



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE INVERNADEROS
CALEFACCIONADOS CON GEOTERMIA EN CHILE Y SU COMPARACIÓN
CON PAÍSES BAJOS**

FLAVIO ALONSO SALAZAR BETANCUR

Santiago, Chile
2022



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**ANÁLISIS LA IMPLEMENTACIÓN DE INVERNADEROS
CALEFACCIONADOS CON GEOTERMIA EN CHILE Y SU COMPARACIÓN
CON PAÍSES BAJOS**

**ANALYSIS FOR THE IMPLEMENTATION OF GEOTHERMAL HEATED
GREENHOUSES IN CHILE AND ITS COMPARISON WITH THE
NETHERLANDS**

FLAVIO ALONSO SALAZAR BETANCUR

Santiago, Chile
2022



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE INVERNADEROS
CALEFACCIONADOS CON GEOTERMIA EN CHILE Y SU COMPARACIÓN
CON PAÍSES BAJOS**

Memoria para optar al título Profesional de Ingeniero Agrónomo

FLAVIO ALONSO SALAZAR BETANCUR

PROFESORES GUÍAS

Ricardo Pertuzé Concha
Ing. Agr. Ph.D.

Danilo Aros Orellana
Ing. Agr. Ph.D.

PROFESORES EVALUADORES

Victor Escalona
Ing. Agr. Ph.D.

Ian Homer B.
Ing. Agr. Dr.

6,7

6,8

6,0

6,5

Calificaciones

ÍNDICE

	página
RESUMEN	1
SUMMARY	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
METODOLOGÍA	6
ENERGÍA GEOTÉRMICA	8
Uso directo de geotermia	8
Bombas de calor geotérmicas (BCG)	10
Geotermia de alta y baja entalpía	11
La geotermia como alternativa en la generación eléctrica para la matriz energética chilena al año 2050	11
Calefacción de invernaderos	12
USO DE TECNOLOGÍA DE CALEFACCIÓN GEOTERMAL EN LA INFRAESTRUCTURA PRODUCTIVA DE PAÍSES BAJOS	14
Capacidad y potencial geotérmico en Países Bajos	14
Invernaderos geotérmicos: Experiencias de implementación en Países Bajos	17
Hoogweg Paprikakwekerijen	17
Red Harvest	19
Floricultura B.V.	20
Ammerlaan	21
USO DE TECNOLOGÍA DE CALEFACCIÓN GEOTERMAL EN LA INFRAESTRUCTURA PRODUCTIVA DE CHILE	23
Capacidad y potencial geotérmico en Chile	23
Invernaderos geotérmicos: Experiencias de implementación en Chile	27
Vivero Forestal Horcones (Arauco)	27
Viveros Sunnyridge	29
Invernadero Geotérmico en Panguipulli	31
Invernadero Geotermal en Liquiñe	34
Liquen Austral	36
COMPARACIÓN Y PROYECCIÓN DE LA CAPACIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN GEOTERMAL PARA INVERNADEROS EN CHILE Y PAÍSES BAJOS	38
Análisis de brechas	38
Escenario nacional actual	38

Objetivos a futuro	39
Identificación de brechas	39
Análisis FODA	41
CONCLUSIONES	44
BIBLIOGRAFÍA	46
APÉNDICE 1	51

RESUMEN

El presente estudio de caso corresponde a una recopilación y análisis de información actual pertinente en materia de uso de energía geotermal para la producción en invernaderos en Chile. A raíz de las nuevas dinámicas territoriales que se han ido configurando con el crecimiento, tanto económico como poblacional, han surgido nuevas necesidades alimentarias a lo largo del país. El aprovechamiento de calor de diversas fuentes geotérmicas, resulta indispensable para el desarrollo económico de los territorios en el sur del país y la oportunidad de explotación crece en función de las ventajas comparativas respecto de los recursos naturales existentes. Sin embargo, la principal desventaja tiene que ver con el escaso desarrollo tecnológico para la explotación de dichos recursos. Entre Chile y Países Bajos, existe una brecha importante tanto pública y privada, en el desarrollo de la geotermia con fines agrícolas. Se abordaron las principales definiciones de la geotermia y su alcance en cuanto a los principales sistemas de calefacción para invernaderos tanto en Países Bajos así como en Chile. La metodología utilizada buscó levantar un diagnóstico y evaluar la posibilidad de implementación de proyectos agrícolas en la zona de estudio a través de la recopilación bibliográfica y la visita en terreno para entrevistar a los principales actores y protagonistas que hoy experimentan con dicha tecnología en casos de éxito. El análisis de la información permitió establecer un panorama para la toma de decisiones, tanto de privados como de entes gubernamentales para la promoción de iniciativas en esta materia. Durante la discusión se han confrontado ambas experiencias, tanto en Chile como en Países Bajos para dilucidar la brecha existente y las estrategias que Chile podría abordar. Finalmente se realizó un análisis para concluir las ventajas comparativas, fortalezas y oportunidades que posee Chile con objeto de fijar una hoja de ruta hacia la implementación real de dichas políticas como tendencia hacia una nueva forma de producir.

Palabras clave: Energía, Producción hortícola, Seguridad alimentaria.

SUMMARY

This case study corresponds to a compilation and analysis of relevant current information on the use of geothermal energy for production in greenhouses in Chile. As a result of the new territorial dynamics that have been configured with both economic and population growth, new food needs have arisen throughout the country. The use of heat from various geothermal sources is essential for the economic development of the territories in the south of the country and the opportunity for exploitation grows based on the comparative advantages with respect to the existing natural resources. However, the main disadvantage has to do with the limited technological development for the exploitation of these resources. Between Chile and the Netherlands, there is an important gap both public and private, in the development of geothermal energy for agricultural purposes. The main definitions of geothermal energy and its scope in terms of the main heating systems for greenhouses both in the Netherlands and in Chile were addressed. The methodology used sought to make a diagnosis and evaluate the possibility of implementing agricultural projects in the study area through the bibliographic compilation and the field visit to interview the main actors and protagonists who today experiment with said technology in success cases. The analysis of the information allowed establishing a panorama for decision-making, both private and government entities for the promotion of initiatives in this area. During the discussion, both experiences were compared, both in Chile and in the Netherlands, to elucidate the existing gap and the strategies that Chile could address. Finally, an analysis was carried out to conclude the comparative advantages, strengths and opportunities that Chile has in order to set a roadmap towards the real implementation of said policies as a trend towards a new way of producing.

Keywords: Energy, Vegetable production, Food security.

INTRODUCCIÓN

La geotermia es una fuente de energía limpia, renovable y altamente disponible en Chile que se halla almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra, la cual engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera sea su temperatura, profundidad y procedencia (Hurtado, 2017). Un sistema de uso directo de calefacción geotermal se basa en agua caliente extraída desde una fuente geotermal, utilizando una bomba hidráulica, y conducida a través de una tubería, de forma que, a lo largo de su recorrido, caliente el recinto por radiación, regresando a su lugar de origen, es decir, al generador, a una temperatura inferior a la que salió (FIA, 2017). En Chile, es una tecnología incipiente y de gran potencial que permite el desarrollo de actividades de diversa índole, en este caso de uso agrícola (Sánchez-Alfaro *et al.*, 2015). En este sentido, el aporte que realiza el Centro de Excelencia en Geotermia Los Andes (CEGA) al proporcionar los estudios y mapeos del potencial geotérmico en el país, es sumamente considerable para el desarrollo de cualquier proyecto de esta índole. Dentro de la generación eléctrica a partir de fuentes geotérmicas se puede diferenciar el “uso directo” de una fuente geotermal para calefaccionar un determinado espacio (Saldivia, 2018).

La agricultura actual busca soluciones tecnológicamente innovadoras, sustentables con el medio ambiente y sostenibles en el tiempo, para la producción de alimentos inocuos, nutritivos, atractivos y de calidad, de manera que se logre garantizar la seguridad alimentaria de la población en el mundo (FAO *et al.*, 2021). En este sentido, los Países Bajos se constituye como un modelo líder en la producción de alimentos (Navarro, 2017), utilizando invernaderos calefaccionados y altamente tecnologizados con fuentes de energía sustentables. Esto permite dar soluciones en materia de seguridad alimentaria a la demanda de alimentos en zonas donde las condiciones ambientales y climáticas no lo permiten de manera óptima (Lund, 2010). Por este motivo, desde Países Bajos se pueden importar nuevas técnicas de trabajo agrícola hacia países en vías de desarrollo como Chile.

Chile posee un interesante potencial de explotación geotérmico como fuente energética para la calefacción de invernaderos, en especial en algunas zonas del sur de Chile, donde es posible utilizarla para la prolongación de la temporada productiva, ya que es imprescindible el uso de invernaderos en épocas más frías (riesgo de heladas) que permitan dar continuidad y sostenibilidad a la producción (Acuña, 2017). En este sentido, los Países Bajos ha contribuido en el desarrollo de infraestructura y tecnología esencial para invernaderos calefaccionados con geotermia (Greenport NHN, 2018).

El sur de Chile se caracteriza por registrar precipitaciones entre los 1.200 y 3.000 mm anuales durante el período 1980-2015 (Agrimed, 2017), y temperaturas templadas frías, similares a las condiciones climáticas en Países Bajos. Estas temperaturas pueden variar en diferentes locaciones del sur de Chile entre los 3° y los 25°C aproximadamente (Agrimed, 2017), lo que crea condiciones favorables para la horticultura de hoja, raíces, bulbos y flores.

Sin embargo, la alta estacionalidad de la producción en periodo estival para la producción hortícola implica una concentración en el periodo de mayor oferta (primavera-verano). Por esta razón, este mercado accede a precios más deprimidos y compete en clara desventaja con los altos volúmenes que provienen desde la zona central. Producir en periodos de menor oferta, requiere de inversiones significativas e incorporación de tecnologías (FIA, 2016). Aquí es donde juega un papel importante el uso de fuentes de calor obtenidas a través de la geotermia en su uso directo.

Por ejemplo, en algunas zonas de la pre cordillera de la Región de Los Ríos, las temperaturas mínimas invernales pueden alcanzar los -3°C produciendo heladas, y la temperatura media entre los meses de junio y septiembre es de 9°C (Agromet, 2019). Para el cultivo de hortalizas de hoja, la temperatura óptima de crecimiento está entre 15 y 18°C , prefiriendo temperaturas frescas; la mínima tolerancia es de 12°C , bajo esta temperatura la planta no crece; y la máxima está entre los 18 y 24°C , temperaturas superiores producen deterioro de las plantas (Saavedra, 2017).

La utilización de técnicas y manejos de ambiente controlado para la horticultura y la floricultura son estrategias pertinentes frente a los desafíos que presentan las condiciones antes descritas y que pueden hallar respuesta en la cooperación entre centros de desarrollo internacionales (Países Bajos) para el perfeccionamiento de las prácticas agrícolas en Chile. En consecuencia, Chile tiene una importante ventaja comparativa en cuanto a su potencial edafo-climático, así como de su recurso geotermal, pero a su vez una desventaja técnica que retrasa una adecuada optimización en el aprovechamiento de los recursos naturales para estos sistemas productivos. Ante un escenario inminente de cambio climático y de calentamiento global, y dentro del marco de un plan de acción al cambio climático se hace indispensable la promoción y el fomento de estas tecnologías para hacer frente a las graves consecuencias de las que la ciencia ha advertido (MMA, 2017).

La empresa neerlandesa Verkade Klimaat ha desarrollado soluciones en esta línea y dispone de un programa de cooperación con la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, donde estudiantes de pre y post grado, en conjunto con la empresa, puedan generar un intercambio de conocimiento para el desarrollo de tecnologías, así como de mercados de producción de flores y hortalizas. En este contexto se han planteado objetivos relacionados con los intereses de este programa de cooperación.

Objetivo general

Realizar un análisis comparativo entre el uso de calefacción geotérmica en invernaderos utilizados en Países Bajos y Chile para la producción de hortalizas.

Objetivos específicos

Analizar los sistemas de calefacción geotérmica para invernaderos en Países Bajos.

Analizar los sistemas de calefacción geotérmica para invernaderos en Chile.

Comparar y proyectar la capacidad de implementación de sistemas de calefacción geotérmica para invernaderos en Chile y Países Bajos, a través de un análisis de brechas y FODA.

METODOLOGÍA

Etapa 1: Revisión bibliográfica acerca de geotermia en Chile y el mundo

A partir de la información disponible en Repositorio académico de la Universidad de Chile y otros sitios de interés como Google académico o Research Gate, se hizo una revisión general de la geotermia: definiciones, sistemas de implementación, rendimientos energéticos, capacidad y potencial instalado en diferentes áreas de interés, equipamiento e infraestructura crítica para el funcionamiento entre otros. Para lo anterior se tomó como principal referencia la información proporcionada por el “*World Geothermal Congress*” en su publicación periódica “*Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review*” desarrollada por la Asociación Internacional de Geotermia (IGA, 2020). Por otro lado, se recopiló información relevante desde el Centro de Excelencia en Geotermia Los Andes (CEGA, 2021) y del Consejo Geotérmico (compuesto por la entidad público privada denominada Mesa Geotérmica, del Ministerio de Energía chileno) acerca de la actualidad en materia de avances geotérmicos en Chile.

Etapa 2: Revisión de proyectos de invernaderos geotérmicos en Países Bajos

La metodología de investigación para la recopilación y selección de proyectos relevantes para el presente estudio se realizó a partir del sitio web “*Geothermal Netherlands*” el cual agrupa a todos los productores de energía geotérmica para cualquier tipo de aplicación de esta, sin embargo, tiene especial relevancia los miembros de esta asociación gubernamental que recoge la experiencia de empresas agrícolas del rubro hortícola y de floricultura. Posteriormente a la revisión de su información y datos en línea, se procedió a contactarles vía correo electrónico para presentarles el estudio de manera que accedieran a contestar la encuesta/entrevista semi estructurada con datos de mayor relevancia y exactitud, con el objetivo de realizar una correcta comparativa entre la realidad neerlandesa y la chilena. Dicha encuesta/entrevista tuvo como objetivo conocer en particular el tipo de geotermia utilizada en su producción, una descripción del sistema, características del invernadero, rendimientos, consideraciones tales como ahorro energético y asociaciones en cooperativas o apoyo del gobierno en subsidios de implementación, entre otros. El diseño de la encuesta se describe en el Apéndice I al final del estudio.

Etapa 3: Revisión de proyectos de invernaderos geotérmicos en Chile

Esta parte del estudio se realizó a través de una revisión bibliográfica en las bases de datos sectoriales más utilizadas tales como Repositorio Académico de la Universidad de Chile, sitios de interés de empresas del rubro en Chile, publicaciones del Centro de Excelencia en Geotermia Los Andes (CEGA), Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), Comisión Nacional de Energía (CNE), Generadoras Chile, International Renewable Energy Agency (IRENA), entre otros. Posteriormente, se presentaron casos de estudio que hoy funcionan gracias a la energía geotérmica. Toda esta información es reciente (últimos 10 años) y entrega un panorama acotado al estado de desarrollo de la geotermia con relación a aplicaciones tanto agrícolas como de la industria en general. Luego de recopilar los datos preliminares y establecer un diagnóstico se procedió a ordenarlos en una estructura categorizada para su publicación. Se presentan casos de éxitos y aplicaciones actuales en el rubro hortícola, biofertilizantes y forestal.

