos de eficiencia energética.

Asimismo, este documento considera la energía geotérmica como energía de origen renovable. Por lo tanto, representa un punto muy importante a la hora de implantar la tecnología geotérmica en las edificaciones de nueva construcción o en reformas de edificios. Además, esta Directiva propone la bomba de calor como uno de las alternativas a tener en cuenta a la hora de especificar el sistema de generación de calor y de frío de una nueva instalación, debido a sus prestaciones altamente eficientes.

5.2 DIRECTIVA 2009/28/CE

En el Anexo VII de esta directiva se establece el método para calcular la cantidad de calor producido por las bombas de calor que debe considerarse procedente de fuentes de energía renovable. Este documento especifica, por tanto, las pautas a seguir para conocer y justificar cómo de renovable es esta tecnología.

5.3 REGLAMENTO DE INSTALACIONES TÉRMICAS EN LA EDIFICACIÓN

El RITE, en su IT 1.2 habla sobre las exigencias en cuanto a eficiencia energética de las instalaciones de producción de calor y de frío. Esta IT comenta que las instalaciones térmicas deben diseñarse y ejecutarse de forma que se reduzca el consumo de energía convencional y las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes mediante la utilización de sistemas eficientes energéticamente, de sistemas que permitan la recuperación de energía y la utilización de las energías renovables.

5.4 CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

El Código Técnico de la Edificación, en sus Documentos Básicos HE, establece una serie de pautas que promueven el uso de energías de carácter renovable en la edificación

6 CLIMATOLOGÍA DE LA ISLA DE GRAN CANARIA

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento de un sistema geotérmico en distintas zonas de la isla de Gran Canaria. Como bien se describió en el apartado anterior, los sistemas geotérmicos de baja entalpía pueden verse afectados por las condiciones climáticas del lugar de instalación. Por ese motivo es necesario conocer las características climáticas de la isla.

6.1 EL CLIMA

El Clima corresponde a una síntesis del tiempo meteorológico asociada al conjunto de las condiciones meteorológicas, en un momento y lugar determinados. Para clasificar los distintos tipos de climas que pueden darse en un lugar se utiliza la clasificación climática de Köppen.

La clasificación climática de Köppen, a pesar de haber sido formulada hace cerca de cien años sigue siendo una de las clasificaciones más empleada en estudios climatológicos en todo el mundo.

La clasificación de Köppen define distintos tipos de clima a partir de los valores medios mensuales de la precipitación y de la temperatura. Para la delimitación de los distintos tipos de clima establece umbrales de temperatura y precipitación basados principalmente en su influencia sobre la distribución de la vegetación y la actividad humana.

La delimitación de las zonas climáticas se realiza aplicando técnicas de álgebra de mapas a las capas de temperatura y precipitación medias mensuales que se crean previamente para los mapas de temperatura y precipitación.

6.2 TIPOS DE CLIMA EXISTENTES EN GRAN CANARIA

5.2.1. Climas secos. Tipo B

La delimitación de los climas áridos (tipo B) se realiza definiendo tres umbrales diferentes según el régimen anual de precipitaciones para tener en cuenta que la precipitación invernal es más efectiva para el desarrollo de la vegetación que la estival al ser menor la evaporación:

- $P = 20(T+7)$: precipitación repartida a lo largo del año.
- $P = 20T$: verano seco (el 70% o más de la precipitación anual se concentra en el semestre comprendido entre octubre y marzo);

Donde P es la precipitación total anual en (mm) y T es la temperatura media anual en (°C) grados centígrados.

Köppen distingue entre dos subtipos de clima, BS (estepa) y BW (desierto) según si la precipitación anual alcanza o no la mitad del valor umbral establecido anteriormente para delimitar los climas de tipo B. A su vez distingue entre las variedades cálida (letra h) y fría (letra k) según la temperatura media anual esté por encima o por debajo de 18 °C respectivamente.

En la isla, el clima **BWh (desierto cálido)** se distribuye ampliamente por el sur, mientras que los climas **BSh (estepa cálida)** y **BSk (estepa fría)** en Gran Canaria se extienden ampliamente por una franja de altitud media-baja en el norte de la isla y a mayor altitud en la vertiente sur.

5.2.2. Climas Templados. Tipo C.

La temperatura media del mes más frío está comprendida entre 0 y 18°C. Köppen distingue entre los subtipos Cs, Cw y Cf según se observe un periodo marcadamente seco en verano (Cs), en invierno (Cw) o bien no haya una estación seca (Cf). El subtipo Cw no aparece en Canarias.

A su vez añade una tercera letra según sea el verano caluroso (temperatura media del mes más cálido superior a 22°C, letra a), templado (temperatura media del mes más cálido menor o igual a 22°C y cuatro o más meses con temperatura media superior a 10°C, letra b) o fresco (temperatura media del mes más cálido menor o igual a 22°C y menos de cuatro meses con temperatura media superior a 10°C, letra c).

El clima **Csa (templado con verano seco y cálido)** se observa principalmente en zonas costeras del norte y este de la isla de La Palma y a mayor altitud en Gran Canaria, mientras que el **Csb (templado con verano seco y templado)** se extiende por las zonas más elevadas de Gran Canaria.

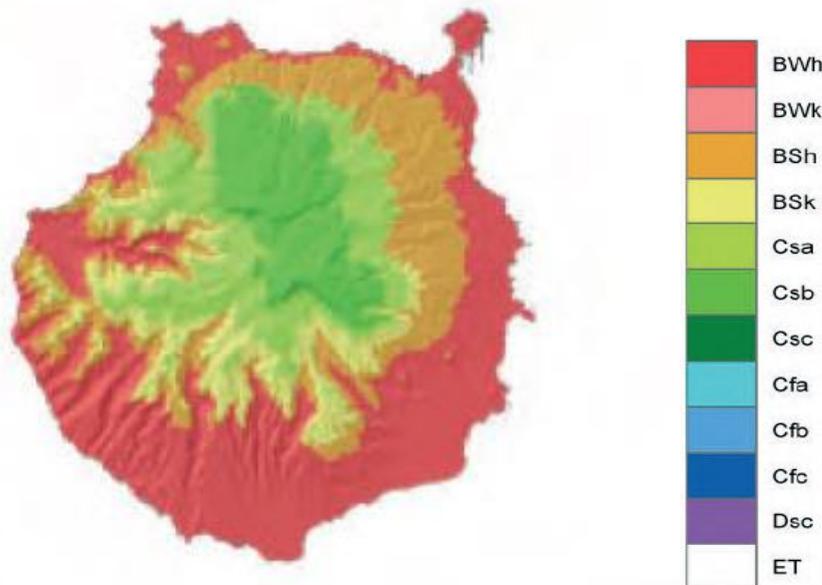


Ilustración 15. Clasificación Climática de Köpen-Geiger en Gran Canaria

6.3 SECTORIZACIÓN DEL CLIMA SEGÚN EL CÓDIGO TÉCNICO

En la sectorización del clima para el código técnico lo primero que se realiza es una delimitación de los sectores climáticos de la isla a partir de las correlaciones de variación y los gradientes verticales de la temperatura y la precipitación con la altitud. Además, se utiliza la orientación frente a los flujos de aire y la constatación de que los umbrales termométricos (<math><14^{\circ}\text{C}</math>, de

Con el fin de facilitar su delimitación climática el CTE trata de hacer coincidir sus límites con los municipales. El número de sectores climáticos, así como su extensión con respecto a la superficie insular y el número de municipios que incluyen varían de una isla a otra.

En Gran Canaria se diferencian 5 sectores que van desde la costa hasta la cumbre. Los municipios de la vertiente septentrional son los más húmedos y frescos, con más de 900 mm de lluvia anual en las medianías. El sector más cálido y seco es el del Sur, con la isoterma media anual de

SECTORES	GRAN CANARIA
NOROESTE 8,9%	Agaete Gáldar
NORTE 11,09%	Santa María de Guía Aruca Firgas Moya Teror Valleseco
NORDESTE 21,8%	Las Palmas Vega de San Mateo Valsequillo Santa Brígida Telde
SUR 42,9%	Ingenio Agüimes Santa Lucía Mogán San Bartolomé
OESTE 15,4%	San Nicolás de Tolentino Tejeda Artenara

Tabla 1. Los sectores climáticos en las islas de la provincia oriental, extensión superficial y municipios que incluyen.

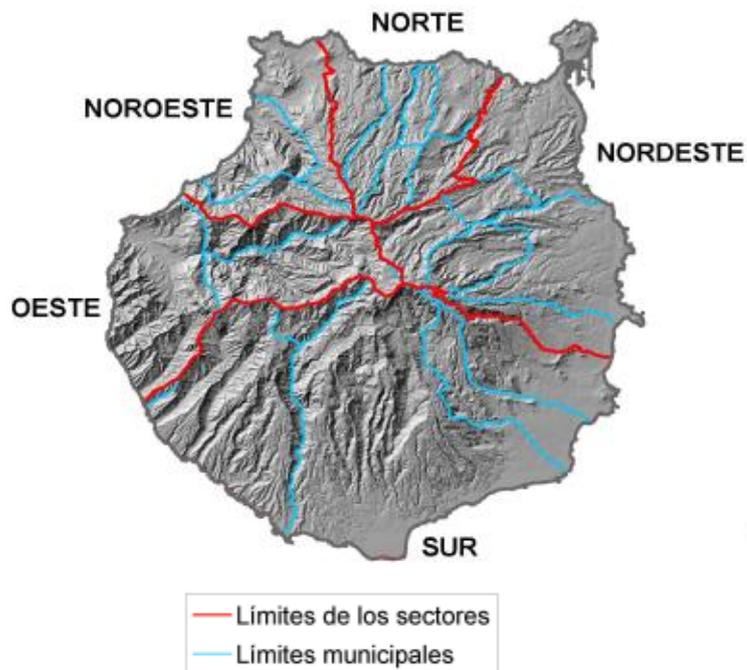


Ilustración 16. Sectores climáticos de Gran Canaria

Los factores climatológicos que afectan directamente a un sistema geotérmico son los siguientes, por lo tanto, se analizarán como afectan cada uno de ellos a la transferencia de calor producida en el sistema.



7 FUNDAMENTOS TÉRMICOS DEL TERRENO

La energía aportada por la radiación solar, precipitaciones y otros efectos atmosféricos es transferida diariamente a y desde la superficie de la tierra produciéndose un equilibrio térmico. Como consecuencia de este equilibrio, la temperatura de la tierra a ciertas profundidades (aproximadamente 10 metros) se mantiene constante y se aproxima a la temperatura media anual del aire ambiente en esa determinada zona. En las profundidades comprendidas entre la superficie y estos 10 metros, la temperatura de la tierra variará dependiendo de la profundidad y de las características del tipo de suelo: conductividad, difusividad, calor específico, etc.

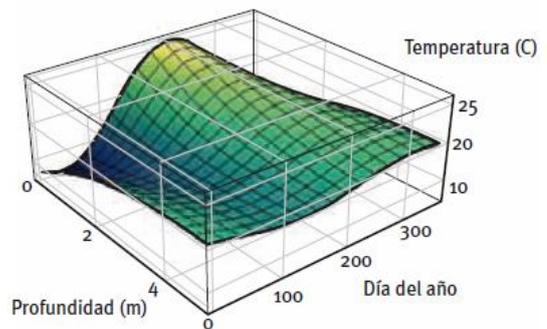
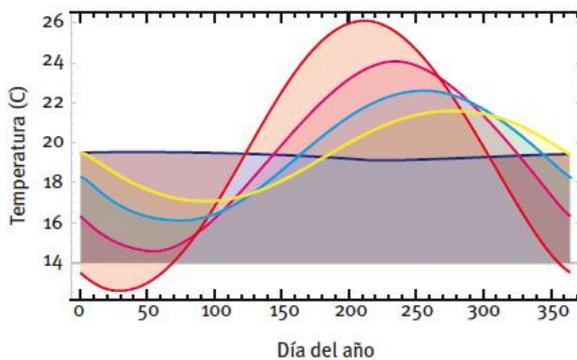


Ilustración 17. Variación de la temperatura de la Tierra en función de la profundidad a lo largo de un año

La figura muestra a la izquierda la evolución estacional de las temperaturas a lo largo de un año para un punto situado a diferentes profundidades bajo la superficie. Las temperaturas y difusividades son típicas de Valencia. Se observa que, a medida que se incrementa la profundidad, la amplitud de las oscilaciones térmicas decrece y sus máximos y mínimos se van desfasando. La curva de color rojo corresponde a la oscilación natural (inmediatamente bajo la superficie), en magenta, azul claro, amarillo y azul oscuro se representan sucesivamente las evoluciones de temperatura a 1m, 2m, 3m y 10m respectivamente.

A la derecha se observa el mismo proceso, en una representación tridimensional que permite obtener una idea global de la variación en profundidad. Como se puede observar en la figura anterior, a medida que aumentamos la profundidad en el terreno, la evolución de la temperatura se va amortiguando hasta permanecer constante. También se aprecia como en verano e invierno, debido a la propia inercia del terreno, las temperaturas máximas y mínimas del suelo se retrasan en torno a cuatro semanas comparadas a las temperaturas superficiales del suelo.

8 SISTEMA GEOTÉRMICO OBJETIVO DEL ESTUDIO

En este estudio, se analizará el comportamiento de un sistema geotérmico en distintas zonas de Gran Canaria. De este modo, teniendo en cuenta la variedad climatológica de la isla, se puede observar cómo afectan las condiciones externas a la transferencia de calor del sistema.

El sistema que se analizará estará formado por un micropilote enterrado con disposición vertical, entre dos materiales. El material superficial se considerará picón o arena, ya que como se nombró anteriormente, la conductividad del terreno es mucho mejor en terrenos cuyo nivel de humedad son mayores. Teniendo en cuenta que en la mayor parte de la isla las precipitaciones son bastante escasas, se ha decidido contemplar este material.

El segundo material se contemplará como el material más abundante o que más se puede encontrar en la zona que se esté analizando.

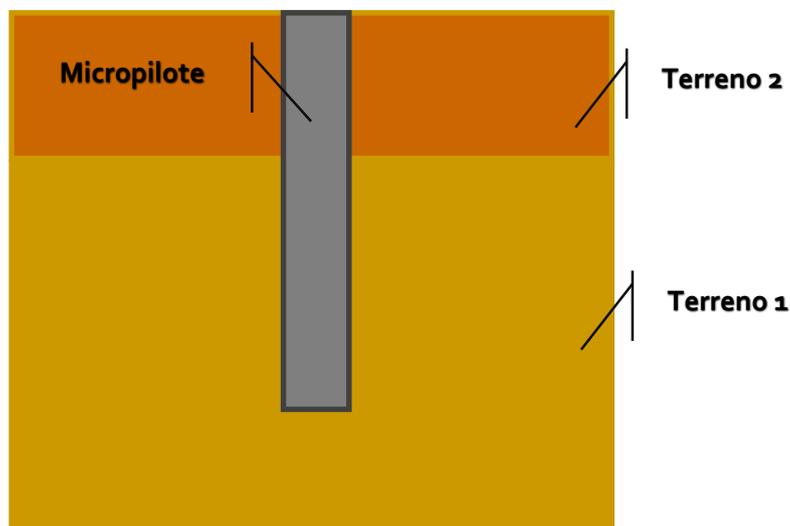


Ilustración 18. Sistema geotérmico del estudio

9 TRANSFERENCIAS DE CALOR

La existencia de una diferencia de temperatura entre dos cuerpos, o un cuerpo y el medio, se produce una transferencia de calor desde el foco de mayor temperatura hacia el de menor temperatura. Es decir, habrá una transferencia de calor desde el foco caliente hacia el frío. Esta transferencia de energía calorífica puede llevarse a cabo por tres formas distintas:

- **Conducción**, consiste en la transferencia de calor entre dos puntos de un cuerpo que se encuentran a diferente temperatura sin que se produzca transferencia de materia entre ellos.
- **Convección**, en este sistema de transferencia de calor interviene un fluido (gas o líquido) en movimiento que transporta la energía térmica entre dos zonas. La transferencia de calor por convección puede ser natural o forzada.
- **Radiación**, es el calor emitido por un cuerpo debido a su temperatura, en este caso no existe contacto entre los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor. Simplemente por existir un cuerpo A (sólido o líquido) a una temperatura mayor que un cuerpo B existirá una transferencia de calor por radiación de A hacia B.

Si se consideran las distintas transferencias de calor que intervienen en el sistema geotérmico, se puede establecer las condiciones de contorno del sistema a simular. En este caso tendríamos los tres tipos de transferencias.

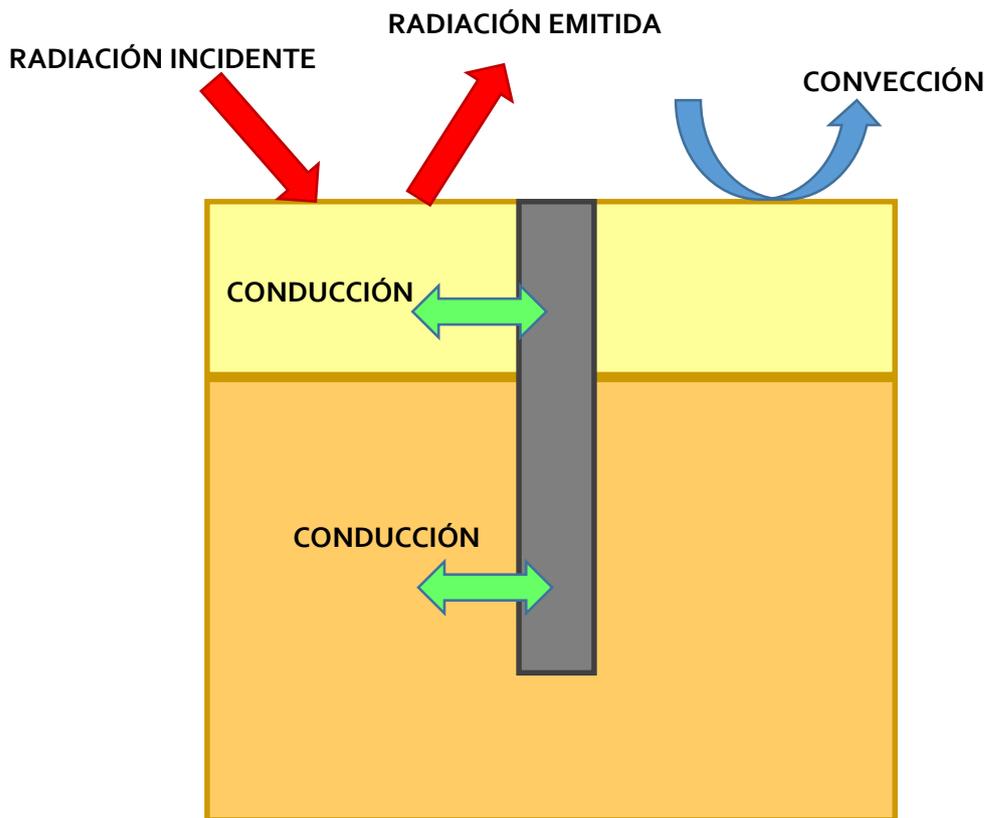


Ilustración 19. Transferencias de calor que intervienen en el sistema

Por lo tanto, como se puede observar en la imagen anterior, en el sistema geotérmico se producirían:

- **Intercambio de calor por conducción**, entre el terreno y el micropilote. Este flujo de calor puede ser absorbido desde el terreno hacia el micropilote o inyectado desde el micropilote hacia el terreno. Este flujo de calor dependerá del modo en el que esté trabajando la bomba de calor, es decir, si está refrigerando o calefactando.
- **Intercambio de calor por convección**, entre el terreno y el aire. Este flujo de calor dependerá bastante del viento de la zona.
- **Intercambio de calor por radiación**. Este intercambio de calor vendrá condicionado por dos variables. Habrá un intercambio de calor desde el medio hacia la superficie del terreno que vendrá condicionado por la radiación solar incidente sobre el terreno. Pero aparte de esto, habrá una transferencia de calor desde el terreno hacia el medio, debido a la radiación que emite el terreno sobre el cielo.