Por otro lado, se realizó una encuesta/entrevista semi estructurada para aplicar a productores que utilizan geotermia en Chile. La aplicación de la encuesta/entrevista se realizó por correo electrónico y eventualmente en visitas a terreno a los productores nacionales, en acompañamiento a los proyectos desarrollados por el CEGA. Dado que las condiciones sanitarias no permitían visitar a los productores durante el año 2021, se optó por contactarlos por teléfono. Los resultados de la encuesta/entrevista se presentan al final del estudio en el Apéndice I.

Etapa 4: Presentación de la información y realización de análisis de brechas comparativas entre Chile y Países Bajos y FODA en Chile

Por último, se presentó una dinámica comparativa de los datos obtenidos a fin de establecer brechas de desarrollo y adelantos en el uso de la tecnología geotérmica, para luego finalizar con una proyección en base a un análisis FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas) aplicando la matriz correspondiente.

ENERGÍA GEOTÉRMICA

La geotermia se define como la energía almacenada en forma de calor en el suelo y subsuelo de la Tierra. Esta energía puede ser hallada a diferentes temperaturas en el suelo o en aguas subterráneas termales, a diferentes profundidades y locaciones geológicas y utilizada tanto para producir electricidad o calentar aguas volviéndolas baños termales. Dentro de los diversos usos que tiene la energía geotérmica se tiene la calefacción de edificios, aplicaciones en industria, sector hotelero, y agricultura entre otros; dado que, tiene especial atención para este estudio, el aprovechamiento térmico que se puede obtener de un reservorio geotérmico, con una temperatura superior al suelo de donde se extrae. Este calor puede almacenarse mediante un dispositivo desarrollado para la acumulación de energía. El aprovechamiento térmico de la energía geotérmica se realiza mediante una “bomba de calor geotérmica” (BCG) (Muñoz, 2018).

Uso directo de geotermia

El uso directo de la energía geotérmica es una de las formas más antiguas, versátiles y comunes de utilizar la energía geotérmica (Dickson y Fanelli, 2003). Existe documentación del uso de este tipo de energía desde hace 2.000 años, cuando en la antigua roma ya utilizaban la geotermia en baños termales públicos y para la calefacción de viviendas (Llopis *et al.*, 2008).

Para el sector agrícola, a través del uso central de la BCG, la climatización de invernaderos es una alternativa de gran potencial, representando el principal factor diferencial con casi todo el resto de las formas de calefacción a base de combustibles fósiles, para el aprovechamiento de un recurso que es accesible en el territorio nacional, dado su gran potencial de explotación sea de baja, media o alta entalpía. La BCG es una tecnología renovable, con más de 30 años de desarrollo gracias a los sistemas de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire (HVAC, por sus siglas en inglés): bombas de calor y enfriadoras eléctricas comunes. Los invernaderos pueden mantenerse bajo condiciones controladas permitiendo optimizar la producción al obtener rendimientos adecuados y por consiguiente, buena rentabilidad del cultivo (Harfagard *et al.*, 2016).

El método consiste en conducir la energía del suelo o de una fuente termal utilizando distintas formas de uso directo de la geotermia, asociadas a diferentes costos y formas de implementación. A partir de la experiencia de invernaderos instalados en diversas partes de Europa y Chile, y como se muestra en la Figura 1, pueden encontrarse los siguientes sistemas: horizontal, vertical, a partir de un cuerpo de agua y abierto. En cada uno de ellos se hace pasar agua a temperatura ambiente por el circuito fabricado con distintos materiales, comúnmente HDPE, y que transmite el calor del suelo hacia la mezcla acuosa (líquido anticongelante principalmente) que contiene iones capaces de almacenar de manera más

eficiente dicho calor. Esta energía es llevada a la BCG que hace aumentar el calor almacenado a medida que el circuito pasa una y otra vez, como un reservorio de incremento gradual. En el caso del sistema horizontal (Figura 1.1) se requiere de una excavación en los primeros 100 cm de profundidad, para instalar un circuito de cañerías que capturen el recurso. Este sistema tiene como objetivo lograr un diferencial de temperatura respecto del exterior donde las condiciones no requieren elevarla demasiado. Es decir, aumentar en unos 4-5°C aproximadamente la temperatura al interior, sirve para espacios pequeños no mayores a 200 m³ de volumen de aire. Para un sistema vertical (Figura 1.2) la inversión inicial es mayor, puesto que la excavación y el metraje de material HDPE aumentan a medida que el sistema requiere cierta potencia de acumulación. En un sistema con cuerpo de agua (Figura 1.3) se calienta la tubería HDPE directamente sumergiéndola en el reservorio, obteniendo así el diferencial deseado. En un sistema abierto (Figura 1.4) no se crea un circuito cerrado de agua, sino que se obtiene el agua termal a cierta temperatura y se hace pasar por la BCG para la acumulación de calor, devolviendo luego el agua a una menor temperatura hacia el curso de agua original (CEGA, 2013).

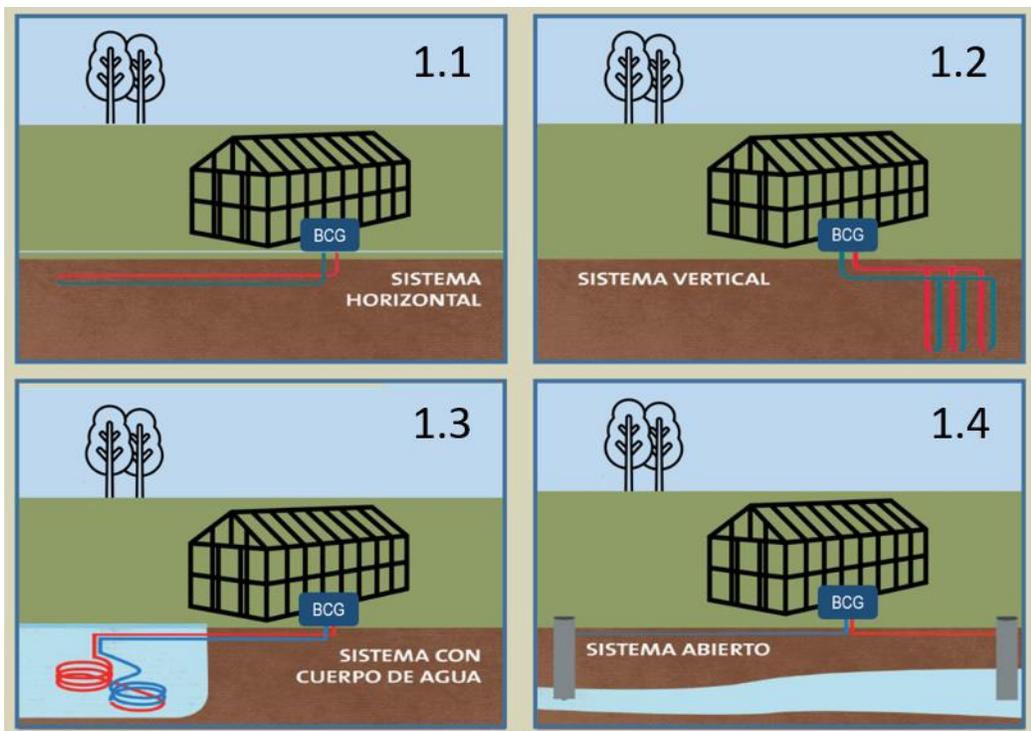


Figura 1. Sistemas de instalación de captura de energía geotérmica con BCG. Fuente: elaboración propia.

Bombas de calor geotérmicas (BCG)

Una bomba de calor geotérmica (BCG) es un artefacto que transfiere calor entre el sistema de convección (“*fan coil*”) y el circuito intercambiador de calor geotérmico o colector de agua termal (Figura 2). Opera utilizando la compresión y expansión del aire de frío a caliente para dirigir ese flujo de un espacio a otro. Este calor fluye desde una mayor temperatura hacia una hay menor temperatura por entropía. La singularidad de este dispositivo reside en acumular dicho calor siendo capaz de extraerlo desde el subsuelo a una temperatura determinada y utilizarla para calentar un ambiente a una temperatura mayor que la de ese subsuelo. Para este proceso la bomba transfiere el calor al fluido líquido refrigerante mediante un evaporador saturado que se encuentra más frío que la fuente geotérmica. Este calor evapora y sobrecalienta al refrigerante, aumentando ligeramente su temperatura. Luego, ese vapor con baja presión y temperatura es comprimido aumentando su presión y, por consiguiente, su temperatura. Luego el fluido pasa por un condensador que distribuye el calor por el edificio, en este caso en un invernadero. Este ciclo se repite a medida que el fluido se enfría y vuelve a condensarse volviéndose líquido con una alta presión y temperatura, el que se expande mediante una válvula que reduce su presión y temperatura. Finalmente, este líquido fluye hacia el evaporador, cerrando y comenzando nuevamente el ciclo. Este proceso puede ser reversible en una BCG, logrando enfriar del mismo modo que puede calefaccionar dado que la fuente geotermal puede funcionar como condensador, el intercambiador de calor funciona como evaporador y la válvula se configura de forma inversa (Muñoz, 2018).

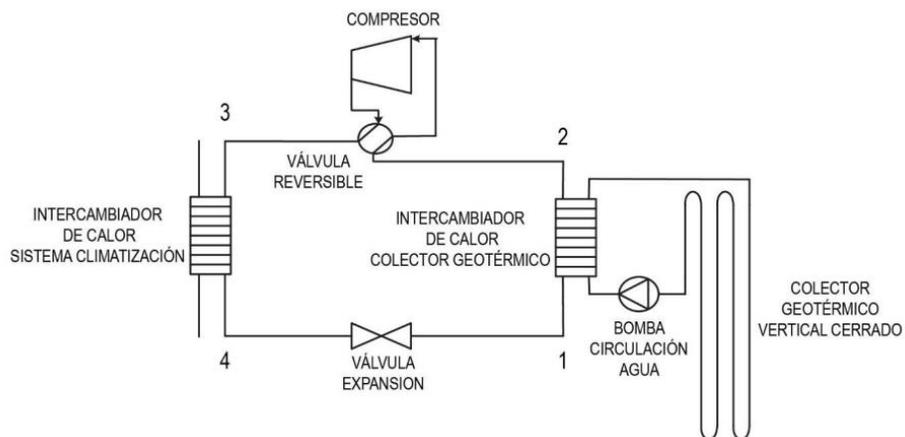


Figura 2. Esquema de bomba de calor geotérmica. Fuente: Muñoz, 2018.

Geotermia de alta y baja entalpía

La entalpía es la cantidad de energía térmica que un fluido puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg. De esta manera, la energía contenida en fluidos dentro de un sistema geotérmico puede ser de alta, media o baja entalpía. Los sistemas de alta entalpía expulsan fluido en forma de vapor (ya sea seco o húmedo) y es fácil utilizarlo para la obtención de energía eléctrica en turbinas de vapor en una central (como la central Cerro Pabellón, Región de Antofagasta), desde donde se inyecta a la red pública de transporte y distribución. Las plantas convencionales de electricidad se limitan a temperaturas del fluido por encima de 150 °C. Por otro lado, en los sistemas de baja entalpía no es viable el transporte de la energía geotérmica a gran distancia, por lo que solo son utilizables si los centros de consumo están cerca de la explotación. Las aplicaciones de la energía de baja entalpía son principalmente de uso doméstico, industrial y agrícola y las temperaturas de operación son de entre 30 y 100 °C (Benítez, 2011).

En Países Bajos las aplicaciones agrícolas para invernaderos geotérmicos involucran sistemas tanto de baja entalpía como de alta entalpía. En el primer caso el uso directo del recurso se utiliza para la climatización de espacios reducidos, mientras que en el caso del uso de alta entalpía, es posible implementar sistemas tanto de generación de electricidad así como de climatización de invernaderos extensivos (varias hectáreas), al utilizar perforaciones de yacimientos a profundidades superiores a 2.000 m para la obtención del recurso a temperaturas adecuadas para este uso (150 °C) (Lund *et al.*, 2020). En Chile, hasta 2022, sólo se han implementado sistemas de baja entalpía para el uso directo del recurso a fin de climatizar invernaderos de superficies reducidas (Morata *et al.*, 2021).

La geotermia como alternativa en la generación eléctrica para la matriz energética chilena al año 2050

Chile tiene como objetivo el desarrollo de una nueva matriz energética que reemplace la actual basada en combustible fósil. Es por ello que en Chile se ha presentado como una de las “provincias geotérmicas” sin explotar más grandes del mundo (Martini, 2008). Las condiciones geológicas de Chile, ubicadas en una de las zonas de subducción más activas y con mayor concentración de volcanes activos, evidencian el enorme potencial geotérmico existente en los Andes chilenos. No fue sino hasta fines de 2017 que Chile cruzó la fase de expectativas y finalmente ingresó al club geotérmico. Cerro Pabellón, la primera planta de energía geotérmica en Chile (y América del Sur) comenzó su operación a una altitud de 4.500 m.s.n.m. en la Cordillera de los Andes, a través de Geotérmica Del Norte (GDN), una empresa conjunta entre ENEL Green Power y la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP). Actualmente hay 81 Mega watts energía (MWe) de generación. En cuanto a los actores

gubernamentales, durante 2017 se lograron importantes avances sobre la base de la "Mesa Redonda Geotérmica", una iniciativa público-privada apoyada por el Ministerio de Energía y financiada por el Banco Mundial (Ministerio de Energía, 2018). Después de un año de sesiones de trabajo, la estimación del potencial desarrollo geotérmico para 2050 oscilaría entre 1.300 MWe y 3.800 MWe, con una inversión total entre US\$ 9-25 mil millones. Esto se suma al compromiso adquirido por Chile en 2017 para reducir las centrales termoeléctricas a base de carbón hasta que desaparezcan por completo de la matriz energética para 2050. Este compromiso abre una ventana extraordinaria, tal como se define en la "Hoja de ruta energética" presentada por el gobierno, para el desarrollo definitivo de la energía geotérmica en Chile y el resto de los países sudamericanos (Morata *et al.*, 2021).

Calefacción de invernaderos

En 2020, el uso mundial de energía geotérmica para calefacción cubierta en invernaderos se contabilizó en 2.459 Mega watts térmicos (MWt) en su capacidad instalada y el uso de energía en 35.826 TJ/año, (Lund *et al.*, 2020). Los principales países que utilizan calefacción geotérmica, son Turquía, China, Países Bajos, Rusia y Hungría con el 83% del total mundial. La calefacción con uso directo de geotermia diferencia entre invernaderos cubiertos y calefacción a suelo descubierto, siendo los principales cultivos de invernaderos las hortalizas y flores (Países Bajos); seguido por plántulas de árboles, cactus y suculentas, peces para acuicultura (EE.UU.) y plátanos (Islandia), además del uso de calefacción cubierta en Islandia (hortalizas) y Grecia (espárragos), utilizando BCG. Dado que la mano de obra es uno de los principales costos en este sector, los países en desarrollo tienen una ventaja competitiva en comparación con los países más desarrollados (Lund, 2020).

De esta manera, la utilización del recurso geotérmico parece ser una tendencia en aumento, destacando el rol de los Países Bajos en aplicaciones para la agricultura. En el caso de Chile, también se han implementado proyectos iniciales de uso directo para invernaderos geotérmicos y que apuntan al desarrollo y fomento de políticas de inversión en esta materia, de forma que pueda subsanarse la falta de productos hortícolas en la zona sur del país, así como de innovación para proyectos tecnológicos y aperturas a nuevos mercados. Durante los últimos años, se realizaron grandes esfuerzos para aumentar el uso directo de la geotermia en Chile, para espacios de calefacción, invernaderos, industria vitivinícola y algunos otros sectores productivos. En este contexto, el notable papel desempeñado por el Centro de Excelencia Geotérmica Andina (CEGA) perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile, tiene como uno de sus objetivos evaluar el potencial de energía geotérmica en áreas geotérmicas de alta entalpía identificadas en la Cordillera de Los Andes chilena, en función de su temperatura y volumen del reservorio, a fin de lograr implementaciones de uso directo en invernaderos. Este centro de investigación se sostiene con diferentes fondos de instituciones públicas destinados a desarrollar proyectos piloto, que son las primeras experiencias locales de esta tecnología en cada región del país. Estos proyectos han sido codiseñados con los usuarios finales: agricultores, comunidades,

escuelas y hospitales, entre otros (Morata *et al.*, 2021).

Por su parte, Países Bajos posee un enorme potencial para la energía geotérmica, presentando 40 proyectos en trámite durante 2019. La superficie total de invernaderos calefaccionados con geotermia en Países Bajos es de alrededor de 100.000 ha con una capacidad de 250 Mega watts térmicos (MWt) (Lund *et al.*, 2020) y actualmente, la energía geotérmica se utiliza principalmente en la horticultura de invernadero. Durante 2021 el parlamento neerlandés enfatizó que el sector geotérmico está listo para hacer una contribución significativa a la transición térmica. Los productores están listos para desarrollar nuevos proyectos en horticultura de invernadero. También se abordan los pasos hacia la sostenibilidad a través de la energía geotérmica en la industria. El apoyo del gobierno es el principal soporte para garantizar que estas nuevas iniciativas puedan despegar rápidamente (Geothermie Nederland, 2021).

USO DE TECNOLOGÍA DE CALEFACCIÓN GEOTERMAL EN LA INFRAESTRUCTURA PRODUCTIVA DE PAÍSES BAJOS

Capacidad y potencial geotérmico en Países Bajos

En Países Bajos el gobierno asegura el desarrollo de políticas e incentivos en función del uso de la energía geotérmica. La Ley de Minería y el Ministerio de Asuntos Económicos y Clima como autoridad competente, lideran el marco legal para la explotación de energía geotérmica. Dicha Ley de Minería indica que se requiere un permiso de exploración antes de realizar la primera perforación. Si esto demuestra ser suficientemente productivo, después de la segunda perforación y la fase de prueba, la licencia de exploración puede convertirse en una licencia de producción (Geothermie Nederland, 2021).

Hoy en día, la parte más avanzada de la tecnología de invernaderos del país se encuentra en la región meridional de Westland, donde el 80% de la tierra cultivada está repleta de invernaderos cubiertos de vidrio. Al 2015 existían ya 24 instalaciones geotérmicas funcionando en los Países Bajos. En la actualidad, la energía geotérmica se utiliza principalmente en invernaderos de horticultura además de calentar hogares e industrias. Cada vez hay más zonas de calor disponibles a través del uso directo de geotermia con BCG y los acuíferos termales subsuperficiales son muy comunes de hallar (Figura 3). Muchos nuevos edificios de servicios públicos comenzaron a usar pozos de agua termal. A principios del 2000 floreció el desarrollo de energía geotérmica profunda. El renovado interés llevó a la implementación de los primeros proyectos profundos, principalmente para la demanda de calor de los invernaderos (Ministerio de Energía de Países Bajos, 2016).

El desarrollo del uso directo geotérmico en los Países Bajos incluye la energía geotérmica profunda (geotermia ultra profunda), superficial y bombas de calor geotérmicas (BCG) a nivel de suelo. Actualmente hay 21 proyectos de energía geotérmica profunda, con un uso aproximado y una capacidad total de 3.600 TJ/año y 317 MWt (Figura 4). A principios de 2019, existían 2.368 sistemas de uso directo horizontal/vertical y 60.354 BCG estaban en funcionamiento. La energía geotérmica superficial consiste en BCG y sistemas de uso directo horizontal/vertical abiertos que utilizan pozos de agua subterránea para almacenar calor y frío (sistema abierto y con cuerpo de agua) a una temperatura de almacenamiento energético de entre 7 y 17° C. Esta tecnología es atractiva tanto económica, como ambientalmente en cuanto a los métodos tradicionales de calefacción y refrigeración. Otras explotaciones de reservorios permiten alcanzar temperaturas de entre 30 y 90° C para lugares con un exceso de calor o una alta demanda de calefacción como invernaderos hortícolas extensivos. En resumen, la calefacción de invernadero para el país es de 230 MWt y 3.731 TJ/año, la calefacción urbana a 3,15 MWt y 63 TJ/año, y las bombas de calor geotérmicas a 1.486 MWt y 4.550 TJ/año, para un total de 1.719,15 MWt y 8.344 TJ/año (Bakema *et al.*, 2020)



Figura 3. Mapa del potencial geotérmico en Países Bajos con las áreas de interés para la producción. Fuente: NLOG, 2022.

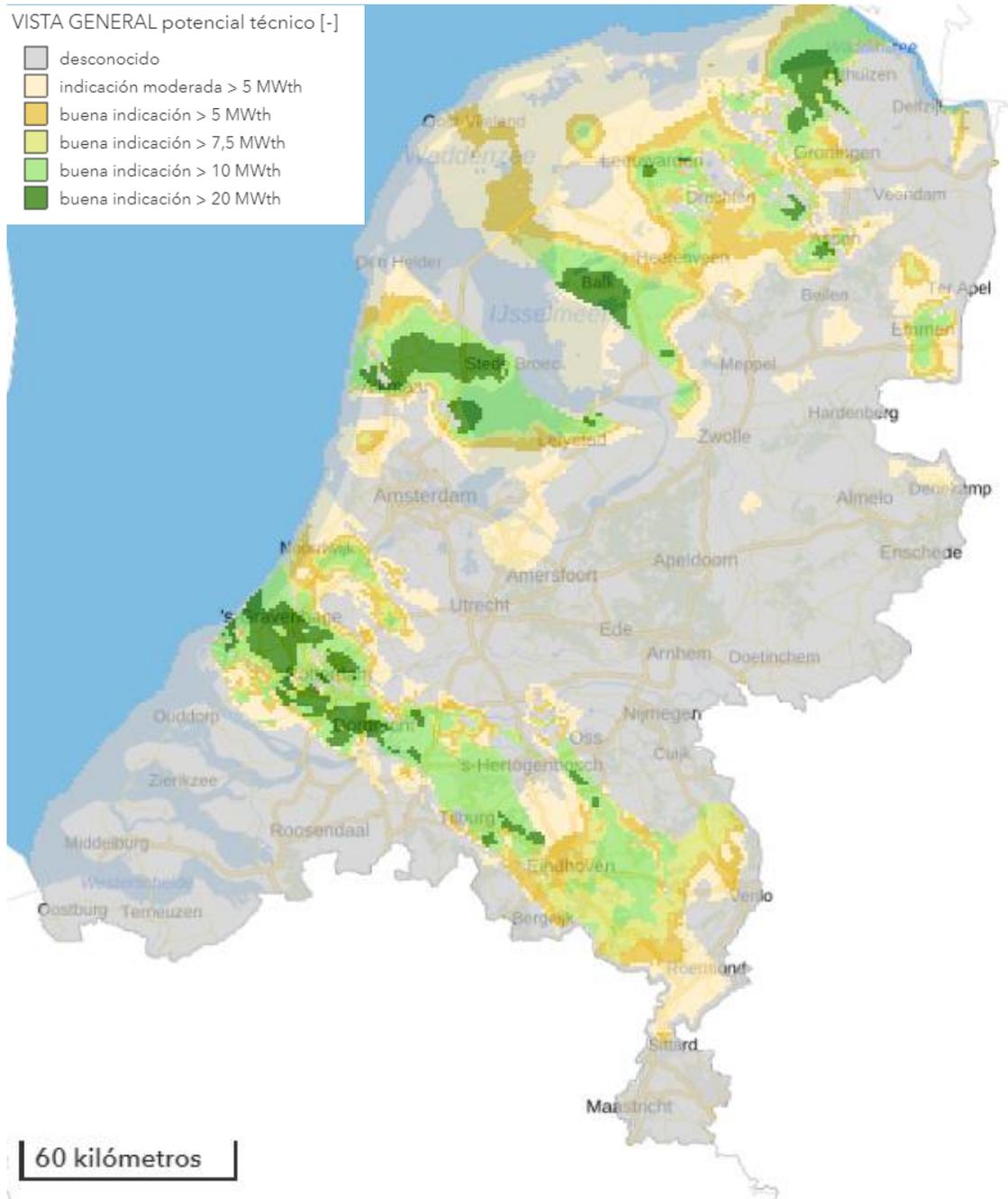


Figura 4. Mapa del potencial geotérmico en Países Bajos con factibilidad técnica para la producción. Fuente: ThermoGIS, 2022.

Invernaderos geotérmicos: Experiencias de implementación en Países Bajos

Hoogweg Paprikakwekerijen

Esta empresa posee 14 invernaderos ubicados en Noordoostpolder (Luttelgeest y Marknesse) y en la provincia de Holanda Meridional (Nootdorp), distribuidos en 160 hectáreas para el cultivo de pimientos dulces en 4 colores diferentes: rojo, amarillo, naranja y verde. Alrededor de 112 hectáreas de invernadero con cubierta de vidrio están calefaccionadas con un sistema geotérmico de uso directo que provee de energía térmica al proceso productivo a través de tres perforaciones de geotermia profunda de baja entalpía a 80°C, en la localidad de “Nieuwlandsweg 1” a una profundidad de 1.850 metros (Figura 5). Este proceso permite una alta calidad en el producto final y en concordancia con el cuidado del medio ambiente. Los pimientos se comercializan principalmente en supermercados de Países Bajos y otros países europeos. La producción en 2021 contaba con 3,6 millones de plantas de pimientos puestas en invernadero. Tal como se indica en la Figura 6, uno de los pozos bombea el agua caliente hacia la superficie donde una BCG transfiere el calor al sistema de agua dulce, luego el agua enfriada se devuelve a la misma profundidad a través del sistema cerrado de agua salada. Finalmente, el calor obtenido se transfiere a través de un sistema de convección para calentar el aire de los invernaderos. Los pozos se ubican contiguos, a varios metros de distancia entre sí, pero bajo tierra el extremo de este pozo se ubica aproximadamente a 1,5 a 2,0 km del primer pozo para evitar enfriar el reservorio. En este circuito subterráneo, el agua de la tierra se calienta gradualmente de nuevo por el calor de la corteza terrestre que fluye hacia la superficie. En 2022, Hoogweg ampliará la producción de energía geotérmica perforando 5 pozos: 2 de producción y 3 de inyección. El proyecto de construcción de la plataforma de perforación comenzó a finales de 2021 y a principios del 2022 ya realiza la inyección hacia el invernadero. Este proyecto de ampliación es muy necesario dado que ha disminuido el volumen de agua por pozo. En esta zona el gradiente térmico sube aproximadamente 33°C por cada km que se baja. Parte de las rocas de las estratas superiores de la corteza terrestre son porosas y están llenas de agua. A una profundidad de dos a tres kilómetros se encuentra agua con temperaturas entre 70 a 100 °C (Hoogweg Paprikakwekerijen, 2022).



Figura 5: Vista aérea del invernadero de Marknesse, “Nieuwlandseweg 1”, con más de 25 hectáreas de horticultura en invernadero. Fuente: Hoogweg Paprikakwekerijen, 2022.

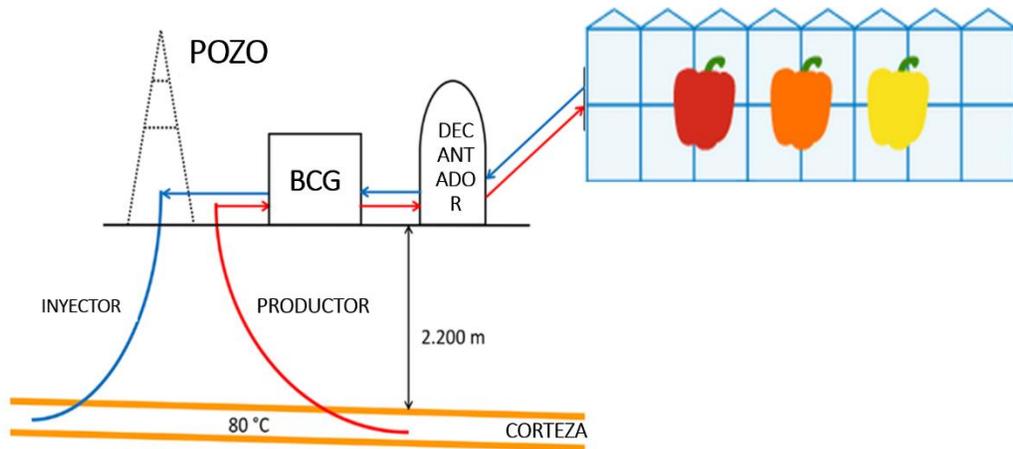


Figura 6. Esquema de funcionamiento del sistema de colector abierto para la calefacción de invernaderos de pimienta morrón de Hoogweg. Fuente: Hoogweg Paprikakwekerijen, 2022.

Red Harvest

Red Harvest es una empresa neerlandesa que provee a diferentes distribuidores de tomates (Figura 7). Al 2022, posee 36 hectáreas de invernadero de tomate, climatizado por Verkade Klimat y ubicado en Middenmeer en De Lier. En 2009 abrió la sucursal en el centro hortícola Agriport A7, ubicado en el norte de la provincia de Noord-Holland. Varias empresas hortícolas de la región de Westland se han asentado aquí, atraídas por las posibilidades de producción a gran escala y el hecho de que las condiciones de cultivo aquí son similares a las de la región de Westland. Para una producción sustentable, Red Harvest ha implementado sistemas de cogeneración basada en energía geotérmica y de combustión para generar su propia electricidad, calefaccionar espacios e inyectar CO₂ a las plantas. En esta locación, el aprovechamiento de la energía geotérmica se da junto con un grupo de empresas de la cooperativa “*Growers United*” quienes levantaron proyectos de explotación de este recurso. Para lograr una producción sostenible de otras formas, los invernaderos poseen un diseño robusto y de gran calidad, permitiendo que el calor se contenga en su interior de manera muy eficiente. Además, el agua que va al desagüe se puede reciclar para aprovechar los nutrientes presentes en ella. Los métodos utilizados por la cooperativa “*Growers United*” han ido migrando desde el gas natural hacia la geotermia para calefaccionar sus invernaderos. En total, poseen 30% de la superficie de cultivo con energía geotérmica para calentar invernaderos. Este porcentaje aumentará en los próximos años, dado que el 80% de los productores están conectados a una iniciativa sostenible. En su conjunto producen 275 millones de kg de tomates por año (Red Harvest, 2022).