10 PROPIEDADES TÉRMICAS DEL SISTEMA

10.1 CONDUCTIVIDAD

La conductividad térmica es una propiedad característica de cada material que indica su capacidad para conducir calor. Se puede expresar según la ley de Fourier como el calor que atraviesa en la dirección x un espesor de 1 m del material como consecuencia de una diferencia de 1 grado entre los extremos opuestos. Se expresa en $W/m^{\circ}C$ o W/mK .

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (Ec. 5)$$

Donde k es la conductividad térmica, Q_x es el calor difundido por unidad de tiempo, A el área de la superficie a través de la cual tiene lugar la transmisión de calor, y el cociente dT/dx entre dx representa el gradiente de temperatura. Esta ecuación es la denominada Ley de Fourier. El signo menos se utiliza para considerar un flujo positivo si dT es negativa en la dirección del desplazamiento normal. La conductividad térmica depende de la composición del material y su valor puede estar comprendido entre 0,008 para gases y 4,17 para metales.

La Ley de Fourier puede expresarse por unidad de área:

$$\dot{q}_x = \frac{\dot{Q}_x}{A} = -k_x \frac{dT}{dx} \quad (Ec. 6)$$

Se considera que el flujo de calor es una cantidad vectorial que puede plantearse de forma más general:

$$\dot{q} = -k \nabla T = -\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}\right) \quad (Ec. 7)$$

donde $T(x, y, z)$ es el campo escalar de temperaturas. La ecuación anterior representa el flujo de calor en una dirección perpendicular a la superficie.

Para los materiales usuales en el terreno existen estudios que demuestran que la conductividad térmica aumenta normalmente con el grado de humedad del mismo hasta alcanzar los valores de conductividad correspondientes a un terreno saturado, si bien no es fácil establecer la dependencia entre ambos factores con carácter general.

La siguiente tabla recoge algunos de los valores más usuales para la conductividad térmica de acuerdo al tipo de terreno.

TIPO DE ROCA	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/Mk)			CAPACIDAD TÉRMICA VOLUMÉTRICA (MJ/m³K)
	MÍN.	VALOR TÍPICO	MÁX.	
ROCAS MAGMÁTICAS				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Grabo	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
Periodita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
ROCAS METAMÓRFICAS				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita	Aprox. 5,8			2,1
Micasquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
ROCAS SEDIMENTARIAS				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	11,3,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sal	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
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
Tierra Arenosa	0,8	1,05	1,3	
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
OTROS MATERIALES				
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

Tabla 2. Valores de conductividad y capacidad térmica de distintos materiales

El cálculo de la conductividad térmica para el diseño de un sistema de bomba de calor geotérmica se puede estimar a partir de tablas, medir en laboratorio mediante pruebas de conductividad sobre parte de terreno recogido o determinar realizando un test de respuesta térmica del suelo (Thermal Response Test, TRT). Este último método es el más fiable y el único recomendado para instalaciones medianas o grandes, ya que, por ejemplo, para una instalación de 140 kWt una variación del valor de cálculo de la conductividad térmica de 2 a 2,2 W/m°C supone una reducción de longitud del intercambiador de calor de 100 metros para las mismas condiciones de diseño. Con este método, para la determinación de las características térmicas del suelo, se fuerzan pulsos de inyección de calor o pulsos de extracción de calor en un bucle enterrado y se mide su respuesta en temperatura; en función de dicha evolución y en base a ecuaciones analíticas se puede obtener el valor de conductividad efectiva del terreno.

10.2 CAPACIDAD TÉRMICA

Se denomina capacidad térmica o calorífica al cociente entre el calor que se suministra a un sistema y la variación de temperatura provocada.

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde C es la capacidad calorífica o térmica y dQ el calor que es necesario suministrar para incrementar la temperatura en dT .

La capacidad térmica del terreno expresa el calor que es capaz de almacenar un volumen de terreno al incrementarse su temperatura, de ahí que se denomine capacidad a esta magnitud, pero también de la oposición a dicho cambio de temperatura en la medida en que cuanto mayor sea la capacidad térmica mayor habrá de ser el calor suministrado para lograr la misma variación de temperatura pudiendo hablarse así de cierta inercia térmica. Sus unidades son J/m³K.

10.3 DIFUSIVIDAD TÉRMICA

La difusividad térmica se define como el ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica del terreno. Se mide en m²/s.

El rango de valores para la difusividad térmica, de acuerdo con los trabajos de Labs y Harrington (1982), va desde 0,36 10⁻⁶ m²/s hasta 0,8 10⁻⁶ m²/s, según sea el suelo seco o húmedo, mientras que Givoni y Katz seleccionaron como valores límites 0,4 10⁻⁶ m²/s para suelo seco y 1,08 10⁻⁶ m²/s para suelo húmedo.

10.4 CONVECCIÓN

En el mecanismo de transporte por convección ocurren dos procesos, la difusión del calor a través de las moléculas del fluido que se mueven aleatoriamente y la advección del calor debida al movimiento global del fluido.

Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento de las moléculas y por el movimiento global del fluido, (Chapman, 1984).

La transferencia de calor por convección depende de la viscosidad dinámica (μ_d), conductividad térmica (k), densidad (ρ) y el calor específico (c_p), así como de la velocidad del fluido (u), la geometría de la superficie sólida y del tipo de flujo (laminar o turbulento).

Si se toma una superficie arbitraria de área A_s a temperatura T_s y se considera un fluido que se mueve sobre dicha superficie a una velocidad U y temperatura T_f se sabe que ocurrirá una transferencia de calor si $T_s \neq T_f$. El flujo de calor se expresa con la expresión de la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{convección} = hA_s(T_s - T_f) \quad (Ec. 9)$$

donde $\dot{Q}_{conv}(W)$ es el flujo de calor desde la superficie al fluido.

La variable $h \left(\frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C \right)$ es el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio y es una correlación simplificada entre el estado del fluido y las condiciones de flujo. Al igual que el flujo de calor, el coeficiente de convección varía a lo largo de la superficie:

$$\dot{Q}_{conv} = \int \dot{q}_x dA_s = (T_s - T_f) \int h_x dA_s \quad (Ec. 10)$$

Por lo general se simplifica el cálculo del flujo de calor utilizando el valor promedio del coeficiente de convección:

$$\bar{h} = \frac{1}{A} \int h_x dA \quad (Ec. 11)$$

10.5 RADIACIÓN

Mientras que la conducción y la convección requieren de medio material, la radiación es la transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas. De hecho, ocurre de manera más eficiente en el vacío.

La radiación térmica que interacciona con la superficie de un cuerpo se puede clasificar de la siguiente manera:

- **Radiación incidente**, es la radiación que incide sobre la superficie del cuerpo y puede dividirse según el efecto que se produce en:
 - Radiación absorbida: se trata de la radiación retenida por el cuerpo causando un aumento de temperatura o una modificación a nivel molecular.
 - Radiación transmitida: es la radiación que atraviesa el cuerpo y no queda retenida.
 - Radiación reflejada: parte de la energía que incide sobre la superficie es repelida o devuelta al medio sin quedar almacenada en el cuerpo.

- **Radiación emitida**, es la que emite un cuerpo a causa de su temperatura.

El flujo de calor emitido por una superficie se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por esta superficie y se representa por la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{E}_b = \frac{\dot{q}}{A} = \sigma T_s^4 \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y vale $5,68 \cdot 10^{-8} (W/K^4m^2)$, (Frank P. & Dewitt, 1996).

Los objetos que son capaces de emitir la totalidad de la radiación se denominan cuerpo negro. Dos cuerpos de distintos materiales a la misma temperatura no emiten necesariamente la misma cantidad de energía. La radiación térmica que emite un objeto depende de su temperatura y de su emisividad, siendo esta última el cociente entre la radiación que emite un cuerpo un cuerpo real y la emitida por un cuerpo negro para la misma temperatura y la misma longitud de onda.

Por lo tanto, la potencia emitida se puede calcular incorporando la emisividad a la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{E} = \varepsilon \dot{E}_b = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (\text{Ec. 13})$$

Un cuerpo interactúa con los objetos que lo rodean y se expone a su radiación. Por lo tanto, el flujo de calor neto intercambiado por la superficie y en aire mediante radiación se expresa:

$$\dot{q} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{cielo}}^4) \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde el valor de la emisividad ε se encuentra en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$ según la eficiencia con que la superficie emita energía en relación con un cuerpo negro.

Por lo tanto:

$$\frac{q_{rad\ emit}}{A} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{cielo}^4) \quad (Ec. 15)$$

$$\frac{q_{rad\ emit}}{A} = \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_{cielo}^2)(T_s^2 - T_{cielo}^2) \quad (Ec. 16)$$

$$\frac{q_{rad\ emit}}{A} = \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_{cielo}^2)(T_s + T_{cielo})(T_s - T_{cielo}) \quad (Ec. 17)$$

$$\frac{q_{rad\ emit}}{A} = h_{rad}(T_s - T_{cielo}) \quad (Ec. 18)$$

Donde h_{rad} es el coeficiente de radiación emitida.

La correlación de Walton (1983) que utiliza la corrección de nubosidad dada por Clark y Allen (1978) permite obtener la temperatura efectiva del cielo en °C :

$$T_{cielo} \left(\frac{H_{IR}}{\sigma} \right)^{0,25} - 273,15 \quad (Ec. 19)$$

Donde H_{IR} es la intensidad de la radiación infrarroja sobre el plano horizontal en Wh/m² y se obtiene:

$$H_{IR} = \varepsilon_{cielo}\sigma(T_s + 273,15)^4 \quad (Ec. 20)$$

La emisividad del cielo se calcula:

$$\varepsilon_{cielo} = \left(0,787 + 0,764 \cdot \ln \left(\frac{T_{rocielo} + 273,15}{273} \right) \right) \cdot (1 + 0,0224N - 0,0035N^2 + 0,00028N^3) \quad (Ec. 21)$$

Donde la constante de Stefan-Boltzmann es $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

Además la temperatura seca del aire (T_s) y la temperatura de rocío se miden en °C.. La cobertura del cielo en tanto por diez(N), tendrá un valor 3 para los meses entre abril y octubre (ambos incluidos) y 5 para el resto de meses.

Así mismo, la temperatura de rocío se calcula mediante la fórmula de Magnus, que nos permite calcular la temperatura en °C a partir de los valores de humedad relativa (φ) y la temperatura seca.

$$T_{rocío} = 243,5 \cdot \left(\frac{\gamma(T_s, \varphi)}{17,67 - \gamma(T_s, \varphi)} \right) \quad (Ec. 22)$$

Donde:

$$\gamma(T, \varphi) = \ln(\varphi/100) + \left(\frac{17,67 \cdot T}{243,5 + T} \right) \quad (Ec. 23)$$

11 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama “malla”.

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el análisis de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones

El desarrollo de un algoritmo de elementos finitos para resolver un problema definido mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno requiere en general cuatro etapas:

1. El problema debe reformularse en forma variacional.
2. El dominio de variables independientes (usualmente un dominio espacial) debe dividirse mediante una partición en subdominios, llamados elementos finitos. Asociada a la partición anterior se construye un espacio vectorial de dimensión finita, llamado espacio de elementos finitos. Siendo la solución numérica aproximada obtenida por elementos finitos una combinación lineal en dicho espacio vectorial.
3. Se obtiene la proyección del problema variacional original sobre el espacio de elementos finitos obtenido de la partición. Esto da lugar a un sistema con un número de ecuaciones finito, aunque en general con un número elevado de ecuaciones incógnitas. El número de incógnitas será igual a la dimensión del espacio vectorial de elementos finitos obtenido y, en general, cuanto mayor sea dicha dimensión tanto mejor será la aproximación numérica obtenida.
4. El último paso es el cálculo numérico de la solución del sistema de ecuaciones.

Los pasos anteriores permiten construir un problema de cálculo diferencial en un problema de álgebra lineal. Dicho problema en general se plantea sobre un espacio vectorial de dimensión no-finita, pero que puede resolverse aproximadamente encontrando una proyección sobre un subespacio de dimensión finita, y por tanto con un número finito de ecuaciones (aunque en general el número de ecuaciones será elevado típicamente de miles o incluso centenares de miles). La discretización en elementos finitos ayuda a construir un algoritmo de proyección sencillo, logrando además que la solución por el método de elementos finitos sea generalmente exacta en un conjunto finito de puntos. Estos puntos coinciden usualmente con los vértices de los elementos finitos o puntos destacados de los mismos. Para la resolución concreta del enorme sistema de ecuaciones algebraicas en general pueden usarse los métodos convencionales del álgebra lineal en espacios de dimensión finita.

En lo que sigue d es la dimensión del dominio, n el número de elementos finitos y N el número de nodos total.

11.1 FORMULACIÓN DÉBIL DEL FLUJO DE CALOR.

La formulación débil de una ecuación diferencial permite transformar dicha ecuación en una más simple, generalmente de dimensión no finita, pero que puede ser aproximada por un sistema de ecuaciones algebraicas.

Para deducirla en el dominio $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ y así garantizar la existencia de una solución a dicha expresión, se tiene que:

- Suponer que existe solución u de la ecuación diferencial, multiplicar los dos lados de la ecuación por una función de prueba $v \in C_0^\infty(\Omega)$ e integrar a ambos lados de la igualdad.
- Usar la fórmula de integración por partes en \mathbb{R}^2 y las condiciones de contorno para obtener expresiones que necesiten derivadas de menor orden.
- Cambiar la función de prueba $v \in C_0^\infty(\Omega)$ por $v \in V = H_0^1(\Omega)$.

Al resolver la formulación débil, se obtiene soluciones a las variables de las derivadas parciales que forman la ecuación diferencial.

Para determinar el flujo de calor desde el medio hasta el micropilote se tiene en cuenta que intervienen transferencias de calor por convección y conducción en el método de transferencia. Por lo tanto, se tiene que en 2D el flujo de calor es:

$$\dot{q}_n = \left(k \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q}_c \quad (Ec. 25)$$

donde \dot{q}_c se refiere al flujo de calor por convección de la ecuación 9.

El procedimiento para obtener la formulación débil de esta expresión consta de tres pasos obteniéndose con este una ecuación diferencial de segundo orden. El primer paso es igualar a cero la expresión, multiplicar por la función de prueba $\omega \in [H_0^1(\Omega)]^2$ e integrar sobre el dominio Ω :

$$0 = \int_{\Omega} \omega \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \dot{q}_c(x, y) \right] dx dy \quad (Ec. 26)$$

El segundo paso se realiza mediante la separación de las dos dimensiones, facilitando así el uso de la integración por partes:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x} (\omega F_1) dx = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} F_1 + \frac{F_1}{\partial x} \right) dx \quad (Ec. 27)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial y} (\omega F_2) dy = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} F_2 + \frac{F_2}{\partial y} \right) dy \quad (Ec. 28)$$

donde se tiene que $F_1 = k \frac{\partial T}{\partial x}$ y $F_2 = k \frac{\partial T}{\partial y}$. Adaptando la ecuación 26 con la integración por partes realizada, se tiene:

$$0 = \int_{\Omega} \left(k \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} - \omega \dot{q}_c \right) dx dy - \oint_{\Gamma} \omega \left(k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) dS \quad (Ec. 29)$$

donde n_x y n_y son el vector normal correspondiente a cada eje. El tercer y último paso consiste en la reformulación de la ecuación 29 implementando la ecuación 25 y obteniéndose:

$$0 = \int_{\Omega} \left(k_x \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) d\Omega - \int_{\Gamma_2} h_c (T - T_f) v dT \quad (Ec. 30)$$

La ecuación 30 completa la formulación débil del flujo de calor total.

11.2 CONDICIONES DE FRONTERA

Para determinar la distribución de temperatura en un medio es necesario obtener las ecuaciones de calor, pero éstas dependerán de las condiciones físicas que existan en las fronteras del medio y las condiciones físicas que se den en el medio en tiempo inicial.

La primera condición que se establece es la referida a la temperatura del terreno. Como ya se ha visto anteriormente a ciertas profundidades la temperatura del terreno permanece prácticamente constante. Por lo tanto, se considera como una de las condiciones de que esta temperatura fija T_s corresponde con la temperatura media del ambiente. Esta se denomina normalmente condición de Dirichlet, o condición de frontera de primera clase (Frank P. & DeWitt, 1996).

La segunda condición de frontera corresponde con la existencia de un flujo de calor constante \dot{q}_s en el plano perpendicular a la superficie terrestre. Este flujo de calor se relaciona con el gradiente de temperatura mediante la ley de Fourier. Este tipo de condición se denomina condición de Neumann o condición de frontera de segunda clase. Un caso especial de esta condición corresponde a la superficie perfectamente aislada, o adiabática, para la que $\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$ (Frank P. & DeWitt, 1996).

La tercera condición de frontera o la conocida como la de tercera clase es aquella que coincide con las acciones de enfriamiento o calentamiento que se dan en la superficie del terreno. Teniendo en cuenta que en la superficie del terreno intervienen flujos de calor por radiación y por convección se utiliza la condición de Robin, ya que es la combinación de las condiciones de primera y segunda clase. En este estudio para el caso de convección y radiación se tiene:

$$kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_r = Ah(T_s - T_\infty) + A\varepsilon\sigma G(T_s^4 - T_{\text{cielo}}^4) \quad (\text{Ec. 31})$$

Como bien se mostró anteriormente la temperatura de cielo se ha calculado mediante el Documento Básico de Ahorro Energético (DB-HE-O) donde se establece que la temperatura efectiva del cielo se ha determinado por la correlación de Walton (1983) que utiliza la relación entre la nubosidad dada por Clark y Allen (1978) para obtener la temperatura efectiva del cielo.

Por lo tanto, estas serían las condiciones de contorno establecidas en el sistema de estudio:

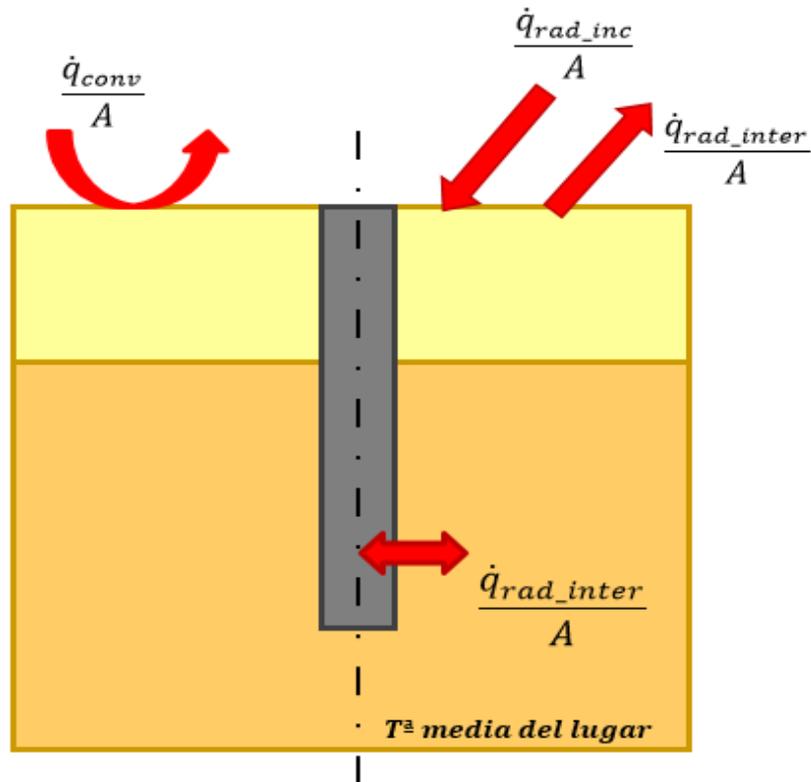


Ilustración 20. Transferencias de calor que intervienen en el sistema

12 DESARROLLO DEL TRABAJO

El objetivo de este estudio es el análisis del recurso de baja entalpía en las distintas zonas de la isla de Gran Canaria, para así poder analizar cómo influyen las características climatológicas de la zona en el sistema geotérmico.