Figura 7. Instalaciones y personal de Red Harvest en Laan van Boekesteijn, Países Bajos
Fuente: Red Harvest, 2022.

Floricultura B. V¹.

Floricultura B. V. es una empresa que desde 1933, está especializada en la producción de orquídeas. Marc Eijsackers, gerente de marketing y comunicaciones indica mediante una entrevista que la casa matriz se ubica en Heemskerk, Países Bajos, además de otras 3 locaciones en el país, pero también en India, Polonia, Taiwán, Estados Unidos y Brasil. En 2022 se encuentran abriendo una nueva locación en China. La empresa cultiva principalmente especies de las familias Orchidaceae y Araceae teniendo como principal producto exportado plantas jóvenes de orquídeas y *Anthurium*. En 2015, Floricultura comenzó la transición hacia la geotermia como principal fuente de calefacción para sus invernaderos donde ya cuentan con más de 7 hectáreas de infraestructura con esta tecnología y con una capacidad productiva de más de 45 millones de plantas por año. Poseen un sistema de doblete geotérmico profundo en arenisca permeable (Rotliegend), con perforaciones de 3.000 metros en el subsuelo, significando un ahorro anual de unos cinco millones de metros cúbicos de gas. La geotermia sustituye entre 4,5 a 6,5 millones de m³ de gas natural por calefacción convencional con caldera de gas evitando así la liberación de 9.000 toneladas de CO₂ por año. Con una inversión a la fecha de aproximadamente 10 millones de Euros, Floricultura B. V. se constituye como pionera en el desarrollo de esta técnica de calor sostenible en los Países Bajos, fomentando el intercambio de conocimientos en este terreno, mediante su participación en la Asociación Neerlandesa de Operadores Geotermiales (DAGO, por sus siglas en neerlandés) y la “Geothermie Nederland”, esta última, entidad que reúne a todas las empresas que funcionan con geotermia en los Países Bajos (Floricultura, 2022). El calor obtenido para calefaccionar los invernaderos en esta locación se obtiene con un sistema de BCG (Figura 8) y su funcionamiento permite mantener la sostenibilidad en el complejo de invernaderos en Strengweg en Heemskerk. En esta planta existe demanda tanto de calefacción como de refrigeración en el cultivo por lo que el diseño de invernaderos cerrados que utiliza un almacenamiento subterráneo de calor y frío (ATES) es primordial para la producción (NH Nieuws, 2018).



Figura 8: Sistema de perforación y obtención de calor geotérmico en Heemskerk Floricultura (Fuente: Floricultura, 2022).

1: 'Besloten Vennootschap' o 'compañía cerrada'.

Ammerlaan

Ammerlaan fue una de las primeras empresas hortícolas de Países Bajos en utilizar energía geotérmica. Cultivan pepinos desde la década de 1980. Actualmente es un vivero comercial que se especializa en plantas verdes tropicales (Figura 9) tales como *Dracaena*, *Yucca*, *Croton*, *Howea kentia*, *Sansevieria*, *Palma*, *Calathea* y *Philodendron*. La empresa cultiva y hidroponicamente más de cien especies de plantas en innumerables variedades y tamaños, ofreciendo personalización que varía de una planta a miles. La empresa ha tenido éxito creciendo hasta un tamaño de 6,5 hectáreas de invernaderos calefaccionados con geotermia donde se cultivan miles de plantas cada año con gran cuidado y artesanía. En 2010 se agrega el nombre “The Green Innovator” a la compañía desde que comenzó a calentar los invernaderos con energía geotérmica. Los pozos geotérmicos de agua caliente se bombean a una profundidad de entre 2.000 y 3.000 m por debajo del nivel del suelo (Figura 10). Como resultado, la empresa es completamente neutra en emisiones de CO₂, dado que utiliza el dióxido de carbono producido para la fotosíntesis en la propagación vegetal de sus productos (AgroEnergy Kanaal, 2013). Luego de eso, Ammerlaan comenzó a suministrar agua caliente a 24 productores contiguos, una escuela, una piscina, un polideportivo y 543 viviendas cerca de la guardería en Nootdorpseweg en Pijnacker. Esta empresa es líder en producción verde sin emisiones y que funciona produciendo su propia electricidad (Ammerlaan, 2022).



Figura 9. Vista del interior del invernadero geotérmico en Ammerlaan, Países Bajos. Fuente: Ammerlaan, 2022.



Figura 10. Vistas de las instalaciones de infraestructura geotérmica en Ammerlaan, Países Bajos. De izquierda a derecha y abajo: (1) Pozo de perforación, (2) Sistemas de tuberías y filtros de agua termal, y (3) extensión de los invernaderos. Fuente: Ammerlaan, 2022.

USO DE TECNOLOGÍA DE CALEFACCIÓN GEOTERMAL EN LA INFRAESTRUCTURA PRODUCTIVA DE CHILE

Capacidad y potencial geotérmico en Chile

La historia de la exploración geotérmica en Chile data de 1921, cuando un grupo técnico italiano de Larderello perforó dos pozos de unos 70-80 m de profundidad en el campo geotérmico El Tatio. Luego, desde 1968, la exploración sistemática involucró a la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) con la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA). Desde entonces, los estudios básicos de exploración, perforación y factibilidad se han realizado esporádicamente, principalmente por la Universidad de Chile, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) (SERNAGEOMIN, 2003). En el año 2000, en Chile se promulgó la ley N° 19.657 que proporciona el marco para la exploración y el desarrollo de la energía geotérmica en Chile (BNC, 2000). Desde este punto, entidades públicas y privadas han realizado esfuerzos integrales para evaluar el potencial geotérmico en el territorio nacional (Aravena *et al.*, 2016).

Actualmente, en Chile las aplicaciones de la geotermia han estado ligadas a casos puntuales en proyectos inmobiliarios y viviendas particulares con la instalación de una central distrital geotérmica en condominios residenciales para 12 edificios en el sur de Chile (GEOLAC, 2019), pero durante los últimos años, se han implementado proyectos de calefacción de escuelas en la Región de Aysén. El uso de la geotermia se está impulsando en la región de Aysén, para proponer alternativas al uso de leña. A partir del trabajo de CEGA el uso de esta tecnología ha podido intensificarse durante los últimos 5 años con proyectos de interés nacional. En la mayoría de los casos, el agua caliente se recoge de aguas termales naturales y se canalizan a edificios y piscinas (CEGA, 2020).

En el 2020, la energía geotérmica de uso directo en Chile se utiliza en balnearios de aguas termales en 29 locaciones. Aunque en Chile se han otorgado alrededor de 70 concesiones de exploración geotérmica a empresas privadas, los recursos geotérmicos chilenos han sido utilizados tradicionalmente para el turismo donde estas aguas termales utilizan energía geotérmica solo para bañarse y nadar. Los únicos dos lugares conocidos por utilizar la energía geotérmica para calefacción de cabañas o para instalaciones hoteleras son el Centro Termal Armada Liquiñe (región De Los Ríos) y el Puyuhuapi Lodge (región de Aysén). Además, se calefaccionan dos hospitales públicos en Rancagua y Talca. Por otro lado, los diferentes usos industriales en la acuicultura, invernaderos e industria del vino han incluido

el uso de BCG, principalmente debido a su alta eficiencia. Dos proyectos piloto de invernaderos en el sur de Chile fueron montados con uso directo de geotermia en Coyhaique y Puerto Aysén, donde las condiciones climáticas extremas impidieron que los cultivos crecieran en invierno. Con este sistema, los invernaderos de superficies pequeñas menores a 70 m² permiten el cultivo de especies hortícolas para el abastecimiento local. En total, se informa de 61 sitios con uso de BCG significando 7.934 MWt (Mega watts de calor térmico) (Worldwide Review, 2020).

El uso de bombas de calor en Chile comenzó en 1996 cuando se instalaron 51 unidades en la parte sur del país. Aproximadamente el 70% de ellos son sistemas horizontales cerrados bajo suelo y el 30% restante son sistemas de colector con cuerpo de agua (Lund, 2013). En Chile, existen distintos organismos tanto gubernamentales como no gubernamentales que promueven el uso de energías renovables, dentro de los cuales destaca el Centro de Excelencia en Geotermia Los Andes, un proyecto FONDAP-CONICYT creado en 2011 por el Gobierno de Chile destinado a mejorar el conocimiento geotérmico y promover su desarrollo tecnológico y difusión en la opinión pública. Posteriormente, también ha realizado un mapeo de las zonas de mediana y baja entalpía donde se presenta un conjunto de áreas geotérmicas altamente favorables, reuniendo los datos suficientes para cuantificar el recurso. Un conjunto de 23 áreas geotérmicas favorables se propone como los objetivos de desarrollo futuro más probables (Figura 11). Ocho de ellos tienen resultados iniciales de exploración que sugieren que son objetivos altamente favorables como recursos geotérmicos potenciales (Aravena *et al.*, 2016).

Según el informe final de la Mesa Geotérmica, se realizó una proyección de explotación del recurso considerando análisis de costos de inversión (Capex) y de operación (Opex) en función de 7 variables como tamaño de planta (capacidades de 20, 50 y 100 MW), tecnología de generación (flash y binaria), ubicación del proyecto (zona norte o sur del país), profundidad promedio del yacimiento (1.500 y 2.500 metros), productividad promedio por pozo (5,0 MW/pozo; 6,8 MW/pozo; 8,0 MW/pozo y 10,0 MW/pozo, con tasa de éxito de perforación promedio de 75%), CAPEX unitarios (bajo, medio y alto en relación al nivel de complejidad del proyecto), y con tasas de descuento del 8, 10 y 12 %. En relación con las profundidades proyectadas y de la experiencia de empresas que ya han realizado perforaciones geotérmicas en Chile, se tiene que los yacimientos se desarrollan de manera estándar a profundidades variables de entre 1.500 y 2.500 metros según sondajes. En la Zona Norte sólo se consideraron yacimientos a una profundidad de 2.500 metros mientras que, en la Zona Sur se consideran yacimientos a 1.500 y 2.500 metros de profundidad (Mesa de Geotermia, 2018).

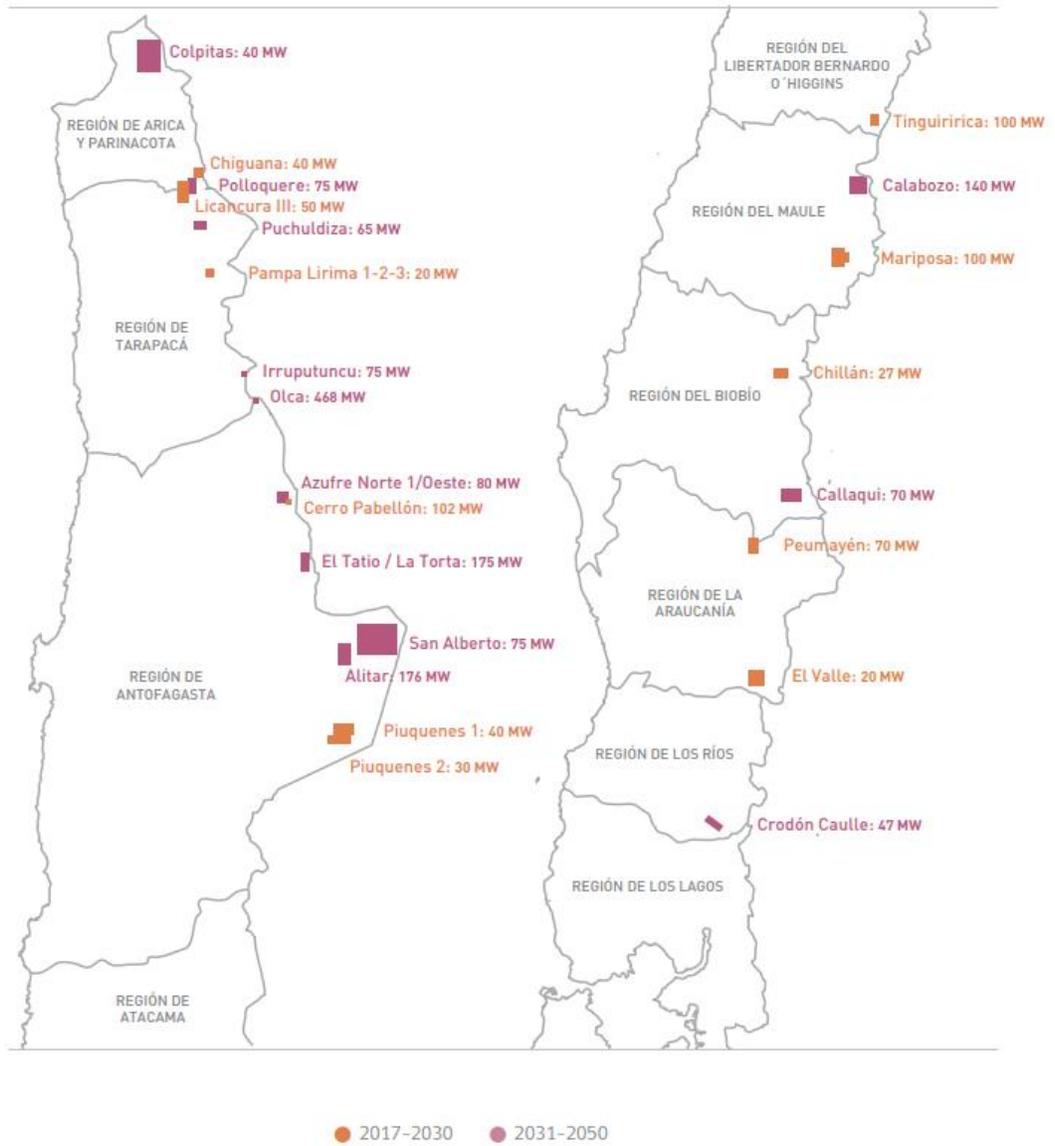


Figura 11. Distribución geográfica del potencial geotérmico en Chile. Fuente: Mesa de geotermia, 2018.

Según lo anterior, las evaluaciones geotérmicas en Chile desprenden potenciales de uso para la generación de energía eléctrica a partir de la medición del gradiente térmico, el cual incrementa a mayor profundidad. Esta estimación habla de 45 °C/km en el cinturón volcánico plio-cuaternario chileno, produciendo $1,85 \times 1.022$ J de energía térmica almacenada en agua por encima de 150 °C para profundidades inferiores a 5 km (Aldrich *et al.*, 1981). Este potencial geotérmico puede utilizarse tanto para la generación de la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de sistemas productivos agrícolas forzados mediante invernaderos de gran superficie y alta tecnologización, así como para distribuir esta energía en forma de calor a través de su uso directo. Las actividades de exploración involucran estudios geológicos, tectónicos, vulcanológicos, geofísicos y geoquímicos para encontrar zonas con alto potencial geotérmico donde se realizarán perforaciones exploratorias (Aravena *et al.*, 2016).

En la zona norte, los programas de exploración más avanzados se han llevado a cabo en los prospectos geotérmicos Colpitas, Apacheta, Pampa Lirima y El Tatio-La Torta. En esta zona destaca la entrada en operación, desde el 2017, de la central geotérmica Cerro Pabellón, con capacidad para producir 600 Gwh al año. Por otro lado, en la zona sur se han perforado pozos exploratorios en todas estas perspectivas y el potencial combinado estimado para las cinco suma unos 550 MWe entre la Sexta región y la Región de Los Ríos, sin considerar la Región de Los Lagos y Aysén (Mesa de Geotermia, 2018).

La inversión geotérmica en Chile se ha incrementado respecto a las décadas anteriores. Durante los últimos cinco años ha aumentado a alrededor de US\$350 millones desde los niveles anteriores de alrededor de US\$26 millones. La inversión pública (gubernamental) ha disminuido del 44% al 21%, llegando a través de fondos de investigación e instituciones públicas. El principal indicador de la actividad de inversión ha sido el programa de perforación de pozos emprendido por algunas de las empresas privadas que exploran recursos geotérmicos. El número de pozos perforados también ha aumentado con respecto a la media década anterior (Lahsen *et al.*, 2010).

Invernaderos geotérmicos: Experiencias de implementación en Chile

Vivero Forestal Horcones (Arauco)

Este proyecto se ubica a 1,5 kilómetros al sur de Laraquete (Figura 12), entre la carretera y el mar, y ocupando un terreno de 100 hectáreas. Las instalaciones de este vivero de alta tecnología contemplan 7 invernaderos de 2.100 m², cubriendo un área total de 14.700 m², incluidas 6 áreas de producción y desarrollo además de sombreaderos de cultivo, áreas de setos (plantas madres), huertos de cruzamientos, laboratorio de polen y de semillas. La industria forestal se encuentra en una constante etapa de investigación y desarrollo. Para el ciclo forestal, en los viveros, se germinan las semillas y crecen las plantas que se transformarán posteriormente en árboles de los bosques plantados. Para este proyecto, y a partir de estudios realizados por la consultora Aiguasol para el Ministerio de Energía, se comprobó el estado de desarrollo de proyectos de BCG instaladas en Chile de manera que se logre replicar en Horcones (Harfagard, 2016). Con el uso de paneles termodinámicos se logra un adecuado manejo de la temperatura y humedad en el sustrato a través del uso directo, permitiendo una mayor tasa de crecimiento de las plantas con calor geotérmico de manera que, para mejorar las condiciones en las bandejas portadoras de plantas madre, se transmite calor mediante una red de tuberías pex que recorren todas las unidades productoras de eucaliptus. Se considera que por estas tuberías circule agua a 50° C la cual permitirá mantener una temperatura de sustrato de aproximadamente 28°C. Este proyecto consta de 700 KWt (Kilowatts térmicos) en 7 unidades BCG y 300 KWt adicionales con paneles termodinámicos. Este equipamiento maximiza la eficiencia de consumo eléctrico de la BCG según los requerimientos térmicos del cultivo. Las BCG del vivero Horcones están diseñadas para proporcionar calefacción y aire acondicionado (ACS) durante todo el año en modo frío pasivo, modo calefacción y modo ACS, modo antilegionela (bacteria infecciosa), entre otras. Dadas las características de la zona se instaló un sistema de colector abierto a nivel freático dando como ventaja el ahorro en perforaciones de sondaje. Inaugurada por el presidente Sebastián Piñera (Figura 13), Horcones es la instalación geotérmica de baja entalpia más grande proyectada para uso productivo en Chile, y que permite incrementar sobre un 20% la tasa de crecimiento en las plantas madres de producción eucaliptus en con ahorros sobre el 75% respecto a sistemas tradicionales utilizados en calentar agua (Ministerio de Energía, 2016).

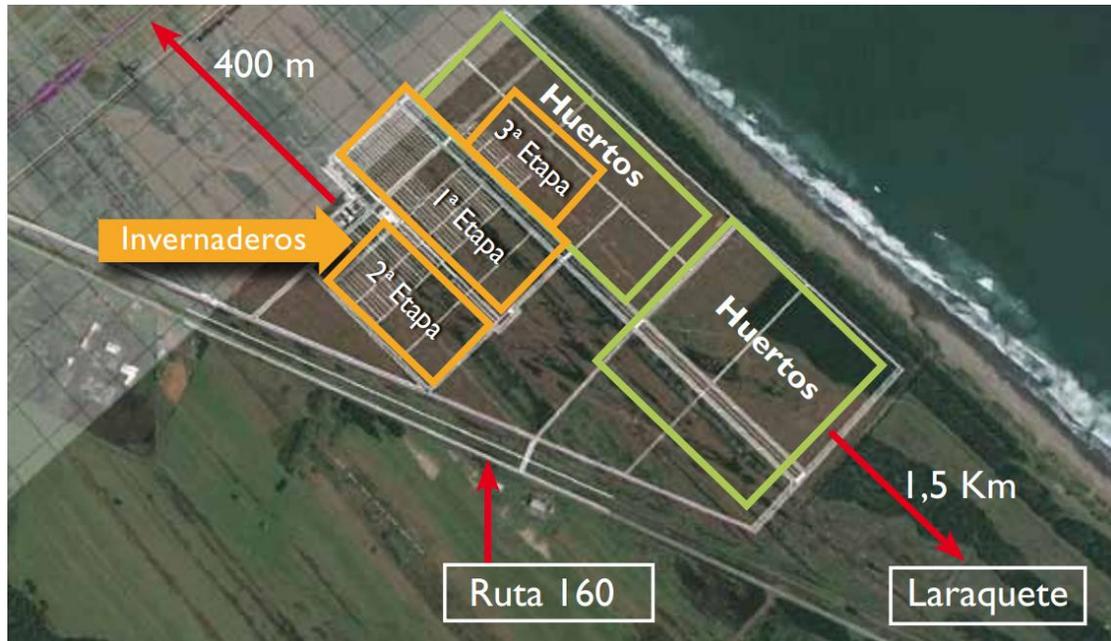


Figura 12. Mapa y diseño del proyecto de modernización y ampliación de vivero geotérmico Arauco. Fuente: Arauco, 2022.



Figura 13. Visita del Presidente Sebastián Piñera al vivero geotérmico Horcones Arauco. Fuente: Dirección de Prensa Presidencia, 2018.

Viveros Sunnyridge

Esta empresa funciona desde 2006 y está ubicada en la Zona Central, Parcela 19-B, Codigua, Melipilla, pero además cuenta con presencia en Brasil y Perú. Su principal línea de producción son las plantas berries (arándanos, frambuesas, moras y frutillas). Forma parte de la Asociación de Exportadores de Frutas de Chile A.G. (ASOEX), los productores de frambuesas Advanced Berry Breeding (Países Bajos). En total poseen 2 sucursales, 22 invernaderos, 17 sombreaderos, 3 jardines de variedades y más de 163 ha en otras sociedades. Al año 2017, Viveros Sunnyridge había vendido más de 584.602 plantas en el país y más de 2,8 millones de plantas a nivel mundial. Jorge Nanjari Zamora, encargado del área I+D de Viveros SunnyRidge indica que cultivan arándanos in vitro utilizando geotermia para calefaccionar favoreciendo su continuidad durante todo el año en un invernadero de 630 m² (Figura 14). Por otro lado, la frambuesa y demás berries requieren de vernalización, por lo que no se utiliza esta forma de calefacción. La captación de calor latente se realiza a través de un cuerpo de agua (tranque) que hoy en día se encuentra seco debido a la sequía y, consecuentemente, a la escasez hídrica predominante tanto en la Región Metropolitana así como en otras partes donde se comercializan las plantas. Por este motivo, para mantener la temperatura adecuada del arándano el invernadero tiene instalada una doble capa protectora y así no perder tanto calor interior. Durante los meses más fríos (junio, julio y agosto), se requiere el uso de calefactor a diésel, sin embargo este sistema no es tan óptimo pues provoca alargamiento de ciclos dadas las variaciones térmicas y el control deficiente de las condiciones de aclimatación y enraizamiento de arándanos. Este proceso se logra de manera óptima en 60 días con geotermia y se alarga hasta 4 meses utilizando petróleo. En el año 2016-2017 Viveros Sunnyridge hizo su transición a la geotermia con una duración de implementación de 8 meses. El costo de implementación de este proyecto de geotermia para producción agrícola fue de unos 30-50 millones de pesos por inversión inicial y unos 10 millones de pesos adicionales por cada nave incorporada.

En relación con el desarrollo, la implementación de este tipo innovación no posee un fomento significativo de parte del estado. Tan sólo la CORFO cofinanció, para la construcción de tranques de captación, un 40% del costo de este ítem, siendo alrededor de un 15% del proyecto total. Este sistema de colector en cuerpo de agua tiene como principal problema la sequía, dado que el tranque (capacidad 6.500 m³) requiere, al menos, de una profundidad efectiva de 1 m, lo que permitiría a los serpentines del sistema captar de manera efectiva el calor geotérmico (Figura 15). La superficie del invernadero consiste en una capacidad instalada total de 6 naves de 630 m² cada uno con un total de superficie de 3.780 m² de invernadero calefaccionado. La adición de las 5 naves restantes requiere de la incorporación de nuevas bombas de calor, compresores, y distribución de serpentines y tuberías de agua. Hoy, la superficie real calefaccionada con geotermia sólo considera una primera nave de 630 m², con dimensiones de 70 m de largo x 9 m de ancho. En cuanto a la capacidad productiva en invernadero de una nave es de 2.625 bandejas de 200 plantas permitiendo la producción de 525.000 plantas/ciclo, con la posibilidad de extender el proceso productivo 3 veces por año (3 ciclos anuales). El ahorro energético en uso de geotermia respecto al uso de fuente

convencional significa unos \$300.000/mes totalizando \$2.100.000/año aproximadamente (7 meses de funcionamiento). En este sentido, el uso de combustible fósil para calefaccionar una nave de 630 m² corresponde a un consumo de al menos 1.000 L/mes (\$800.000/mes). La estimación de GEI (gases de efecto invernadero) no emitidos utilizando geotermia corresponde a 2,65 kg/L CO₂ * 1.000 L = 265.000 kg CO₂/año (una nave de 630 m²). La geotermia es un sistema confiable siempre y cuando estén las condiciones de llenado del tranque con aguas lluvia. Además, es una energía limpia que permite mantener el aire limpio para que el personal del vivero pueda trabajar en condiciones saludables. Por otro lado, la geotermia como factor productivo otorga valor agregado para la venta a clientes, sobre todo a los provenientes de Europa y países desarrollados.



Figura 14. Vista del interior del invernadero de Sunnyridge, variedad de arándano Emerald.
Fuente: Sunnyridge, 2022.



Figura 15. Vista del interior del invernadero de Sunnyridge, con el sistema de serpentín que transporta agua caliente desde el colector en cuerpo de agua. Fuente: Sunnyridge, 2022.

Invernadero Geotérmico en Panguipulli

Este invernadero se ubica en la Región de Los Ríos, en la localidad central de Panguipulli. El invernadero pertenece a don Mario Aburto quien pudo montar este proyecto gracias al apoyo del gobierno regional y el CEGA. Financiado en casi un 80% por el Proyecto FIC19-044. En él se producen tomates en un espacio de 700 m². Durante los meses de invierno la Región registra temperaturas que no permiten el cultivo de especies de alto valor como el tomate y, por consiguiente, existe un escaso número de productores locales de tomates con baja o nula oferta durante el invierno. Anteriormente, el invernadero que utilizaba sólo durante la temporada cálida se tuvo que adaptar y monitorear mínimamente como prototipo viable de invernadero tecnificado para la producción continua de tomates con bomba de calor geotérmica (BCG). Para el diseño y construcción del invernadero geotérmico, se debió realizar un análisis termográfico de la envolvente térmica del espacio para luego identificar y reparar deficiencias térmicas. Finalmente se calculó la demanda térmica del invernadero para definir la cantidad, configuración y tipo de equipos necesarios, así como las mejoras necesarias a la conexión del sistema eléctrico. La distribución del equipamiento se detalla en la Figura 16.

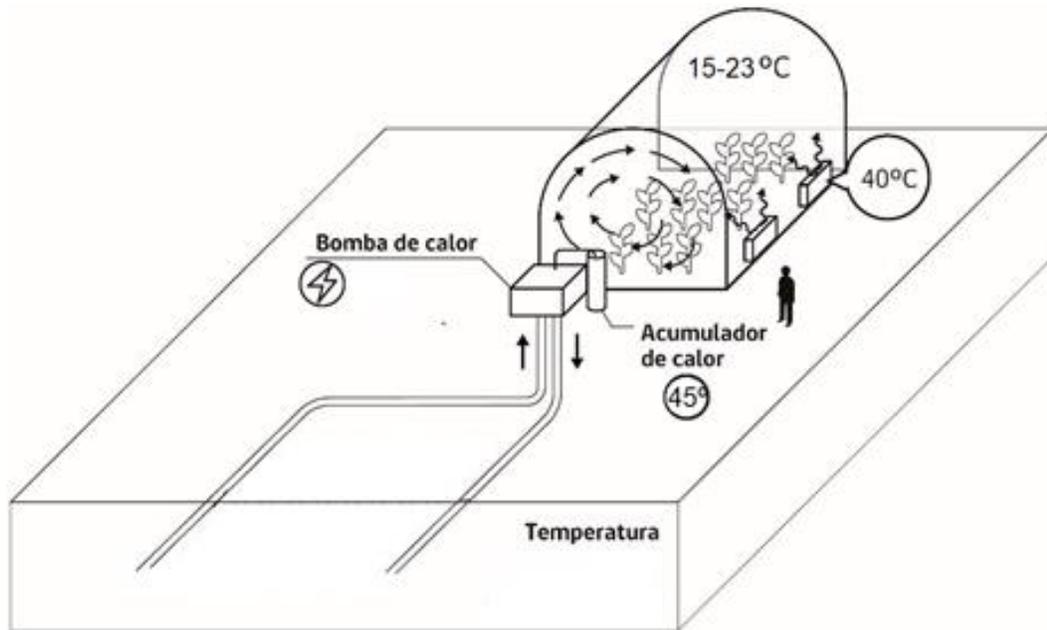


Figura 16. Detalle de la distribución del equipamiento para el funcionamiento. Fuente: modificado de “informe de avance invernadero geotérmico en Panguipulli”. Proyecto FIC19-0544. CEGA 2020.