Para llevar a cabo este análisis se ha realizado una simulación mediante el software informático Freefem++. Este software es gratuito y ha sido desarrollado por la Universidad Pierre y Marie Curie, en Francia. Este software permite simular resolver ecuaciones diferenciales parciales mediante lenguaje máquina. El lenguaje que emplea dicho software es C++.

El algoritmo del estudio está compuesto por los siguientes pasos:



A continuación, se describirán cada uno de los pasos de manera más detalla.

12.1 PARAMETRIZACIÓN Y DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

Para llevar a cabo la simulación primero se realizó la parametrización del sistema. Freefem++ permite definir geoméricamente un sistema en 2D o 3D. Este software permite reproducir geometrías creando elementos concretos o mediante la descripción de distintas secciones.

Para el caso del estudio se llevó a cabo la parametrización en dicho software de un micropilote, contemplando dos tipos de terreno distintos. Como el micropilote tiene una forma cilíndrica se examinó el sistema tomando el eje de simetría del micropilote. La visualización de las distintas regiones de estudio en Freefem++ sería:

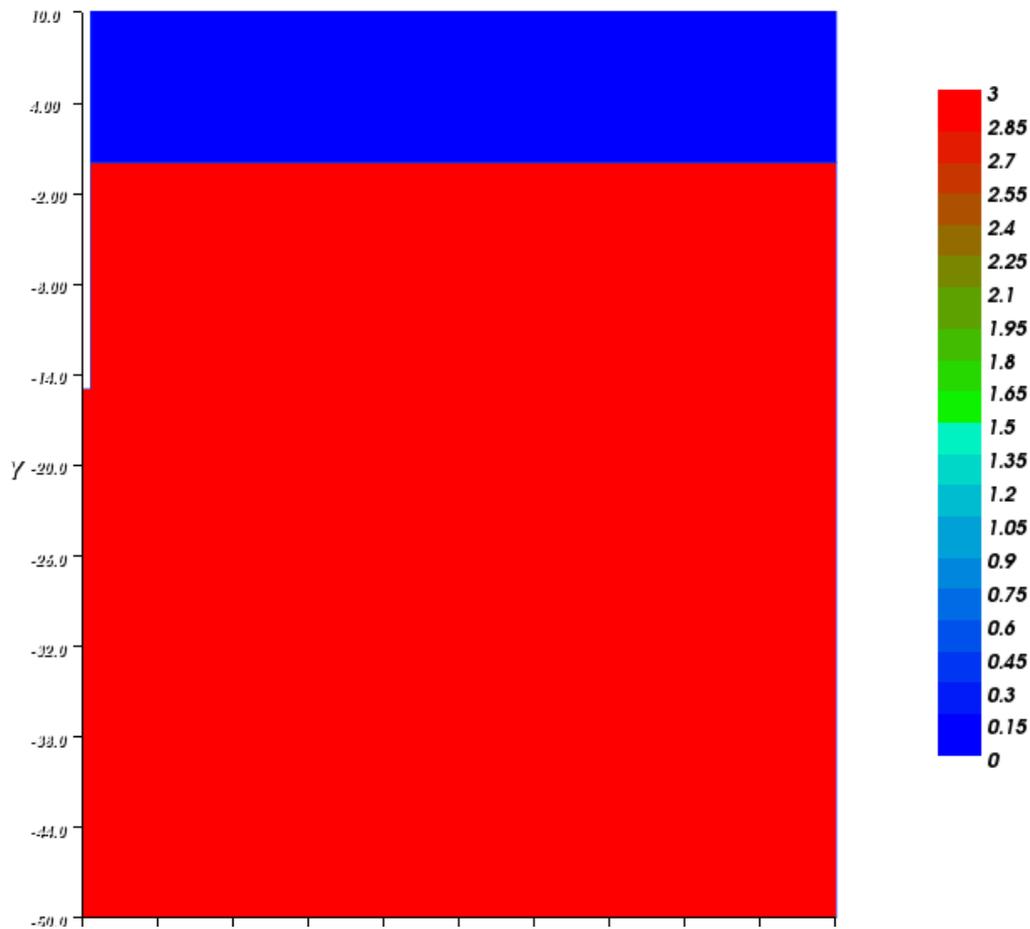


Ilustración 21. Regiones del sistema en Freefem++

Como se puede observar en la imagen anterior, se representa gráficamente las distintas regiones, teniendo el terreno 1, con un material determinado de color rojo y el terreno 2 con otro material distinto.

Además, se ha realizado la parametrización de tal forma que se pueda cambiar las profundidades de los terrenos, del micropilote o la longitud del terreno a estudiar para que existe una mayor amplitud de posibilidades a la hora de realizar las simulaciones.

Conjuntamente, en este apartado del desarrollo se han definido las variables que afectan al sistema. Las variables que se han definido en el sistema son:



12.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Una vez definidas las variables y la parametrización, el siguiente paso a seguir para realizar una simulación de un sistema geotérmico en Freefem++ sería establecer las condiciones de contorno. Una vez establecidas las condiciones de contorno como se han desarrollado en el apartado 10.2, se establecerían en Freefem++ mediante la ecuación de Laplace.

En el caso del sistema objeto del estudio las condiciones de contorno en el software serían:

```

problem laplace(uh,vh,solver=GMRES,tgv=1e5) =
    int2d(Th) ( x*k*dx(uh)*dx(vh) + x*k*dy(uh)*dy(vh) ) // bilinear form
- int1d(Th,4) ((x*qBC*vh)/k) //Condicion de contorno tipo Neumann;
- int1d(Th,1) ((x*alfa*G*vh)/k) //Condicion de contorno tipo Neumann ; Radiación absorbida por el terreno
+ int1d(Th,1) (x*hrad*uh*vh) //condicion de contorno tipo Radiativa
- int1d(Th,1) (x*hrad*ucielo*vh) //condicion de contorno tipo Radiativa
+ int1d(Th,1) ((x*h*uh*vh)/k) //Condicion de contorno tipo Convectiva
- int1d(Th,1) ((x*h*uinf*vh)/k) //Condicion de contorno tipo Convectiva
+ int1d(Th,2) (0*x*vh) //Condicion de contorno tipo Neumann ; Convección a los lados del terreno que se considera 0
+ on(3,uh=umed) ; // boundary condition form ; Temperatura del terreno = Temperatura ambiente
    
```

Ilustración 22. Condiciones de frontera en Freefem++

12.3 MALLADO

Freefem++ permite generar un mallado de cada geometría representada, haciéndolo mediante los algoritmos propios del software, permitiendo escoger la densidad de los nodos. En el caso del sistema geotérmico de baja entalpía que se ha desarrollado durante este trabajo, el mallado realizado en el software quedaría:

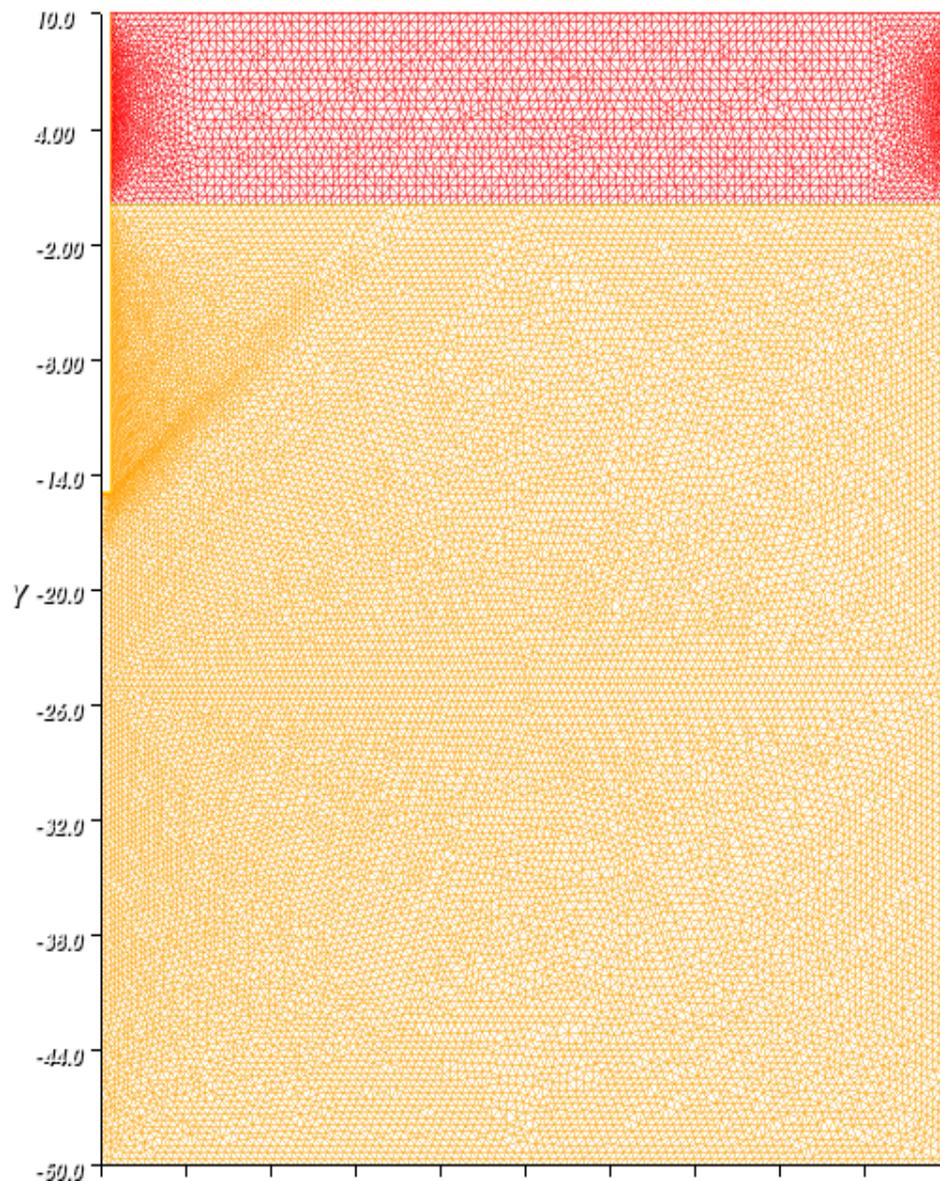


Ilustración 23. Mallado en Freefem++

12.4 SIMULACIÓN.

Para el estudio del sistema geotérmico se recopiló la información necesaria de cada una de las distintas zonas de la isla. Para obtener los datos de radiación, viento, temperaturas o tipo de terreno existente en cada zona se empleó Grafcan Visor, que permite obtener ese tipo de datos con bastante exactitud. Además, los datos de conductividad de los distintos materiales de la zona, así como la absorptividad se extrajo de la Guía Geotérmica del Instituto para la diversificación y ahorro de energía (IDAE).

Con respecto al estudio del terreno, se observó la mayor parte de materiales existentes en el terreno de las distintas zonas mediante el Grafcan Visor. Debido al origen volcánico de la isla la mayor parte del terreno está compuesto por lava basáltica. El basalto es una roca ígnea volcánica de color oscuro, de composición máfica, rica en silicatos de magnesio y hierro y en sílice, que constituye una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre. En la zona suroeste existe una gran presencia de arena negra y picón, mientras que en la vertiente sureste la mayor parte del terreno es compactación de arena.

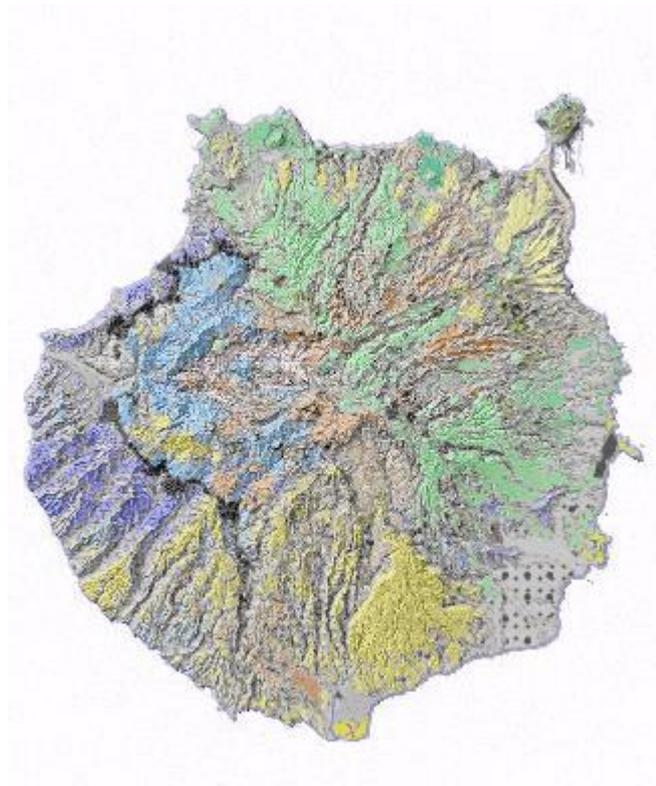


Ilustración 24. Distribución Geológica de Gran Canaria

Por lo tanto, a continuación se detallan las pruebas realizadas en cada una de las zonas de las islas para analizarlas con mayor amplitud.

❖ **AGAETE**

La primera zona de la isla que se analizó fue Agaete. Este municipio se encuentra en la zona noroeste de la isla y se caracteriza por tener un clima Bwh según la clasificación de Köppen.



Ilustración 25. Localización municipio Agaete.

Este municipio se caracteriza por tener una temperatura media anual de 22,7°C. Una de las características del municipio es el viento. Siendo una zona muy ventosa en ciertos meses del año. Las características climatológicas de esta zona se recogen en la siguiente tabla:

AGAETE - CLIMA Bwh			
	Temperatura media (°C)	Humedad relativa media (%)	Irradiancia (W/m2)
Enero	19	64	290,53
Febrero	20,1	68	357,03
Marzo	20,8	65	465,73

Abril	20,9	66	511,33
Mayo	22,2	66	567,28
Junio	23,5	68	577,4
Julio	24,7	72	547,47
Agosto	25,9	71	515,16
Septiembre	25,9	71	473,38
Octubre	25,1	69	374,43
Noviembre	22,8	69	279,79
Diciembre	20,8	66	253,6
ANUAL	22,7	68	434,78

Tabla 3. Datos medios de temperatura, humedad e irradiancia de Agaete.

El suelo de la isla es bastante variado, por ese motivo, debido a la complejidad que implica realizar la simulación con el terreno fracturado, y contemplándolo como futuras líneas de investigación, se consideró para llevar a cabo la simulación el material más abundante en la zona. En el caso del municipio de Agaete, el terreno está compuesto por una gran parte de lava basáltica. Por lo que en la simulación se empleó los valores de conductividad del basalto y la arena o grava.

Para analizar cómo se ve afectado el sistema geotérmico por las discrepancias del ambiente se realizó la simulación con los datos de temperatura de Enero y Agosto, ya que se observa son los meses con las temperaturas más bajas y más altas de la zona.

Teniendo en cuenta que la temperatura media en Enero de Agaete ronda en torno a los 19°C y que según el Código Técnico de la Edificación se considera como temperatura de confort en torno a los 22-24°C, la bomba de calor se encargará de absorber el calor del terreno.

Realizando la simulación con los datos obtenidos de enero se obtiene:

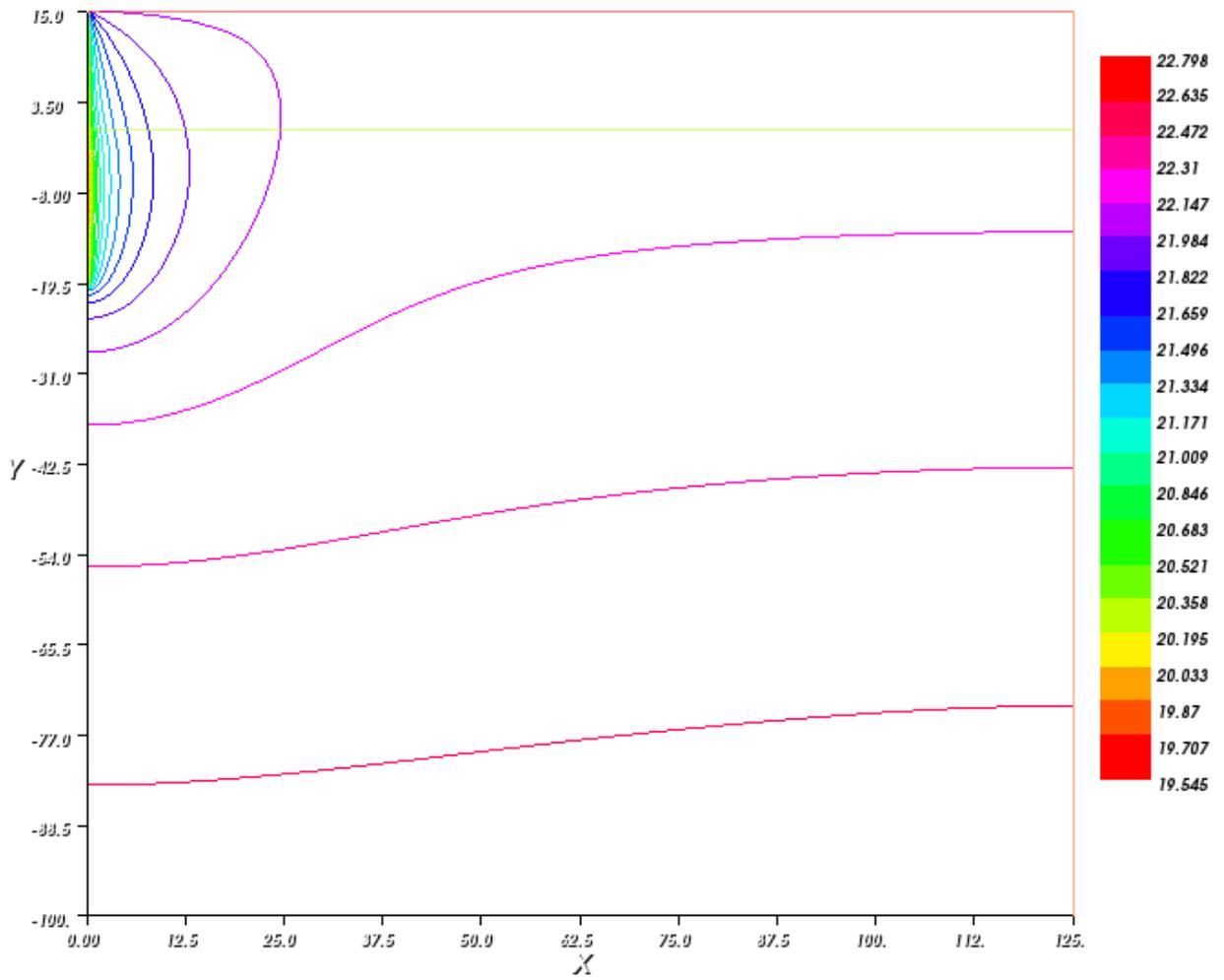


Ilustración 26. Distribución de T^a en Agaete, mes de Enero

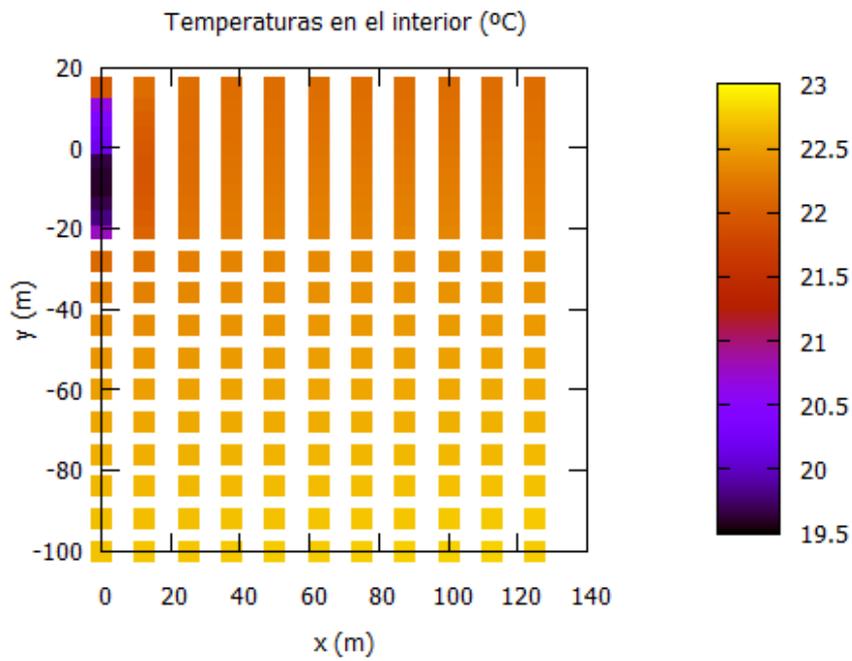


Ilustración 27. Distribución de temperatura Agaete en enero.

Cómo las leyes de la termodinámica demuestran, la transferencia de calor siempre se produce desde el foco caliente hacia el foco frío. Por lo tanto en las gráficas anteriores se ve como el terreno se encuentra a mayor temperatura que la del micropilote, por lo que éste se encarga de absorber el calor del terreno para cederlo a la vivienda por medio de la bomba de calor.

Por el contrario, también se realizó el análisis del comportamiento del sistema en el mes de Agosto, dónde se registran los valores más altos de temperatura. Para este mes se tuvo en cuenta que esta zona es bastante ventosa en la época de verano.

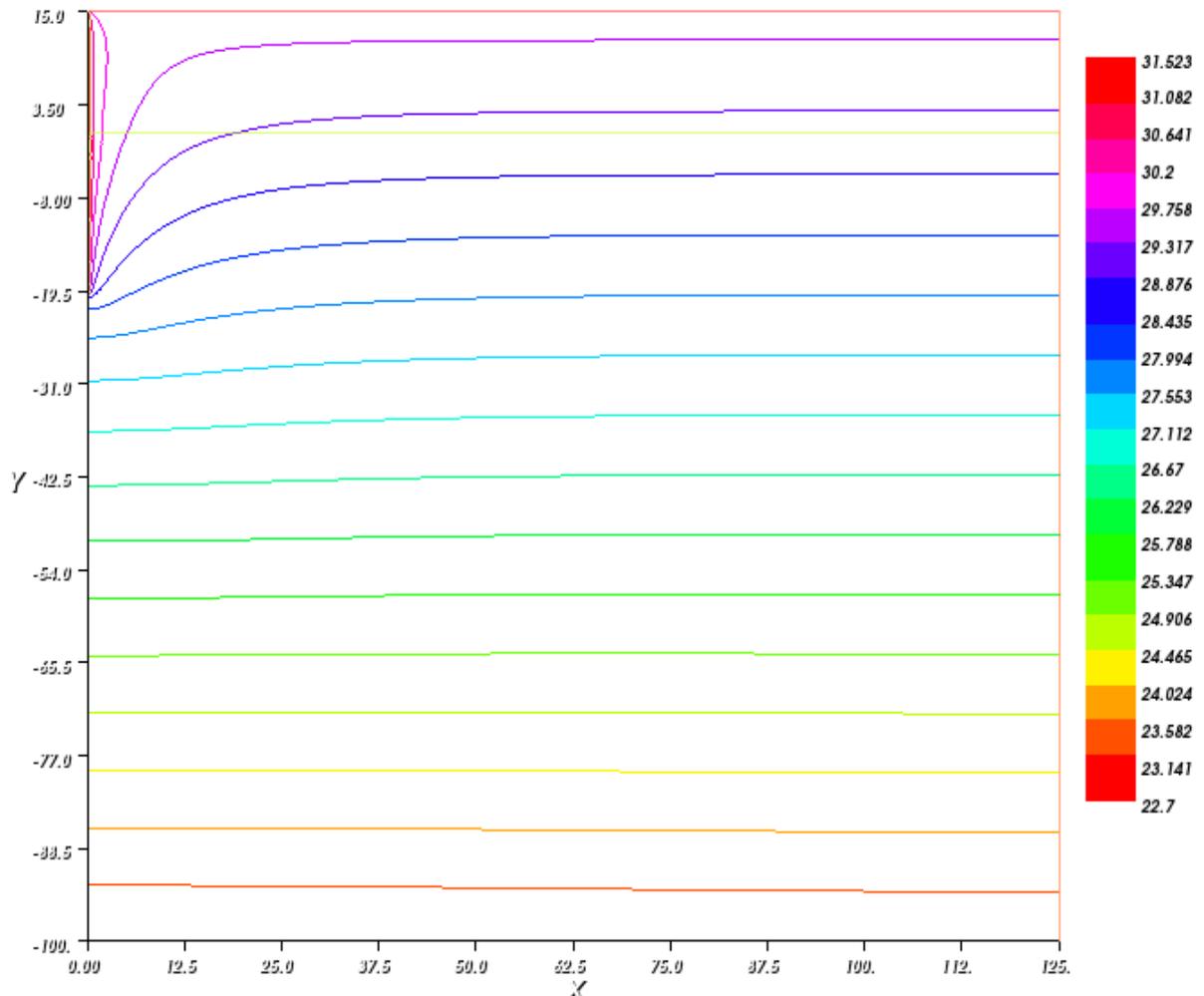


Ilustración 28. Distribución de Tª en el terreno, Agaete en Agosto

Con los datos climatológicos de la zona en verano, se observa como el micropilote cede el calor a la tierra, por lo que los valores más altos de temperatura se registran cerca del micropilote. En el siguiente gráfico se puede observar con mayor claridad.

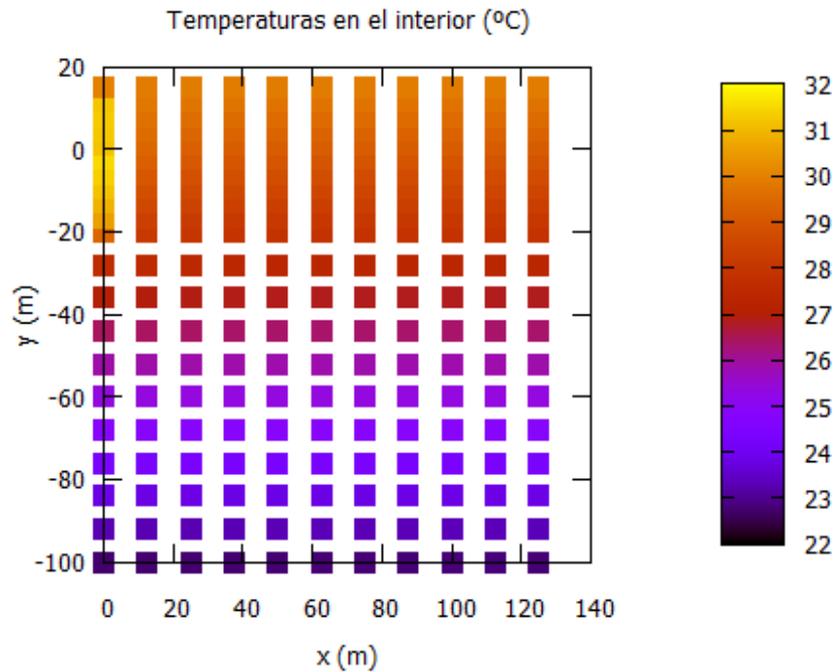


Ilustración 29. Distribución T^a Agaete- Agosto

Teniendo en cuenta que en el mes de agosto el valor de radiación es bastante elevado se observa en la gráfica como las capas de terreno más superficiales se encuentran a mayor temperatura.

❖ FIRGAS

Firgas es un municipio situado en el norte de la isla. Se caracteriza por tener un clima Bsk según la clasificación de Köppen, es decir, clima desértico de espeta fría. Las variaciones de temperatura según el mes del año son:



Ilustración 30. Localización del municipio de Firgas

FIRGAS - CLIMA Bsk			
	Temperatura media (°C)	Humedad relativa media (%)	Irradiancia (W/m ²)
Enero	16,6	82	278,8
Febrero	17,3	80	348,23
Marzo	17,9	80	456,28
Abril	17,7	86	481,24
Mayo	19,2	83	537,63
Junio	20,9	83	563,83
Julio	22,9	76	531,63
Agosto	23,5	79	513,78
Septiembre	23	82	464,87
Octubre	21,9	82	358,54
Noviembre	19,4	82	254,23
Diciembre	17,2	85	248,21
ANUAL	19,8	82	420,13

Tabla 4. Datos medios de temperatura, humedad e irradiancia de Firgas

Aunque Firgas se encuentra en la vertiente norte de la isla al igual que Agaete, tienen climas distintos y valores de temperatura distintos. Aunque el rango de temperatura entre ambos municipios no varía demasiado en Firgas los valores de humedad relativa son bastante

más elevados. Por lo tanto, se analizará los rangos de temperatura con lo que puede trabajar el sistema valorando los meses más favorables y desfavorables térmicamente hablando.

Además, este municipio al igual que Agaete se caracteriza por un terreno bastante basáltico. Por lo que simulando el mes de enero se obtiene:

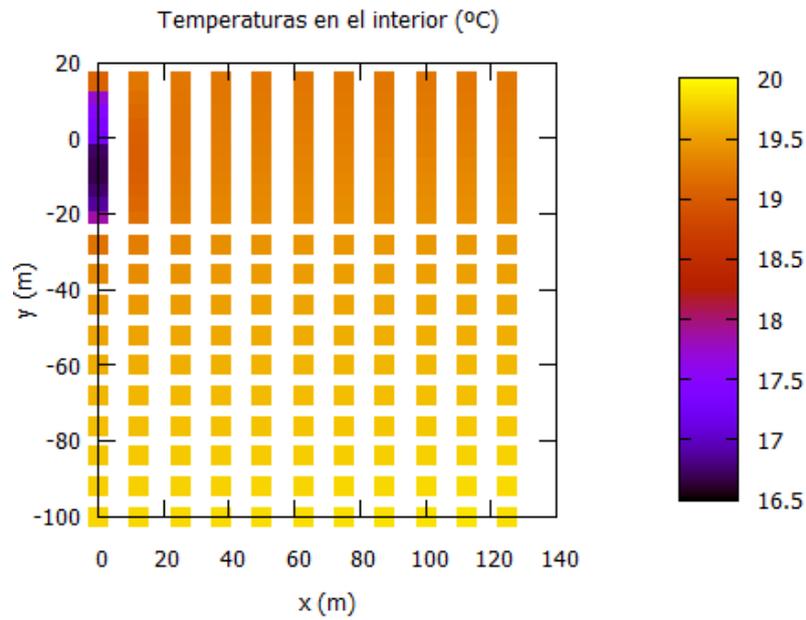


Ilustración 31. Distribución de T^a en el terreno Firgas-Enero

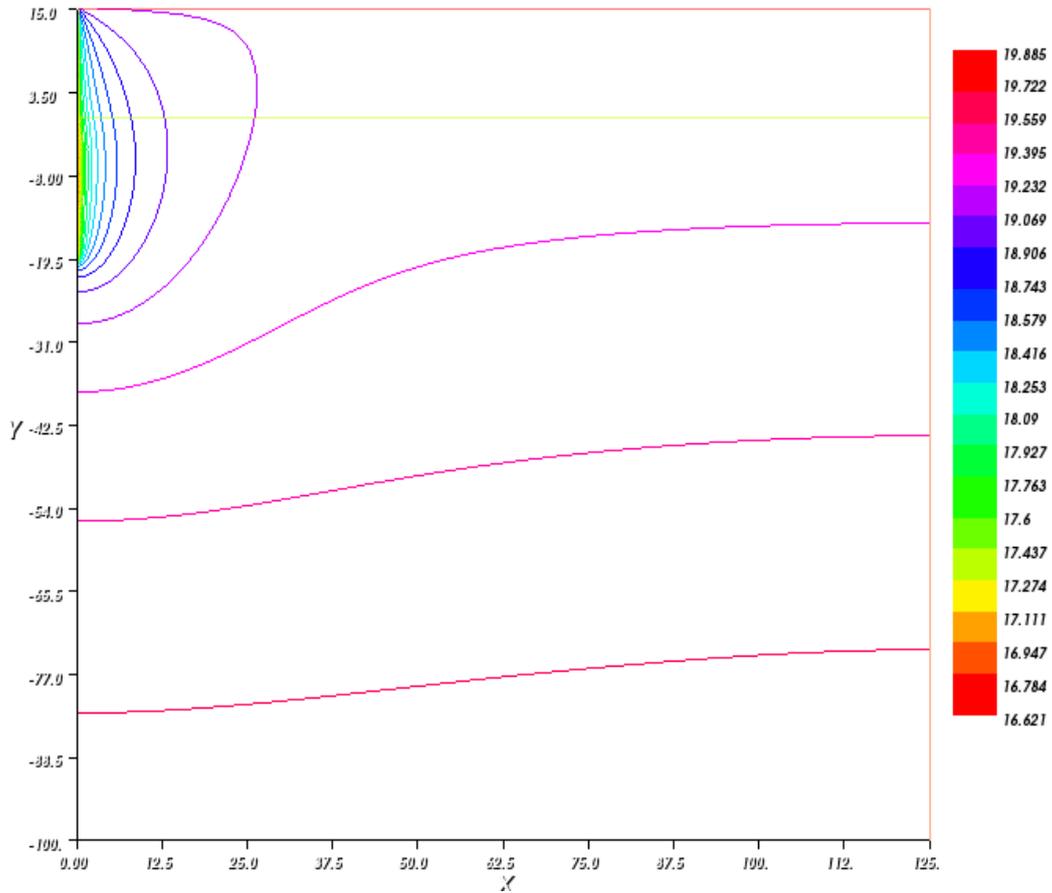


Ilustración 32. Distribución de T^g en el terreno en Firgas en Enero

Se observa como el micropilote absorbe calor del terreno, alcanzándose valores superiores en las capas más profundas del terreno.

Quando se realiza la simulación con los valores para el mes de temperatura más elevada, que en este caso es agosto, se obtiene:

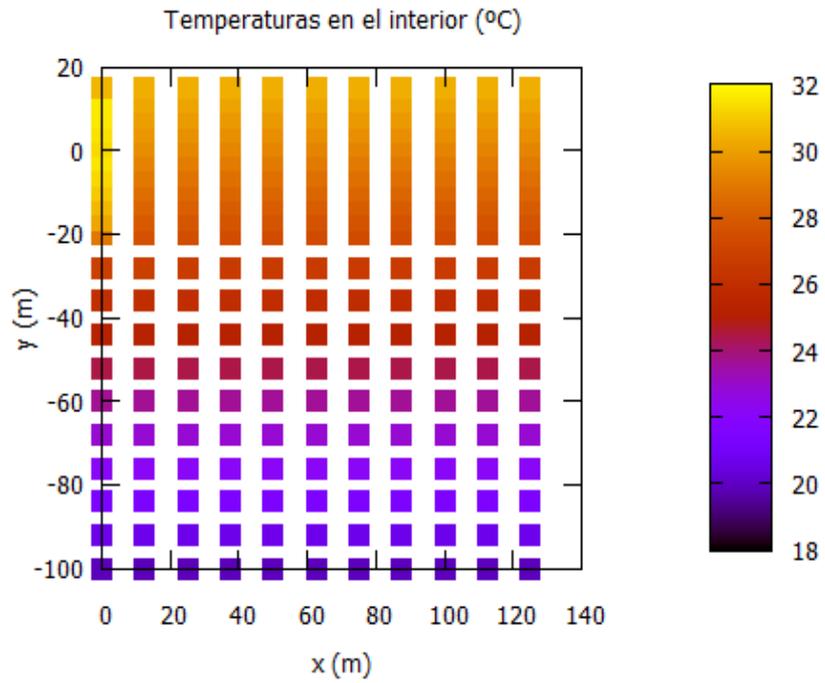


Ilustración 33. Distribución de T^a terreno Firgas- Agosto

Los valores de temperatura son más elevados en las capas superiores del terreno, alcanzándose los valores más altos en el micropilote.

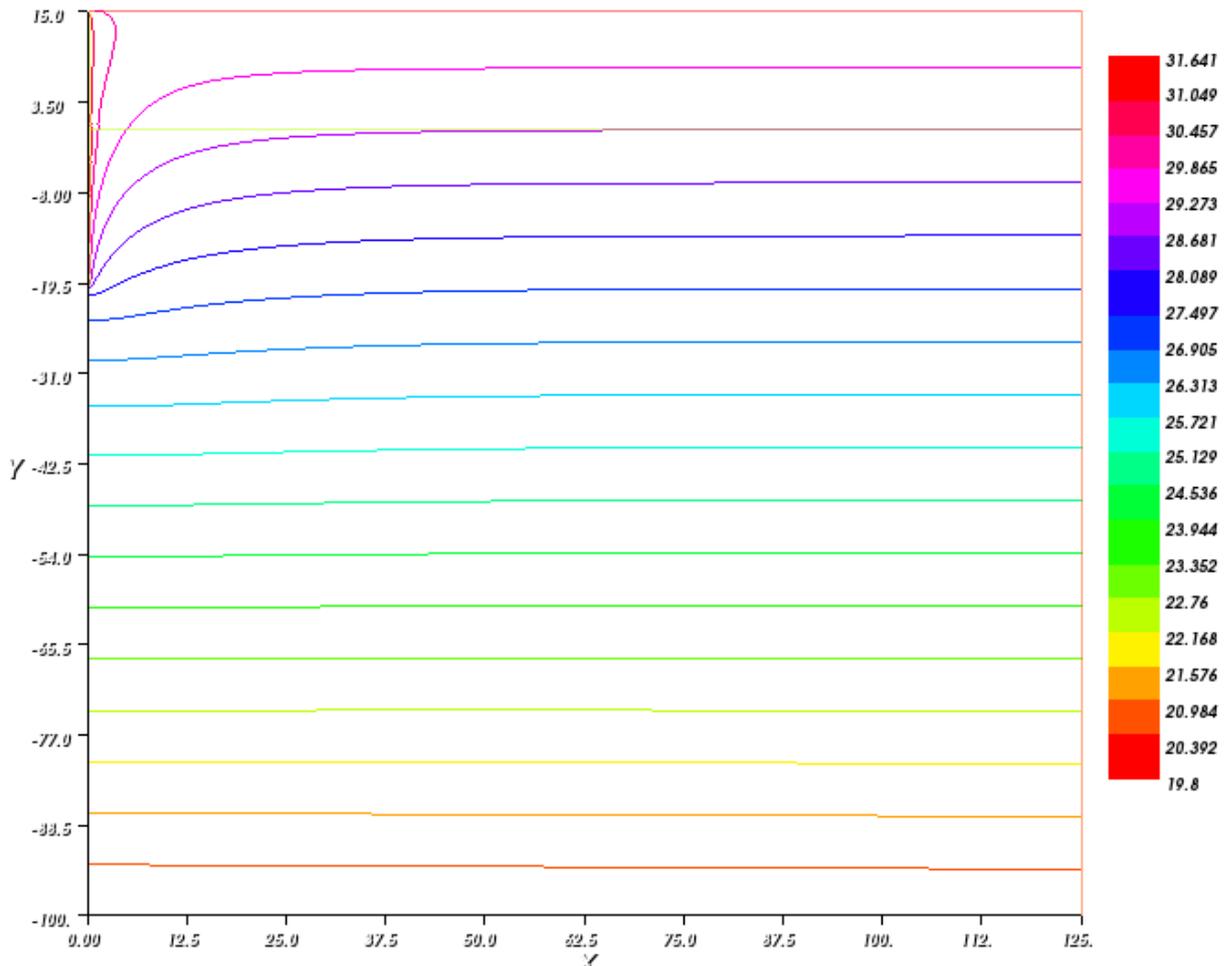


Ilustración 34. Distribución de Tª en el terreno en Firgas en Agosto

En las gráficas anteriores se observa como la distribución del calor en el terreno es mucho más constante en los meses de calor que en los meses de invierno.