Este proyecto cuenta con un circuito abierto donde se bombea agua desde el pozo, intercambiando energía con las BCG en la sala térmica que luego descarga al estero. Las BCG aprovechan la energía del circuito abierto y generan la energía restante necesaria para

climatizar el invernadero. Los estanques de inercia acumulan la energía y el sistema de distribución de 8 “fan coil” distribuyen la energía en el invernadero (Figura 17).

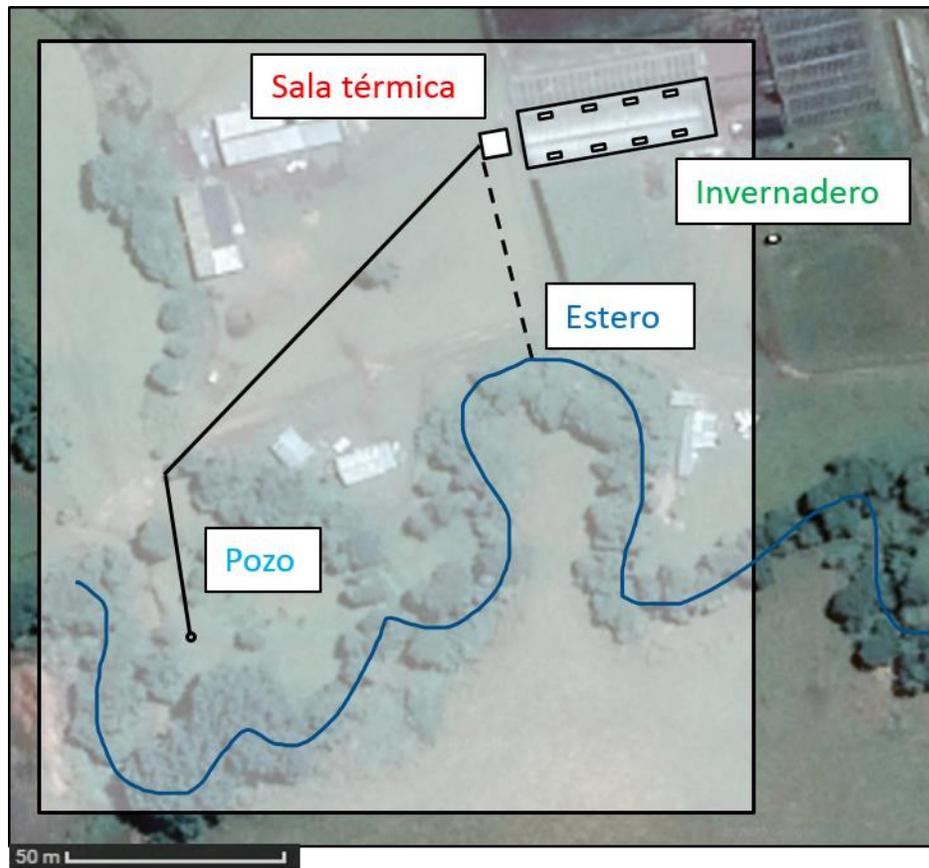


Figura 17. Diseño de instalación de los diferentes puntos de interés del invernadero geotérmico. Fuente: adaptado de “informe de avance invernadero don Mario Aburto”, Proyecto FIC19-0544. CEGA 2020.

Para la construcción de la sala térmica se montó un espacio para albergar los equipos, junto al invernadero, y a la vista desde la casa del propietario para permitir su vigilancia. La estructura 3 m de altura y de 15 m² contempla un radier de hormigón resistente al peso de los equipos para permitir la instalación de los estanques de inercia. El invernadero se puede apreciar en las figuras 18 y 19. Antes de implementar la nueva infraestructura, don Mario Aburto cultivaba 1.800 plantas de tomate en 696 m², cosechando aproximadamente 24.000 kg de tomate en una temporada de 6 meses (diciembre a mayo), obteniendo un rendimiento de 344.000 kg/ha y 33,4 kg/m². Sin embargo, le era imposible continuar con la cosecha debido a la llegada de heladas invernales.



Figura 18. Vista desde el exterior del invernadero en Panguipulli. Fuente: Registro fotográfico propio, 2021.



Figura 19. Vista del interior del invernadero en Panguipulli. Fuente: Registro fotográfico propio, 2021.

Invernadero Geotermal en Liquiñe

Ubicada en la precordillera de la Región de Los Ríos, es una localidad que se caracteriza por poseer zonas de aguas termales con fines turísticos. Es el caso del Sr. Hipólito Muñoz, quien posee un negocio de aguas termales donde ha logrado implementar un invernadero geotermal de uso directo para el cultivo de algunas hortalizas de hoja a partir del proyecto ANID-FONDECYT Regular N° 1180167 y cofinanciado por el proyecto ANID-FONDAP N° 15200001 del CEGA. Liquiñe es un área donde el subsuelo está especialmente habitado por fallas geológicas que generan zonas ideales para la circulación de fluidos, que se mueven desde abajo por rocas fracturadas hasta la superficie de Liquiñe. El agua de la lluvia y de los ríos se infiltra por las fracturas hasta unos 1-2 km de profundidad, donde se calienta y almacena. Posteriormente, las fracturas permiten que el agua caliente suba de manera natural, formando las termas. Las temperaturas alcanzadas por las aguas termales de esta zona, incluida las termas de Hipólito Muñoz, se describen en la Figura 20 (CEGA, 2021).

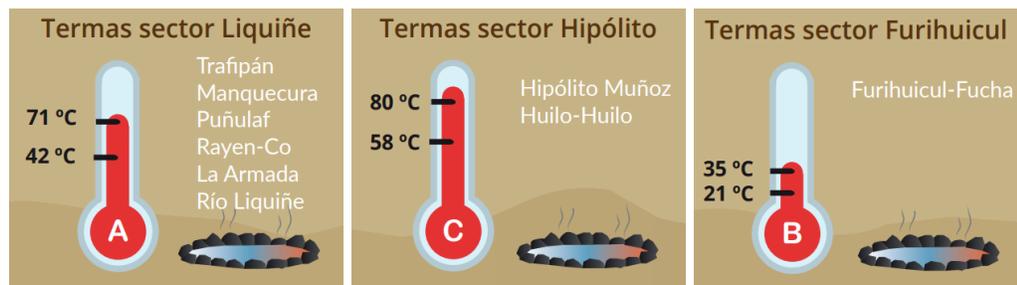


Figura 20. Temperaturas mínimas y máximas alcanzadas a nivel de suelo en las termas de Liquiñe. Fuente: CEGA, 2021.

En esta zona existen numerosas vertientes termales, la mayoría de ellas alineadas con una orientación noroeste, de forma paralela al Río Rañintulelfu, a lo largo de aproximadamente 300 m. Desde estas vertientes emerge un gran volumen de agua caliente, que contiene mucha energía termal. Es por ello que se escogió esta zona para implementar el primer invernadero calefaccionado con agua termal en Chile. En Hipólito Muñoz existen decenas de pozas burbujeantes calientes, entre los 40 y 82 °C. Gracias al estudio de la composición química de estas aguas se puede conocer por qué, cómo y cuándo se calentó el agua. El origen de las aguas termales es el agua de lluvia y nieve que se infiltra a través de las fallas geológicas, superando los 100 °C en profundidad. El olor a ‘huevo duro’, que ocasionalmente se siente en las termas, se debe a la presencia de ácido sulfhídrico (H₂S), compuesto que se genera en profundidad. El proyecto comprende un sistema geotermal de cultivo y secado de alimentos. Corresponde al primer invernadero calefaccionado con agua termal en Chile (Figura 21), dado que Liquiñe posee una gran cantidad de termas y bajas temperaturas invernales. Esto último imposibilita la producción de hortalizas en dicha época, mermando así la autonomía alimentaria de la comunidad local. Utilizando directamente agua termal, se ha calefaccionado este invernadero y un secador de frutos. Con una inversión inicial de \$18 millones de pesos, el proyecto busca promover la innovación agrícola al obtener productos agrícolas de manera limpia y sustentable, permitiendo una producción agrícola ininterrumpida incluso en

invierno. Sin duda, es un aporte a la autonomía alimentaria de las comunidades locales. El modelo de negocios busca producir hortalizas durante todo el año y comercializar los productos a los visitantes de las termas Hipólito Muñoz, así como establecer nuevas redes de comercialización local. La producción estimada en 70 m² de invernadero calefaccionado con uso directo es de 3.750 lechugas y 4.200 atados de cilantro al año. El secador tiene una capacidad de disminuir productos húmedos por cada 7 kg a 1,5 kg en seco (CEGA, 2021).

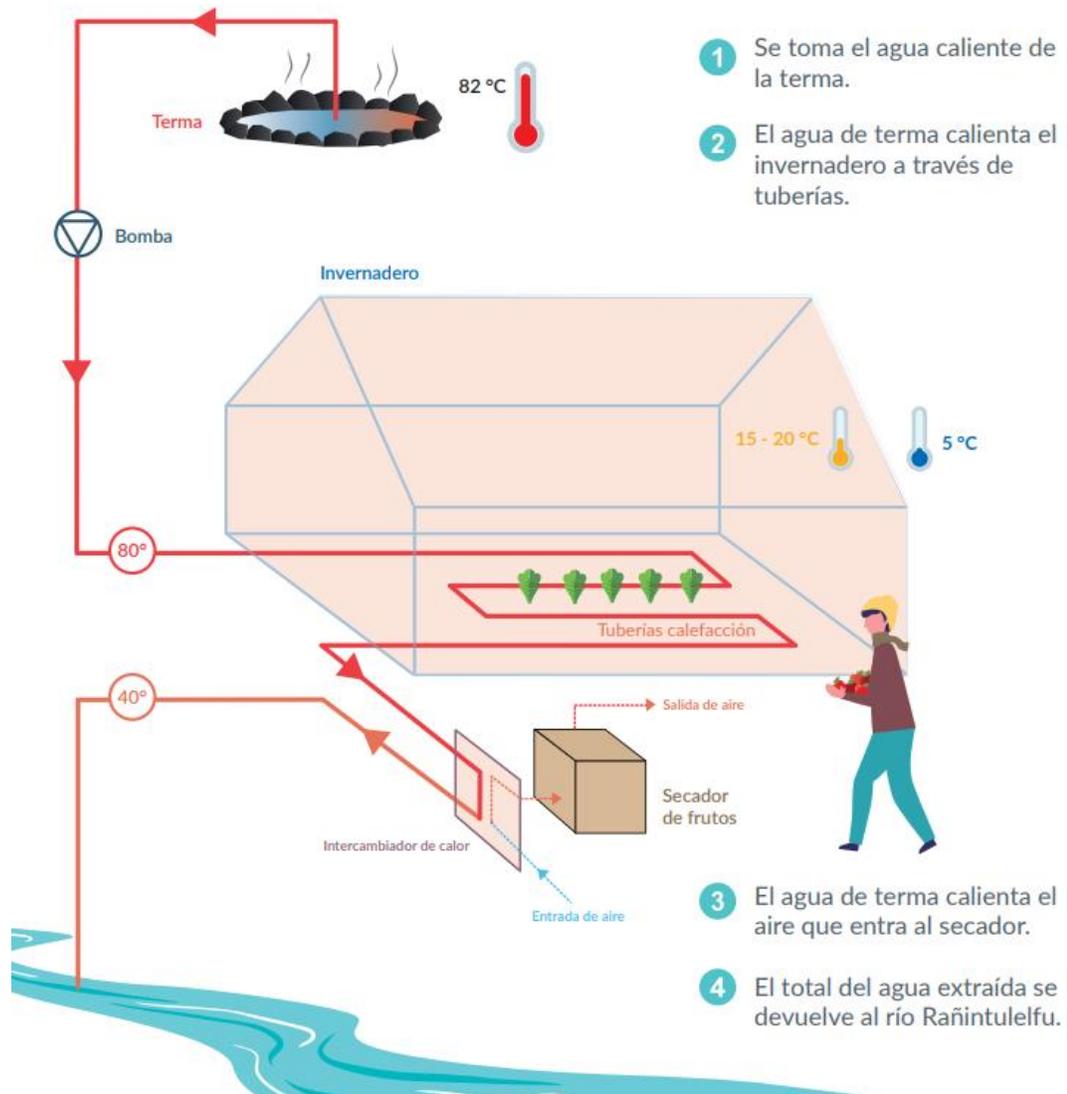


Figura 21. Descripción del uso del agua termal en un invernadero en Liquiñe. Fuente: CEGA, 2021.

Liquen Austral

Esta empresa chilena ubicada en Valdivia fue creada en 2018 y se dedica a la producción de biofertilizantes para la agricultura regenerativa. Con la colaboración del CEGA, del Gobierno Regional de Los Ríos y de la Municipalidad de Máfil, Liquen Austral ha implementado un invernadero calefaccionado con un sistema geotérmico con colector cerrado para la producción de plantines en Máfil (Proyecto BIP 40026345-0, Centro de Innovación Colaborativo Máfil). Con una duración de 24 meses a partir de enero de 2021, el proyecto busca aminorar la brecha detectada en cuanto a la escasez de oferta de plantines en la comuna de Máfil (PRODESAL Máfil, 2020) y por otro lado favorecer la migración de población cesante a actividades primarias, como la agricultura. Esta iniciativa busca la reactivación económica localizada en la comuna de Máfil, provincia de Valdivia con una inversión inicial de 41,8 millones de pesos. Esto se realizará apuntando a la base de la cadena de valor correspondiente a la oferta de plantines de vegetales de hoja verde. La captación geotérmica se llevará a cabo mediante un colector horizontal cerrado de 1.250 m², utilizando una BCG de 22 kW y un estanque de acumulación. La distribución del calor se realizará mediante la disposición de 3 ventilos convectores (*fan coils*). La cámara plantinera tendrá una superficie de 140 m² y permitirá almacenar 337 bandejas almacigueras por ciclo. Según una evaluación económica preliminar el costo de operación anual será de unos \$12,7 millones de pesos y el retorno esperado será de entre \$20,2 y \$32,3 millones de pesos (CEGA, 2021). El desglose de costos se puede apreciar en la Cuadro 1 y la planificación de ejecución del proyecto aparece en la Cuadro 2.

Cuadro 1. Costos operacionales anuales de la cámara plantinera geotermal Liquen Austral.

Ítem	Costo anual
Mano de obra (2 personas part-time)	\$6.000.000
Insumos	\$3.600.000
Electricidad	\$2.900.000
Mantenimiento	\$300.000
Total	\$12.700.000

(Fuente: elaboración propia en base a proyecto BIP 40026345-0, Centro de Innovación Colaborativo Máfil)

Cuadro 2. Cronograma de actividades de implementación proyecto..