❖ **MOGÁN**

Este municipio se encuentra situado al sur de Gran Canaria. Se caracteriza por un clima Bsh, que como se vio anteriormente es desértico de estepa cálida. Este municipio se caracteriza por tener valores de temperatura bastante estables durante todo el año, alcanzándose el valor mínimo en el mes de enero con una media de 19,2°C.



Ilustración 35. Localización municipio de Mogán

MOGÁN - CLIMA Bsh			
	Temperatura media (°C)	Humedad relativa media (%)	Irradiancia (W/m ²)
Enero	19,3	66	299,39
Febrero	19,6	71	372,43
Marzo	20,6	73	473,99
Abril	20,4	77	521,12
Mayo	21,4	79	583,06
Junio	23	81	606,57
Julio	24,6	80	580,64
Agosto	25,1	80	547,08
Septiembre	25,3	78	485,59
Octubre	24	76	381,31
Noviembre	22,2	67	290,51
Diciembre	20,5	66	263,84
ANUAL	22,2	75	450,82

Tabla 5. Datos medios de temperatura, humedad e Irradiancia de Mogán

Al igual que en las zonas anteriores se realiza la simulación con los datos de los meses donde más diferencia de temperaturas existe, con el fin de observar cómo le afecta la

climatología al sistema geotérmico. Se realiza la simulación para los meses de enero y agosto. Antes de realizar la simulación debe hacerse hincapié en el tipo de terreno que predomina en la

zona. En este caso el material que más se extiende en el terreno del municipio es el conglomerado de arena. Por lo que la conductividad del terreno variará con respecto a los lugares anteriores.

En el mes de enero se observa:

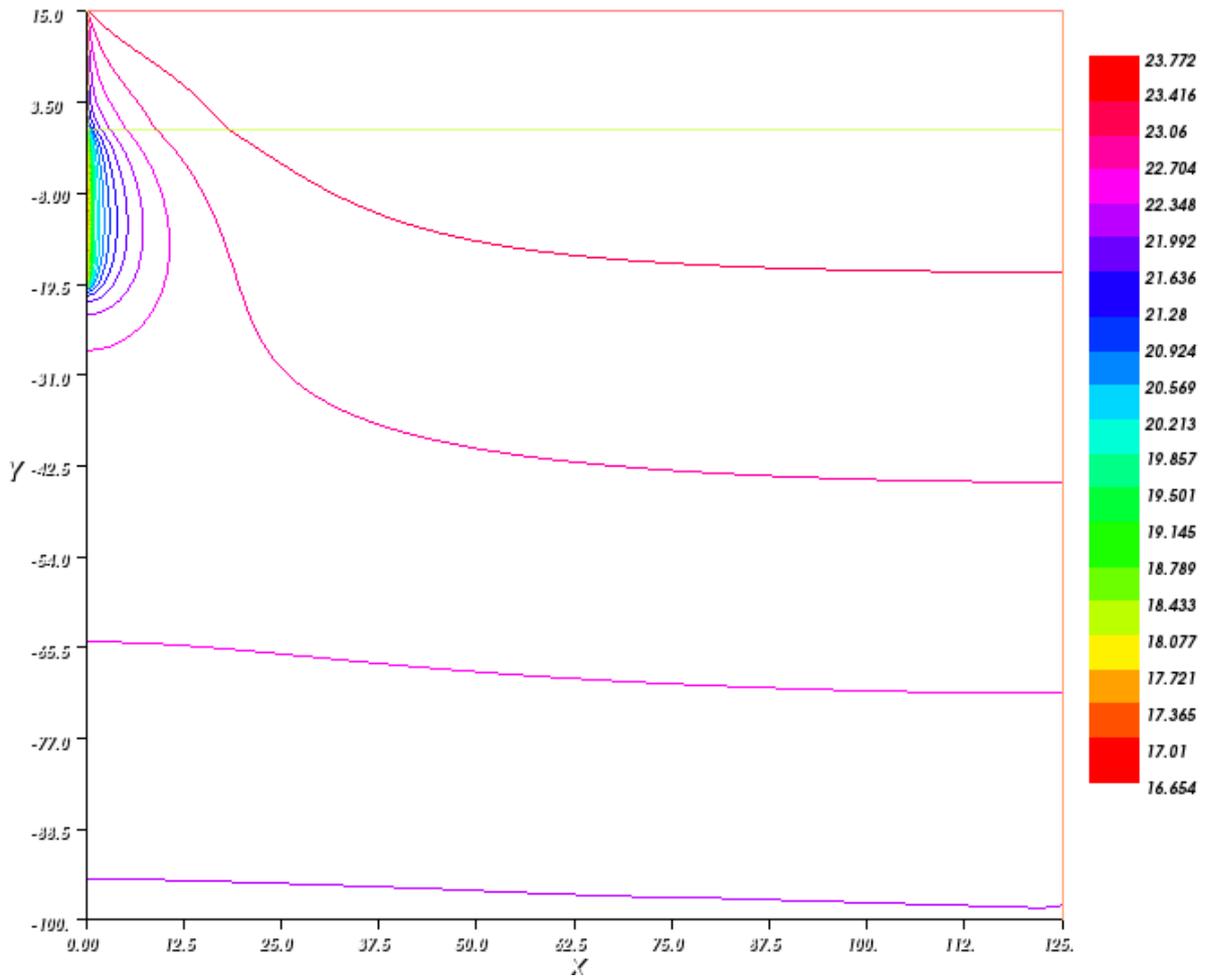


Ilustración 36. Distribución de Tª en el terreno en Fargas en el mes de enero

Como en las zonas anteriores en este mes el sistema se encarga de absorber el calor del terreno, aunque en Mogán se registran valores de temperatura más elevados que en las zonas anteriormente analizadas.

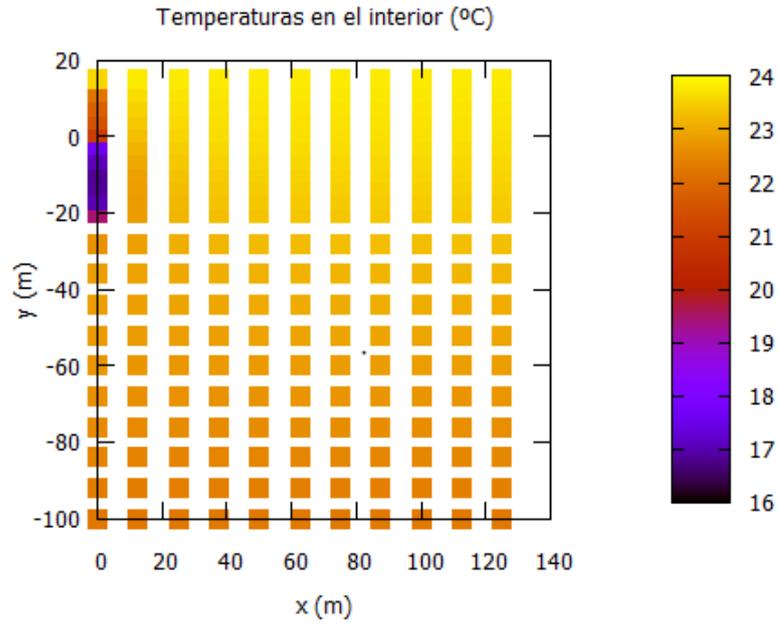


Ilustración 37. Distribución T^a terreno Mogán- Enero

Para el mes más caluroso de la zona, que en este caso es agosto la distribución de temperatura sobre el terreno es:

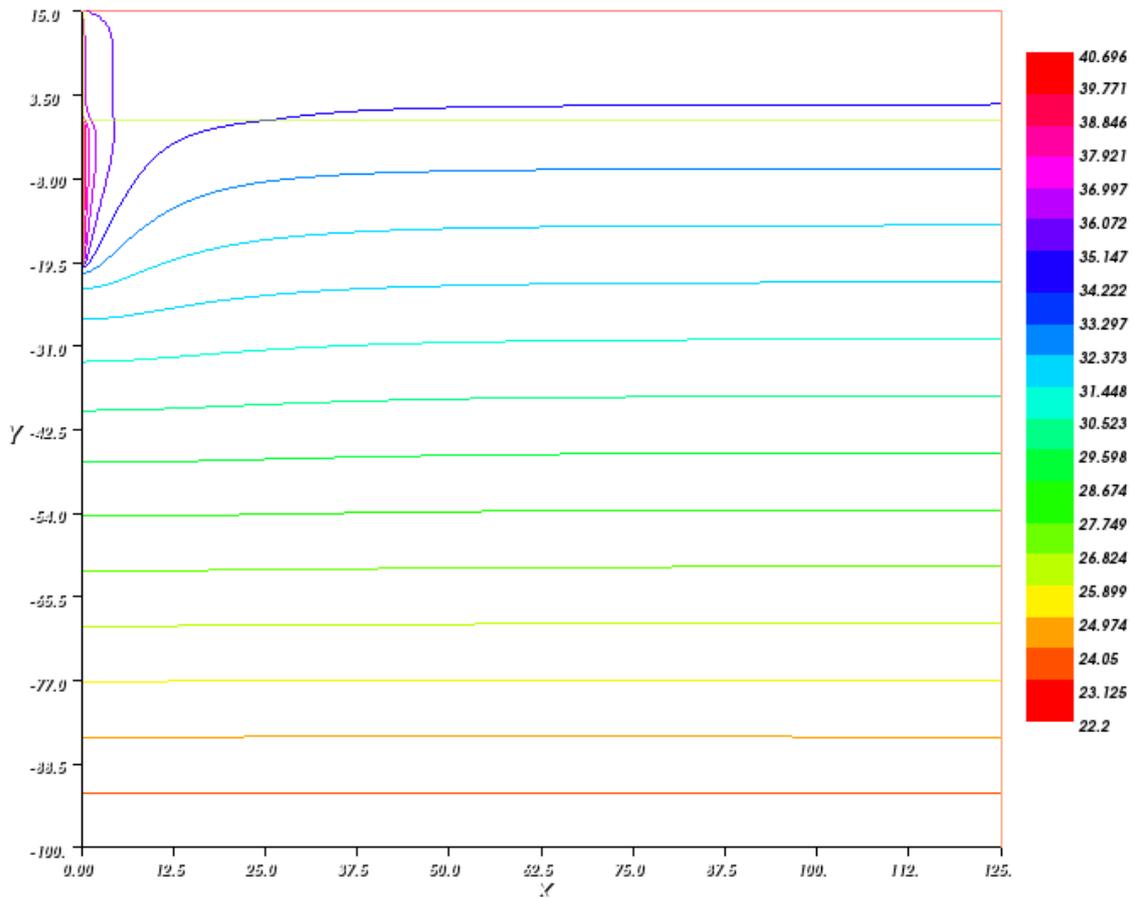


Ilustración 38. Distribución de T^a en el terreno en Mogán en el mes de Agosto

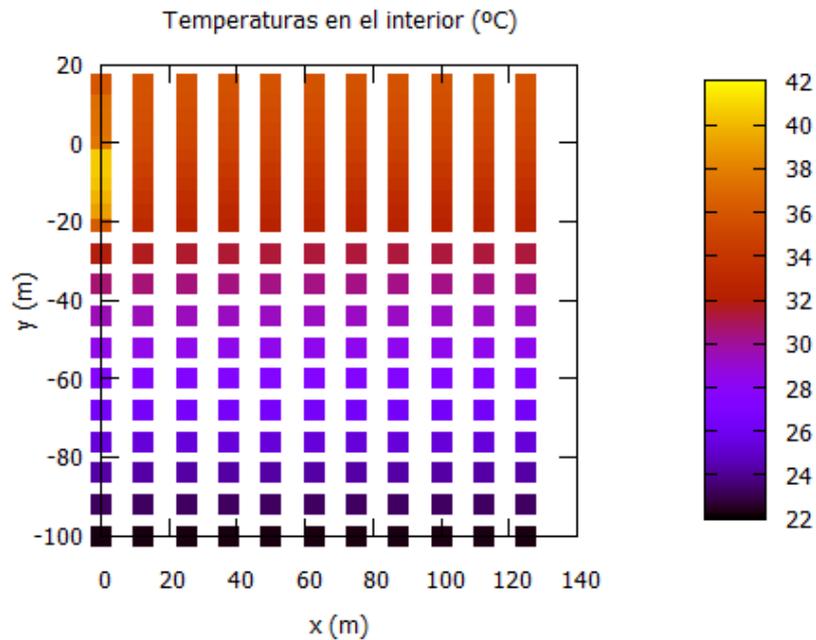


Ilustración 39. Distribución T^a terreno Mogán- Agosto

Se puede observar como los valores altos de radiación que se tienen en esa zona de la isla afectan haciendo que las capas superficiales del terreno tengan valores de temperatura mucho más elevados que las capas inferiores. Los valores más elevados de temperatura se registran en la zona del micropilote, ya que en este caso el sistema está cediendo el calor al terreno.

❖ **VEGA DE SAN MATEO**

Está situado sobre una amplia y fértil vega agrícola del tramo medio-alto del barranco Guiniguada, en las medianías del centro-norte de la isla.



Ilustración 4o. Localización municipio Vega de San Mateo

El análisis del sistema en esta zona puede llegar a ser bastante interesante ya que en las zonas centro de la isla los cambios de temperatura entre las estaciones pueden ser considerables. Como se puede observar en la siguiente tabla, puede darse una diferencia de temperatura de hasta 10°C de verano a invierno.

VEGA DE SAN MATEO - CLIMA Bsk			
	Temperatura media (°C)	Humedad relativa media (%)	Irradiancia (W/m ²)
Enero	12,9	80	292,68
Febrero	14	78	348,08
Marzo	13,5	74	470,56
Abril	14,9	77	452,30
Mayo	17,1	77	520,67
Junio	19,7	72	610,87
Julio	22,3	63	608,43
Agosto	22,5	69	565,98
Septiembre	20,4	79	475,13
Octubre	19	79	359,77
Noviembre	16,5	81	273,34
Diciembre	13,8	81	271,80
ANUAL	17,3	76	438,03

Tabla 6. Valores medios de temperatura, humedaad e irradiancia de San Mateo

Como en las zonas anteriores se realiza la simulación de aquellos meses que registran los valores de temperatura máximos y mínimos, que son agosto y enero.

En la zona de San Mateo los valores de viento son bastante similares durante todo el año. Con respecto al terreno, cabe destacar que la mayor parte del material que se encuentra en el municipio es el basalto.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, la simulación para el mes más frío se obtiene:

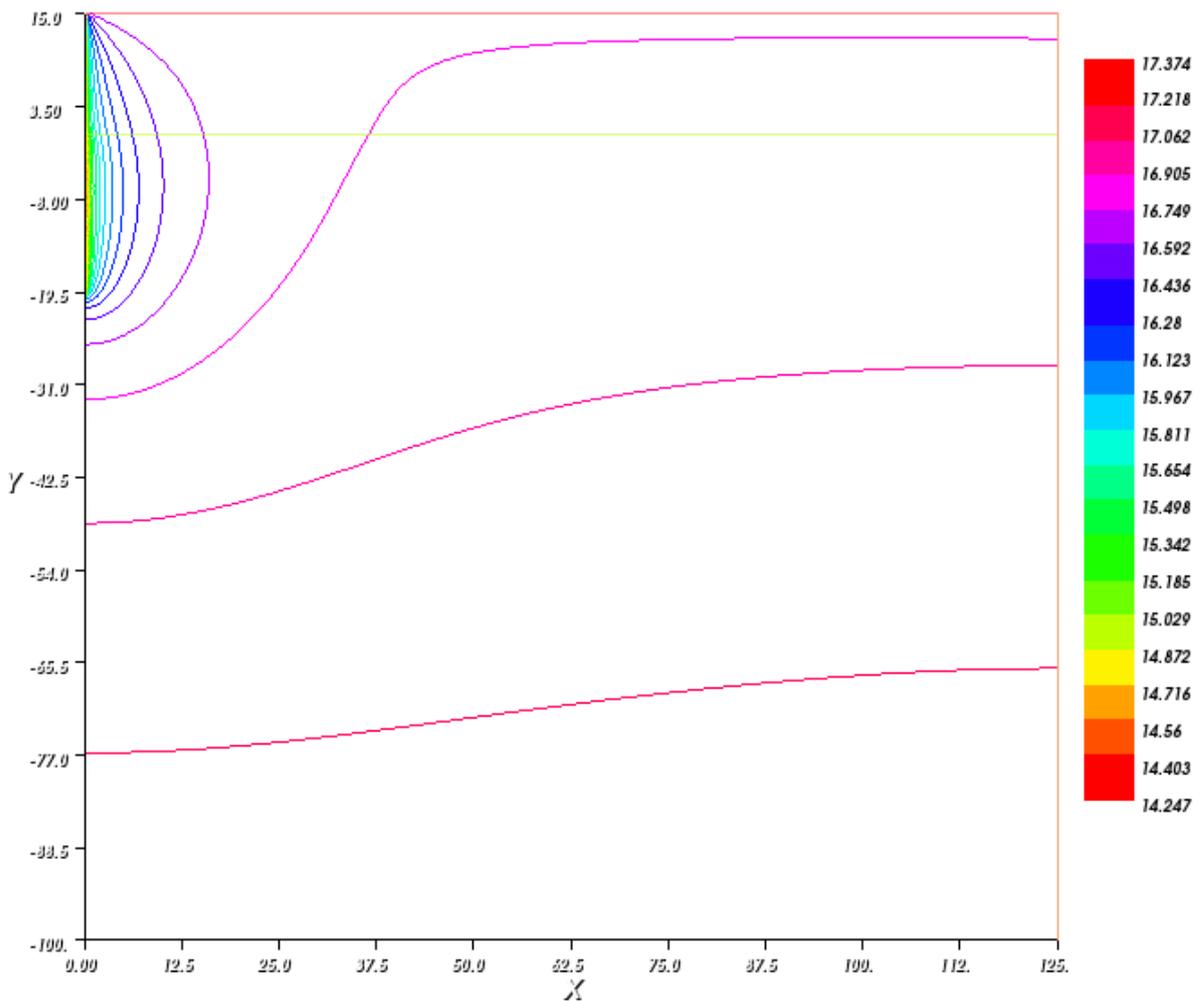


Ilustración 41. Distribución de T^g en el terreno en San Mateo mes Enero

Como se observa los valores de temperatura del terreno son bastante constantes.

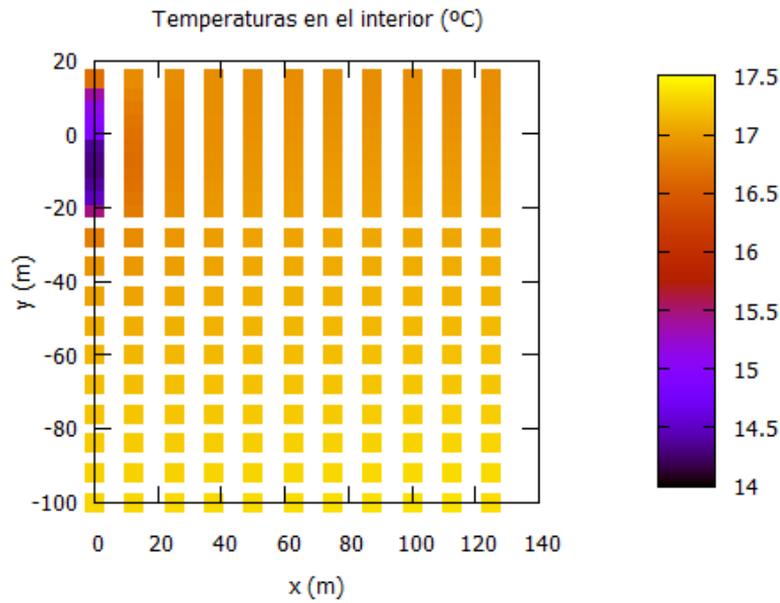


Ilustración 42. Distribución T^a terreno San Mateo- Enero

En la gráfica anterior se observa más claramente como los valores más bajos de temperatura se registran en la zona del micropilote, lo que significa que el sistema está robando calor al terreno.

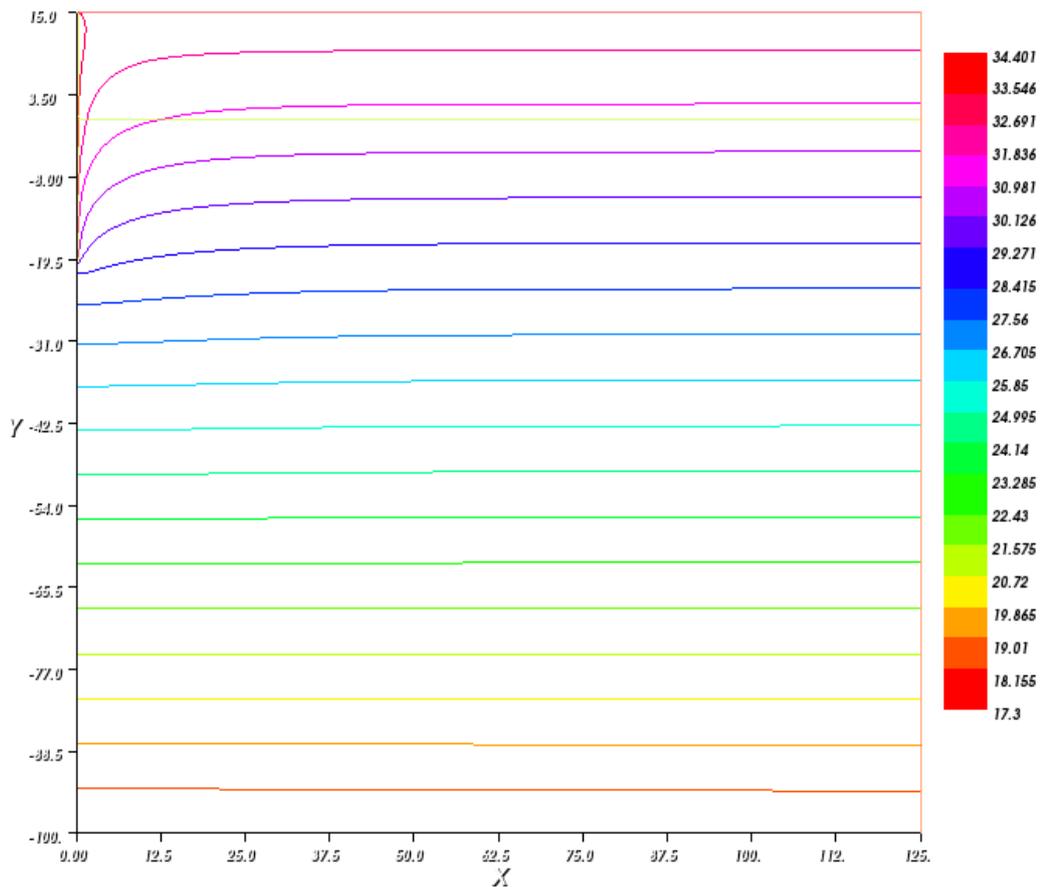


Ilustración 43. Distribución de T^a en el terreno en San Mateo mes de Agosto

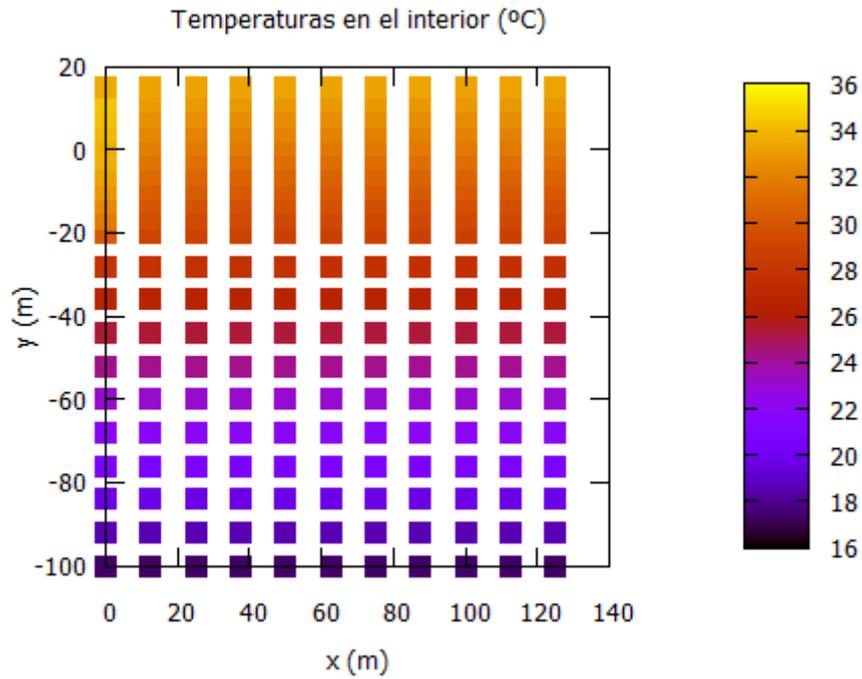


Ilustración 44. Distribución T^a terreno San Mateo- Agosto

Como ocurre en las zonas anteriores se observa como varia la temperatura en el terreno, registrándose en este caso los valores más bajo en la zona del micropilote.

❖ INGENIO

Este municipio se encuentra situado en el sureste de Gran Canaria. Se caracteriza por tener un clima Bwh según la clasificación de Köppen-Geiger. Esta zona, es una de las que registra los valores de viento más altos, sobretudo en los meses de verano. Dato a tener en cuenta en la simulación. Este municipio se encuentra localizado en:



Ilustración 45. Localización municipio de Ingenio

Los datos de irradiancia y temperaturas obtenidos del análisis de la zona han sido:

INGENIO - CLIMA Bwh			
	Temperatura media (°C)	Humedad relativa media (%)	Irradiancia (W/m ²)
Enero	16,8	80	292,68
Febrero	17,6	78	348,08
Marzo	18,6	74	470,56
Abril	18,8	77	452,30
Mayo	20,4	77	520,67
Junio	22,4	72	610,87
Julio	24,5	63	608,43
Agosto	25	69	565,98
Septiembre	24,2	79	475,13
Octubre	23,1	79	359,77
Noviembre	20,4	81	273,34
Diciembre	18,2	81	271,80
ANUAL	20,9	76	438,03

Tabla 7. Datos medios de temperatura, humedad e irradiancia de Ingenio

Al igual que en los municipios anteriores se analiza los meses de enero y agosto para analizar el comportamiento del terreno de la zona. En el caso de Ingenio la simulación se hace atendiendo al material que más predomina en la zona, que en este caso es el basalto. En la simulación para el mes de enero se obtiene:

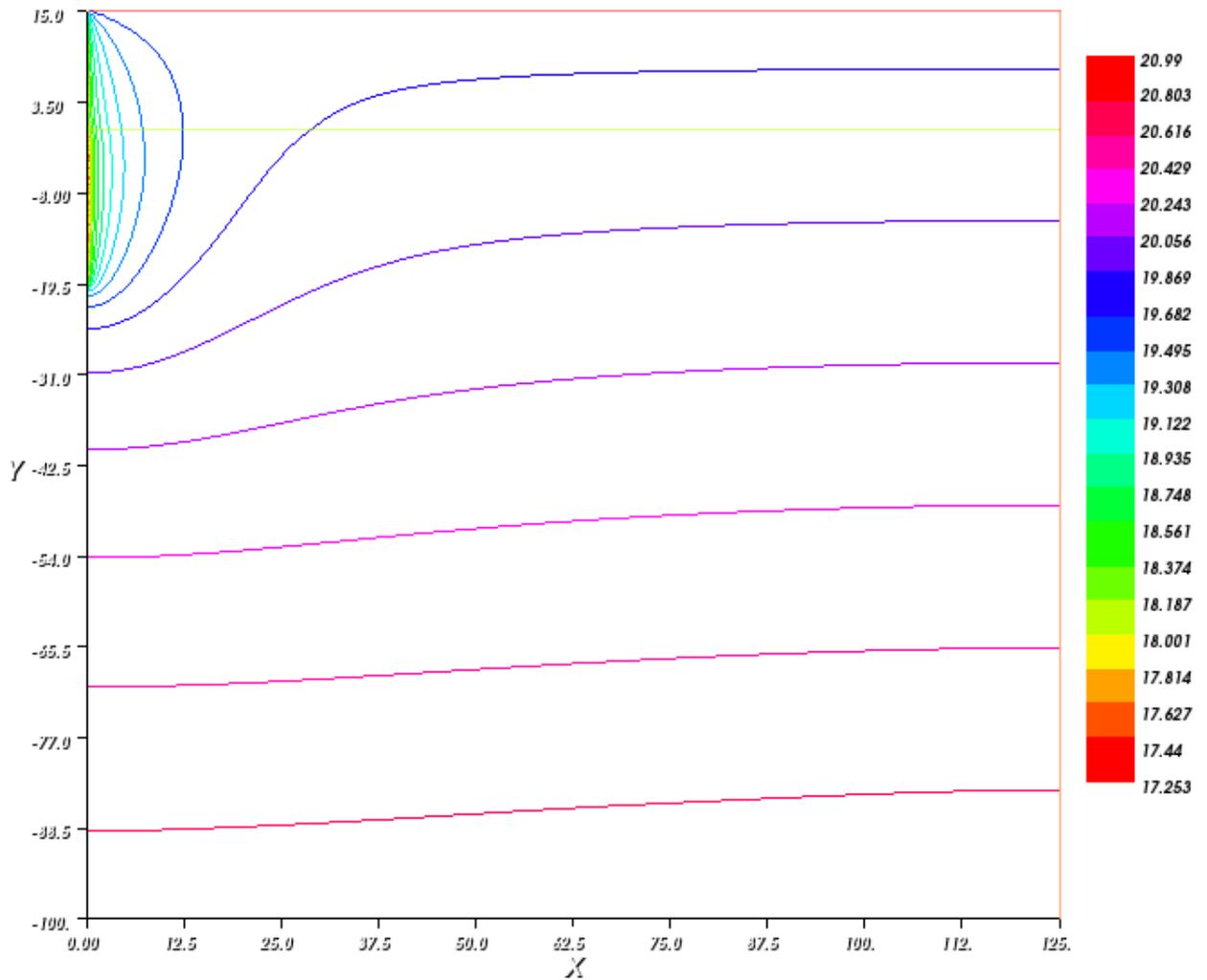


Ilustración 46. Distribución de T^g en el terreno de Ingenio en Enero

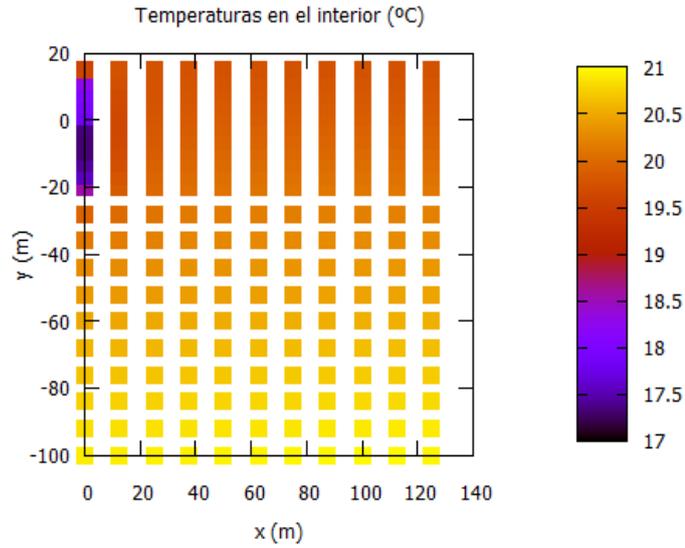


Ilustración 47. Distribución T^a terreno Ingenio- Enero

Se observa que el sistema actúa de forma similar que en los municipios anteriores, atendiendo a las temperaturas de Ingenio. En el caso de la simulación para el mes más caluroso se observa:

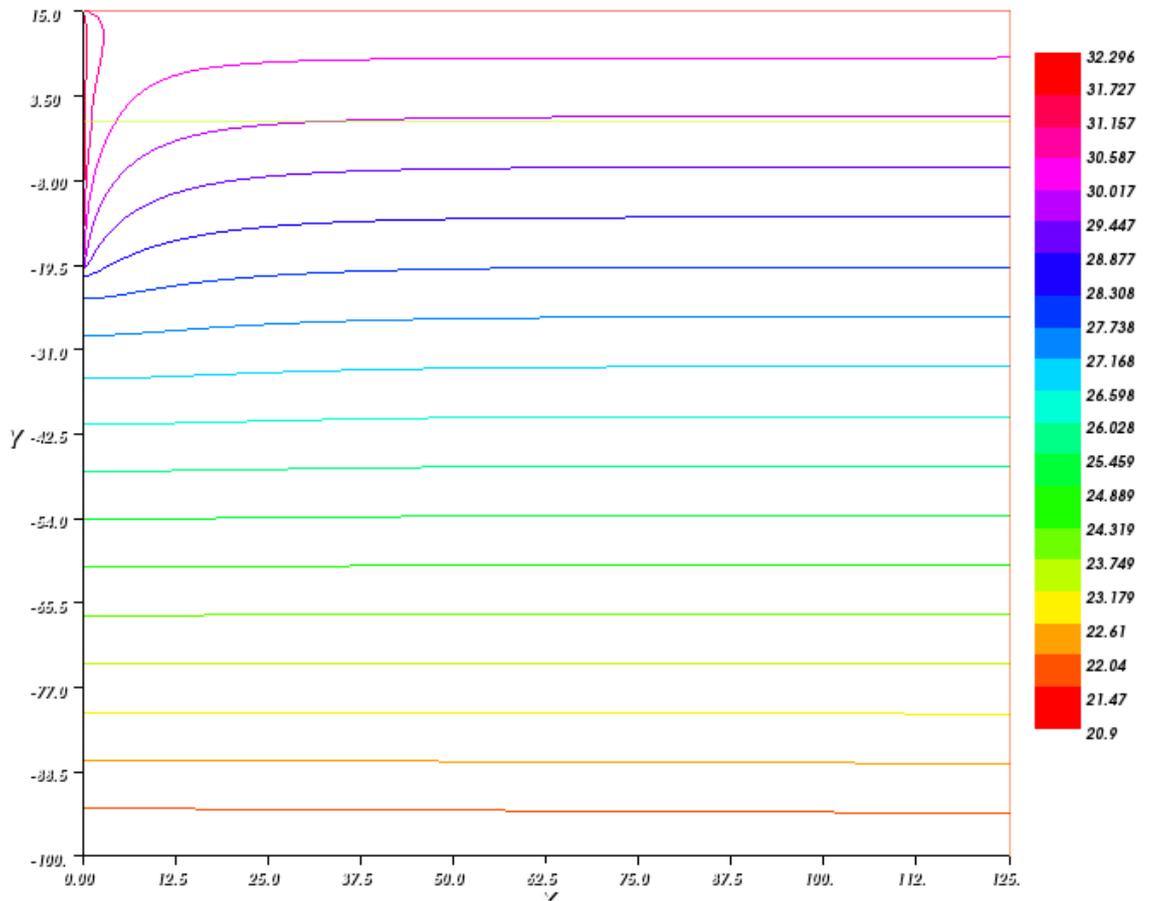


Ilustración 48. Distribución T^a en el terreno de Ingenio mes de Agosto

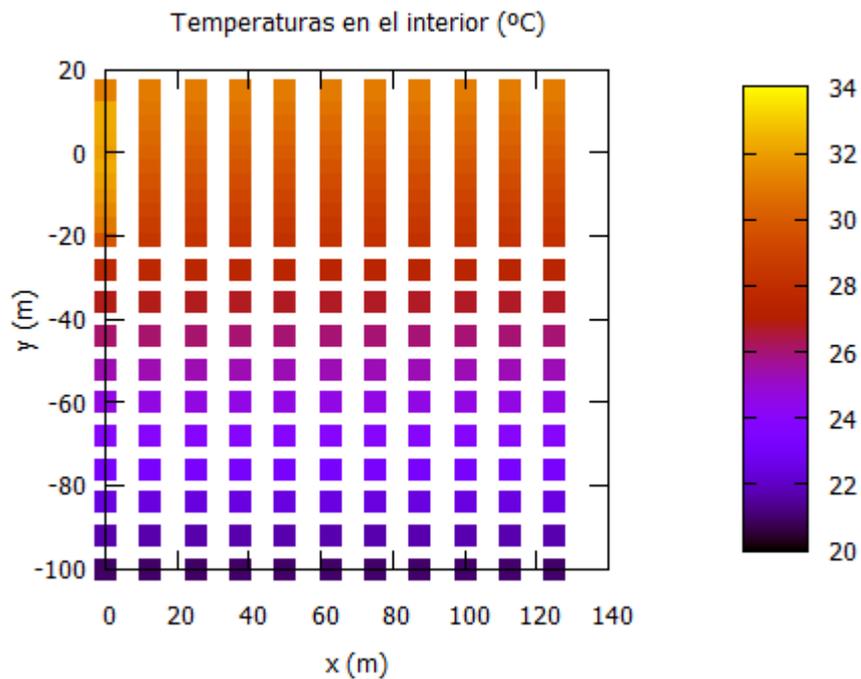


Ilustración 49. Distribución T^a terreno Ingenio-Agosto

Como ocurre en los meses de calor anteriores se ve como el micropilote está cediendo calor al terreno, registrándose los calores más elevados donde se encuentra el micropilote. Aunque el coeficiente de convección es bastante elevado en esta época del año se siguen registrando los valores más altos de temperatura en las capas superficiales debido a la radiación.