Actividad	Fecha
Puesta en marcha de cámara plantinera	Septiembre 2021
Implementación modelo de negocios	Octubre 2021 – Noviembre 2021
Transferencia tecnológica del sistema productivo	Noviembre 2021- Diciembre 2022
Transferencia del modelo de negocios asociado	Noviembre 2021- Diciembre 2022
Monitoreo a plan de reactivación para la elaboración de hoja de ruta	Mayo 2021 – Diciembre 2022
Seminario finalización proyecto	Diciembre 2022

(Fuente: elaboración propia en base a proyecto BIP 40026345-0, Centro de Innovación Colaborativo Máfil)

El potencial productivo del invernadero prototipo de 140 m² para el cultivo es de 43.136 plantines por ciclo productivo (337 bandejas plantineras por ciclo) y de 517.632 plantines al año. Tal como se describe en la Figura 22, para su funcionamiento se hace circular un fluido a través de un colector cerrado plástico, a 2 metros bajo tierra, que capta energía térmica del subsuelo. El fluido ingresa a la BCG y la energía descrita en (1) es utilizada para evaporar un refrigerante y calentarlo hasta los 50°C. Este gas de (2) cede toda la temperatura ganada por compresión (vuelve a estado líquido), calentando un fluido a 40°C que es distribuido al interior del invernadero a través de *fan coils*, alcanzando aproximadamente 18°C. El fluido vuelve al colector a menor temperatura y se inicia nuevamente el proceso de captación del calor desde el subsuelo (CEGA, 2022).

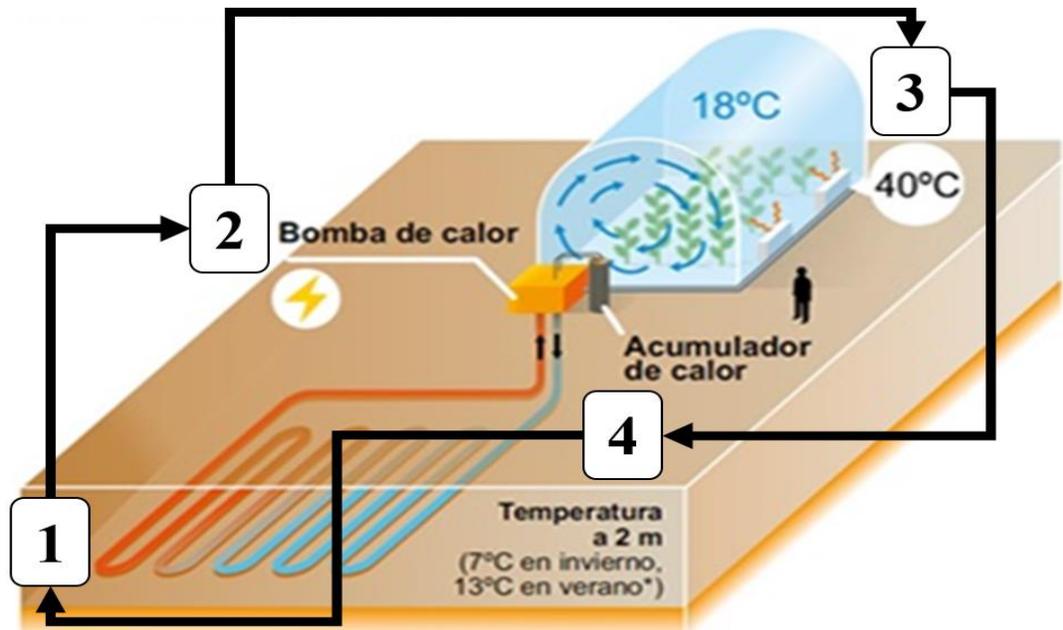


Figura 22. Diagrama de funcionamiento del sistema geotérmico con colector cerrado. Fuente: CEGA, 2022.

COMPARACIÓN Y PROYECCIÓN DE LA CAPACIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN GEOTERMAL PARA INVERNADEROS EN CHILE Y PAÍSES BAJOS

Análisis de brechas

Chile y Países Bajos han logrado desarrollar en diferentes magnitudes la energía geotérmica. La identificación de brechas técnicas y económicas se ha realizado en base a una metodología de análisis de brechas comparativas entre estos dos países.

Escenario nacional actual

En Chile, las aplicaciones se han enfocado hasta ahora en calefacción de espacios reducidos (edificios residenciales, escuelas, centros de salud y oficinas). También, gracias al esfuerzo de instituciones de carácter público/privado, se ha logrado impulsar el desarrollo inicial para la implementación de invernaderos de producción hortícola en el sur del país. Sin embargo, el alcance técnico aún no es sustancial. Para el desarrollo de la geotermia en profundidad se requiere de esfuerzos mancomunados de parte del gobierno con tal de que se logre impulsar la explotación de energía geotérmica de alta entalpía, no sólo para la producción de energía (como es el caso de Cerro Pabellón, en la Región de Antofagasta, por parte de ENEL) sino también para el uso directo tal como se ha descrito en el presente estudio (Mesa de Geotermia, 2018).

Por otra parte, a través del apoyo del gobierno de Países Bajos se han constituido cooperativas de desarrollo hortícola a base de geotermia. La más importante de estas organizaciones es “Geothermie Nederland”, la cual ha fusionado a las organizaciones existentes “Platform Geothermie” (2002) y DAGO (2014) en esta nueva organización comprometida con el desarrollo y la operación de proyectos geotérmicos. Geothermie Nederland es, por tanto, la nueva organización sectorial de energía geotérmica que comenzó en 2021 y que une a todas las empresas y organizaciones con intereses comerciales en el sector geotérmico, agrupando todo el conocimiento sobre la energía geotérmica en Países Bajos, lo que es de gran importancia para la agricultura y para la transición energética. La asociación cuenta con más de un centenar miembros. Otras cooperativas que forman parte del sector geotérmico también pueden convertirse en miembros puesto que es de carácter abierto. De esta manera, pueden obtener conocimiento y experiencia práctica de primera mano y participar en debates sobre los desafíos que enfrenta el sector. Los próximos años serán cruciales para el desarrollo de la energía geotérmica en los Países Bajos y las expectativas son mayores que nunca. Además, se imponen altas exigencias a la seguridad y la comunicación con el medio ambiente. De esta manera, denota la prioridad del gobierno en llevar esta tecnología como principal fuente energética para cada uso, poniendo a disposición una gran infraestructura institucional y académica para el cumplimiento de los

objetivos productivos, económicos, sociales y ambientales de los Países Bajos (Geothermie Nederland, 2021).

La diferencia de desarrollo entre ambos países es más preponderante en relación con la organización de diferentes actores que muestran interés a la hora de explotar dicha fuente, y no tanto del potencial de explotación de la misma. Es decir, Países Bajos ha podido lograr un avance sustancial en menos de 20 años, gracias a un desarrollo continuo de la tecnología necesaria. Basta considerar la tecnología disponible para mapear y cuantificar el recurso geotérmico en sistemas de información geográfica y la inversión destinada a esta labor. Mientras tanto, en Chile este desarrollo visto en otros países sirve como modelo robusto y constituye una hoja de ruta clara en el avance de implementación de una nueva matriz energética tanto para el sector primario, secundario y terciario de producción. Recientemente se ha logrado mapear el potencial de exploración y explotación del recurso de manera general. Por otro lado, ambos países poseen experiencia en el desarrollo agrícola, necesaria para la implementación de sistemas productivos eficientes utilizando invernaderos calefaccionados, los que brindan las condiciones propicias para el crecimiento de hortalizas y flores.

Objetivos a futuro

Chile puede emular la cultura organizacional de Países Bajos, en la búsqueda de nuevos acuerdos que den un impulso inicial en el área agrícola para la implementación de manejos tanto intensivos como extensivos en el desarrollo de la agricultura local dado que, el uso que se ha dado tanto en Países Bajos así como en Chile es reciente, y que el potencial de implementación crece tanto en función de la capacidad de explotación en áreas cercanas a lugares de interés, así como del desarrollo de políticas que involucren un uso eficiente de la energía, sobre todo si esta proviene de una fuente renovable como lo es la geotermia. Dado lo anterior, el objetivo de Chile es posicionarse como líder en energías renovables no convencionales (ERNC) y dar a la geotermia un uso tanto directo para la agroindustria o en la generación de electricidad a través de la proyección e inversión de más de US\$ 400 millones entre 2018 y 2030 (Ministerio de Energía - Chile, 2018).

Identificación de brechas

La proyección en la implementación de la energía geotérmica en Chile puede estar ligada tanto al sector industrial, servicios, residencial, así como a la agricultura. Dentro de este último, además de las aplicaciones para invernaderos, también pueden implementar en prácticas que requieren energía tales como el riego o el funcionamiento de maquinaria que puede migrar hacia la electromovilidad. Muchas instalaciones agropecuarias requieren de energía eléctrica, calor y/o climatización para su funcionamiento. Dentro de la agroindustria se podrían implementar aplicaciones y procesos en base a energía geotérmica. En tanto en Países Bajos, el desarrollo geotérmico se ha potenciado a través del uso en invernaderos, generando un mercado de más de 3,5 mil millones de euros y otorgando una denominación de origen en cuanto al sistema productivo de calidad y responsable con el ambiente (Dutchhorticulture, 2022).

La principal brecha económica entre Chile y Países Bajos es el alcance económico que tiene el mercado agropecuario. En 2018, en Países Bajos, 3.500 empresas concentran el 75% de la producción hortícola general en invernadero sumó en un área de 9.324 hectáreas cosechas por 1,7 mil millones de kilogramos además de unos 900 millones de kilogramos de tomates aumentando así un 12% la producción en los últimos 10 años (Holland Horti International, 2018). Sus productos más conocidos son flores, quesos, tomates, verduras, hortalizas y cervezas. Su mercado de flores es un gigante de 7,1 mil millones de euros (Dutchhorticulture, 2022).

Por otro lado, y según la información disponible, Chile en el año 2020 cultivó 86.751 hectáreas de hortalizas contabilizadas (ODEPA, 2020) con una estimación productiva de más 1,6 mil millones de toneladas de hortalizas en 2020, comercializadas en los diferentes mercados internos, de acuerdo al registro de series históricas, utilizando agricultura convencional (ODEPA, 2022). No se cuenta con información actual disponible de superficie de cultivo en invernaderos en el país, por lo que se considera lo informado en el Censo agropecuario 2007, con un 2% de la superficie total de hortalizas con este fin (Ruiz *et al.*, 2020).

Esta diferencia de manejo de información y magnitud se debe principalmente al control productivo y trazabilidad de capacidad productiva en invernadero utilizando geotermia de baja y alta entalpía en Países Bajos, logrando rendimientos muy superiores y optimizando el espacio de cultivo en esquemas intensivos y de arquitectura vertical en las especies mencionadas anteriormente.

Análisis FODA

En relación a las ventajas de implementación de la geotermia en Chile, se tienen en primer lugar la transferencia de conocimiento desde centros basales de investigación y empresas del rubro, no sólo desde países que ya han desarrollado e implementado en gran medida la tecnología, sino que desde instituciones nacionales como universidades, asociaciones, ministerios y actores fundamentales del sector energético, reunidos en instancias como el consejo geotérmico, impulsado desde el gobierno y que, permite reunir y establecer las variables técnico económicas para la proyección de la geotermia como una fuente energética alternativa de gran capacidad tanto para la agricultura, como para otros usos. Esto es factible hoy en día, se han levantado diagnósticos y evaluaciones de los recursos disponibles y se han logrado proyecciones económicas tanto en escenarios favorables y desfavorables, en la identificación de economías de escala para la implementación de la geotermia. Además de lo anterior, existen hoy en Chile demostraciones de innovación que permiten vislumbrar la apertura de nuevos mercados hortícolas o florícolas, o bien impulsar a otros niveles los ya existentes, todo en base al acceso de energía limpia geotérmica.

Cuadro 5. Matriz FODA desarrollo geotérmico para la producción hortícola y florícola en Chile.

Criterio	Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
Potencial geotérmico	Chile se halla inserto en el cinturón de fuego del pacífico por lo que posee gran potencial comprobado por sondajes de parte del CEGA.	A través de la exploración por parte de los centros de investigación se ha logrado dar con un gran potencial de explotación. El Consejo geotérmico ha puesto sobre la mesa la hoja de ruta a seguir.	Se requieren de perforaciones profundas y ultra profundas (>2.500 m) para maximizar el aprovechamiento dada la tecnología actual, en Chile sólo se tiene la experiencia de Cerro Pabellón.	Las fuentes convencionales de energía ya están muy enraizadas en los procesos productivos y el diseño de estos están usualmente basado en las soluciones más ampliamente probadas.
Capacidad de explotación	Chile posee capacidad de explotación dados los escenarios de	Aplicación de soluciones para mitigación de gases de efecto invernadero en	Las tecnologías implicadas en el desarrollo de proyectos	El desconocimiento generalizado por parte de la industria con

Criterio	Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
	proyección anteriores.	la zona norte, centro y sur del país.	de geotermia pueden ser económicamente poco atractivas y competitivas en función de las características de la operación en que se inserten.	respecto de la tecnología y la resistencia organizacional al cambio puede desincentivar el uso de la geotermia como una tecnología nueva y riesgosa.
Institucionalidad vigente	Existe el interés desde el gobierno e instituciones estatales y privadas, centros de investigación y universidades, en replicar este tipo de iniciativas para el desarrollo productivo del país.	Las instituciones prevén un importante incremento de explotación de energías renovables no convencionales (ERNC) como la geotermia, en la matriz energética y productiva del país.	Aún no se logra de manera total y potente el apoyo de más instituciones y empresas en el sector agrícola sobretodo. La agricultura convencional aún no decide migrar sus sistemas productivos de precisión.	Abandono por parte de actores importantes en cuanto existan otras oportunidades de inversión más atractivas para ellos en materia económica.
Financiamiento	Existen fondos concursables para financiar proyectos de pequeña escala (FIA, Sercotec, etc). La banca puede financiar proyectos siempre y cuando exista un mercado seguro y no tan	Posibilidad de desarrollo de créditos y fondos para proyectos de uso y adquisición de equipos de uso directo de geotermia y ERNC, en acompañamiento con iniciativas	Dificultad de financiamiento de alta inversión de los sistemas. Falta una estructura real de financiamiento de proyectos por terceros.	Falta de instrumentos de financiamiento a raíz de la desconfianza en tecnologías “nuevas” o con poca aplicación en el país.

Criterio	Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
	riesgoso.	gubernamentales para proyectos agrícolas.		
Mercado hortícola y florícola	Potenciamiento de los actores regionales y la industria productiva de flores y hortalizas fuera de la RM, debido al potencial elevado en la zona centro sur del país.	Se han identificado múltiples mercados en los que la viabilidad de los sistemas puede ser muy alta para la explotación del recurso en las diversas industrias productivas del país.	Tamaño muy pequeño del mercado como para incentivar la entrada de nuevos actores.	Economías de escala no son aplicables a las perforaciones.

CONCLUSIONES

En relación con los objetivos planteados, y para establecer un análisis comparativo actual de los proyectos geotérmicos en Países Bajos y Chile, se debieron identificar las brechas para definir una alternativa económica en el desarrollo del sector agrícola del país, detectar ventajas de su incorporación en la operación del sistema eléctrico e identificar posibles medidas para conseguir una mayor utilización de esta fuente de energía. En consecuencia, la investigación concluye que, el uso de geotermia para calefaccionar invernaderos es una alternativa viable en comparación al uso de combustibles fósiles para el mismo fin, siempre y cuando el desarrollo agrícola vaya de la mano del desarrollo de la matriz energética que lo sostenga. Es decir que, para el éxito en la implementación de la geotermia como motor productivo a gran escala en el sector hortícola y florícola chileno, se debe avanzar en la implementación de proyectos de inversión en el sector energético basado en energías renovables, en específico geotermia de profundidad (baja y alta entalpía).

Los sistemas de calefacción geotérmicos para invernaderos utilizados en Países Bajos poseen gran capacidad y desarrollo tecnológico. De hecho, este país ha invertido en perforaciones ultra profundas para alcanzar altos volúmenes de producción en invernaderos de punta y realizando mejoras consecutivas tanto en la capacitación de su personal en la ejecución de infraestructura, así como en innovaciones tecnológicas complementarias para este fin.

Por otro lado, Chile ha logrado dar inicio a investigaciones exitosas de exploración para la explotación de sistemas geotérmicos tanto de baja y de alta entalpía, por lo que existe un interés real de desarrollar aplicaciones en diversas áreas denotando los sistemas de calefacción geotérmica para invernaderos, lo que permitiría mejorar las condiciones de cultivo en zonas australes (Región de los Ríos hasta Aysén). Sin embargo, este uso es aún muy limitado, siendo que el potencial de explotación nacional es mucho mayor.

Las desventajas presentes en el análisis tienen que ver con la imposibilidad de realización de proyectos de gran escala sin una hoja de ruta potente en la que se sigan incorporando más actores de todos los frentes y que tenga como objetivo alternativo la descarbonización de la matriz energética chilena. De lo anterior, para la utilización de fuentes energéticas que utilicen geotermia de alta entalpía para la producción de electricidad y calor de uso directo para impulsar la agroindustria a niveles similares a los estudiados en Países Bajos se requiere de un desarrollo inercial por parte del estado. Por otro lado, muchas iniciativas de todo ámbito han sido pospuestas dado a la crisis sanitaria (Covid-19), sin embargo, se espera que se retomen y ganen fuerza en materia de inversión y estabilización de los mercados, todo esto por el alza de precios de insumos en todo orden o para cualquier aplicación, sobre todo en el sector de la construcción.

Por último, en relación a la proyección real de la capacidad de implementación de este recurso en invernaderos en Chile y Países Bajos, existe una brecha importante tanto pública como privada. Por un lado, dado que en Chile aún prima la producción frutícola de exportación por sobre la hortícola o de flores, además de que, la matriz energética

predominante en base a combustibles fósiles representa el 68% del total, no permite un avance importante en geotermia. Aún se requiere de un esfuerzo importante para lograr una consolidación real de este medio de consumo energético, por lo que se sugiere dar prioridad en políticas públicas que permitan lograr este cometido.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña, R. (2017). Consideraciones técnicas para el uso de invernaderos en épocas estivales en el Sur de Chile: Manejo de temperatura y radiación. Diario UACH. Recuperado de: <https://diario.uach.cl/consideraciones-tnicas-para-el-uso-de-invernaderos-en-pocas-estivales-en-el-sur-de-chile-manejo-de-temperatura-y-radiacin/> .

Agrimed. (2017). Atlas Agroclimático de Chile. Tomo 5: Región de Los Ríos y Los Lagos. Recuperado de: <http://oym.cl/clientes/reguemos-1/pdf/Atlas-Agroclima%CC%81tico-Tomo-5.pdf> .

AgroEnergy Kanaal. (2013, Abril). AgroEnergy in reportage EenVandaag - Samen met Ammerlaan The Green Innovator. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=ofC_DB_tr0w .

Aravena, D.; Muñoz, M.; Morata, D.; Lahsen; A.; Parada, M.A.; Dobson, P. (2015). Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile. Geothermics ELSEVIER. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137712/Assessment-of-high-enthalpy-geothermal-resources.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .

Bakema, G., Provoost, M., Schoof, F. (2020). Netherlands Country Update, Proceedings, World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, (2020), 11 p.

Benítez, S. 2011. Estudio De Las Aplicaciones De La Energía Geotérmica En España. Caso Práctico Para Climatización De Una Vivienda Unifamiliar. [Memoria de Pregrado. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica. Universidad Carlos III de Madrid]. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/30044756.pdf> .

CEGA. (2013). Video: Usos directos de la geotermia. Recuperado de: https://vimeo.com/51264349?embedded=true&source=vimeo_logo&owner=1042350

CEGA. (2021). Infografía: Las termas del sector de Liquiñe. Recuperado de: <http://www.cega-uchile.cl/wp-content/uploads/2021/06/INFOGRAFIAS-LIQUI%C3%91E.pdf>

CEGA. (2022). Infografía: *Máfil, Este invernadero utiliza geotermia para el cultivo de plantines.* Recuperado de: <http://www.cega-uchile.cl/informacion-sobre-geotermia/#material-de-divulgacion>

Dickson, M.; Fanelli M. (2003). Geothermal Energy: Utilization and Technology. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization,

Dirección de Prensa Presidencia. (2018). Presidente Piñera visita Planta Arauco. Recuperado de: <https://prensa.presidencia.cl/discurso.aspx?id=79747> .

Dutchhorticulture. (2022). Hechos y Cifras. Recuperado de: <https://www.dutchhorticulture.nl/en/facts-and-figures>

FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. (2021). Versión resumida de El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2021. Transformación de los sistemas alimentarios en aras de la seguridad alimentaria, una mejor nutrición y dietas asequibles y saludables para todos. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb5409es>

FIA. (2016). Agenda de innovación agraria territorial de la región de los Ríos. 82 p. Ministerio de Agricultura. Recuperado de: <http://www.fia.cl/download/estudios-fia/innovacion-agraria-territorial/Agenda%20Los%20R%C3%ADos.pdf> .

FIA. (2017). Invernadero calefaccionado para producción temprana de hortalizas en Coyhaique. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.fia.cl/bitstream/handle/20.500.11944/146000/131Invernaderos.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .

Floricultura. (2022, Marzo). *Responsabilidad social empresarial en el mercado de orchidaceae y araceae*. <https://www.floricultura.com/> .

Greenport NHN, (2018). “El proyecto geotérmico reduce significativamente las emisiones de CO₂ de los horticultores de Andijk”. Recuperado de: https://www.greenportnhn.nl/nieuws/aardwarmteproject-vermindert-co2-uitstoot-tuinders-rond-andijk-aanzienlijk?_ga=2.250994310.1634581553.1637186106-30046629.1637186106 .

Harfagard, S. (2016). Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile. Ministerio de Energía de Chile en conjunto con Aiguasol. Recuperado en: <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/626>

Horti Holland International. (2018). Holland: your partner in feeding and greening the cities. Recuperado en: https://company.greentech.nl/Image/Download?docid=63661&dl=MIJNRAI_TOP_LIBRARY<c=MIJNRAI_LOGIN_PRIVATEFILE

Hoogweg Paprikakwekerijen. (2022, Marzo). *Actividades de energía geotérmica en Hoogweg*. <https://www.hoogweg.nl/nl/duurzaam-telen/geothermie> .

Hurtado, N. (2017). Evaluación del uso de bombas de calor geotérmicas en invernaderos. [Memoria pregrado. 101 p. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile.]

- Ruiz, R.; Martínez, J. 2020. Los Invernaderos en la Agricultura Familiar Campesina. Informativo N° 156, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Recuperado de : <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/67459/NR42496.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lahsen, A.; Muñoz, N.; Parada, M.A. (2010). Geothermal development in Chile. In: World Geothermal Congress, Bali, pp. 25–29.
- Llopis, G; Rodrigo, A. (2008). Guía de la energía geotérmica. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid.
- Lund, J. (2010). “Direct utilization of geothermal energy,” *Energies*, vol. 3, n°.8, pp: 1443-1471.
- Lund, J; N. Toth A. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, April - October 2021. Recuperado en: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf>
- Martini, S. (2008). Sistemas Estructurales y Recursos Geotermiales en la Cordillera Principal de Chile Central. (32°30' - 34°00' de Latitud Sur). Memoria para optar al grado de Geólogo. Departamento de Geología, FCFM, Universidad de Chile. Recuperado en: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103085/martini_s.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Ministerio de Energía. (2016). Estado de Desarrollo de Proyectos de Bombas de Calor Geotérmicas Instalados en Chile. Informe Final CIFES, Versión 3.3. Recuperado de: https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/33191/MINENERGIA_2016_Estado_Development_Proyectos_Bombas_Calor_Geotermicos_Instalados_Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ministerio de Energía. (2018). Presentación Consejo Geotérmico. Recuperado en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/20180925_presentacion_consejo_geotermico_-_sesion_5.pdf
- MMA. (2017). Plan de adaptación al cambio climático del sector silvoagropecuario. Chile. Recuperado de: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/02/Plan-Nacional-Adaptacion-Cambio-Climatico-version-final.pdf> .
- Mesa de Geotermia. (2018). Rol De La Geotermia En El Desarrollo De La Matriz Eléctrica Chilena. Ministerio de Energía. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe-final-mesa-geotermia.pdf> .
- Morata, D; Aravena, D; Lahsen, A; Muñoz, M; Valdenegro, P. (2021). Chile Up-Date: The First South American Geothermal Power Plant After One Century of Exploration. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/356218147_Chile_Up-Date_The_First_South_American_Geothermal_Power_Plant_After_One_Century_of_Exploration.

Muñoz, M. (2018). [Memoria de Magíster] Bomba De Calor Geotérmica Con Intercambiadores De Calor Verticales Cerrados En Coyhaique. Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento De Geología. Universidad De Chile.

Navarro, I. (2017). La agricultura holandesa como modelo a seguir en el desarrollo agrario. TFM con perfil de inicio a la investigación. Recuperado de: http://espacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-CEE-SyRSC-Inavarro/Navarro_Garcia_Ignacio_TFM.pdf .

NH Nieuws. (2018, Abril). “Orchideeënkwekerij Floricultura draait volledig op aardwarmte”. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=Ncluv8XvZKo> .

NLOG. (2022). Portal Holandés de petróleo y gas. Información sobre exploración y producción de energía. Ministerio de asuntos económicos y clima. Países Bajos. Recuperado de: <https://www.nlog.nl/kaart-boringen>

ODEPA. (2020). Estadísticas Productivas. Recuperado en: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2022/03/Hortalizas-Cuadro-de-resultados-ESH2021.xlsx>

ODEPA. (2022). Series históricas (diarias, semanales y mensuales) de precios y volúmenes de frutas y hortalizas. Recuperado en: https://reportes.odepa.gob.cl/#/series-historicas-fruta-hortaliza?utm_source=web&utm_medium=clic&utm_campaign=consultasBBDD&utm_term=2019&utm_content=historicas

Red Harvest. (2022, Marzo). *Sustentabilidad Red Harvest*. Recuperado de: <https://www.redharvest.nl/en/red-harvest#sales> .

Saavedra, G. (2017). Manual de producción de lechuga. p. 27. Instituto de Desarrollo Agropecuario. INIA.

Saldivia, M. (2018). Análisis de legislación comparada sobre energía geotérmica. Centro de Excelencia en Geotermia Los Andes (CEGA). Recuperado de: http://www.cega-uchile.cl/wp-content/uploads/2019/03/Analisis_LegislacionCEGA_2503.pdf.

Sánchez-Alfaro, P.; Sielfeld, G.; Dobson, P.; Van Campen, B.; Fuentes, V.; Reed, A.; Palma-Behnke, R. and Morata, D. (2015). Geothermal barriers, policies and economics in Chile – Lessons for the Andes. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.001.

SERNAGEOMIN, S. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, (4).

ThermoGIS. (2022). Mapeo de Energía Geotérmica. TNO Organización Holandesa para la Investigación Científica Aplicada. Recuperado de <https://www.thermogis.nl/mapviewer>.

APÉNDICE 1

Encuesta/entrevista semi estructurada a productores que utilizan geotermia para invernaderos

Correo de contacto

Estimados,

Junto con saludar, y esperando que se encuentren bien. Mi nombre es Flavio Salazar, estudiante de pregrado de la Universidad de Chile y me encuentro realizando un estudio para mi memoria de título para Ingeniero Agrónomo. Mi tema trata del análisis de uso de invernaderos geotérmicos para la producción agrícola en horticultura y floricultura en Chile, así como en Países Bajos. Mi investigación contempla una encuesta simple para analizar y comparar la realidad tanto de mi país como el vuestro. Para lo cual, solicito por favor considerar el siguiente requerimiento para responder una breve encuesta semi estructurada que me permita basar mis datos obtenidos desde la fuente principal, en este caso de vuestra empresa. Agradezco la buena disposición y les deseo éxito en lo venidero tanto para ustedes así como para su empresa.

Saludos cordiales,

Datos de contacto

El correo con la entrevista/encuesta fue enviado a las siguientes empresas/correos:

Hoogweg (Países Bajos) / administratie@hoogweg.nl

Ammerlan (Países Bajos) / info@ammerlaan-tgi.nl

Red Harvest (Países Bajos) / info@redharvest.nl

Floricultura (Países Bajos) / info@floricultura.nl

Liquen Austral (Chile) / contacto@liquenaustral.cl;

Viveros Sunnyridge (Chile) / sandra.gonzalez@sunnyridge.cl

Vivero Arauco Horcones (Chile) / esfuente@arauco.cl

CEGA (Chile) / emicco@cega.cl

**Encuesta estudio para memoria
Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Agronómicas
Departamento de Producción Agrícola
Av. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago de Chile**

I. Datos de empresa

- Nombre empresa:
- Nombre y cargo de la persona que responde:
- Correo electrónico:
- Teléfono:
- Año de creación de la empresa:
- Ubicación de la empresa:
- Productos asociados:
- Año de transición a geotermia:
- Tipo de uso de geotermia (uso directo de fuente termal, colector, perforación ultra profunda, otro):
- Superficie de invernadero (ha, m², otra unidad específica)
- Superficie calefaccionada con geotermia (ha, m², %)
- Total de producción en invernadero por producto (kg/año, otra unidad):
- Ahorro energético en uso de geotermia respecto al uso de fuente convencional (gas, pellet, leña, petróleo, electricidad, otra fuente) (US\$/año, %, otra unidad):
- Estimación de GEI (gases de efecto invernadero) NO EMITIDOS utilizando geotermia (Ton/año, otra unidad):

II. Sección preguntas abiertas

1. Descripción de instalaciones y de tecnología utilizada en invernadero (materiales, bombas de calor, tuberías, *fan coils*, etc.):
2. Costo estimado de implementación de geotermia para producción agrícola (US\$/ha, US\$/m², otra unidad):
3. Descripción de implementación del proyecto geotérmico para uso en su invernadero (tipo de instalación, sistema de riego, manejo sanitario, estimación de demanda de temperatura para producción según volumen del invernadero, producción esperada, etc.):
4. Asociación y participación con otros productores, fomento de parte del gobierno o

de otra institución de gestión (subsidio estatal, proyecto adjudicado, cooperativa de productores, etc.):

5. Otros comentarios y consideraciones:

Muchas gracias por su respuesta.