Por lo tanto, de estas simulaciones se puede sacar la conclusión de que el sistema, aunque esté situado en distintas zonas de la isla tendrá el mismo comportamiento, no obstante, trabajando en el rango de temperatura. Analizando en detalle las gráficas se observa que, en invierno, cuando la sonda geotérmica se encarga de absorber el calor del terreno, registra los valores más bajos en la zona del micropilote. Con respecto al terreno se observa como la temperatura va en aumento con la profundidad, siendo mayor la temperatura a mayores profundidades. Sin embargo, en las simulaciones realizadas para los meses de veranos el micropilote cede calor al terreno, registrándose los valores más elevados en la zona de la sonda geotérmica. Al igual que en invierno la temperatura varía algunos grados centígrados a razón de la profundidad, sin embargo, al contrario que en invierno, en verano se registran los valores más elevados en las zonas más superficiales del terreno.

Otra de las simulaciones que se ha llevado a cabo es para estudiar el comportamiento del terreno con respecto a la superficie de trabajo. Para ello se tomó dos de las zonas con distintos materiales, para comparar como afecta al trabajar en materiales con conductividades distintas.

En este caso se realizó la simulación en Mogán y en Agaete. Para ver como varía el terreno al variar las dimensiones de la parametrización. Para ello en la primera simulación se trabajó con:

PARAMETRIZACIÓN	VALORES
Profundidad del material 1	15m
Profundidad del material 2	100m
Longitud del micropilote	20m
Diámetro del micropilote	0,2m

Tabla 8. Parametrización inicial

Obteniéndose una distribución de calor así en Mogán:

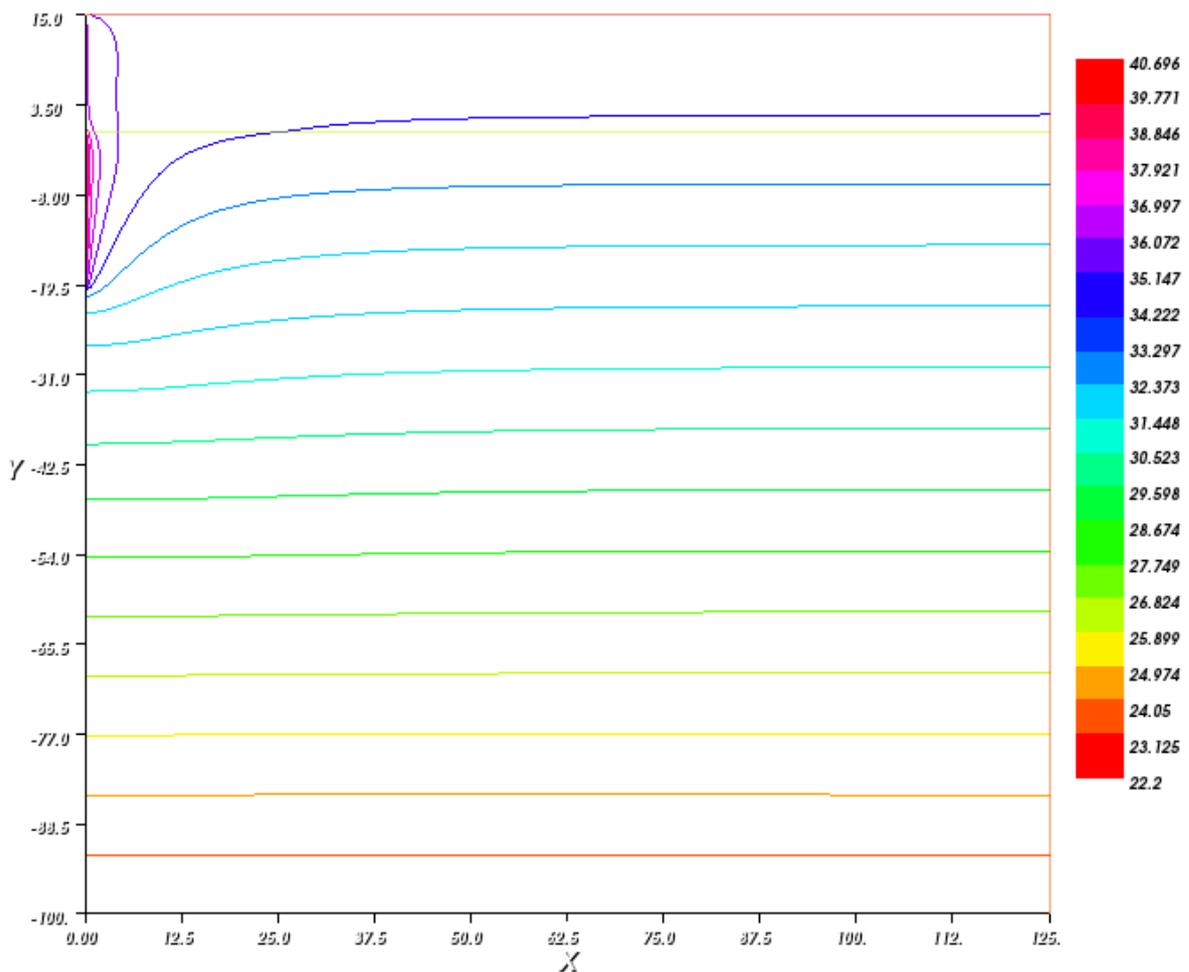


Ilustración 50. Distribución de temperatura en el terreno

Por lo que se opta a cambiar los parámetros a los siguientes:

PARAMETRIZACIÓN	VALORES
Profundidad del material 2	5m
Profundidad del material 1	100m
Longitud del micropilote	30m
Diámetro del micropilote	0,2m

Tabla 9. Modificaciones en la parametrización

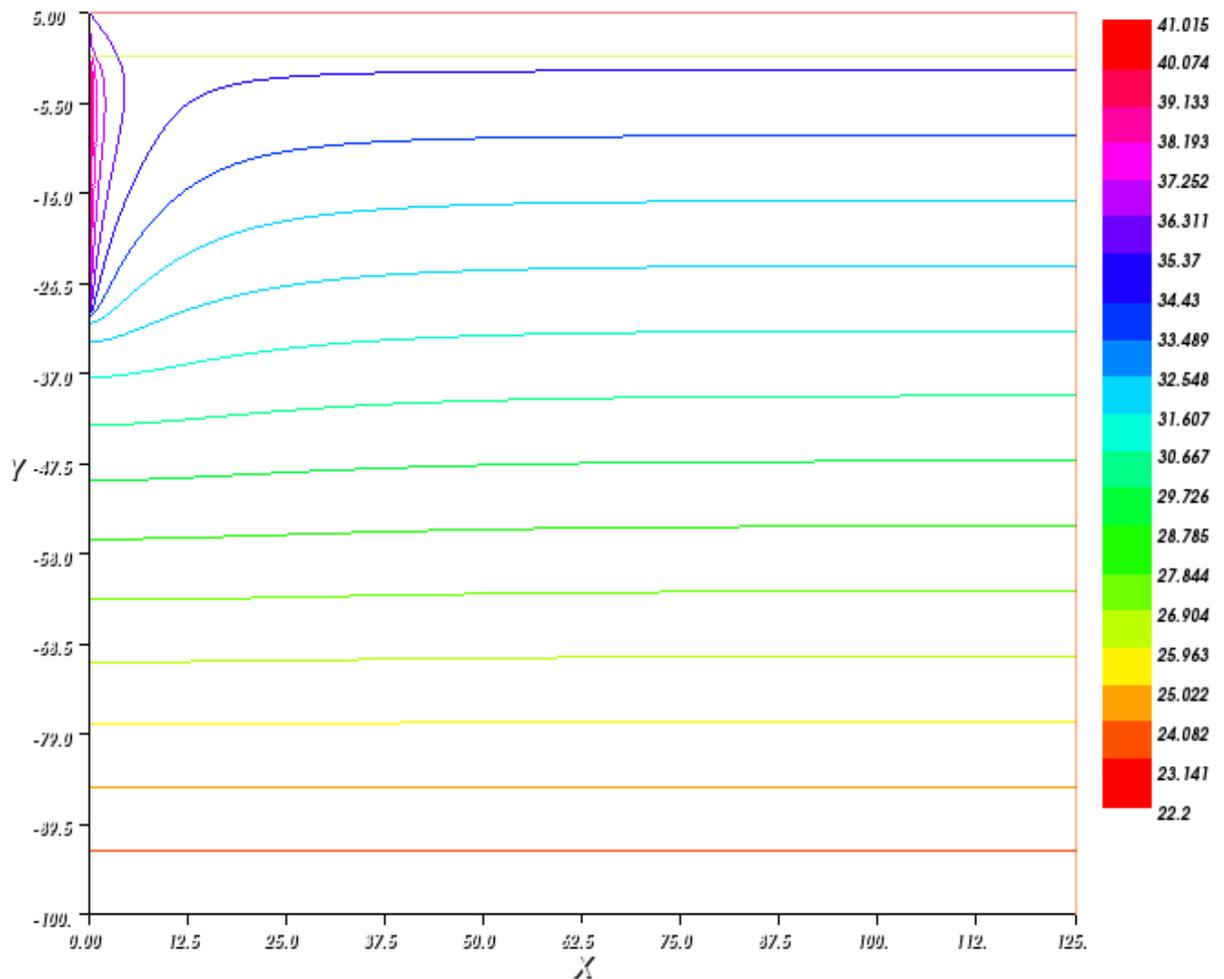


Ilustración 51. Distribución de T^a modificando la parametrización

El sistema se ve mucho menos afectado por la conductividad del material superior, que en este caso tiene una conductividad menor.

Además, se quiso ver cómo afectaría cambiando el grosor del micropilote. Si se implementa un micropilote de 0,5m de diámetro tenemos:

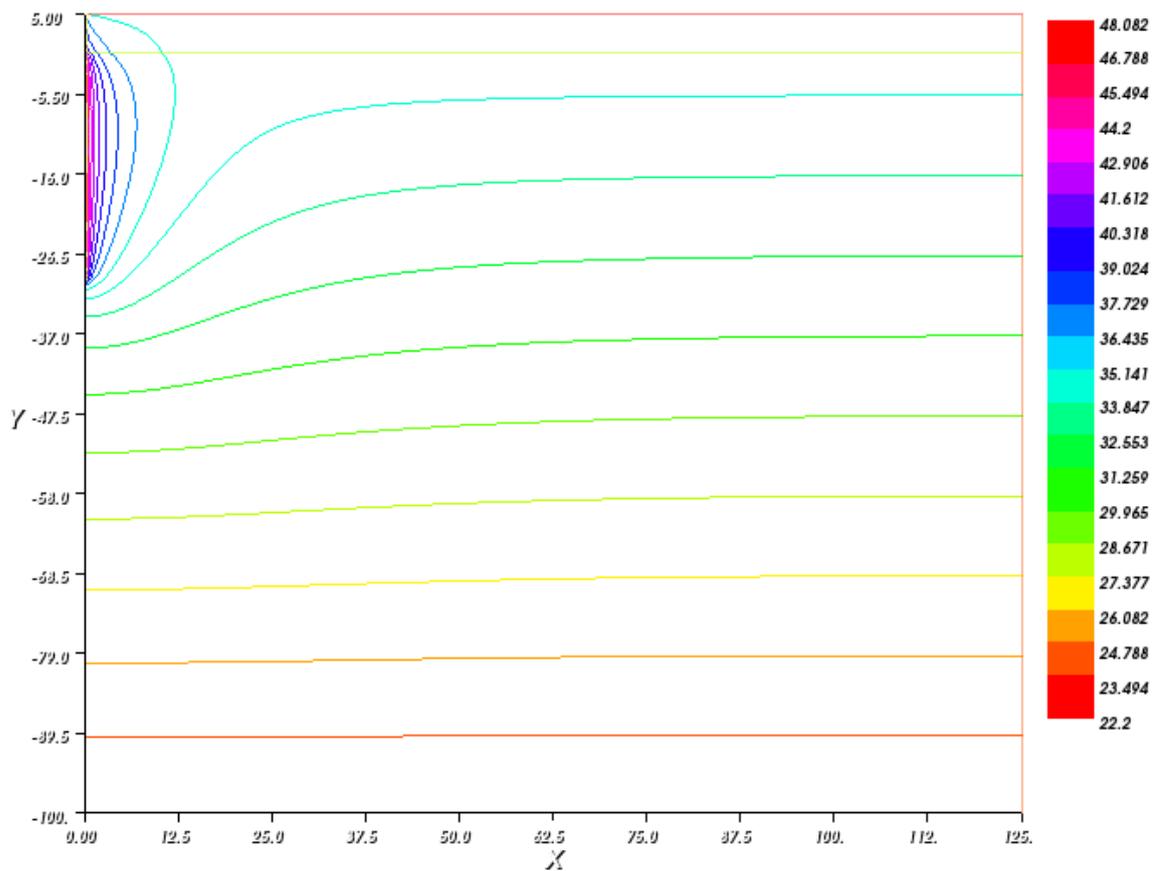


Ilustración 52. Distribución de Tª modificando el diámetro del micropilote

De esta forma se puede comprobar que empleando micropilotes de 0,2m de diámetro a partir se debe dejar mínimo una separación de 37,5m entre dos micropilotes para que no exista influencia térmica de uno sobre el otro, mientras que variando 30cm el ancho del micropilote, es decir, instalando una sonda de 0,5m debe respetarse una separación de 50m mínimo entre dos micropilote.

Si se modifican los parámetros de manera que la capa del material 2 sea mucho mayor y se aumenta además el diámetro del micropilote con los siguientes valores:

PARAMETRIZACIÓN	VALORES
Profundidad del material 2	20m
Profundidad del material 1	40m
Longitud del micropilote	30m
Diámetro del micropilote	0,75m

Tabla 10. Variaciones de parametrización

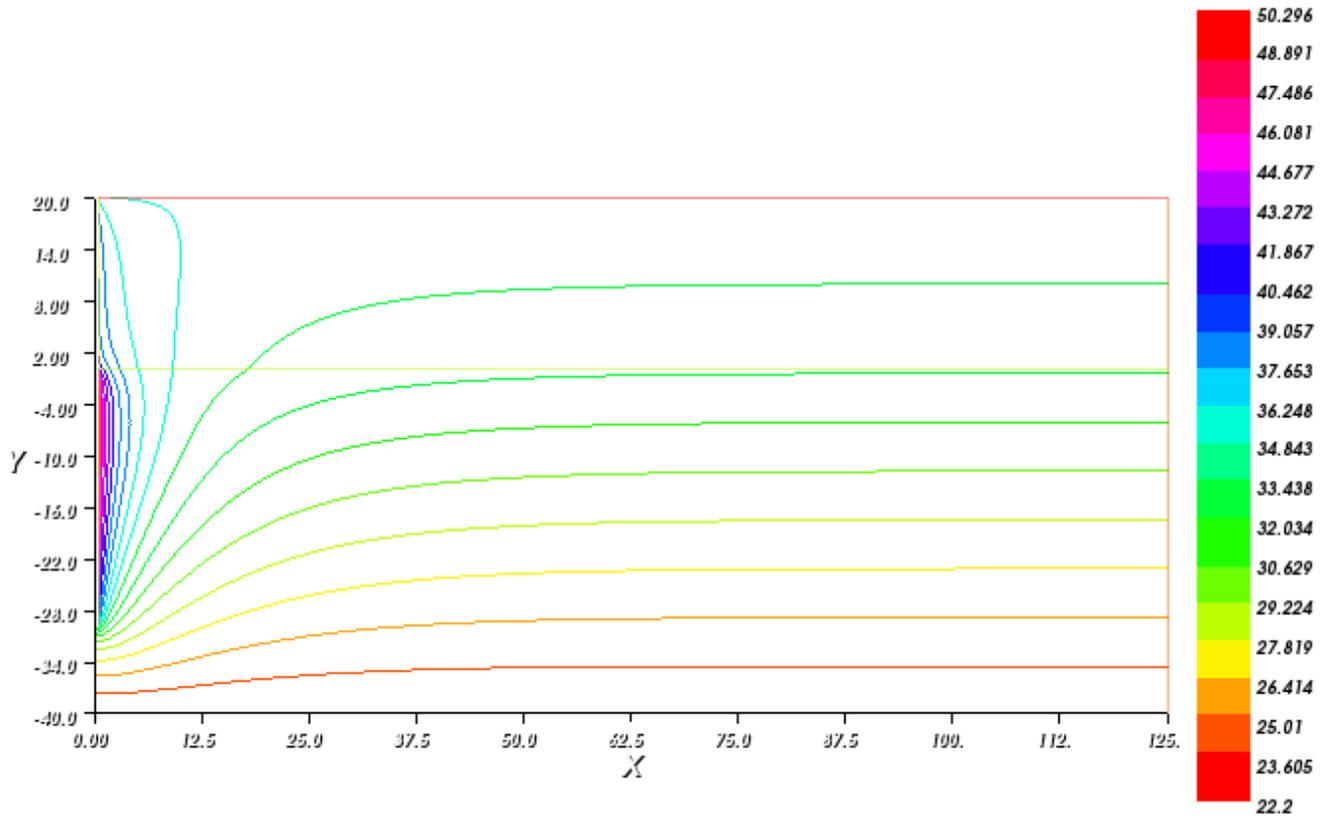


Ilustración 53. Distribución de T^a con variaciones de parametrización

Pero si además suponemos la capa de material superficial de grava seca, que como se observa en la tabla 1 tiene una conductividad de 0,4 w/mk y una absortividad de 0,29, en vez de arena como se ha empleado en las simulaciones anteriores el sistema se vería afectado de la siguiente forma:

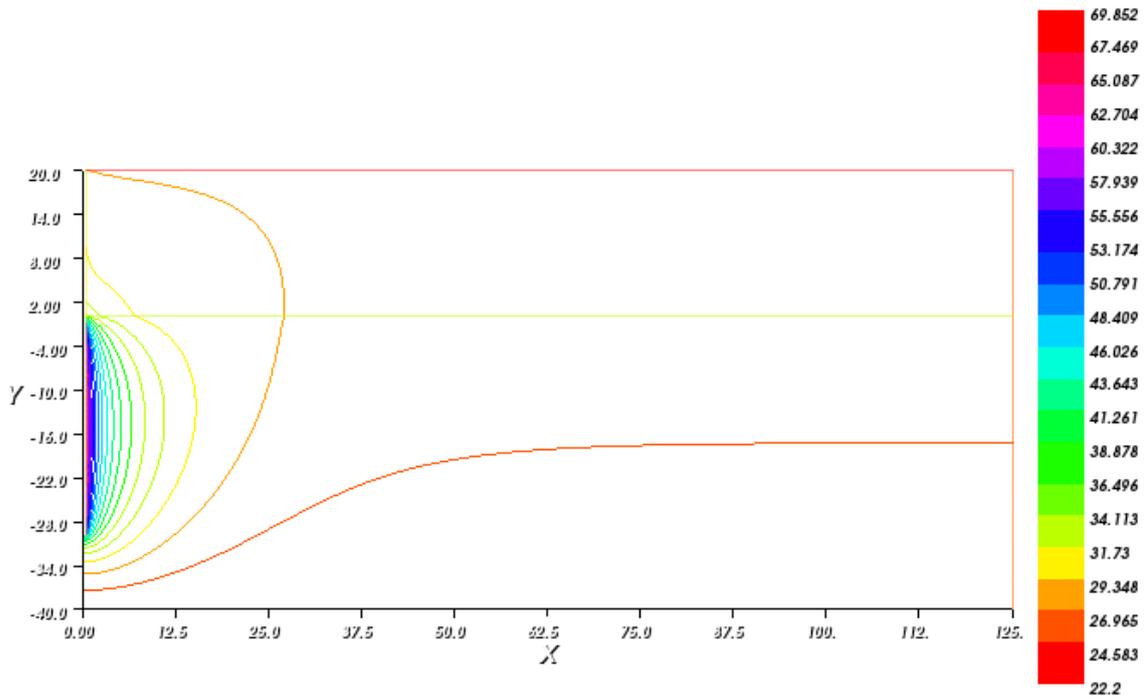


Ilustración 54. Distribución de T^a variación de terrenos

Si se prueba con esta parametrización en otra zona como Fargas, el sistema reacciona de la siguiente manera:

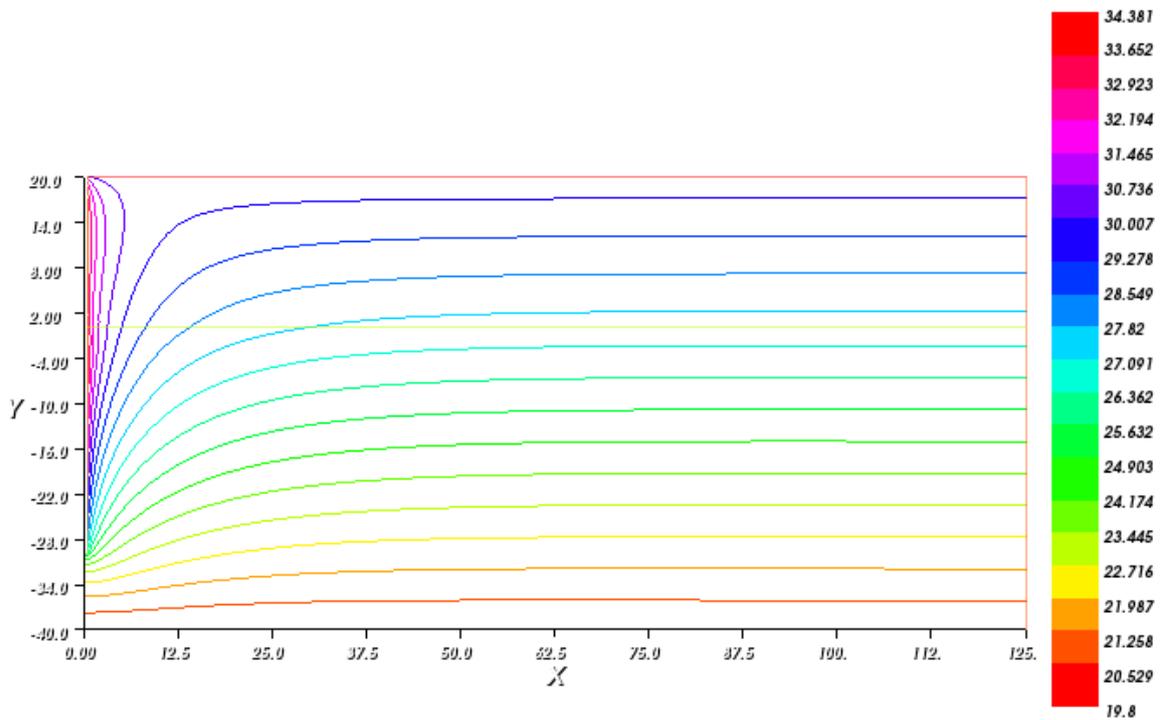


Ilustración 55. Distribución de T^a en Fargas con parametrización modificada

La distribución de la temperatura es similar en ambos materiales ya que ambos tienen conductividades bastante similares, aunque se produce un cambio de temperatura bastante considerable entre las capas más superficiales y las más profundas.

Pero también se opta por probar la grava como material secundario en la superficie, obteniéndose los siguientes resultados:

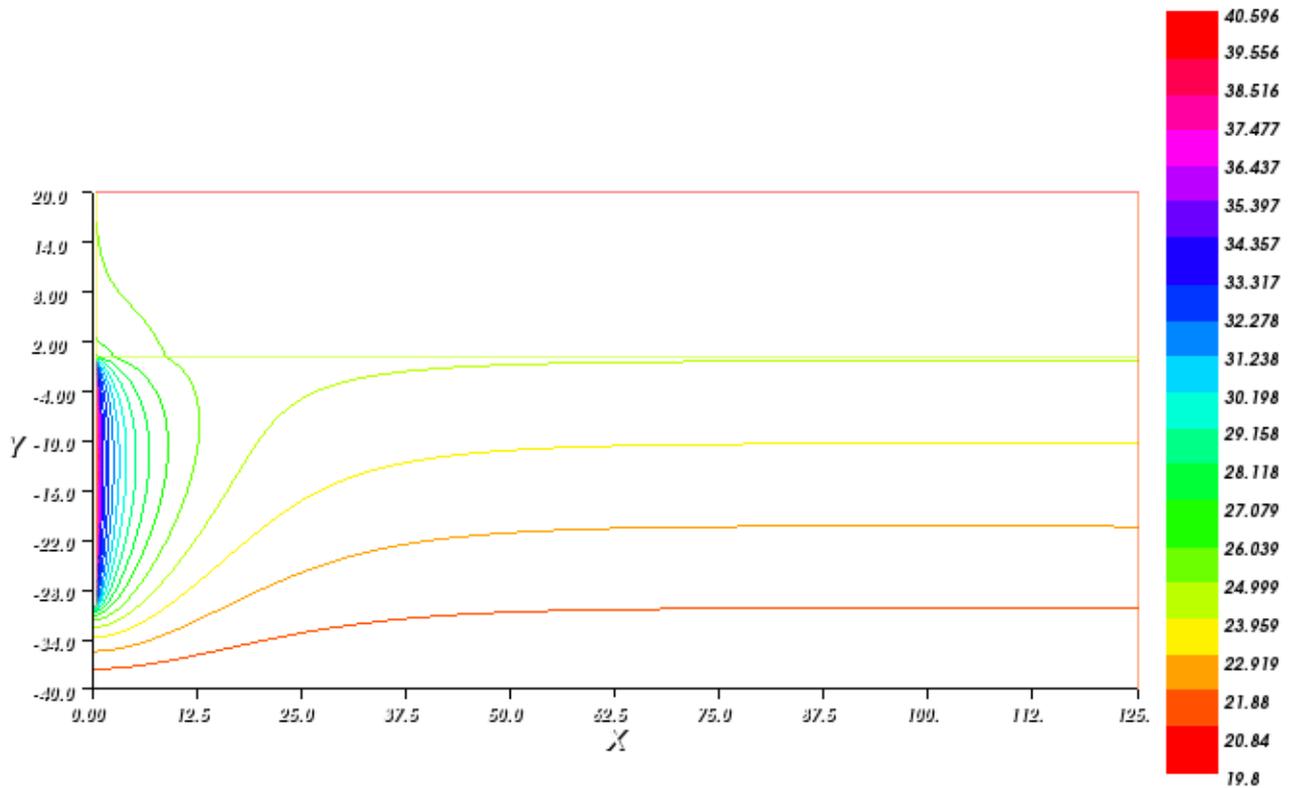


Ilustración 56. Distribución de Tª en Firgas con modificación de material

Como se puede observar influye bastante el tipo de material que compone el sistema a la hora de realizar la transferencia de calor.

12.5 RESULTADO Y CONCLUSIONES.

Como se muestra a lo largo del estudio, el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía en la isla puede suponer un gran ahorro energético en el ámbito de la climatización, haciendo las instalaciones más eficientes energéticamente y reduciendo considerablemente las emisiones de CO₂.

Este estudio puede llegar a ser una herramienta muy útil para el análisis del comportamiento de una instalación geotérmica en una zona determinada de la isla. Además, permite ver las variaciones de temperatura que pueden darse en el terreno o en el sistema según las características a estudiar.

Mediante la simulación se ha visto como se transfiere el calor desde las zonas de mayor temperatura a las de menor temperatura. Viéndose como actúa el sistema según la estación del año. En los meses calurosos de verano el sistema inyecta calor al terreno mediante el micropilote, mientras que en los meses de invierno la sonda geotérmica se encarga de absorber el calor del terreno.

A través de la herramienta matemática se observa como las condiciones climatológicas pueden llegar afectar al sistema, viéndose como en verano debido a la radiación que afecta a la zona y a la temperatura ambiente los valores más altos de temperatura se registran en las capas más superficiales del terreno.

Sin embargo, en invierno pasa todo lo contrario, ya que el terreno se ve afectado con los valores más bajos de temperatura y la humedad relativa, haciendo que las capas superiores del terreno estén a menores temperaturas a que las capas más internas.

Otra conclusión a la que se ha podido llegar a través de este estudio, es que la composición del terreno es primordial para el proceso. Se ve como los valores de conductividad de los materiales afectan directamente a la distribución de temperatura y a la transferencia de calor directa por convección del micropilote con el terreno. Además de la conductividad también el sistema se va a ver afectado por la absorción del material.

Una de las ventajas que se ha visto realizando este trabajo es que, debido al carácter volcánico de la isla, la mayor parte del terreno está compuesto por lava basáltica. El basalto es un mineral con un valor bueno de conductividad y buena absorción. Además, para mejorar la conductividad se estudió cubrir la zona con arena, ya que la arena es un material con buena conductividad y que absorbe mucho más el agua y la humedad, mejorando aún más la transferencia de calor. Este es un punto a tener en cuenta dado que en las islas existe una gran problemática con respecto a las precipitaciones.

Por otra parte, a través de la herramienta matemática es posible cambiar la parametrización del sistema, permitiendo así optimizar la instalación y permitiendo visualizar si el dimensionamiento calculado de un sistema geotérmico es correcto. Con la simulación ha sido posible variar las profundidades de los distintos materiales y del micropilote, para así visualizar la distribución de temperatura en el terreno. Incluyendo, la posibilidad de estudiar las distancias adecuadas a las que se deben colocar varios micropilotes para que no se vean afectados térmicamente entre ellos.

13 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Cómo líneas futuras de investigación a raíz del desarrollo de este trabajo se sugieren:

- ❖ Estudio del sistema teniendo en cuenta la fractura del terreno. Es decir, realizar la simulación teniendo en cuenta la variedad de materiales que pueden darse en las distintas zonas de la isla y estudiando el terreno mediante fracturas.

- ❖ Realizar un estudio más exhaustivo del sistema empleando varios micropilotes y estudiando cómo pueden verse afectados sobre el terreno la presencia de éstos.
- ❖ Realizar un estudio modificando la tecnología empleada, para así comparar otro tipo de tecnologías empleadas en la geotermia de baja entalpía con la utilizada en el trabajo actual. Estudiar las variaciones de temperatura que afectan al terreno con una disposición vertical u horizontal.
- ❖ Trasladar el estudio a las demás islas del archipiélago, teniendo en cuenta las características climatológicas y las características del terreno de cada una de ellas.
- ❖ Realizar el estudio teniendo en cuenta los fluidos que trabajan dentro del micropilote.
- ❖ Realizar pruebas de campo y tratar de comparar los valores de temperatura obtenidos en el estudio con valores de temperatura reales medidos directamente en la zona de estudio.

14 CÓDIGO FREEFEM++

El algoritmo que se ha empleado para llevar a cabo la simulación ha sido el siguiente:

```
//ESTUDIO DEL RECURSO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA EN LA ISLA DE GRA CANARIA
//MÁSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA
//TRABAJO FIN DE MASTER
//OMAYRA DEL PINO DÍAZ MOLINA

//Parametrización//
//Distancia desde el eje de simetría del pilote
real x2=125;
//Profundidad del material 1
real y3=20;
//Profundidad del material 2
real y2=40;
//Longitud enterrada de los micropilotes
real y1=30;
//Diámetro de las tuberías de los micropilotes
real d=.75;
```

```

//Cálculo de Variables//
real x1;
x1=d/2;

//Condiciones de contorno//

border t1 (t=-y2,0){x=x2;y=t; label=2;}
border t2 (t=x2,x1){x=t;y=0; label=5;}
border t3 (t=0,-y1){x=x1;y=t; label=4;}
border t4 (t=x1,0){x=t;y=-y1; label=4;}
border t5 (t=-y1,-y2){x=0;y=t; label=2;}
//border t6 (t=-x1,-x2){x=t;y=0; label=5;}
//border t7 (t=0,-y2){x=-x2;y=t; label=2;}
border t8 (t=0,x2){x=t;y=-y2; label=3;}
border t9 (t=0, y3){x=x2;y=t; label=2;}
border t10(t=x2,x1){x=t;y=y3; label=1;}
border t11 (t=y3,0){x=x1;y=t; label=4;}
//border t12 (t=0, y3){x=-x1;y=t; label=4;}
//border t13 (t=-x1,-x2){x=t;y=y3; label=1;}
//border t14 (t=y3,0){x=-x2;y=t; label=2;}

int n=100;
plot(t1(n)+t2(n)+t3(n)+t4(n)+t5(n)+t8(n)+t9(n)+t10(n)+t11(n));

mesh Th;
fespace Ph (Th,P0);
fespace Vh(Th,P1); // P1 FE space
Vh uh,vh; // unkown and test function.
real qBC=2; //flujo de calor de la Bomba de Calor..Negativo -> Absorbiendo calor

//Positivo -> Cediendo calor

```

```

real alfa=.29,G=513.78; // Radiacion incidente
real hrad=10,epsilon=1,sigma=5.67e-8;
real vviento=6.6;
real h=5.7+3.8*vviento; // Convección
real uinf=23.5; //
real umed= 19.8; //Temperatura media del ambiente = Temperatura del terreno
real ucielo=14.92; //Temperatura de cielo
real k1=0.4; //Conductividad del material 1 del terreno
real k2=2; //Conductividad del material 2 del terreno

Th=buildmesh(t1(n)+t2(n)+t3(n)+t4(n)+t5(n)+t8(n)+t9(n)+t10(n)+t11(n));
plot(Th, LabelColors=1, wait=1);

Ph reg = region;
plot(reg,fill=1,wait=1,value=1);

//Definición de las regiones

real material1=(-y2+0.01);
real material2derX=(x1+0.01);
real material2derY=(y3-0.01);

int terreno1=Th(0, material1).region;
int terreno3=Th(material2derX,material2derY).region;
Ph k=k1*(region==terreno1)+k2*(region==terreno3);
plot(k, wait=1, fill=1, value=1);

//regiónterreno1

problem laplace(uh,vh,solver=GMRES,tgv=1e5) = // problem definition
  int2d(Th)( x*k*dx(uh)*dx(vh) + x*k*dy(uh)*dy(vh) ) // bilinear form
  - int1d(Th,4)((x*qBC*vh)/k) //Condicion de contorno tipo Neumann;

```

```

- int1d(Th,1)((x*alfa*G*vh)/k) //Condicion de contorno tipo Neumann ; Radiación absorbida
por el terreno

+ int1d(Th,1)(x*hrad*uh*vh) //condicion de contorno tipo Radiativa

- int1d(Th,1)(x*hrad*ucielo*vh) //condicion de contorno tipo Radiativa

+ int1d(Th,1)((x*h*uh*vh)/k) //Condicion de contorno tipo Convectiva

- int1d(Th,1)((x*h*uinfr*vh)/k) //Condicion de contorno tipo Convectiva

+ int1d(Th,2)(o*x*vh) //Condicion de contorno tipo Neumann ; Convección a los
lados del terreno que se considera o

+ on(3,uh=umed) ; // boundary condition form ; Temperatura del terreno = Temperatura
ambiente

for(int m=0;m<15;m++){
hrad=sigma*epsilon*(uh+273+ucielo+273)*((uh+273)^2+(ucielo+273)^2);
cout << " hrad = " << hrad <<endl;
laplace; // Resuelve el problema
}

real x01=0,y01=-(y2),ancho1=x2,alto1=(y2-y1);
real x02=x1,y02=-(y1),ancho2=x2-x1,alto2=(y3+y1);

ofstream fg("temperaturas.txt");
int nm=10;
for (int qq=0;qq<=nm;qq++){
for (int ii=0;ii<=nm;ii++){
fg <<(x01+ancho1*qq/nm)<<" " <<(y01+alto1*ii/nm)<<"
"<<uh(x01+ancho1*qq/nm,y01+alto1*ii/nm)<< endl;
}
}
nm=10;
for (int qq=0;qq<=nm;qq++){
for (int ii=0;ii<=nm;ii++){
fg <<(x02+ancho2*qq/nm)<<" " <<(y02+alto2*ii/nm)<<"
"<<uh(x02+ancho2*qq/nm,y02+alto2*ii/nm)<< endl;
}
}

```

}

```
laplace; // solve the problem plot(uh); // to see the result
```

```
plot(uh,ps="LaplaceP1.eps",value=true);
```

15 BIBLIOGRAFÍA

[1] Alberto Carotenuto, Michela Ciccolella, Nicola Massarotti , Alessandro Mauro. Models for thermo-fluid dynamic phenomena in low enthalpy geothermal energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (2016)

[2] Qiang Liu, Linlin Shang, Yuanyuan Duan. Performance analyses of a hybrid geothermal–fossil power generation system using low-enthalpy geothermal resources. *Applied Energy*. (2015).

[3] V. Ciriello, M. Bottarelli, V. Di Federico, D.M. Tartakovsky. Temperature fields induced by geothermal devices. *Energy*. (2015)

[4] Iosifina Iosif Stylianou, Savvas Tassou, Paul Christodoulides, Ioannis Panayides, Georgios Flodes. *Renewable Energy*. (2015)

[5] Janvier Domra Kana, Noël Djongyang, Danwe Raïdandi, Philippe Njandjock Nouck , Abdoumani Dadjé. A review of geophysical methods for geothermal exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (2015)

[6] Antonio Colmenar-Santos n, Martín Folch-Calvo, Enrique Rosales-Asensio, David Borge-Diez. The geothermal potential in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (2015)

[7] Memoria justificativa CTE-DR-008-2011. Caracterización climática de las islas Canarias para la aplicación del código técnico de la edificación.

[8] P. Pin˜a-Varas, J. Ledo, P. Queralt, A. Marcuello, F. Bellmunt, R. Hidalgo, M. Messeiller. 3-D Magnetotelluric Exploration of Tenerife Geothermal System (Canary Islands, Spain). (2014).

[9] ATLAS CLIMÁTICO DE LOS ARCHIPIÉLAGOS DE CANARIAS, MADEIRA Y AZORES

[10] Celestino García de la Noceda Márquez. Geotermia en Canarias: la energía desconocida. Investigación del potencial geotérmico en Canarias realizado por el IGME. (2015).

[11] Gioietta Kuo. *Geothermal Energy*. (2012).

[12] CLIMCAN-010. Caraterización Climáticas de las islas Canarias para la aplicación del código técnico de la edificación.

[13] Manual Freefem++. Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Pierre et Marie Curie, Paris

[14] DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS de GRAN CANARIA. GRAFCAN.

[15] Guía Técnica IDAE. Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020.

[16] GETCAN-011. Guía para la planificación y realización de estudios geotécnicos para la edificación en la comunidad autónoma de canarias.

[17] Guía técnica IDAE. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica.