



POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

Setiembre 2022



POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA DE COSTA RICA

SUS COMENTARIOS SON BIENVENIDOS

Por favor dirija sus comentarios, observaciones o consultas a:

Eddy Sánchez Rivera ESanchezR@ice.go.cr

Leyner Chavarría Rojas LchavarriaR@ice.go.cr

Javier Romero Brenes Jromero@ice.go.cr

www.grupoice.com

ELABORACIÓN

Este documento fue elaborado por: Proceso Fuentes Geotérmicas y Proceso Gestión de Desempeño Operativo, División de Generación, Gerencia de Electricidad. Instituto Costarricense de Electricidad.

El estudio se realizó entre febrero 2021 y julio del 2022.

COORDINACIÓN

Energía y Desarrollo Eléctrico, Proceso Sostenibilidad, Dirección Planificación y Sostenibilidad, Gerencia de Electricidad. Instituto Costarricense de Electricidad.

REPRODUCCIÓN

Se autoriza la reproducción total o parcial este documento, bajo la condición de que se acredite la fuente.

PURTADA

Unidades de generación Miravalles I y II, rodeadas por la reserva forestal del ICE. Cada planta cuenta con una capacidad de 55 MWe y junto con Miravalles III y IV (ambas fuera de la foto) conforman las cuatro unidades de generación del Campo Geotérmico Alfredo Mainieri Protti. Dicho proyecto se ubica en la ladera sur del volcán Miravalles, cantón de Bagaces, provincia de Guanacaste.

Fotografía: Unidad de Información Georreferenciada, Fuentes Geotérmicas.

Contenido

RESUMEN 1

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Premisa	3
1.2	Equipo de trabajo	4
1.3	Periodo de ejecución	5
1.4	Área de estudio.....	5
1.5	Marco general y objetivo.....	5
1.6	Definiciones utilizadas en el presente documento.....	5
2	METODOLOGÍA.....	8
3	GRADO DE CONFIABILIDAD GENERAL DEL ESTUDIO	10
4	APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS EN COSTA RICA	11
4.1	Recursos geotérmicos con fines de generación eléctrica.....	14
4.1.1	Etapas para el aprovechamiento del recurso	17
4.2	Usos directos de los recursos geotérmicos	19
5	DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DISPONIBLES.....	21
6	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS	22
6.1	Distribución de temperatura a 2,5 y 3,0 km de profundidad	22
6.2	Caracterización de nacientes termales y su significado geotérmico	26
6.2.1	Estimaciones geotermométricas realizadas en el presente estudio	28
6.3	Categorización geotérmica	31
6.3.1	Antecedentes	31
6.3.2	Categorización geotérmica actualizada	32
6.3.3	Significado práctico de la categorización geotérmica (modificado de ICE, 1991).	36
6.3.4	Categorización geotérmica de Costa Rica y variables limitantes para el aprovechamiento del recurso	37
7	RESUMEN DE LAS INVESTIGACIONES DE CAMPO COMPLEMENTARIAS REALIZADAS DURANTE EL PRESENTE ESTUDIO	41
7.1	Introducción.....	41
7.2	Geología	43
7.3	Sensores remotos (VANT).....	45
7.4	Parámetros ambientales.....	46
7.5	Geofísica	47
7.6	Clasificación Marco de las Naciones Unidas para la energía fósil y los recursos y reservas minerales (CMNU-2009), aplicada a los recursos de energía geotérmica (UNECE, 2016).	48
7.7	Integración de resultados	50
8	CÁLCULOS PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL POTENCIAL GEOTERMOELÉCTRICO NACIONAL 51	
8.1	Introducción.....	51

8.2	Metodología.....	53
8.3	Estimación de la capacidad instalable a partir de las “reservas” y los “recursos” geotérmicos 55	
8.3.1	Capacidad instalable a partir de las “Reservas” geotérmicas.....	55
8.3.2	Capacidad instalable a partir de los “Recursos” geotérmicos	57
9	CONCLUSIONES.....	60
10	RECOMENDACIONES	62
11	BIBLIOGRAFÍA.....	63
12	APÉNDICES	66
12.1	Apéndice A: Fichas técnicas de las nacientes termales muestreadas	66
12.2	Apéndice B: Tabla de geotermómetros químicos	120
12.3	Apéndice C: Detalle de las investigaciones de campo realizadas en el presente estudio de actualización	122
12.4	Apéndice D: Criterios para la definición de las áreas mínima, más probable y máxima a 2,5 y 3,0 km de profundidad	163
12.5	Apéndice E: Estimaciones de la capacidad instalable de las diferentes áreas geotérmicas. 164	

Resumen

El requerimiento para la realización de un Estudio Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica fue planteado por la Dirección de Planificación y Sostenibilidad (previamente Dirección de Planificación y Desarrollo Eléctrico), de la Gerencia de Electricidad. Su objetivo es contar con información actualizada, requerida para el planteamiento de estrategias y toma de decisiones en materia de desarrollo eléctrico nacional.

Previo a este trabajo, el último estudio de Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica fue realizado en 1991. Durante este periodo de más de 30 años se ha generado un importante volumen de información, obtenida de los estudios realizados por el ICE durante la exploración, desarrollo y explotación de los campos geotérmicos Alfredo Mainieri Protti, Tenorio, Las Pailas y Borinquen, en la Cordillera Volcánica de Guanacaste.

El estudio está orientado a estimar el potencial con que cuenta el país, para la generación de electricidad a partir de fuentes geotérmicas con temperaturas superiores a 150°C.

Los datos disponibles para realizar este tipo de estimaciones (modelación) no se encuentran distribuidos de manera homogénea a lo largo del territorio nacional, lo anterior lleva a recurrir a inferencias e interpolaciones con base en los datos disponibles y considerando el entorno geológico-geotérmico. Por lo anterior, es importante indicar que los valores de potencial energético obtenidos, corresponden a estimaciones, las cuales podrían diferir de lo que se podría obtener en el futuro, una vez que se cuente con mayor cantidad de información geotérmica, en especial a partir de estudios geocientíficos detallados, perforación de pozos geotérmicos y caracterización del recurso profundo.

Considerando el volumen y la distribución de los datos utilizados en la estimación del potencial energético del país, se define el presente estudio con un nivel de confiabilidad moderado, lo cual es característico para estudios a este nivel.

El análisis de la información disponible permitió actualizar la división del País en Provincias y Áreas, de acuerdo a sus características geotérmicas (Categorización Geotérmica), adoptándose la misma nomenclatura utilizada por ICE (1991), lo cual facilita correlacionar ambos estudios.

Se realizaron las estimaciones de la capacidad instalable de las áreas geotérmicas más favorables para generar electricidad; Clase A1 (temperaturas mayores a 220°C) y Clase A2 (temperaturas de 150-220°C). Las estimaciones se efectuaron para los recursos ubicados hasta 2,5 km y 3,0 km de profundidad; esto acorde a las definiciones de “**Reservas**” y “**Recursos**”, respectivamente. En este proceso se utilizó el “método volumétrico”, descrito

en OLADE, 1994 b; el cual se basa en el cálculo de la energía contenida en un cierto volumen de roca.

Por su contexto geológico, los sectores del país con mayor favorabilidad geotérmica se encuentran asociados a las cordilleras volcánicas de: Guanacaste, Tilarán (volcán Arenal) y Central, estos sectores igualmente se caracterizan por su belleza natural con extensas zonas boscosas y la existencia de zonas protegidas. Por esta razón, los cálculos del potencial geotermoeléctrico nacional se realizaron bajo dos escenarios: uno al considerar la totalidad de las áreas de interés, según variables geológicas y otro excluyendo del análisis los sectores con restricciones de acceso (parques nacionales y reservas, humedales y zonas con amplio desarrollo urbano). Obteniéndose de esta manera la estimación total del recurso existente y la estimación del recurso accesible, bajo la legislación actual.

Los resultados obtenidos indican que las “**Reservas**” corresponden a un total de 1331 MWe para los sistemas geotérmicos mayores a 220°C y de 418 MWe para los de 150-220°C. En cuanto a los “**Recursos**”, se estima una capacidad total de 2277 MWe para los sistemas geotérmicos mayores a 220°C y de 1908 MWe para los de 150-220°C. Al excluir del análisis los sectores con restricciones de acceso, el potencial se reduce considerablemente: las “**Reservas**” se estiman en 614 MWe para los sistemas geotérmicos mayores 220°C y de 212 MWe para los de 150-220°C; en el caso de los “**Recursos**” se obtuvo un potencial de 1019 MWe para los sistemas mayores 220°C y de 1102 MWe para los de 150-220°C.

Gracias al impulso que se le ha dado a la energía geotérmica, desde mediados de la década de 1970, hoy día el ICE cuenta con una capacidad geotermoeléctrica instalada de 250 MWe, la cual aporta aproximadamente el 15% de la demanda nacional. Según las proyecciones actuales, en el año 2027 entrará en operación la planta geotérmica Borinque I, con lo cual el País aumentará a 305 MWe la capacidad total instalada.

Es importante acotar que la generación de electricidad por medio de la energía geotérmica trae beneficios al País; entre ellos: es un recurso autóctono, amigable con el ambiente, es una energía estable, no depende de factores climáticos y opera de manera continua la mayor parte del año. Adicionalmente, es un recurso sostenible en el tiempo, siempre y cuando se sigan adecuadas políticas de desarrollo y explotación.

1 Introducción

1.1 Premisa

El requerimiento para la realización del Estudio Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica fue planteado por la Dirección de Planificación y Sostenibilidad (previamente Dirección de Planificación y Desarrollo Eléctrico), de la Gerencia de Electricidad. El objetivo de este estudio es contar con información actualizada, requerida para el planteamiento de estrategias y toma de decisiones en materia de desarrollo eléctrico nacional.

Este requerimiento fue planteado a mediados del 2020 al entonces Proceso Recursos Geotérmicos del Negocio de Ingeniería y Construcción. Producto de los cambios derivados de la reestructuración en el ICE a raíz del proceso Evolución 2021, la responsabilidad de dicho estudio es asignada al Proceso Fuentes Geotérmicas y al Proceso Gestión del Desempeño Operativo, ambas dependencias de la División de Generación.

Previo al presente estudio de Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica, el último trabajo realizado con similares alcances fue en 1991. Durante este periodo de más de 30 años se ha generado un importante volumen de información, obtenida de los estudios realizados por el ICE durante la exploración, desarrollo y explotación de los campos geotérmicos Alfredo Mainieri Protti, Tenorio, lo cual es un valioso aporte para complementar y actualizar el potencial geotérmico del país.

Adicionalmente, entidades estatales como el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), la Universidad de Costa Rica (UCR), el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y el Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE), entre otras entidades, han generado en los últimos años un importante volumen de información cartográfica, geológica, ambiental y urbana, que constituye un valioso suplemento a la información antes indicada.

El presente estudio se desarrolló en el ámbito de los recursos con temperaturas iguales o superiores a 150°C, los cuales podrían ser utilizados con fines de generación eléctrica. Aunque no fueron contemplados los recursos con temperaturas menores a 150°C en la estimación del potencial, se hará una breve descripción de este tipo de recursos y de sus posibles aplicaciones.

Las estimaciones del potencial geotermoeléctrico nacional se realizaron en función de los **recursos** y las **reservas**, correspondientes a la energía que se podría aprovechar hasta los 2,5 y 3,0 km de profundidad, respectivamente. Para esto se utilizó el “método volumétrico”, descrito en OLADE, 1994 b; siendo probablemente el medio más utilizado en este tipo de estudio. Se basa en el cálculo de energía contenida en un cierto volumen de roca (“heat in place”, USGS).

Debido a que los datos disponibles para realizar este tipo de estimaciones (modelación) no se encuentran distribuidos de manera homogénea a lo largo del territorio nacional, como parte de la metodología, se requiere recurrir a inferencias e interpolaciones con base en los datos disponibles y considerando el entorno geológico-geotérmico. Por consiguiente, es importante indicar que los valores de potencial energético obtenidos, corresponden a estimaciones, las cuales podrían diferir significativamente de lo que se podría obtener en el futuro, una vez que se cuente con mayor cantidad de información geotérmica del subsuelo, en especial a partir de estudios geocientíficos detallados, perforación pozos geotérmicos y evaluación del recurso profundo.

1.2 Equipo de trabajo

Constituido por personal con amplia experiencia en la exploración, desarrollo y explotación de recursos geotérmicos; siendo especialistas en las ramas gestión integral de los recursos geotérmicos, geología, geoquímica, geofísica, gestión ambiental, gestión de información geográfica, control financiero y modelación numérica. El equipo de trabajo estuvo conformado por los siguientes profesionales:

Leyner Chavarría Rojas	Coordinador técnico, estudios geológicos y geoquímicos. Integración del informe final
Ányela Murillo Arroyo	Gestión de Información Georreferenciada y sensores remotos
Johan Valerio Pérez	Gestión Socio-ambiental
Dagoberto Herrera Cabezas	Estudios Geofísicos
Leonardo Solís Salguero	Estudios Geofísicos
Osvaldo Vallejos Ruiz	Modelación Numérica
Alberto Chaves Chacón	Gestión Clasificación Marco de Naciones Unidas
Obed Murillo Jiménez	Control y seguimiento recursos financieros
Eddy Sánchez Rivera	Coordinador general del Proyecto, revisión, corrección y aprobación
Javier Romero Brenes	Coordinador estudio, seguimiento por parte de Dirección Planificación y Sostenibilidad – Energía y Desarrollo Eléctrico

1.3 Periodo de ejecución

El estudio se desarrolló entre enero del 2021 y julio del 2022, correspondiendo a un tiempo de 560 días calendario, que incluyó la recopilación de la información disponible, creación de la base de datos, análisis de la información inicial y elaboración de plantas de distribución de la temperatura a 2,5 y 3,0 k de profundidad, taller interno para el análisis de la información recopilada, planificación y ejecución de estudios de campo, reuniones de seguimiento, procesamiento e interpretación de la información y elaboración del informe final.

1.4 Área de estudio

Corresponde con el territorio de la República de Costa Rica, con la exclusión de las zonas marítimas y las islas; por lo tanto corresponde a un área aproximada de 51 100 km².

1.5 Marco general y objetivo

En noviembre de 1991 el ICE concluyó el primer estudio de evaluación del Potencial Geotérmico de Costa Rica, el cual permitió establecer las zonas prioritarias para desarrollar este tipo de energía y su posible capacidad para generación de electricidad. Dicho documento ha sido una valiosa referencia para la planificación eléctrica del país; no obstante, han pasado ya 30 años y se hace necesario contar con una actualización que incorpore la nueva información disponible, en especial la obtenida durante la exploración, desarrollo y explotación de los campos geotérmicos Alfredo Mainieri Prott, Tenorio, Las Pailas y Borinquen; así como cualquier otra información disponible que sea de interés.

Por lo anterior, el objetivo general del presente estudio es actualizar el potencial que tiene Costa Rica para generar electricidad a partir de fuentes geotérmicas con temperaturas superiores a los 150°C.

Las estimaciones del potencial se realizaron bajo dos escenarios: unos al considerar aspectos puramente técnicos inherentes a la geotermia; y el otro al considerar, adicionalmente, aspectos técnicos y condiciones sociales y ambientales que limitan el aprovechamiento pleno del recurso; entre ellas: existencia de reservas indígenas, zonas forestales protegidas (parques nacionales, reservas, entre otros), humedales y áreas con amplio desarrollo urbano. De esta manera se contará con estimaciones más realistas de la cantidad de recurso que se podría aprovechar en el corto y mediano plazo.

1.6 Definiciones utilizadas en el presente documento

En términos generales, la terminología utilizada es la propuesta por Muffler & Cataldi (1978), misma que fue adoptada en el informe de Evaluación del Potencial Geotérmico de

Costa Rica, elaborado por ICE (1991). Además, se incluyen otras definiciones tomadas de las guías de OLADE-BID (1994); así como de otras fuentes.

Recurso geotérmico base:

Todo el calor almacenado en la corteza terrestre en un área determinada, referida a la temperatura media anual del área (Muffler & Cataldi, 1978).

Recurso accesible:

La definición general de Muffler & Cataldi (1978), indica que este incluye todo el calor almacenado en la corteza terrestre hasta la profundidad máxima alcanzable con los pozos de explotación.

Haciendo un balance entre la capacidad de perforación y los costos de la misma, se define en este estudio como *recurso accesible*, a la fracción del recurso geotérmico base almacenada dentro de la profundidad máxima de 3,0 km.

Recurso:

La fracción del *recurso accesible* que podría extraerse económica y legalmente dentro de un tiempo futuro que, para el presente estudio, se establece en 30 años.

Reserva:

La fracción del *recurso* que podría ser aprovechada y utilizada para aplicaciones prácticas en el presente o dentro de un lapso temporal relativamente pequeño.

Para efectos del presente estudio, se decide considerar como “*reserva*” a la energía que está asociada con reservorios ubicados a una profundidad menor a 2,5 km y que podría aprovecharse económicamente dentro de un lapso de más o menos 10 años.

Reconocimiento geotérmico:

Etapa de evaluación preliminar de los recursos geotérmicos susceptibles de ser aprovechados con fines de generación eléctrica o en otros usos en una región determinada, identificando o delimitando las áreas de mayor interés, para plantear, de manera concreta, las líneas de acción a seguir en la siguiente etapa de Prefactibilidad. (OLADE-BID, 1994 a).

Prefactibilidad geotérmica:

Etapa en la que se describirá la forma de continuar las investigaciones, con el fin de detallar la información que permita inferir con mayor certeza la existencia del yacimiento en el área de interés y preparar su verificación con pozos profundos, a perforar en la etapa de Factibilidad. OLADE-BID (1994 a).

Factibilidad geotérmica:

Esta etapa contempla la perforación exploratoria total de 3 a 6 pozos profundos. Los resultados y la información que se obtienen con la perforación, deben aportar alguna certidumbre con respecto a la existencia del recurso, tanto en el sector de explotación, como en de reinyección y con base a ésta enfocar el modelo (o estrategia) de desarrollo y de explotación del yacimiento. OLADE-BID (1994 c).

Desarrollo geotérmico:

Esta etapa es la culminación de los estudios y análisis contemplados en las etapas anteriores. Se basa primordialmente en la perforación de los pozos de producción y de reinyección requeridos por la unidad de generación a instalar; así como construcción de la infraestructura superficial del proyecto.

La cantidad de pozos, ubicación, orientación, profundidad aproximada y tipo de pozo (producción o reinyección), entre otros aspectos, se concibe en la “estrategia de desarrollo del yacimiento”, la cual deriva de la información del modelo geocientífico conceptual. Dicho modelo debe ser actualizado conforme se obtiene información de los nuevos pozos; ya que constituye la base para la toma de decisiones.

Explotación geotérmica:

Esta etapa debe ir estrechamente ligada con las etapas previas de Factibilidad y Desarrollo, ya que se requiere un amplio conocimiento del modelo conceptual del yacimiento para establecer las políticas tendientes a garantizar la estabilidad del sistema durante la vida útil establecida para el proyecto.

Ante una acertada caracterización y dimensionamiento del yacimiento, en conjunto con una adecuada estrategia de desarrollo, la sostenibilidad a largo plazo de un reservorio en explotación, depende de que las políticas de explotación logren alcanzar un estado de equilibrio extracción – recarga, estabilizar el sistema bajo una condición de disminución controlada de la presión y temperatura, además de controlar los efectos secundarios adversos derivados de la complejidad química de los fluidos.

Entalpía:

Magnitud termodinámica que se define como la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.

Modelo conceptual del yacimiento:

Es la conceptualización de las características físicas y químicas esenciales del sistema geotérmico, así como la manera en que esas variables se relacionan entre sí; a saber: ubicación y naturaleza fuente de calor; litología, extensión y profundidad del yacimiento; origen, composición y movimiento de los fluidos; patrones estructurales predominantes;

entre otros. Se representa de manera gráfica, a través de diagramas tridimensionales y bidimensionales (plantas y perfiles).

2 Metodología

El esquema general de trabajo abarcó dos etapas (Figura 1): en la primera se establecieron los objetivos y alcances del estudio, a partir de los cuales se definió el equipo de trabajo y la logística requerida. Dicha etapa incluyó la compilación y análisis de la información geotérmica disponible, dando énfasis a los documentos de:

- Evaluación del Potencial Geotérmico de Costa Rica, ICE (1991).
- Plan de Expansión para los Desarrollos Geotérmicos 2018 – 2030, ICE (2018).

Adicionalmente se consultaron otros documentos y bases de datos de índole geotérmica, geológica, geoquímica, geofísica, geográfica, ambiental, hidrogeológica y urbana con el fin de elaborar una base de datos digital (en un SIG), que permitiera de manera expedita y exacta la correlación de las diferentes fuentes de información.

La segunda etapa inició con un taller, donde el equipo de trabajo analizó la información recopilada en la base de datos; esto permitió definir sectores de interés geotérmico para la realización de estudios de campo de índole geológico, geoquímico, geofísico y ambiental. Lo anterior con el objetivo de complementar la información existente y tener un panorama geotérmico más amplio, en especial en algunos sectores de la Cordillera Volcánica Central.

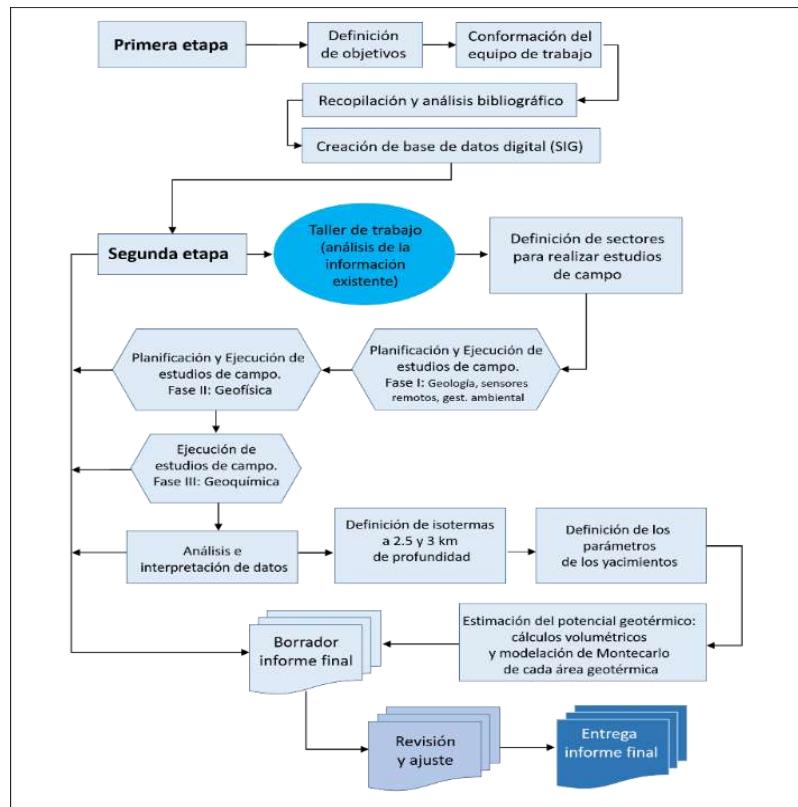


Figura 1. Esquema de trabajo utilizado en el presente estudio.

Como tarea inicial para realizar la actualización del potencial geotérmico, se estimó la distribución de la temperatura (isotermas) a las profundidades de 2,5 y 3,0 km, tomando como punto de partida la distribución de temperatura realizada por ICE (1991) y se incorporó en el análisis la nueva información térmica obtenida de la exploración, desarrollo y explotación de los campos geotérmicos Alfredo Mainieri Protti, Las Pailas y Borinque; así como la derivada de estudios geotérmicos básicos realizados en otros sectores del país.

La integración de la información permitió modelar los contornos de temperaturas superiores a 150°C a las profundidades indicadas, debiendo recurrir en este proceso a interpretaciones y extrapolaciones de datos en los sectores que carecen o es muy limitada la información térmica del subsuelo.

Asimismo, los contornos de las isoterma a 2,5 y 3,0 km de profundidad, se utilizaron como insumo para zonificar los recursos superiores a 150°C y dividir el país en diecisésis áreas de acuerdo a su vocación geotérmica (categorización geotérmica).

A partir de las áreas obtenidas en la categorización geotérmica, sumado a otros datos geocientíficos y con base en la experiencia acumulada, se procedió a estimar e inferir los parámetros requeridos para realizar los cálculos del potencial energético; entre ellos:

áreas y espesores de los posibles yacimientos geotérmicos, temperaturas, propiedades físicas de la roca y del fluido.

Para el cálculo del potencial energético se utilizó el “método volumétrico” descrito por Brook et. al. 1978 (en OLADE, 1994 b), el cual es comúnmente utilizado en este tipo de estimaciones geotérmicas. Este se basa en el cálculo de energía contenida en un cierto volumen de roca. Este método se complementó con un cálculo probabilístico mediante el método de simulación de Montecarlo, el cual se basa en una distribución de probabilidades que trabaja con los parámetros inciertos de los posibles yacimientos, para hacer el respectivo cálculo de las reservas energéticas. Para dicho proceso se utilizó el programa “@RISK 8.2 Industrial”.

Es importante acotar que los cálculos del potencial energético se realizaron para cada una de las dieciséis áreas geotérmicas en que se dividió el país (temperaturas superiores a 150°C), considerando tanto las áreas obtenidas en los cálculos iniciales, como las áreas resultantes al excluir del análisis los sectores que presentan importantes restricciones de ingreso (reservas indígenas, parques y reservas forestales, humedales y zonas de alta densidad urbana). De esta manera se obtuvieron dos versiones del potencial geotérmico: una desde el punto de vista geocientífico y la otra, al considerar las limitantes sociales y ambientales indicadas.

3 Grado de confiabilidad general del estudio

La evaluación y cuantificación de los recursos y las reservas de energía geotérmica de una determinada área podría realizarse de una manera relativamente fácil si, para el área considerada, existiesen datos suficientemente numerosos y confiables sobre la distribución de la temperatura en profundidad, la hidrogeología, porosidad eficaz y la permeabilidad de las formaciones geológicas, el estado físico y la dinámica del fluido del reservorio, entre otros. Sin embargo, dicha evaluación podría representar un trabajo delicado cuando los estudios deben realizarse en áreas muy extensas, donde los datos están distribuidos de manera heterogénea o son relativamente escasos, ICE (1991).

En el caso del presente estudio, si bien el volumen de datos del subsuelo es elevado, debe indicarse que estos se concentran en sectores muy específicos de la Cordillera Volcánica de Guanacaste, siendo muy escasos en el resto del país. Esta heterogeneidad en la distribución de los datos, conlleva a inferir algunos de los parámetros requeridos para la estimación del potencial en algunos sectores; lo cual sin duda son parte de los elementos de incertidumbre característicos de este tipo de estudio.

Como ejemplo, la distribución de temperatura a 2,5 y 3,0 km de profundidad se modeló para todo el territorio nacional; no obstante, la mayor parte de la información térmica del subsuelo proviene de la región de Guanacaste. Debido a esto, fue necesario realizar importantes extrapolaciones e inferencias en los datos, principalmente hacia la región de

la Cordillera Volcánica Central; lo anterior respaldado con los escasos datos térmicos del subsuelo y características geológicas como: geomorfología de los edificios volcánicos, patrones estructurales predominantes, ubicación y características de las manifestaciones termales, entre otros.

El análisis realizado logra estimar a grosso modo las condiciones térmicas que se podrían esperar en profundidad, y no necesariamente indican la existencia a ciencia cierta, de un yacimiento geotérmico explotable; ya que para que eso ocurra, deben conjugarse diversos factores geológicos, especialmente de índole térmico y de permeabilidad. La metodología utilizada asume que en las regiones donde se esperan condiciones térmicas favorables, se estaría encontrando igualmente condiciones adecuadas de permeabilidad; esto bajo el supuesto de que se trata de formaciones geológicas en su mayoría volcánicas, que han estado expuestas a la intensa actividad tectónica que caracteriza al país, favoreciendo esto el desarrollo de elementos estructurales y por ende de permeabilidad.

Por lo anterior, considerando el volumen y la distribución de los datos utilizados en la estimación del potencial energético del país, se define el presente estudio con un nivel de confiabilidad moderado, lo cual es característico para estudios a este nivel.

4 Aprovechamiento de los recursos geotérmicos en Costa Rica

Costa Rica se ubica en un contexto geológico favorable para el desarrollo de anomalías de calor en niveles superficiales de la corteza terrestre; dicho ambiente se asocia al proceso de subducción entre las placas tectónicas Cocos y Caribe. Un contexto tectónico similar, se repite a lo largo de toda la costa Pacífica de América, islas Aleutianas, Rusia, este de Asia y continúa hasta Nueva Zelanda; en lo que se conoce como Cinturón de Fuego del Pacífico. Este se caracteriza por extensas cadenas volcánicas acompañadas de una intensa actividad sísmica, donde se concentra la mayor parte del potencial de recursos geotérmicos de alta temperatura del planeta (Figura 2).

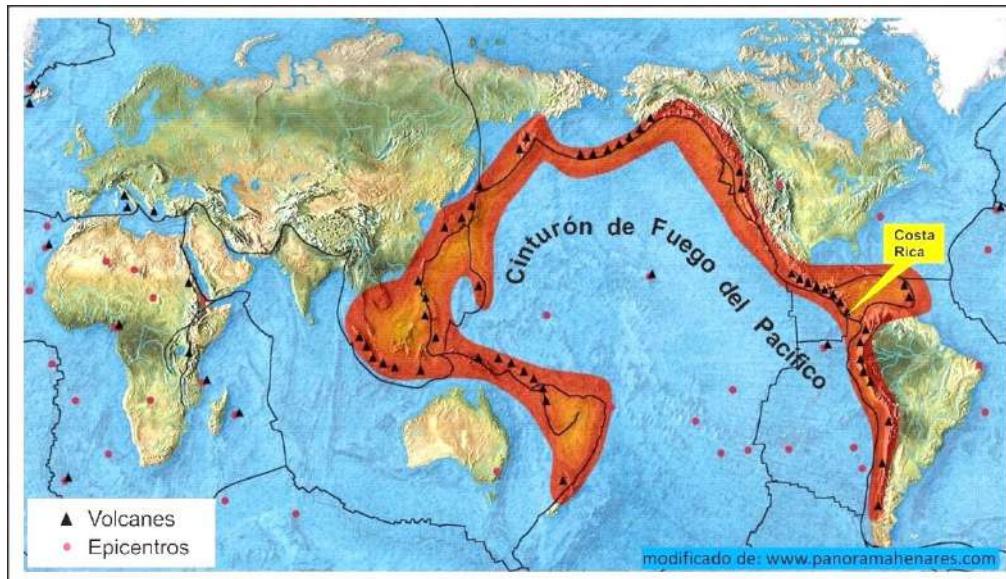


Figura 2. Cinturón de Fuego del Pacífico. Se muestran los límites entre las placas tectónicas, volcanes y epicentros sísmicos. Figura modificada de <https://www.panoramahenares.com>

Existen diversos criterios para la clasificación de los recursos geotérmicos, entre ellos: su estado físico, entalpía, contexto geológico y mecanismo de transferencia de calor.

El criterio más utilizado se basa en la entalpía de los fluidos geotérmicos, los cuales actúan como el medio de transporte del calor desde la roca profunda hacia la superficie.

En yacimientos geotérmicos tipo líquido-dominante, la entalpía de la fase líquida puede ser considerada proporcional a la temperatura del sistema (Noorollahi, 2005). La relación anterior ha sido utilizada por diversos autores para clasificar este tipo de yacimientos, en términos de la temperatura, (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de los recursos geotérmicos líquido-dominantes, según su temperatura. Tomado de Dickson & Fanelli (1990)- en Lee, K.C. (1996)

Clases	Muffer & Cataldi (1978), °C	Hochstein (1990), °C	Benderitter & Cormy (1990), °C	Haenel, Rybach & Stegema (1988), °C
Baja entalpía	< 90	<125	<100	≤150
Media entalpía	90-150	125-225	100-200
Alta entalpía	> 150	>225	>200	>150

El término alta entalpía generalmente se aplica a reservorios que contienen agua o vapor adecuado para la generación de electricidad, mientras que los reservorios de media y baja entalpía son usualmente aquellos donde la energía es de interés principalmente para propósitos de calefacción (Haenel, Rybach, & Stegema, 1988 – en Jackson, 1997) y otros usos directos.

A nivel mundial la energía geotérmica se aprovecha de diversas maneras, según la temperatura del recurso. Usualmente las temperaturas superiores a 165°C son utilizadas para la generación de electricidad mediante plantas de condensación (o tipo “flash”); mientras que recursos de menor temperatura (aprox. de 100-160°C) se aprovechan para producir electricidad por medio de plantas binarias. En cuanto a los usos directos, los recursos pueden ser utilizados de diversas maneras en función de su temperatura; entre ellas: procesos industriales, calefacción, acuacultura, agricultura y balneología (Figura 3).

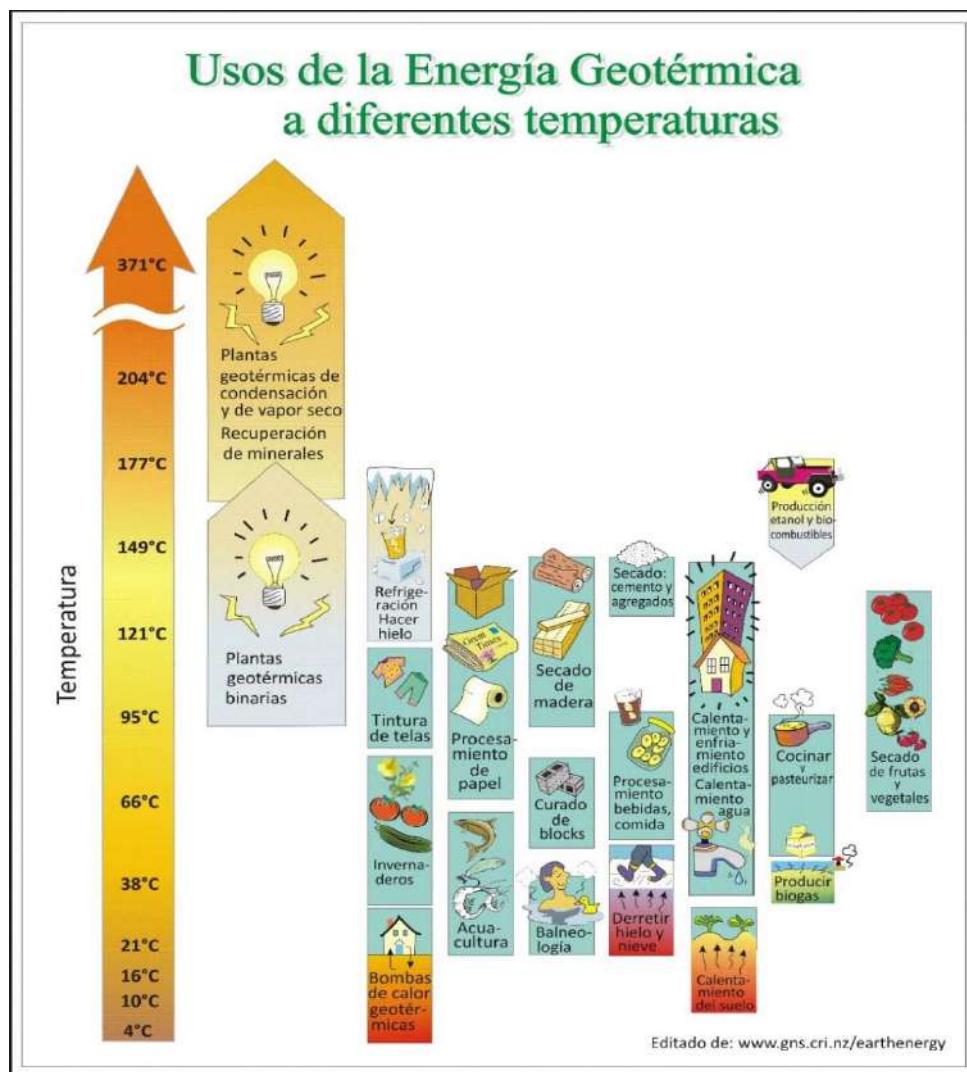


Figura 3. Usos de la energía geotérmica a diferentes temperaturas.

En nuestro país el uso de los recursos geotérmicos ha sido poco diversificado, siendo particularmente aprovechados para la generación de electricidad y uso directo en balnearios en el sector turístico, pero sin duda sus proyecciones de uso son más amplias.

4.1 Recursos geotérmicos con fines de generación eléctrica

La generación de electricidad es la actividad que requiere los recursos geotérmicos de mayor temperatura, los cuales solo ocurren en sectores del planeta con características geológicas particulares, tal como ocurre a lo largo de los límites de placas tectónicas o en sus cercanías. Este tipo de recursos son los que tienen mayor energía y brindan las mayores rentabilidades.

Los avances tecnológicos en sistemas de generación binarios, permiten hoy día la generación de electricidad con temperaturas tan bajas como 107°C (Wabuska, NV- en Williams, 2004) o incluso 80°C (www.exergy-orc.com/technology). Estos límites de temperatura evolucionan en función del desarrollo tecnológico, con lo cual se logra aprovechar recursos de menor temperatura para la generación de electricidad.

En el caso de Costa Rica, la generación de electricidad a partir de los recursos geotérmicos, se realiza al acceder al recurso por medio de pozos, cuyas profundidades alcanzan entre 1000-2500 m y los cuales tienen funciones de productores o inyectores, mediante los cuales se extrae el fluido que alimenta las unidades de generación y posteriormente se regresa al yacimiento profundo; lo anterior con el fin de mantener la presión del yacimiento y evitar cualquier contaminación superficial.

A continuación, se presenta un resumen de los principales eventos que han contribuido al aprovechamiento de los recursos geotérmicos con fines de generación eléctrica en Costa Rica:

- Tras su creación en 1949, el ICE se convirtió en la entidad pública encargada del desarrollo eléctrico del país. Consciente de la necesidad de contar con energías alternativas a la generación térmica (muy utilizada en aquel entonces, la cual es altamente contaminante y dependiente de los países productores de petróleo), inició en la década de 1960 los estudios para determinar si el país contaba con recursos geotérmicos aprovechables. Entre 1963-64 expertos de las Naciones Unidas visitaron el país y luego de un análisis, recomendaron estudiar en detalle los volcanes Miravalles y Rincón de la Vieja.
- A partir de 1975, el ICE lleva a cabo una serie de actividades con el propósito de encaminar el aprovechamiento del calor terrestre para usos energéticos.

- Con la Ley No. 5961 del 22/12/76, el Gobierno de Costa Rica se abocó al estudio de los recursos geotérmicos nacionales, con el propósito de desarrollarlos al máximo grado posible, técnica y económica mente.
- Todas las actividades prácticas de investigación, evaluación y desarrollo de estos recursos fueron atribuidas al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).
- Tras varios años de estudios realizados por expertos del ICE, con el apoyo del gobierno de Italia y de las Naciones Unidas, se realizaron los primeros pozos geotérmicos en la falda sur del volcán Miravalles (1978-1980), con lo cual se confirmó la existencia de un yacimiento geotérmico de alta temperatura.
- La explotación de recursos geotérmicos de alta temperatura constituyó uno de los objetivos de desarrollo de las fuentes nacionales de energía, que en 1982 el Gobierno de Costa Rica estableció como prioritario en el documento de política energética llamado “Programa de Planeamiento y Desarrollo Energético”.
- En 1984 inicia la primera campaña de perforación de pozos profundos, que culminó con la puesta en marcha de la primera unidad de generación geotermoeléctrica del país en 1994: Planta Miravalles I, ubicada en el Campo Geotérmico Alfredo Mainieri Prott (antes llamado Campo Geotérmico Miravalles).
- Paralelo al desarrollo del campo geotérmico Alfredo Mainieri Prott, en noviembre de 1988 se concluyó el estudio de reconocimiento geotérmico del territorio nacional, efectuado como fase I del proyecto denominado COS/83-T01. Dicho estudio permitió establecer en sus partes esenciales el panorama geotérmico del país, localizar con buena aproximación las zonas de anomalía geotérmica y determinar una escala de prioridad para el hallazgo de fluidos geotérmicos con diferentes condiciones de temperatura.
- A comienzos de 1989 el ICE se propone el objetivo de cuantificar el potencial Geotérmico de todo el país y estimar los componentes de tal potencial en términos de recursos¹ y de reservas². Se plantearon una serie de necesidades como:
 - ❖ Realizar una subdivisión del País en provincias y en áreas geotérmicas homogéneas, clasificadas con base en sus diferentes condiciones geológicas y de temperatura, hasta una profundidad máxima de 3,0 km.

¹ recursos: fracción de calor terrestre accesible hasta 3,0 km de profundidad, que podría extraerse económicamente en un lapso de 30 años.

² reservas: fracción de calor terrestre asociada a reservorios profundos hasta 2,5 km de profundidad, que podrían aprovecharse económicamente en un lapso de 10 años.

- ❖ Con base en dicha subdivisión, establecer una vocación geotérmica para cada una de las provincias y áreas, según una escala convencional que permitiera reconocer el grado de interés para el eventual planteamiento de proyectos de desarrollo de la energía geotérmica en el País.
- ❖ Efectuar para cada provincia y área geotérmica la evaluación cuantitativa de los recursos y de las reservas potencialmente disponibles para la producción de energía eléctrica y para usos directos.

Dicho estudio concluyó a finales de 1991 y logró cumplir con los objetivos planteados. De forma paralela a estos estudios, se continuó con el desarrollo y posterior incorporación de otras unidades de generación como: Unidad Boca de Pozo (1994), Miravalles II (año 1998), Miravalles III (año 2000) y Miravalles V (año 2003).

Adicionalmente, se realizaron labores de exploración en los flancos Sur y Oeste del Volcán Rincón de la Vieja, los cuales culminaron con el desarrollo y puesta en marcha de las unidades de generación Pailas I (año 2011) y Pailas II (año 2019). Figura 4.



Figura 4. Planta geotérmica Pailas II (55 MWe). Se localiza en el flanco sur del volcán Rincón de la Vieja y limita con el parque nacional del mismo nombre. Foto: Gestión de Información Geográfica, Fuentes Geotérmicas.

Gracias al desarrollo de estos proyectos, hoy día el país cuenta con una capacidad geotermoeléctrica instalada de 250 MWe, la cual aporta aproximadamente un 15% de la demanda nacional.

Actualmente el ICE se encuentra desarrollando el proyecto geotérmico Boringuen I, ubicado en las faldas del volcán Rincón de la Vieja. Este proyecto contará con una capacidad instalada de 55 MWe, con lo cual en el año 2027 el país contará con una capacidad geotérmica instalada total de 305 MWe (Figura 5).

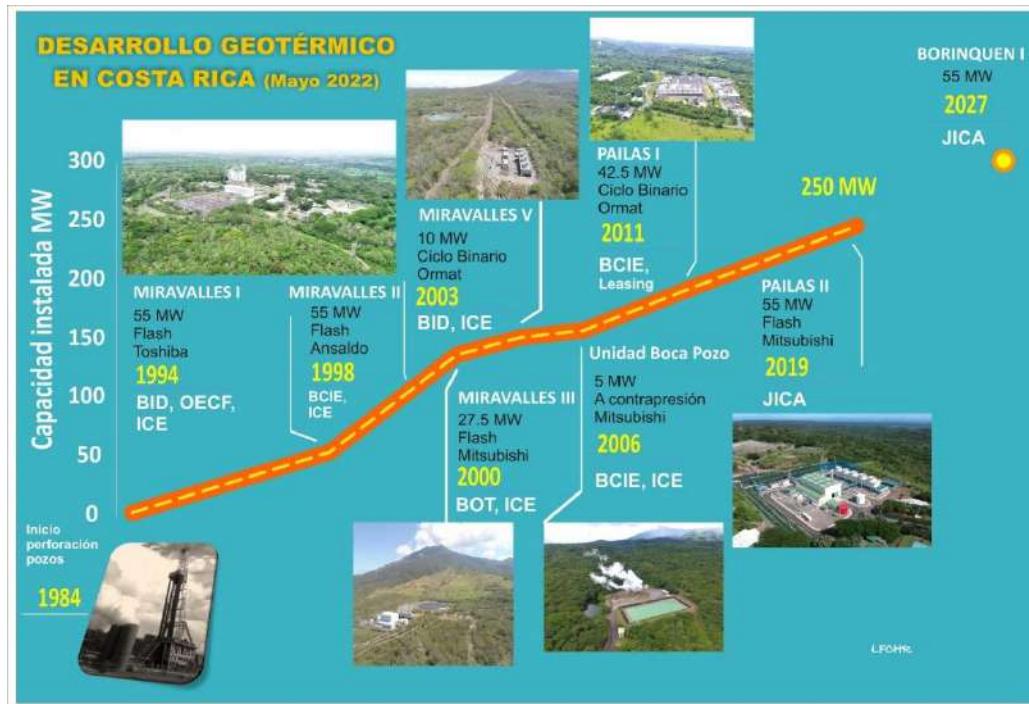


Figura 5. Crecimiento histórico de la capacidad geotermeléctrica instalada en Costa Rica. En el año 2027 se espera contar con una capacidad total instalada de 305 MWe.

El ser un recurso autóctono, amigable con el ambiente, una energía estable, no depender de factores climáticos y operar de manera continua la mayor parte del año, son algunas de las ventajas de generar electricidad utilizando la energía geotérmica.

Representa un recurso sostenible en el tiempo, siempre y cuando se sigan adecuadas políticas de desarrollo y explotación.

4.1.1 *Etapas para el aprovechamiento del recurso*

Las estructuras organizacionales de las entidades dedicadas al aprovechamiento de la energía geotérmica para la generación de electricidad, varían según las condiciones propias de cada país. No obstante, existe una estrategia de interrelación de los procesos técnicos que es común en la mayoría de los casos; en donde las etapas de Exploración, Desarrollo y Explotación se mantienen dentro de un mismo proceso. Lo anterior, debido a que las actividades que componen cada una de estas etapas, están estrechamente vinculadas a lo largo de la vida útil del yacimiento. Esto implica una adecuada coordinación

de actividades y definición continua de estrategias de desarrollo y explotación del yacimiento, orientadas a una visión de sostenibilidad a largo plazo.

En las diferentes etapas del aprovechamiento de los recursos geotérmicos, es preponderante el papel del modelo conceptual del yacimiento del sistema geotérmico; el cual consiste en una representación esquemática de las características físicas y químicas esenciales del sistema geotérmico, así como la manera en que esas variables se relacionan entre sí. El modelo conceptual del yacimiento se elabora desde las etapas iniciales de exploración, y debe ser actualizado y validado en las etapas posteriores, conforme se dispone de nueva información geocientífica (Figura 6). Es un elemento que debe soportar la planificación y toma de decisiones a lo largo de la vida del proyecto.

De acuerdo a los alcances de la Ley No. 5961 de 6 de diciembre de 1976, el ICE tiene a su cargo la ejecución de las actividades técnicas y científicas requeridas para la exploración, desarrollo y explotación de los recursos geotérmicos; lo anterior utilizando tecnologías, planeamiento, organización y controles en armonía con el medio ambiente.

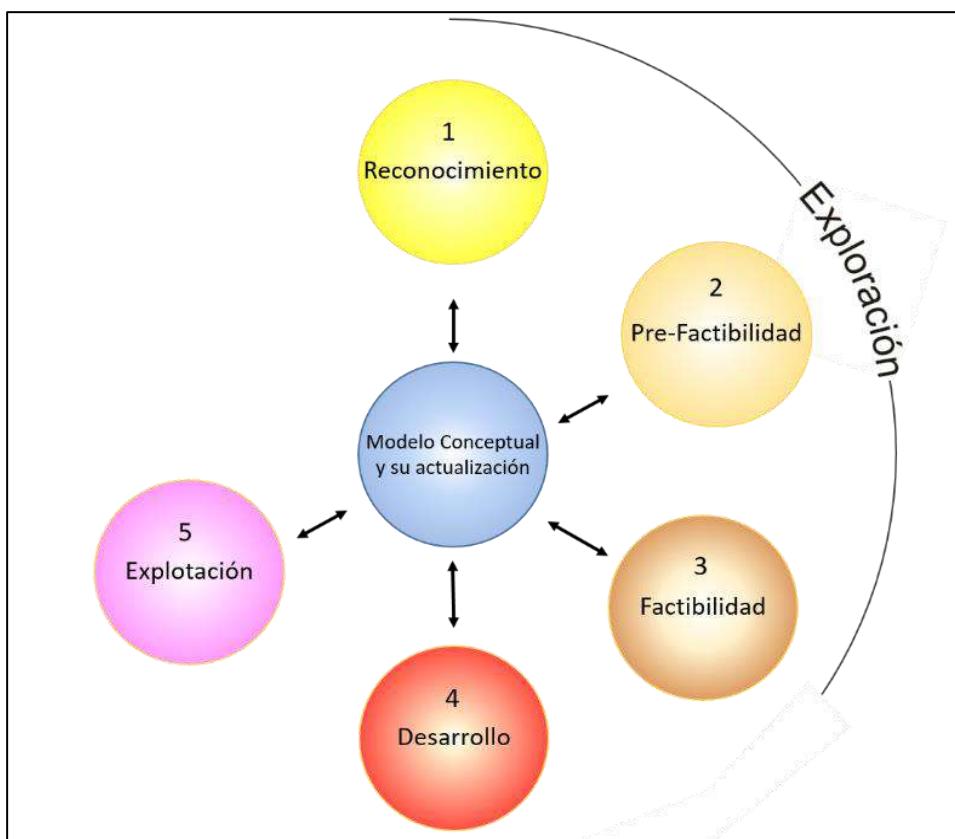


Figura 6. Etapas integrales para el aprovechamiento de los yacimientos geotérmicos.

4.2 Usos directos de los recursos geotérmicos

El aprovechamiento de los recursos geotérmicos por medio de usos directos, también se encuentra restringido a áreas geológicamente favorables (con presencia de anomalías térmicas); no obstante, estas áreas son más comunes debido a que abarcan un rango de temperatura relativamente bajo (Boden, 2017).

En nuestro país el uso directo de los recursos geotérmicos, se concentra en el aprovechamiento de nacientes y acuíferos termales en balnearios y spas; estando la mayoría dedicados a la actividad turística.

El primer balneario termal y hotel de Costa Rica fue construido en 1886 en Aguacaliente de Cartago, (www.sinabi.go.cr -en Alvarado y Vargas, 2017), siendo distintivo para la época y el lugar (Figura 7). Fue destruido en 1910 a raíz de los terremotos de Cartago (Alvarado & Vargas, 2017).

En 1955 se instaló la primera empresa de aguas minerales del país, ubicada en la fuente mineral fría de Salitral de Santa Ana. (Kupiec, 1962 -en Alvarado y Vargas, 2017). El permiso para embotellar agua se canceló en 1977.

Entre 1969 y 1970 se desarrollan nuevos balnearios de agua termal en el valle central y en la zona de San Carlos (Gómez 1972 -en Alvarado y Vargas, 2017), representando un turismo doméstico.

A partir de 1985 ocurre un florecimiento de balnearios de agua termal, principalmente en los alrededores del volcán Arenal (Figura 8), constituyéndose en un punto de referencia a nivel nacional (Alvarado y Vargas, 2017).

Luego de 1990, diversos factores de índole social, ambiental, político y social favorecieron el desarrollo de los balnearios termales en nuestro país, constituyéndose en un gran atractivo para el turismo nacional y extranjero, promoviendo las aguas termales un turismo de placer, salud y naturalista (Alvarado y Vargas, 2017).



Figura 7. Primer hotel y balneario termal de Costa Rica, los Baños Tismales de Aguacaliente, Cartago. Imagen de fuente desconocida- tomada de Alvarado & Vargas (2017).



Figura 8. Balneario termal y hotel localizado en la zona del volcán Arenal. Tomado de <https://www.hoteles.com/>

Es importante resaltar que la poca diversificación en el uso directo de los recursos geotérmicos en Costa Rica obedece, en parte, a que nuestro país tiene un clima tropical, donde muchas de las aplicaciones directas empleadas en países fríos, no son necesarias ni rentables en nuestro medio. No obstante, se están realizando esfuerzos orientados a promover el uso directo de los recursos geotérmicos en diferentes ámbitos de aplicación; para lo cual, desde el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) se está elaborando un proyecto de ley que permita la regulación de uso de este segmento de la geotermia en el país.

En Costa Rica se han realizado diversos estudios teóricos enfocados al desarrollo de proyectos de uso directo, particularmente en la creación de secadores de cebolla, granos, frutas y otros productos agrícolas; utilizando la energía geotérmica residual del campo geotérmico Alfredo Mainieri Protti (antes Campo Geotérmico Miravalles) (Mena, 1998; Solano & Coto, 2002; Barrantes, 2012 y Ugalde, 2016).

Actualmente el ICE, conjuntamente con la Cooperación Técnica Alemana (GIZ), Municipalidad de Bagaces, organizaciones comunales, el Instituto de Desarrollo Rural (INDER) y otros actores, están en proceso de desarrollo de los estudios técnicos, económicos y de mercado, además de los diseños, que podrán materializar a mediano plazo la instalación de un secador de granos y cebolla utilizando el calor de una tubería de reinyección el Campo Geotérmico Alfredo Mainieri Protti, lo anterior como parte de una estrategia de dinamización y reconversión agrícola en la región.

5 Descripción de los datos disponibles

Se indican de manera general las principales fuentes de información utilizadas en la elaboración del presente estudio de actualización. Estas incluyen información de diversa índole (geotérmica, geológica, geoquímica, geofísica, geográfica, entre otras) generada por el ICE y otras entidades estatales y privadas:

- Informe de Evaluación del Potencial Geotérmico de Costa Rica (ICE, 1991): Mapas con la distribución de la temperatura estimada a 3,0 km de profundidad, categorización geotérmica del país (en Provincias y Áreas), cuantificación de los Recursos y las Reservas, entre otros.
- Informe Plan de Expansión para los Desarrollos Geotérmicos 2018 – 2030 (CSRG, 2018).
- Mapa geológico de Costa Rica, escala 1: 400 000. UCR-ICE.
- Información geológica, geoquímica y termo-hidráulica de sesenta y dos pozos profundos (de 900 hasta 3025 m) perforados en el campo geotérmico Alfredo Mainieri Prott, flanco sur el volcán Miravalles.
- Información geológica, geoquímica y termo-hidráulica de dos pozos profundos (de 1345 m y 2473 m) perforados entre 1999- 2000 en el proyecto geotérmico Tenorio; flanco sur del volcán del mismo nombre.
- Información geológica, geoquímica y termo-hidráulica de cuarenta y dos pozos profundos (de 693 hasta 2409 m) perforados en el campo geotérmico Las Pailas, flanco sur del volcán Rincón de la Vieja.
- Información geológica, geoquímica y termo-hidráulica de diez pozos profundos (de 2082 hasta 2636 m) perforados en el campo geotérmico Borinquen, flanco oeste del volcán Rincón de la Vieja.
- Base de datos geoquímica del Centro de Servicio Recursos Geotérmicos, ICE.
- Reportes internos de índole geológica, geoquímica y geofísica elaborados por el Centro de Servicio Recursos Geotérmicos, ICE.
- Bases de datos digitales de modelos de elevación del terreno, mapas estructurales, zonas forestales protegidas, reservas indígenas, red hídrica, caminos e infraestructura urbana de Costa Rica.

6 Análisis e interpretación de los datos

Producto del importante volumen de información, se requirió de la creación de una base de datos en un sistema de información geográfico. Esto permitió realizar, de manera expedita y precisa, la visualización, caracterización y correlación de los datos espaciales, facilitando las interpretaciones finales.

Una de las tareas fundamentales del presente estudio fue establecer de forma referencial la distribución de la temperatura en el subsuelo a 2,5 y 3,0 km de profundidad. Dicha información es utilizada para la identificación de las zonas de mayor potencial lo cual permite proponer una división del país en diferentes áreas, de acuerdo a sus características y vocación geotérmica (categorización geotérmica).

El hecho de que cerca de un 25% de la superficie del país corresponde a áreas silvestres protegidas, aunado a la existencia de humedales, reservas indígenas y amplias zonas urbanas e industriales, lo cual limita en gran medida los sectores disponibles para el pleno aprovechamiento de los recursos geotérmicos, llevó a considerar oportuno incluir dentro del análisis estas variables socio-ambientales, de manera que se logre cuantificar de manera general, el recurso geotérmico al que se podría tener acceso bajo la legislación actual.

6.1 Distribución de temperatura a 2,5 y 3,0 km de profundidad

Para efectos del presente estudio, se consideró modelar la distribución de la temperatura a 2,5 y 3,0 km de profundidad, en correspondencia con las definiciones de “Reservas” y “Recursos”.

Como punto de partida se utilizó la distribución de temperatura del subsuelo elaborada por ICE (1991; Figura 9); la cual fue realizada con base en mediciones directas de temperatura de algunas decenas de pozos profundos (geotérmicos y de exploración petrolera), medidas de gradiente geotérmico (de aproximadamente 50 perforaciones con profundidades mayores a 150 m) y los valores de temperatura de equilibrio de acuíferos profundos (geotermometría aplicada a manifestaciones hidrotermales). Dichos autores realizaron una serie de consideraciones cruzadas de carácter litoestratigráfico, hidrogeológico, vulcanológicos y estructurales con el fin de homogenizar los criterios de interpretación de los datos.

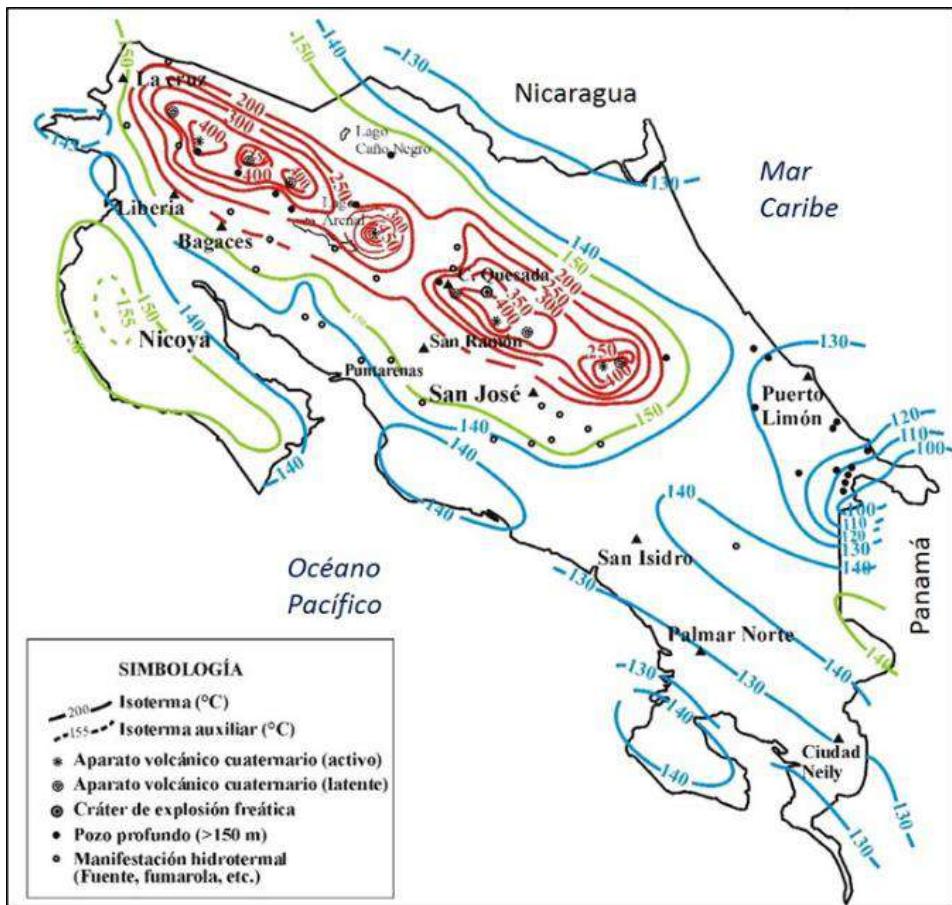


Figura 9. Distribución de la temperatura a 3,0 km de profundidad. Tomada de ICE (1991).

Para el presente estudio, la actualización de la distribución de la temperatura en el subsuelo se realizó al tomar como insumo inicial las isotermas modeladas por ICE (1991) y se incorporó en el análisis la nueva información térmica obtenida de numerosos pozos profundos perforados por el ICE luego de 1991, así como información derivada de estudios puntuales de evaluación geotérmica.

Debido a que la mayor parte de la información térmica del subsuelo corresponde a la zona de Guanacaste (campos geotérmicos Alfredo Mainieri Protti, Las Pailas y Borinquen), para poder realizar el trazado de las isotermas a nivel nacional, se recurrió a extrapolaciones e interpretaciones basadas en aspectos morfológicos, estructurales, geoquímicos y vulcanológicos.

Las figuras 10 y 11 muestran la distribución de las isotermas a 2,5 y 3,0 km de profundidad, obtenidas en el presente estudio. Al igual que en el estudio de ICE (1991), es evidente que las mayores anomalías de calor se distribuyen en la parte central y norte del país, en correspondencia con la Cordillera Volcánica Central, Volcán Arenal y Cordillera Volcánica de Guanacaste.

Es importante acotar que el análisis realizado logra estimar, a grosso modo, las condiciones térmicas que se podrían esperar en profundidad, y no necesariamente indican la existencia a ciencia cierta, de un yacimiento geotérmico explotable; ya que para que esto ocurra deben conjugarse diversos factores geológicos, especialmente de índole térmico y de permeabilidad.

Las isotermas obtenidas fueron utilizadas para definir los límites de las áreas geotérmicas en que se divide el país (categorización geotérmica) y, al mismo tiempo, para definir algunos de los parámetros volumétricos (áreas) requeridos en los cálculos del potencial energético.

Al comparar las figuras 10 y 11 se aprecia que a 3,0 km de profundidad las anomalías térmicas se ensanchan y son de mayor temperatura; esto se debe a su mayor proximidad con las fuentes de calor, las cuales se asocian en su mayoría a las cámaras magmáticas de los volcanes recientes.

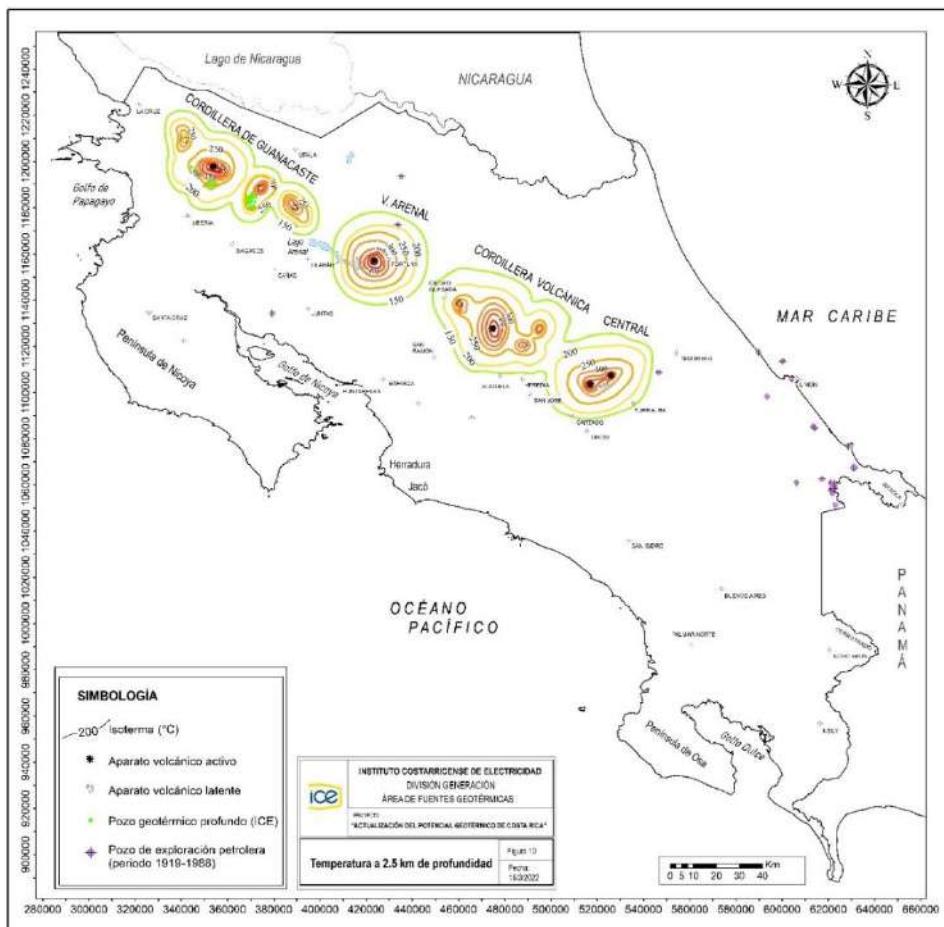


Figura 10. Distribución de temperaturas mayores a 150°C a 2,5 km de profundidad. Las mayores anomalías se asocian con la Cordillera Volcánica de Guanacaste, Volcán Arenal y la Cordillera Volcánica Central.

A los 3,0 km de profundidad (Figura 11) se observa que la isoterma de 150°C bordea la Península de Nicoya y el sector del Cerro Pando (frontera con Panamá). De acuerdo con el estudio realizado por ICE (1991), aunque en estos sectores se podrían presentar temperaturas de esta magnitud, aclaran que la Península de Nicoya carece, en profundidad, de formaciones acuíferas importantes, por lo cual le asignan una vocación geotérmica muy escasa o nula.

El Cerro Pando se ubica en el extremo sureste de la cordillera de Talamanca, en un sector caracterizado por un vulcanismo relativamente antiguo, de edad Terciaria; no obstante, se localiza relativamente próximo a un sector de vulcanismo reciente, representado por el volcán Barú (ubicado en territorio panameño). Las características geológicas de este sector sugieren la posible existencia, en profundidad, de formaciones acuíferas de importancia. ICE (1991) le asignó una vocación geotérmica buena.

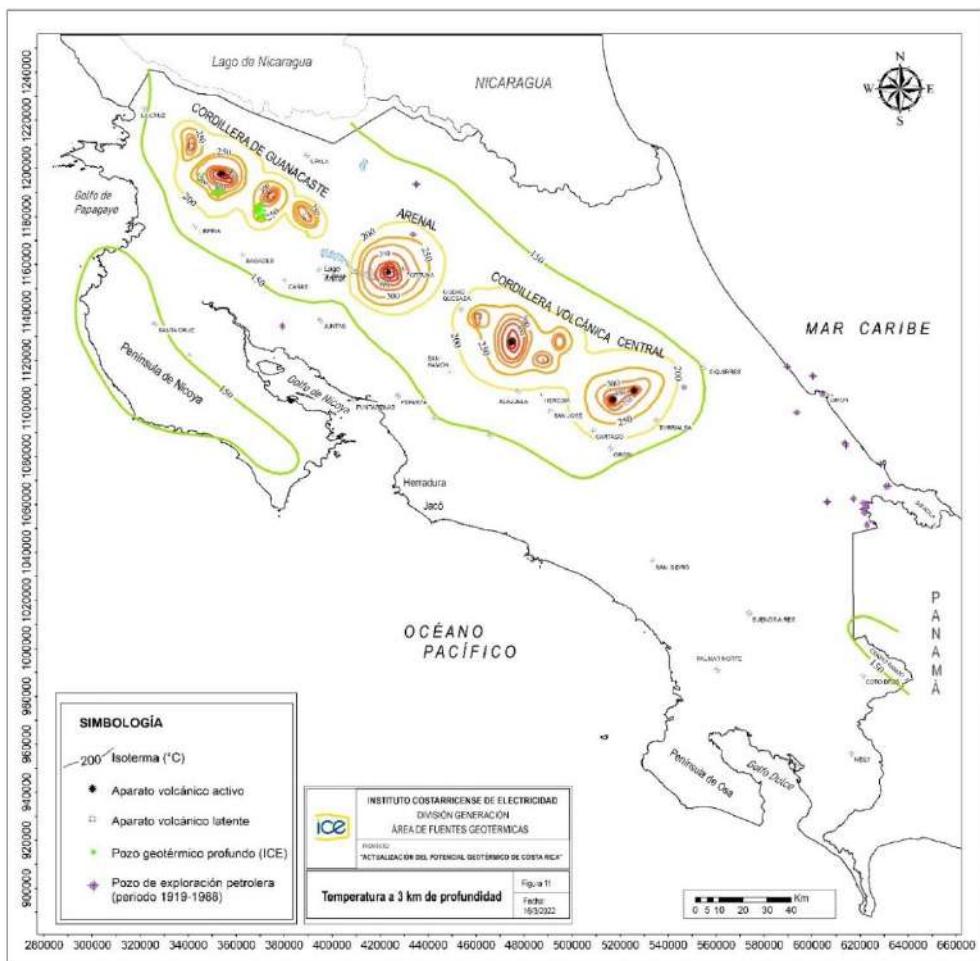


Figura 11. Distribución de temperaturas mayores a 150°C a 3,0 km de profundidad. Las mayores anomalías se asocian con la Cordillera Volcánica de Guanacaste, Volcán Arenal y la Cordillera Volcánica Central.

6.2 Caracterización de nacientes termales y su significado geotérmico

El informe de Evaluación del potencial geotérmico de Costa Rica, elaborado por ICE (1991), constituye un valioso documento de referencia sobre los diferentes grupos de nacientes termales existentes en el país, sus características químicas y geotermométricas. Dicho documento, sumado a la información de las nacientes termales documentadas luego de 1991, así como la realización de un levantamiento geoquímico de nacientes termales a nivel nacional (ejecutado a inicios del año 2022), sirvieron como insumo para confeccionar los mapas actualizados de manifestaciones y nacientes termales de Costa Rica.

En la Figura 12 se muestra la ubicación de los diferentes tipos de manifestaciones hidrotermales del país: nacientes termales, fumarolas, suelo caliente y cráteres activos. La forma del símbolo hace alusión a su composición química y el color, al rango de temperatura medido.

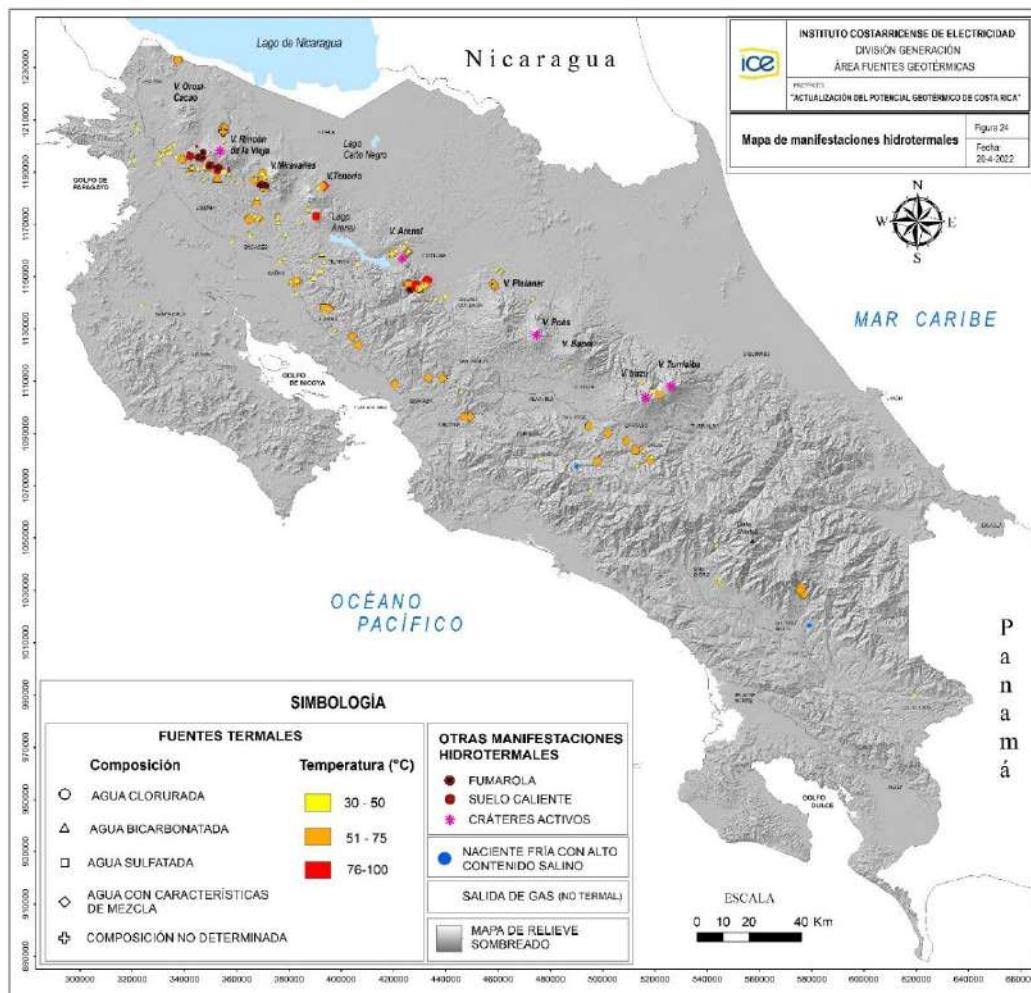


Figura 12. Ubicación de las manifestaciones hidrotermales de Costa Rica. La forma de los símbolos representa la composición y el color su rango de temperatura.

La Figura 13 muestra la ubicación y composición de las principales nacientes termales de Costa Rica. La composición química de las nacientes es representada por medio de gráficos radiales, donde sus ejes corresponden a la concentración (en ppm) de las especies iónicas dominantes: Na, Ca, Mg, Cl, HCO₃ y SO₄. Dentro de cada gráfico se incluye el valor de pH de campo. Adicionalmente, el color del gráfico representa el rango de temperatura medido. Como se aprecia en ambas figuras, las nacientes termales se concentran en la cordillera volcánica de Guanacaste y cordillera de Tilarán, y en menor grado en la cordillera volcánica Central, Valle Central y algunas pocas en la Cordillera de Talamanca.

La composición química de las nacientes va del tipo bicarbonato-alcalinotérreo al sulfatado o cloruro-alcalino, o bien una mezcla de estos. Muestran temperaturas primordialmente en el rango de 30°C - 60°C, con escasas manifestaciones que alcanzan hasta los 95°C. Según lo observado en el campo, y acorde a lo indicado por ICE (1991), la mayoría de las fuentes termales tienen un flujo medio inferior a 1 l/s; con valores extremos excepcionales de 5 - 10 l/s.

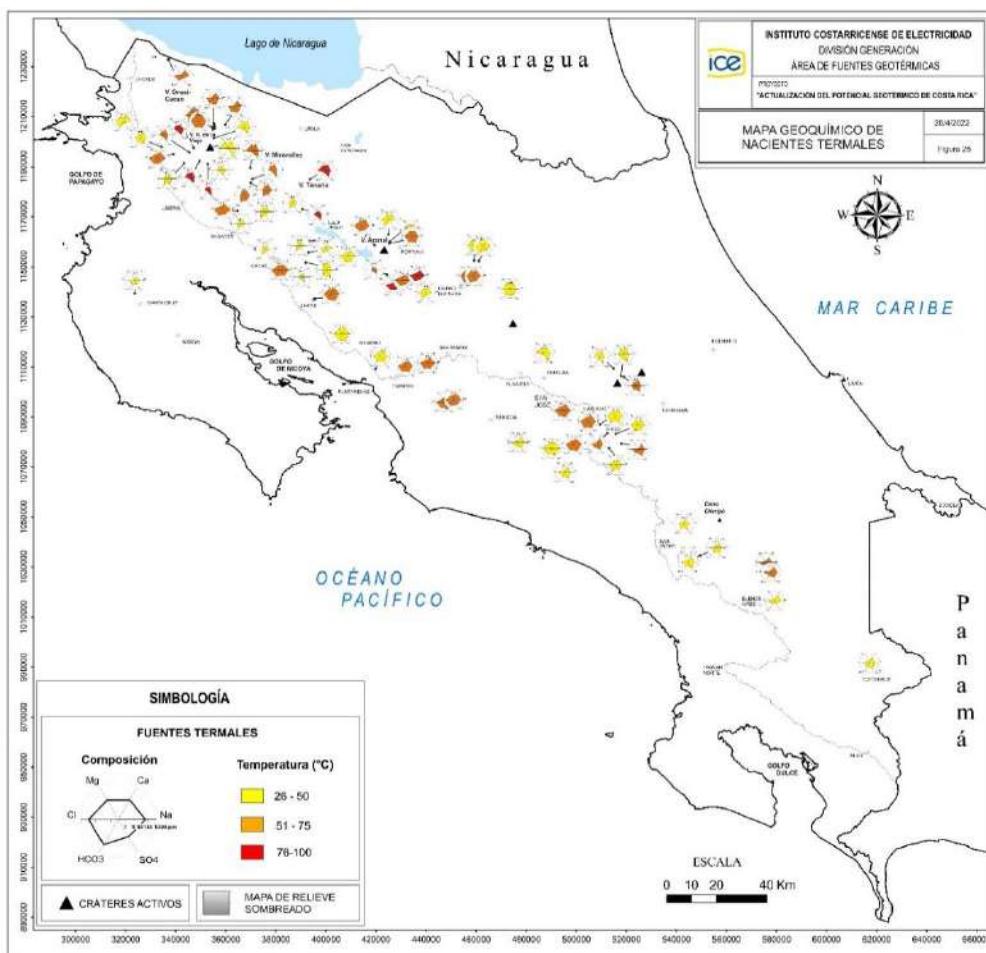


Figura 13. Ubicación, composición y temperatura de las principales nacientes termales de Costa Rica.

6.2.1 *Estimaciones geotermométricas realizadas en el presente estudio*

Con el fin de complementar y actualizar la información geotermométrica presentada por ICE (1991), se muestreó y analizó un total de 53 nacientes termales, distribuidas a lo largo del territorio nacional. Dichas nacientes fueron seleccionadas de acuerdo a su afinidad química para la aplicación de geotermómetros químicos.

Los iones analizados fueron Na, K, Ca, Mg, Cl, $\text{SO}_4^{=}$ y HCO_3^- , requeridos para la aplicación de geotermómetros de Na-K-Ca (Fournier & Truesdell 1973) y Na-K-Mg (Giggenbach, 1988). Adicionalmente, se determinó en el laboratorio el pH y la conductividad eléctrica.

Estos geotermómetros fueron diseñados para ser aplicados a fluidos geotérmicos y poder determinar la posible temperatura del reservorio geotérmico que los originó.

Para la aplicación de esta técnica, es importante reconocer el grado de equilibrio químico existente entre las muestras de fluido y las rocas huésped (reservorio geotérmico), de manera que se logre seleccionar las muestras con el mayor grado de equilibrio posible.

Para lo anterior, se graficaron las nacientes en el triángulo ternario de Giggenbach (1988), el cual permite dilucidar el grado de equilibrio químico o madurez de las muestras, Figura 14. En dicha figura se incluyeron, adicionalmente, los datos químicos de las nacientes termales de: Salitral-Las Lilas (Liberia), Poco Sol (San Carlos), Finca La Trampa (Las Juntas de Abangares), La Palmera (San Carlos) y La Marina (San Carlos); las cuales habían sido reportadas en estudios previos.

Las nacientes adecuadas para la aplicación de los geotermómetros, son las que se ubican en los campos de “*aguas parcialmente equilibradas*” y aguas con equilibrio total. Las muestras clasificadas como “*aguas inmaduras*” se excluyen ya que no cuentan con las condiciones de equilibrio químico requeridas.

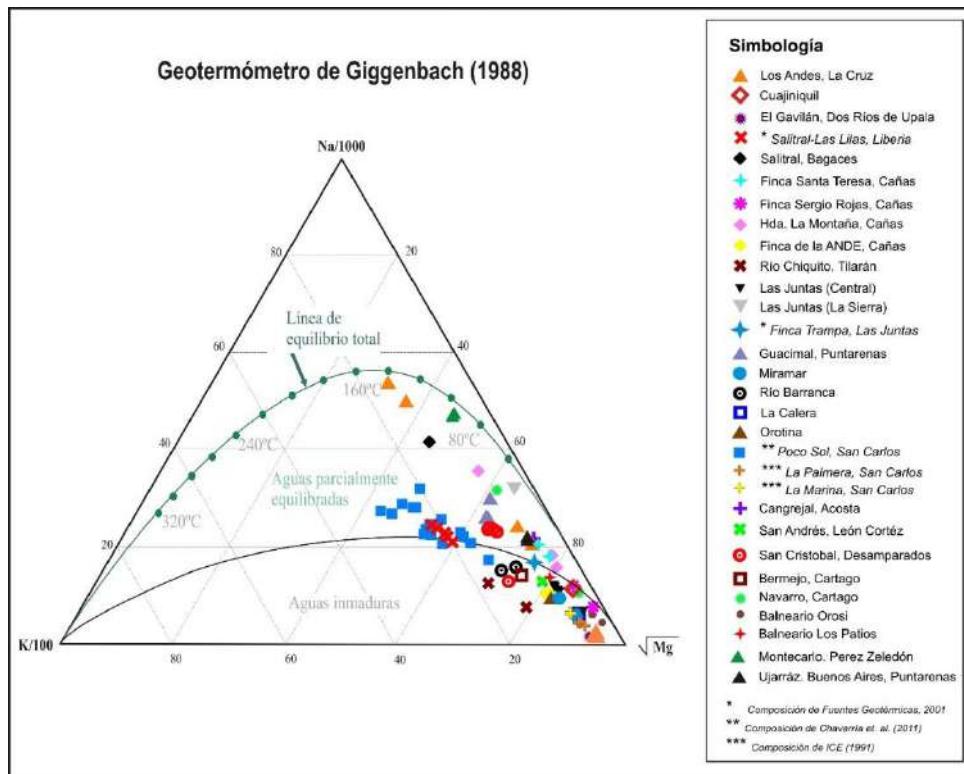


Figura 14. Nacientes termales (agrupadas por localidad) graficadas en el diagrama ternario de Giggenbach (1988). Las muestras ubicadas en el extremo inferior derecho del triángulo fueron descartadas (aguas inmaduras).

Se determinó que 12 localidades cumplían con las características químicas requeridas para la aplicación de geotermómetros. De acuerdo a la experiencia del ICE, el geotermómetro de Na-K-Mg de Giggenbach (1988) tiende a sobreestimar las temperaturas de equilibrio; mientras que el geotermómetro de Na-K-Ca de Fournier & Truesdell (1973), es el que mejor se ajusta a las temperaturas reales de los yacimientos geotérmicos de Costa Rica. Por lo tanto, los valores obtenidos con este último geotermómetro, se utilizarán como referencia para reportar las posibles temperaturas de equilibrio en profundidad. Los resultados de temperatura se presentan en la tabla 2.

Tal como se aprecia, los geotermómetros indican temperaturas de equilibrio en el rango de 80 - 220°C, para diferentes sectores del país. Estas varían en función de las características geológicas de cada sitio: origen de las fuentes termales, temperatura y profundidad de la fuente de calor, procesos de mezcla de fluidos, grado de conexión con el posible reservorio, entre otras.

Tabla 2. Resultados de los geotermómetros químicos

Localidad	Geotermómetro Na_K_Ca Fournier & Truesdell 1973, (°C)
Los Andes. La Cruz, Guanacaste	130
Salitral-Las Lilas. Muestra de CSRG (2001)	200
Salitral de Bagaces, Guanacaste	150-160
Cañas, Guanacaste	130
La Sierra. Las Juntas, Guanacaste	80
Finca La Trampa. Las Juntas, Guanacaste. Muestra de ICE (1991)	150
Fernández. Guacimal, Puntarenas.	115
Los Ángeles. Guacimal, Puntarenas.	135
Poco Sol. San Carlos, Alajuela	200-220
San Cristobal. Desamparados, San José	160
Cangrejal. Acosta, San José	105
Navarro, Cartago	105
Montecarlo, Pérez Zeledón	90
Ujarraz. Buenos Aires, Puntarenas	120

Las nacientes de Salitral-Las Lilas indican una temperatura geotermométrica de 200°C. De acuerdo al modelo conceptual de este sector, estas nacientes se asocian a la descarga natural de un reservorio geotérmico de alta temperatura de Borinquen I, donde se tienen pozos profundos con temperaturas de 250 - 275°C.

De manera análoga, las nacientes termales de Salitral de Bagaces, que indican temperaturas de equilibrio de 150-160°C, se asocian a la descarga natural del yacimiento geotérmico ubicado en el volcán Miravalles (campo geotérmico Alfredo Mainieri Protti), donde se han medido temperaturas en el rango de 180-250°C.

Adicionalmente, la aplicación de geotermómetros en el sector de Poco Sol (San Carlos-San Ramón) indica temperaturas de equilibrio de 200-220°C; por lo cual constituye un prospecto de interés para investigaciones orientadas a la búsqueda de recursos geotérmicos de alta temperatura.

Se reconocen otros sectores del país donde los geotermómetros indican temperaturas de equilibrio del orden de 100 - 150°C, los cuales podrían eventualmente, representar algún

interés para proyectos de usos directos o bien generación eléctrica por medio de plantas binarias; esto si las condiciones geológicas son adecuadas para su explotación.

Es importante indicar que los resultados obtenidos son coincidentes con los reportados por ICE (1991), lo cual indica poca variación en el químismo de estas fuentes termales en los últimos 30 años.

En el apéndice A se incluye la ficha técnica de cada naciente muestrada y en el apéndice B se muestra la tabla de resultados geotermométricos.

6.3 Categorización geotérmica

Con base en la información disponible se realizó una división del país en provincias y áreas geotérmicas, de acuerdo a su vocación para el desarrollo de proyectos geotermoelectríficos.

6.3.1 Antecedentes

En el informe de ICE (1991) se propuso la división del país en provincias, de acuerdo a su vocación geotérmica, y estas a su vez en áreas geotérmicas de acuerdo a su ubicación geográfica. Dicha categorización se efectuó con base en el análisis de los dos principales factores que controlan la formación de un sistema geotérmico: la temperatura y la permeabilidad. En el mencionado estudio se dividió el país en tres categorías de provincias geotérmicas (A, B, D)³ y dentro de ellas *dos distintas clases de áreas geotérmicas* (A1-A2, B1-B2 y D1-D2), teniendo como resultado 12 provincias y 28 áreas geotérmicas (Figura 15).

³ No se incluye la categoría “C” ya que se había considerado esta para sectores con temperaturas a 3,0 km de profundidad inferiores a 90°C, y estos no fueron reconocidos en dicho estudio.

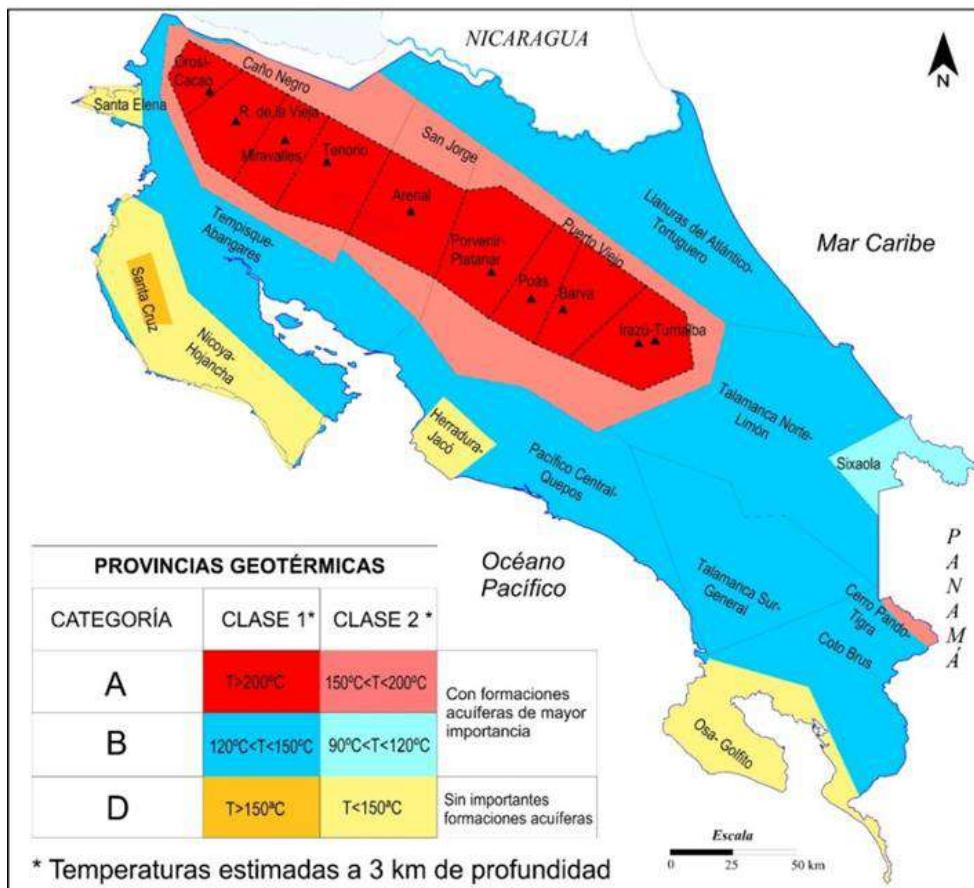


Figura 15. Categorización geotérmica realizada por ICE (1991).

6.3.2 Categorización geotérmica actualizada

Por practicidad se adoptó la misma nomenclatura utilizada por ICE (1991), y se actualizaron los límites de las provincias y áreas, a la luz de la nueva información térmica del subsuelo.

En el presente estudio se redefinió el límite inferior de los recursos con vocación geotérmica óptima en 220°C, el cual había sido originalmente definido en 200°C por ICE (1991).

Tomando en consideración todo lo anterior, el territorio de Costa Rica queda dividido, de acuerdo a su potencial geotérmico en las siguientes provincias y áreas (Tabla 3).

Tabla 3. Categorización geotérmica de Costa Rica actualizada. Basada en ICE (1991), con modificaciones efectuadas durante presente el estudio.

Hidrogeología	Provincia (Categoría)	Área (Clase)	Temperatura a 3,0 km de profundidad
Provincias y áreas con formaciones acuíferas de relevante importancia	A	A1	$T \geq 220^{\circ}\text{C}$
		A2	$150^{\circ}\text{C} < T < 220^{\circ}\text{C}$
	B	B1	$120^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$
		B2	$90^{\circ}\text{C} < T < 120^{\circ}\text{C}$
Provincias y áreas sin importantes formaciones acuíferas	D	D1	$T > 150^{\circ}\text{C}$
		D2	$T < 150^{\circ}\text{C}$

En esta clasificación las provincias categoría “A”, son las más favorables para el desarrollo de proyectos geotermoelectrivos, debido a sus elevadas temperaturas. Según se aprecia (Figura 16), las áreas de mayor potencial (Clases A1 y A2) se encuentran asociadas a las cordilleras y edificios volcánicos recientes. Conforme nos alejamos de estos sectores, las temperaturas y el potencial geotérmico tienden a disminuir.

A nivel nacional, se reconocen las siguientes *provincias* geotérmicas:

- **Cuatro provincias de categoría A** (Cordillera Volcánica de Guanacaste, Arenal, Cordillera Volcánica Central y Cerro Pando), con una superficie total de 16 861 km². Estas tienen, en conjunto, una vocación geotérmica de buena a óptima.
- **Cinco provincias de categoría B** (Tempisque, Llanuras del Atlántico, Talamanca Norte, Talamanca Sur y Pacífico Central) con una superficie total de 28 105 km². Estas provincias tienen, en conjunto una vocación geotérmica moderada.
- **Tres provincias de categoría D** (Nicoya, Herradura y Osa), con una superficie de 6210 km². Estas provincias tienen una *vocación geotérmica* de muy baja a nula.

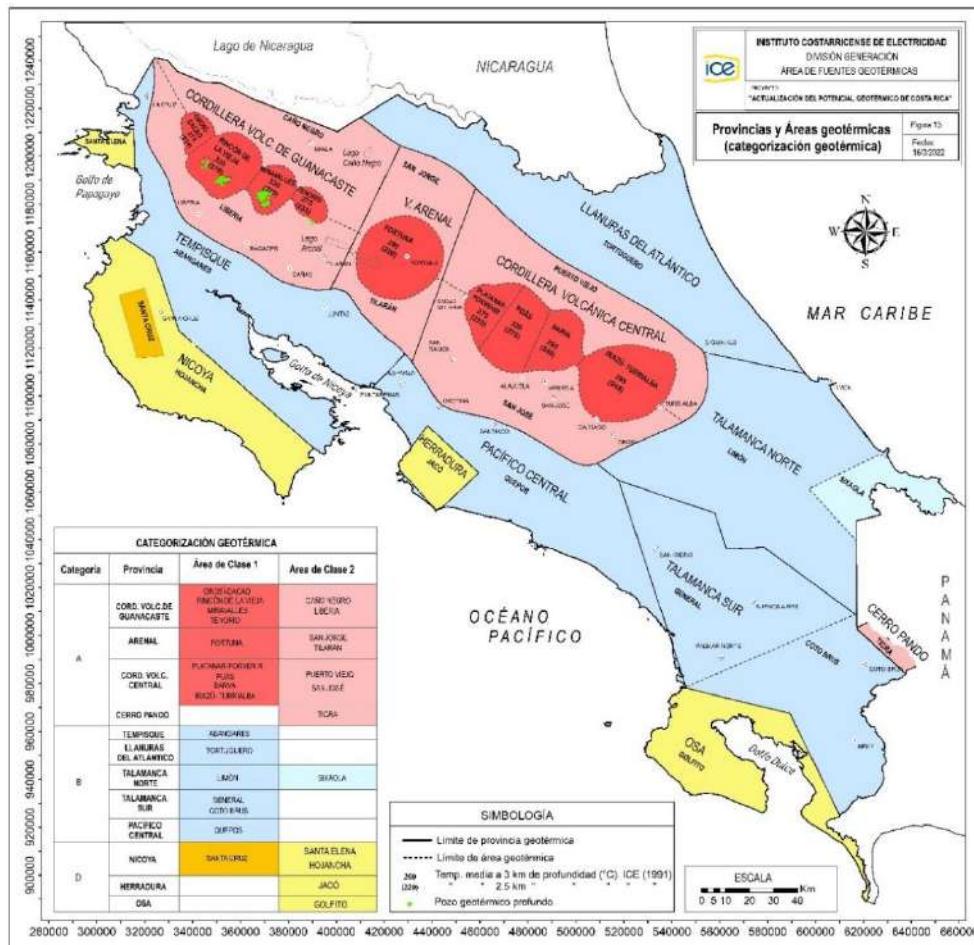


Figura 16. Mapa de categorización geotérmica de Costa Rica, basado en las estimaciones de temperatura a 3,0 km de profundidad. Las áreas clase A1 (temp. $\geq 220^{\circ}\text{C}$), corresponde a los sectores con mayor potencial para la producción geotermoeléctrica.

Adicionalmente, cada una de las *provincias*, se divide en las siguientes áreas:

- **Nueve áreas de clase A1**, con una superficie total de 4706 km² (Orosí-Cacao, Rincón de la Vieja, Miravalles, Tenorio, Fortuna, Platanar-Porvenir, Poás, Barva, Irazú-Turrialba). Todas ellas tienen una vocación geotérmica óptima, y constituyen las zonas del país que, desde el punto de vista geológico, tienen la mayor prioridad para la ejecución de proyectos geotermoeléctricos.

- **Siete áreas de clase A2**, con una superficie total de 12155 km² (Caño Negro, Liberia, San Jorge, Tilarán, Puerto Viejo, San José, Tigra). Ellas tienen una vocación geotérmica buena, y representan zonas de segunda prioridad para la búsqueda de fluidos utilizables para el desarrollo geotermoeléctrico.

- **Seis áreas de clase B1**, con una superficie total de 27189 km² (Abangares, Tortuguero, Limón, General, Coto Brus, Quepos). Tienen una vocación geotérmica moderada, y deben, por lo tanto, considerarse de tercera prioridad para la búsqueda de fluidos utilizables para la generación de electricidad. Sin embargo, estas áreas tienen interés para el hallazgo de agua caliente, que podría usarse en una amplia gama de usos directos.

- **Un área de clase B2**, con una superficie de 840 km² (Sixaola). Tiene una vocación geotérmica pobre. En este momento, sus perspectivas para el aprovechamiento de la geotérmica con fines de generación eléctrica son bajas. Podría tener cierto interés, por la posibilidad de encontrar en ella agua moderadamente caliente que pudiera ser utilizada en una gama más bien reducida de aplicaciones directas.

- **Un área de clase D1**, con una superficie de 314 km² (Santa Cruz). Tiene una vocación geotérmica baja. Podría eventualmente tener un interés para la generación geotermeléctrica mediante proyectos de rocas secas.

- **Cuatro áreas de clase D2**, con una superficie total de 5896 km² (Santa Elena, Hojancha, Jacó, Golfito). Tienen una vocación geotérmica muy baja. Estas áreas corresponden a sectores de rocas de baja permeabilidad y además de relativamente baja temperatura; por lo tanto, tienen un valor práctico muy bajo para el desarrollo de la energía geotérmica.

En la tabla 4 y figura 17 se muestra la distribución porcentual de las diferentes categorías de “provincias” y “áreas” geotérmicas, respecto a la superficie total del país (51 100 km²).

Tabla 4. División del territorio costarricense con base en la vocación geotérmica

PROVINCIA GEOTÉRMICA		ÁREA GEOTÉRMICA		VOCACIÓN (Provincias y áreas)		
CATEGORÍA	CANTIDAD	CLASE	CANTIDAD	VOCACIÓN GOTÉRMICA	SUPERFICIE (Km ²)	PORCENTAJE TERRITORIO NACIONAL
A	4	A1	9	ÓPTIMA	4706	9
		A2	7	BUENA	12 155 } 16 861	} 33 24
B	5	B1	6	MODERADA	27 189	53
		B2	1	ESCASA	840 } 28 029	} 55 2
D	3	D1	1	ESCASA	314	1
		D2	4	MUY ESCASA	5 896 } 6 210	} 12 11
TOTAL	12	TOTAL	28	TOTAL	51 100	100

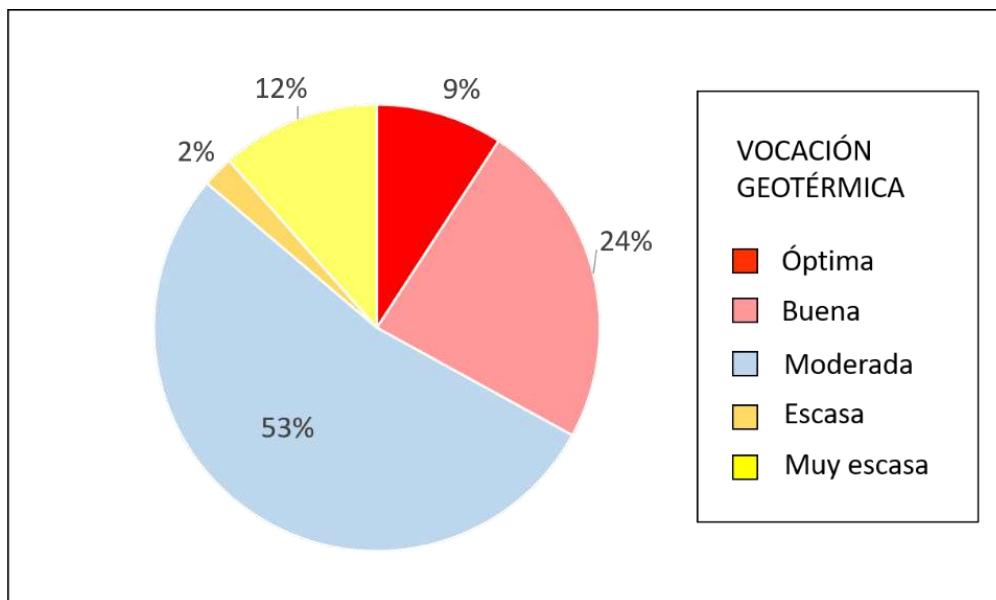


Figura 17. Distribución porcentual del territorio nacional en función de la vocación geotérmica.

6.3.3 Significado práctico de la categorización geotérmica (modificado de ICE, 1991).

Provincias de Categoría A

Corresponden a zonas donde es muy probable la existencia, dentro de 3,0 km de profundidad, de por lo menos una importante formación permeable que almacene fluidos con temperatura $\geq 150^{\circ}\text{C}$.

- Áreas Clase A1 ($T \geq 220^{\circ}\text{C}$): tienen una vocación geotérmica óptima y desde el punto de vista geológico, merecen la mayor prioridad para la ejecución de proyectos con fines de producción geotermoeléctrica.
- Áreas Clase A2 ($150^{\circ}\text{C} < T < 220^{\circ}\text{C}$): tienen vocación geotérmica buena y presentan geológicamente zonas de segunda prioridad para la ejecución de proyectos orientados a la producción geotermoeléctrica.

Asimismo, las áreas A1 y A2 tienen muy buenas expectativas para la ejecución de proyectos geotérmicos de usos directos con temperaturas del orden de 100°C o más.

Provincias de Categoría B

En ellas es muy probable la existencia, dentro de 3,0 km de profundidad, de por lo menos una importante formación acuífera que almacene fluidos con temperaturas entre 90°C y 150°C .

- Áreas Clase B1 ($120^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$): en ellas, salvo casos excepcionales, solo existen reservorios de agua dominante, se pueden considerar geológicamente zonas de tercera prioridad para la ejecución de proyectos geotermoeléctricos.

Al mismo tiempo, sin embargo, estas áreas tienen un potencial muy bueno para el desarrollo de proyectos de uso directo del calor geotérmico con una temperatura de más o menos 100°C .

- Áreas Clase B2 ($90^{\circ}\text{C} < T < 120^{\circ}\text{C}$): tienen un interés bajo para la ejecución de proyectos geotermoeléctricos; pero tienen potencial para el desarrollo de aplicaciones directas del calor geotérmico.

Provincias de Categoría D

Se considera que, dentro de los 3,0 km de profundidad no se tienen formaciones acuíferas importantes, por lo tanto, sólo un régimen térmico de tipo conductivo existiría. Se trata, por lo tanto, de provincias que, en conjunto, constituyen zonas de rocas secas “sensu lato”.

- Áreas Clase D1 ($T > 150^{\circ}\text{C}$): dependiendo de los niveles de temperatura y de varios otros factores, podrían eventualmente alcanzar un interés local para la extracción de calor mediante la tecnología de la circulación forzada de agua en bloques de la corteza fracturados artificialmente (proyectos de rocas secas), en caso de que la legislación lo permita.
- Áreas clase D2 ($T < 150^{\circ}\text{C}$): sectores que tienen una perspectiva muy baja para el desarrollo práctico de la geotermia.

6.3.4 Categorización geotérmica de Costa Rica y variables limitantes para el aprovechamiento del recurso.

Tal y como se desprende del análisis de la Figura 16, las zonas de mayor temperatura y favorabilidad para la producción geotermoeléctrica, se asocian con los volcanes recientes: cordillera volcánica de Guanacaste, cordillera de Tilarán (Volcán Arenal) y cordillera volcánica Central. Estos son sectores gran belleza escénica y exuberante vegetación, los cuales en gran medida coinciden con zonas forestales protegidas (parques nacionales, reservas estatales y privadas, entre otras modalidades); esto limita, bajo la legislación actual, la explotación de los recursos geotérmicos en dichos sectores. Lo anterior, sumado a la posible existencia de reservas indígenas, humedales y zonas de gran desarrollo urbano o industrial, restringen en gran medida las áreas disponibles para el aprovechamiento pleno de los recursos geotérmicos existentes.

Considerando lo anterior, es importante conocer el potencial geotérmico del país no solo desde el punto de vista científico, sino también conocer el potencial al que se podría tener acceso, al excluir los sectores con restricciones de acceso. Lo anterior resulta de interés para la planificación de las estrategias de aprovechamiento del recurso. Por lo tanto, las estimaciones del potencial geotérmico nacional se realizaron bajo esos dos escenarios.

Debido a que el presente estudio contempla el potencial geotermoeléctrico de los recursos mayores a 150°C, los cálculos respectivos se realizaron sobre las áreas clasificadas como A1 y A2.

Tomando como referencia la categorización geotérmica (Figura 16), se procedió a aplicar álgebra de mapas (mediante software de SIG) para realizar la sustracción de las áreas correspondientes a: zonas forestales protegidas, reservas indígenas, desarrollos urbanos y humedales. A estas dos últimas variables se les asignó un área buffer de 100 m (Figura 18).

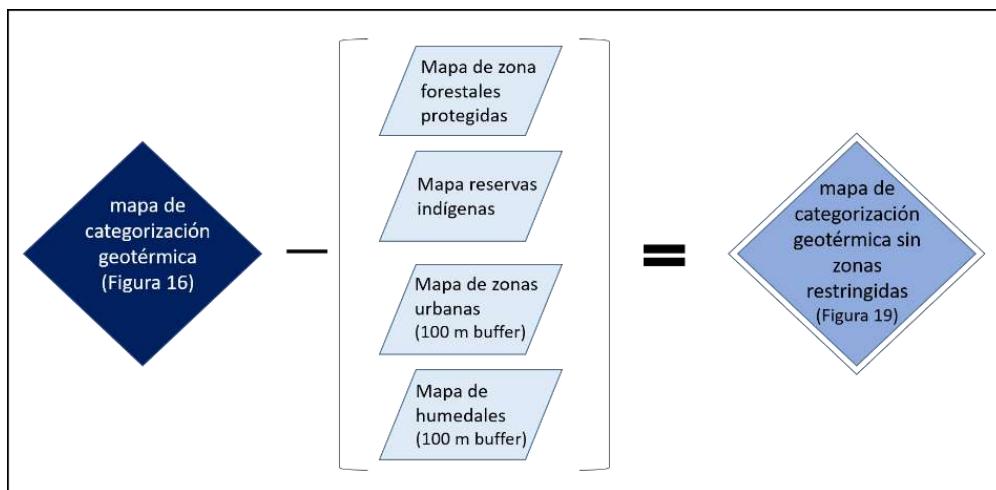


Figura 18. Álgebra de mapas utilizado para obtener el mapa de categorización geotérmica que excluye las áreas con limitaciones de acceso.

El mapa obtenido muestra la clasificación geotérmica del país y las áreas con limitaciones de acceso (Figura 19). Este proceso es indispensable para contar con las nuevas áreas que fueron utilizadas en los cálculos de potencial energético.

La existencia de áreas con limitaciones de acceso es particularmente sensible en los sectores con vocación geotérmica óptima (A1), donde los parques nacionales y reservas cubren la mayor parte de los volcanes, disminuyendo de forma importante las áreas disponibles para el aprovechamiento del recurso geotérmico.

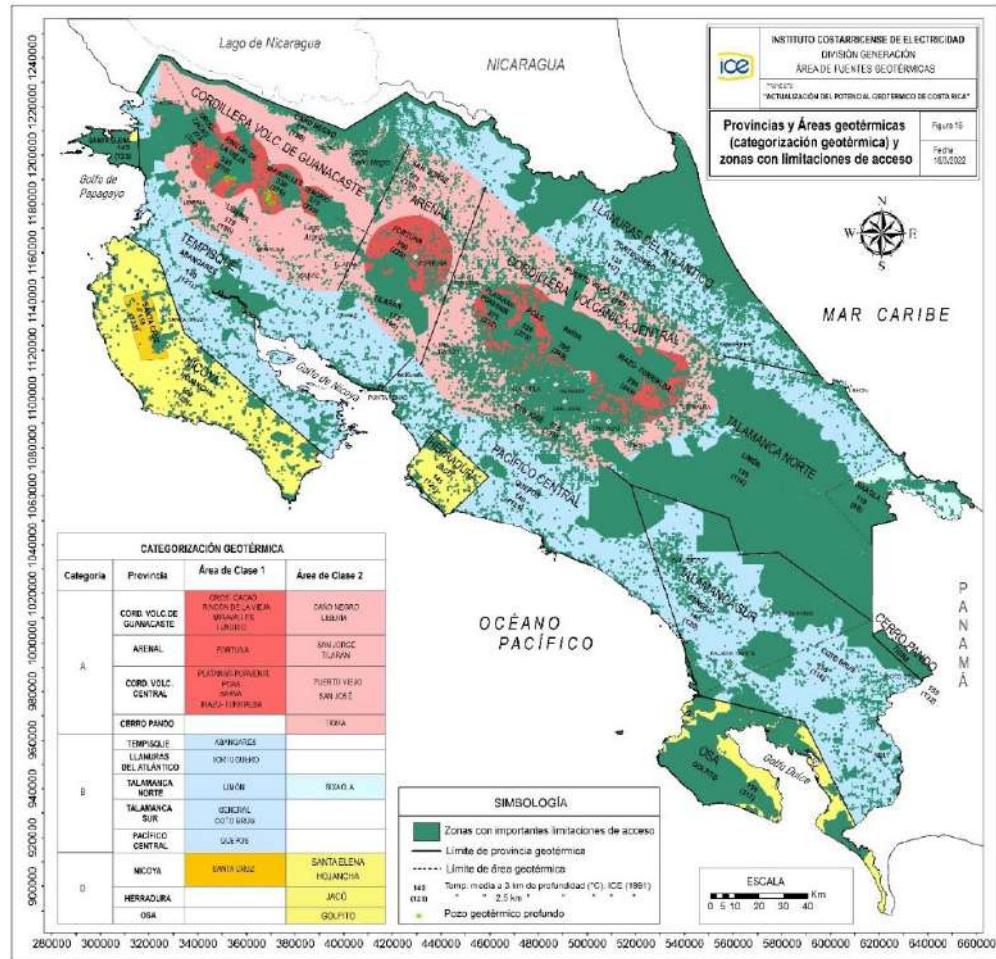


Figura 19. Mapa de categorización geotérmica de Costa Rica. En color verde se muestran las zonas con restricciones de acceso para el aprovechamiento del recurso geotérmico.

En la tabla 5 y en la Figura 20 se muestra la distribución porcentual (respecto a la superficie total del país) de las diferentes “provincias” y “áreas” geotérmicas, al excluir las zonas con restricciones de acceso.

Tabla 5. División geotérmica del territorio costarricense con base en las diferentes categorías de provincias y áreas, al excluir las zonas con restricciones de acceso

PROVINCIA GEOTÉRMICA		ÁREA GEOTÉRMICA		VOCACIÓN (Provincias y áreas)		
CATEGORÍA	CANTIDAD	CLASE	CANTIDAD	VOCACIÓN GEOTÉRMICA	SUPERFICIE (Km ²) excluyendo zonas con restricciones de acceso	PORCENTAJE TERRITORIO NACIONAL
A	4	A1	9	ÓPTIMA	1 728	3
		A2	7	BUENA	7 201	14
B	5	B1	6	MODERADA	13 292	26
		B2	1	ESCASA	278	0.5
D	3	D1	1	ESCASA	248	0.5
		D2	4	MUY ESCASA	3 469	7
TOTAL	12	TOTAL	28	TOTAL	26 216	51,5

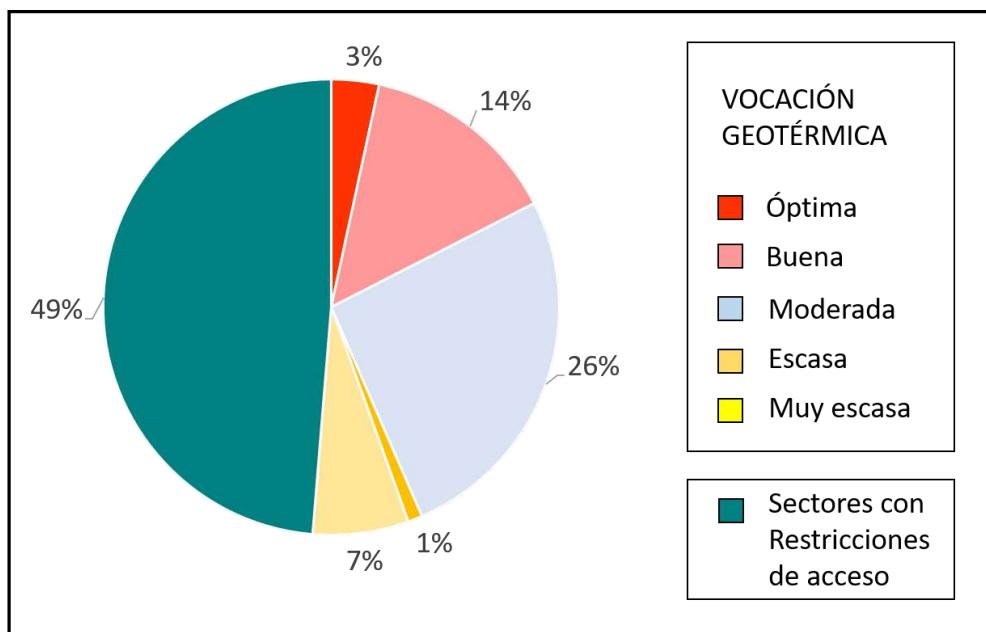


Figura 20. Distribución del territorio nacional en función de la vocación geotérmica. Porcentajes obtenidos al incluir en el análisis los sectores con restricciones de acceso.

Al comparar las áreas totales obtenidas según su *vocación geotérmica* y las áreas resultantes al excluir los sectores con restricciones de acceso (Tablas 4 y 5, respectivamente), se observa que, en el segundo caso, las áreas de interés geotérmico resultantes se reducen significativamente (Figura 21). Las áreas con vocación geotérmica

óptima experimentan una reducción del 63%, al pasar de 4706 m² a 1728 km²; las de vocación geotérmica buena se reducen en un 41% (de 12155 km² a 7201 km²); las de moderada vocación geotérmica una disminución del 51% (de 27189 km² a 13292 km²); un comportamiento similar se observa en las otras categorías de menor potencial.

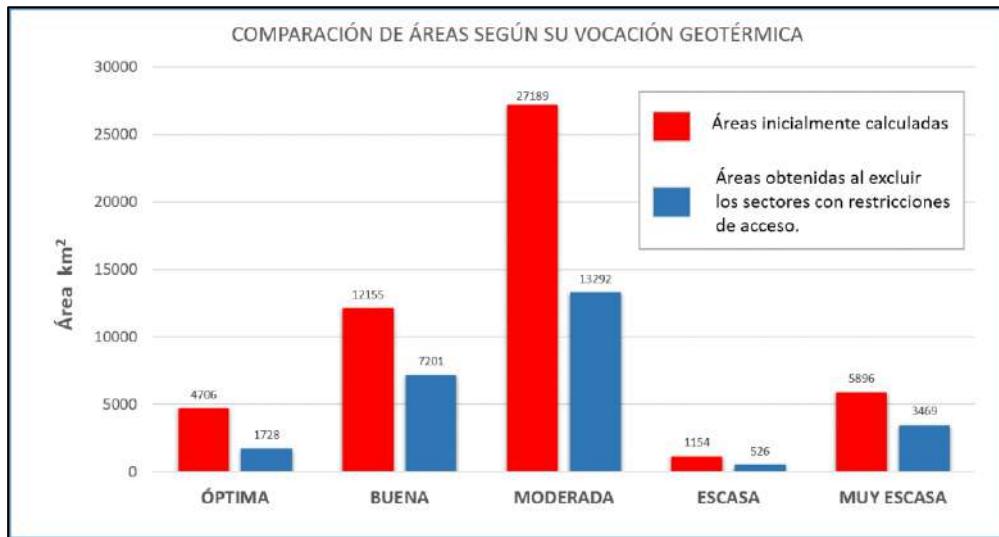


Figura 21. Comparación de áreas según su vocación geotérmica. Se muestran las áreas totales inicialmente calculadas con criterios técnico-geocientíficos y las obtenidas al excluir los sectores que tienen importantes limitaciones de acceso.

7 Resumen de las investigaciones de campo complementarias realizadas durante el presente estudio

7.1 Introducción

Con el objetivo de complementar la información geotérmica disponible, se planificaron y ejecutaron campañas de campo orientadas a la recolección de datos técnicos en seis sectores de interés, denominadas: Suroeste del volcán Tenorio, Norte del volcán Platanar-Porvenir, Oeste del volcán Platanar-Porvenir, Bajos del Toro, Vara Blanca-Poasito y sur del volcán Turrialba (Figura 22).

En la fase de análisis e interpretación de la información, se consideró adicionalmente el prospecto geotérmico Arenal-Poco Sol, al cual se le había realizado el estudio de reconocimiento geotérmico en el año 2011.

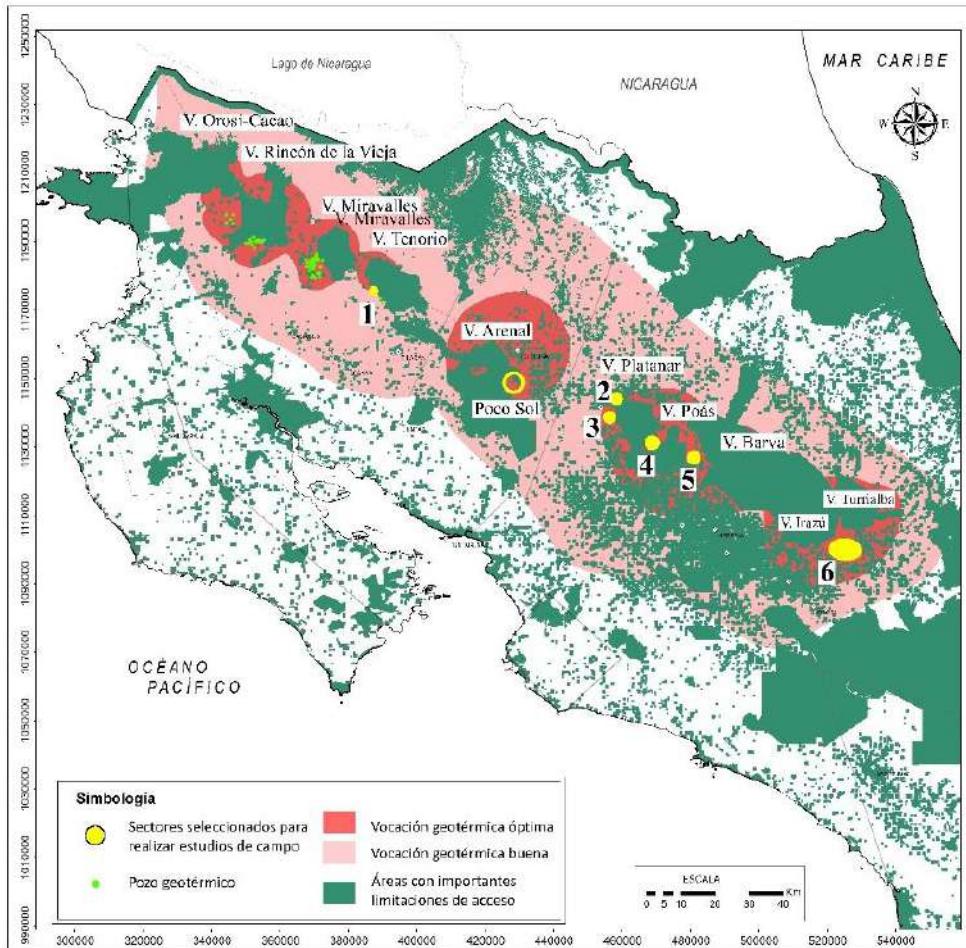


Figura 22. Ubicación de los sectores donde se realizaron estudios de campo complementarios: 1) suroeste del volcán Tenorio; 2) norte del volcán Platanar-Porvenir; 3) oeste del volcán Platanar-Porvenir; 4) Bajos del Toro; 5) Vara Blanca-Poasito; 6) sur del volcán Turrialba. Adicionalmente, se muestra la localización del prospecto geotérmico Arenal-Poco Sol.

Las labores de campo se ejecutaron durante la segunda mitad del año 2021 e inicios del 2022, e incluyeron las siguientes disciplinas:

- **Geología:**

Mapeo y caracterización de rasgos lito-estratigráficos, mineralógicos, tectónicos e hidrotermales; identificación de nacientes termales.

- **Geofísica:**

Elaboración de sondeos electromagnéticos pasivos de amplio espectro (BMT), para definir parámetros geofísicos que podrían estar asociados a la existencia de reservorios geotérmicos.

- **Sensores remotos:**

Sobrevuelos mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT) con el objetivo de identificar zonas de anomalía geotérmica y rasgos morfo-estructurales. Se utilizaron sensores en color verdadero (RGB) e infrarrojo térmico (IR).

- **Ambiental**

Mediciones acústicas de ruido ambiente para obtener el nivel de presión sonora (Lp) y mediciones de H₂S y CO₂, para determinar la calidad del aire; información base para futuras campañas de exploración.

Como complemento a los estudios indicados, se realizó la clasificación de los siete prospectos geotérmicos, utilizando las metodologías de la CMNU (2009) y UNECE, 2016.

En el apéndice C se presenta el detalle de las investigaciones de campo y de la clasificación mencionada.

7.2 Geología

Se evaluaron una serie de indicadores geológicos que podrían asociarse a la posible existencia de yacimientos geotérmicos profundos, entre ellos: presencia de elementos estructurales, existencia de fuentes de calor recientes o activas, evidencias de descarga superficial de aguas geotérmicas de origen profundo, presencia de manifestaciones hidrotermales activas y contexto estructural. (Tabla 6).

Tabla 6. Valoración de los indicadores geológicos

Prospecto Geotérmico	Indicadores geológicos					Puntaje
	Estructuras caldéricas	Fuente de Calor	Evidencias de descarga de un reservorio geotérmico maduro	Manifestaciones hidrotermales activas	Contexto estructural	
	Sí= 1 Probable= 0.5 No= 0	Activa= 1 Latente= 0.5	Sí= 1 Probable = 0.5 No= 0	Sí= 1 Muy escasas= 0.5 No= 0	Favorable= 1 Intermedio= 0.5 No favorable= 0	
Suroeste volcán Tenorio	0.5	0.5	0	1	1	3
Volcán Arenal-Poco Sol	0.5	1	1	1	1	4.5
Norte volcán Platanar-Porvenir	0.5	0.5	0.5	1	1	3.5
Oeste volcán Platanar-Porvenir	0	0.5	0	0	1	1.5
Bajos del Toro	0	1	0	0.5	1	2.5
Vara Blanca-Poasito	0	1	0	0	1	2
Sur volcán Turrialba	0.5	1	0	0.5	1	3

Del análisis se desprende que, de los prospectos analizados, “Volcán Arenal-Poco Sol” es el que presenta características geológicas más favorables, seguido de “Norte volcán Platanar-Porvenir”; según se aprecia en la figura 23. Por lo tanto, desde el punto de vista geológico, esos serían los sectores prioritarios para continuar los estudios exploratorios.

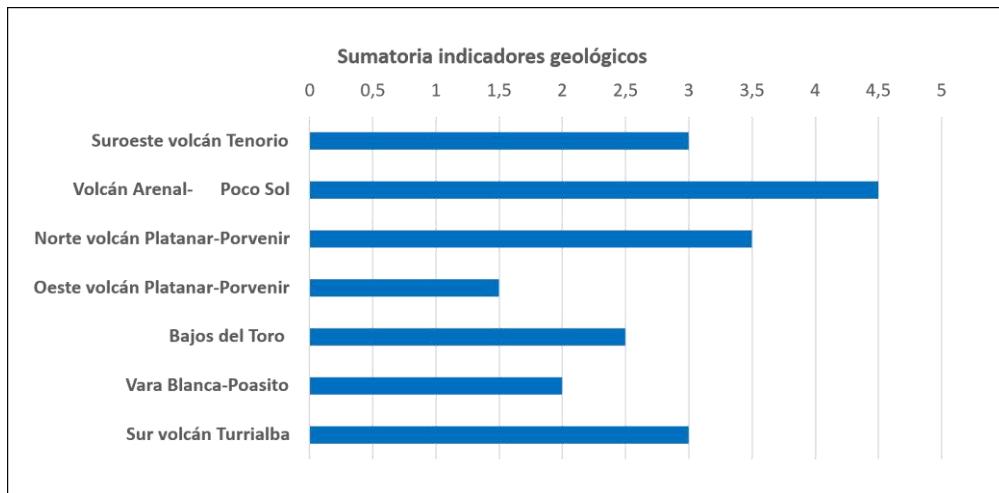


Figura 23. Evaluación de los indicadores geológicos, por sector de estudio.

7.3 Sensores remotos (VANT)

La utilización de vehículos aéreos no tripulados (VANT o “dron”) permitió contar con imágenes y videos aéreos que constituyeron un valioso complemento a los recorridos geológicos de campo. Favoreció la identificación de morfologías de interés geotérmico, definición de vías de acceso y el mapeo de manifestaciones termales, entre otras tareas.

Esta herramienta constituye un valioso complemento a otras fuentes de información de sensores remotos, tales como: imágenes satelitales, imágenes radar, nubes de puntos LIDAR; siendo especialmente útil en sectores de moderada extensión (debido a la limitada autonomía del equipo usado), donde se requiere estudios detallados.

Se comprobó la utilidad del VANT, equipado con un sensor térmico infrarrojo, permitiendo delimitar zonas de anomalías térmicas de moderada temperatura (27-65°C, Figura 24 a). Los resultados fueron más favorables en sobrevuelos nocturnos, ya que esto minimiza el efecto de la radiación solar sobre las superficies del terreno, aumentando el contraste entre la anomalía térmica y su entorno (Figura 24 b). Adicionalmente, esta técnica permitió ubicar y determinar la temperatura de algunas fuentes termales (Figura 24 c), siendo un valioso complemento a labores de mapeo geológico-geoquímico.

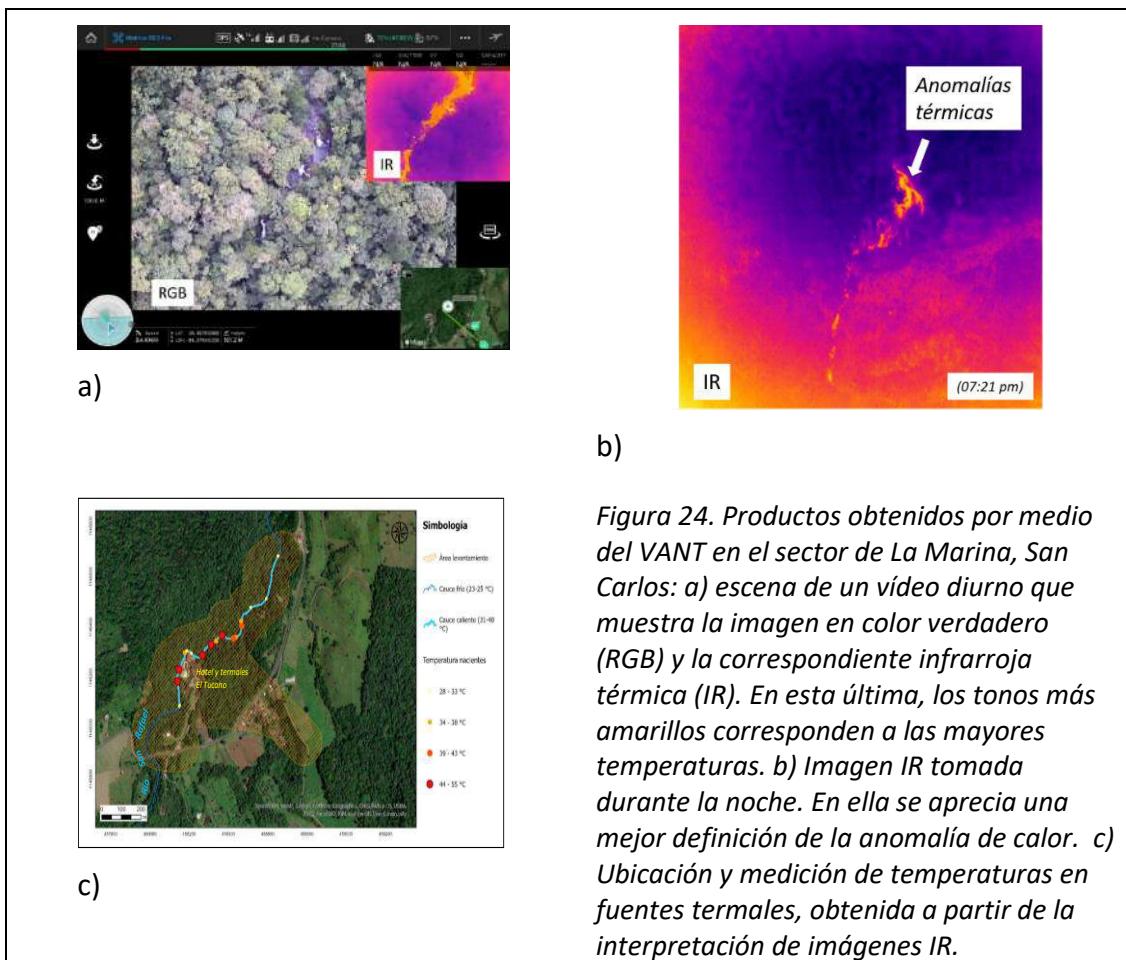


Figura 24. Productos obtenidos por medio del VANT en el sector de La Marina, San Carlos: a) escena de un video diurno que muestra la imagen en color verdadero (RGB) y la correspondiente infrarroja térmica (IR). En esta última, los tonos más amarillos corresponden a las mayores temperaturas. b) Imagen IR tomada durante la noche. En ella se aprecia una mejor definición de la anomalía de calor. c) Ubicación y medición de temperaturas en fuentes termales, obtenida a partir de la interpretación de imágenes IR.

7.4 Parámetros ambientales

Las labores de campo realizadas permiten concluir lo siguiente (Figura 25):

Las mediciones de H₂S ambiente se encuentran entre 0,001 ppm – 0,002 ppm, muy por debajo de las 10 ppm límite que estable la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, por su sigla en inglés) para jornadas laborales de 8 horas. Por otro lado, la Organización Mundial de Salud establece como límite ambiental 0,10 ppm. A nivel nacional no hay legislación aplicable.

Las mediciones de CO₂ ambiente se encuentran entre 215 ppm – 241 ppm, muy por debajo de las 5000 ppm límite que estable OSHA para jornadas laborales de 8 horas. A nivel nacional no hay legislación aplicable.

Las mediciones de ruido ambiente se encuentran entre 28,46 dBA – 40,26 dBA, las cuales se mantienen dentro de los valores admisibles en el reglamento para el control de la contaminación por ruido, N°39428-S, y cuyo valor máximo permisible es de 65 dBA en horario diurno (mismo en el que se realizaron las mediciones).

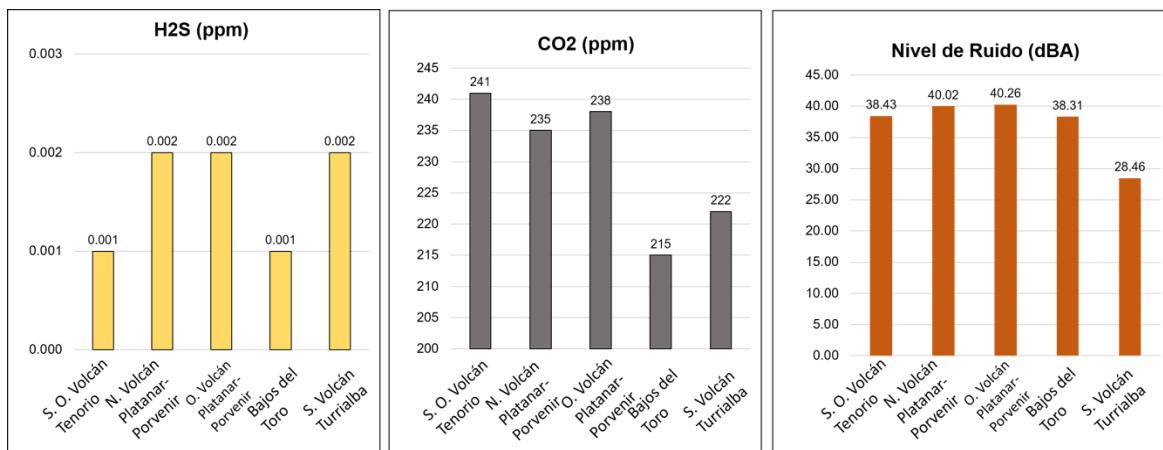


Figura 25. Mediciones promedio de H_2S , CO_2 y Ruido ambiente, por sector.

Es importante indicar que todos los sectores de monitoreo comparten 4 actividades económicas en sus áreas de influencia, que son: agricultura, ganadería comercio y turismo.

7.5 Geofísica

La campaña de campo fue realizada por el C.S. Explotación Subterránea de Ingeniería y Construcción (Badilla, 2022) y las interpretaciones fueron complementadas por personal encargado de la elaboración del presente estudio.

La interpretación de los sondeos geofísicos permitió elaborar una categorización de las áreas de estudio en términos de la estratigrafía geoeléctrica y la eventual existencia de un recurso geotérmico de interés: 1 (Potencial Alto), 0,5 (Potencial Intermedio) y 0 (Potencial Bajo), Tabla 7.

Tabla 7. Categorización de las áreas de estudio en términos de la estratigrafía geoeléctrica y su eventual potencial geotérmico

Sector	Hallazgo	Potencial
Suroeste V. Tenorio	Possible reservorio y zonas limítrofes	1
Arenal-Poco Sol	Possible reservorio y zonas limítrofes	1
Platanar-Porvenir	Zonas limítrofes	0,5
Bajos del Toro	No hubo indicios	0
Vara Blanca	Possible reservorio y zonas limítrofes	1
Sur V. Turrialba	Zona limítrofe	0,5

Según se aprecia, desde el punto de vista geofísico los sectores con características más favorables son: Suroeste V. Tenorio, Arenal-Poco Sol y Vara Blanca.

Es importante tener presente que, el no determinarse señales asociables a yacimientos geotermales en algunos sitios, no implica la inexistencia de los mismos, sino que podría ubicarse en zonas aledañas, y sus manifestaciones superficiales, corresponder a expresiones de zonas de descarga de dichos yacimientos. Adicionalmente, es importante considerar que los estudios realizados son de carácter general (de 1 a 5 sondeos por sitio), por lo cual, para futuras etapas de exploración a mayor detalle, se requiere de la ampliación de zonas de estudio para contar con un panorama más amplio.

En el apartado 7.7 se indica la valoración de los siete sectores, tomando en consideración los indicadores geológicos y geofísicos.

7.6 Clasificación Marco de las Naciones Unidas para la energía fósil y los recursos y reservas minerales (CMNU-2009), aplicada a los recursos de energía geotérmica (UNECE, 2016).

Dentro de las aplicaciones prácticas que ha establecido la UNECE, se encuentra la adaptación de la clasificación de las Naciones Unidas para la energía fósil y los recursos y reservas minerales (CMNU-2009), para la energía geotérmica; siendo un esfuerzo por normalizar la manera en que se informa el potencial de energía renovable. Dicha clasificación considera la viabilidad socio-económica (eje E), la viabilidad del proyecto (eje F) y las incertidumbres significativas que afectan la cantidad de recursos estimados (nivel de conocimiento geológico, eje G).

Esta clasificación se aplicó a todos los sectores donde se realizaron estudios de campo en el marco del presente estudio; así como al prospecto geotérmico Arenal-Poco Sol.

De acuerdo al nivel de información actual, todos los prospectos analizados se encuentran en un nivel de exploración muy similar (Etapa de Reconocimiento geotérmico).

Resultados:

- **Eje E (viabilidad socio-económica). Tabla 8.**

Tabla 8. Clasificación obtenida en el eje E

Categoría	Razonamiento para Clasificación
E3.2	No se espera que el tema se resuelva dentro de un futuro previsible. Tomando como base el rango más bajo exploratorio en todos los temas del entorno (legal, ambiental, mercado, entre otros), no se puede determinar la viabilidad económica de la extracción debido a la información insuficiente en la fase de exploración.

- **Eje F (viabilidad técnica del proyecto. Madurez de los estudios y compromisos necesarios para poner en práctica planes o proyectos de explotación de los recursos). Tabla 9.**

Tabla 9. Clasificación obtenida en el eje F

Categoría	Razonamiento para Clasificación
F3.3	Estas zonas están en etapas tempranas de las actividades de exploración. Puede deducirse de los estudios geológicos regionales las condiciones favorables para el descubrimiento potencial de yacimientos en una provincia geotérmica.

- **Eje G (nivel de confianza del conocimiento geológico y posibilidades de recuperar las cantidades establecidas). Tabla 10.**

Tabla 10. Clasificación obtenida en el eje G

Categoría	Razonamiento para Clasificación
G4	Cantidades estimadas relacionadas con un yacimiento potencial, basadas principalmente en evidencia indirecta.

Por lo tanto, con el nivel de conocimiento actual y de acuerdo a la clasificación indicada, los prospectos geotérmicos se clasifican en la categoría E3.2/F3.3/G4, correspondiente a proyectos de exploración (Figura 26).

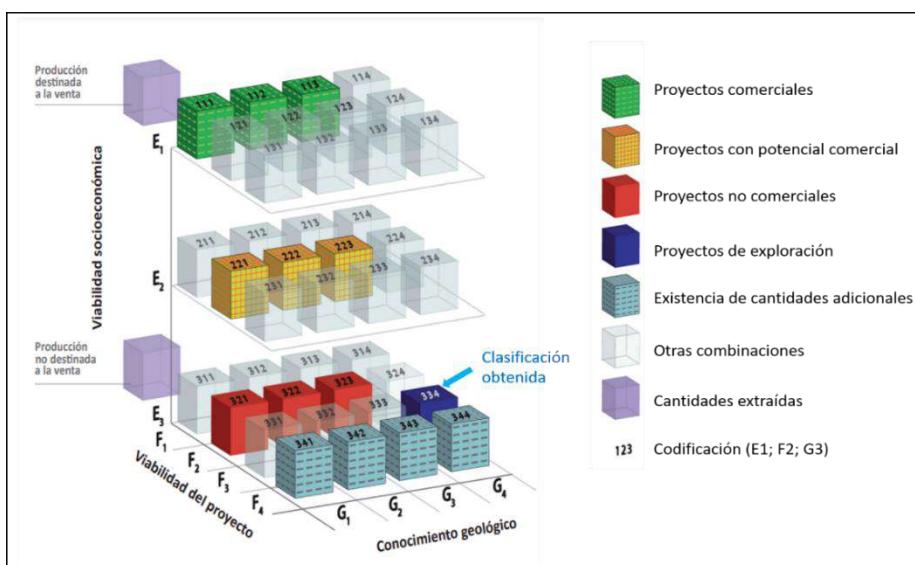


Figura 26. Diagrama ternario para la clasificación de los recursos (CMNU, 2009). Todos los proyectos analizados se clasifican con el código E3; F3; G4, correspondiente a Proyectos de Exploración.

7.7 Integración de resultados

Las investigaciones de campo y posteriores análisis permitieron realizar una valoración macro de las características geocientíficas de cada sector, en función de su idoneidad para la posible existencia de un yacimiento geotérmico de alta entalpía (indicadores geotérmicos). En la Tabla 11 se presenta la unificación de los indicadores geológicos y geofísicos descritos en secciones anteriores (7.2 y 7.5, respectivamente).

Tabla 11. Indicadores geotérmicos de los 7 sectores analizados

Prospecto Geotérmico	Indicadores geocientíficos						Puntaje
	Estructuras caldericas Sí= 1 Probable= 0.5 No= 0	Fuente de Calor Activa= 1 Latente= 0.5	Evidencias de descarga de un reservorio geotérmico maduro Sí= 1 Probable = 0.5 No= 0	Manifestaciones hidrotermales activas Sí= 1 Muy escasas= 0.5 No= 0	Contexto estructural Favorable= 1 Intermedio= 0.5 No favorable= 0	Contexto geeléctrico (geofísica) Favorable= 1 Intermedio= 0.5 Desfavorable= 0	
Suroeste volcán Tenorio	0.5	0.5	0	1	1		3
Volcán Arenal-Poco Sol	0.5	1	1	1	1		4.5
Norte volcán Platanar-Porvenir	0.5	0.5	0.5	1	1		3.5
Oeste volcán Platanar-Porvenir	0	0.5	0	0	1		1.5
Bajos del Toro	0	1	0	0.5	1		2.5
Vara Blanca-Poasito	0	1	0	0	1		2
Sur volcán Turrialba	0.5	1	0	0.5	1		3

Del análisis realizado se desprende que, de los prospectos analizados, el que tiene características más favorables es el “Volcán Arenal-Poco Sol”, seguido de “Norte volcán Platanar-Porvenir” y “Suroeste del volcán Tenorio”, considerados prioritarios para continuar los estudios exploratorios de mayor detalle.

8 Cálculos para la actualización del potencial geotermoeléctrico nacional

8.1 Introducción

En el año de 1991 el Instituto Costarricense de Electricidad culminó el primer estudio de reconocimiento geotérmico de Costa Rica, en el cual se cuantificó el potencial energético de las principales áreas geotérmicas del país. En dicho estudio se estimó que la capacidad geotermoeléctrica promedio de Costa Rica era de 986 MWe (Tabla 12).

Tabla 12. Estimaciones de la capacidad geotermoeléctrica instalable de Costa Rica (con base en las reservas) realizadas por ICE (1991).

Grupo	Área Geotérmica	1 Separación (MWe)	2 Separación (MWe)	Promedio (MWe)
1°	Miravalles	164	213	189
	Rincón de la Vieja	137	177	157
2°	Irazú-Turrialba	101	130	115
	Tenorio	97	123	110
	Platanar	97	122	109
	Poás	90	116	103
	Barva	85	109	97
3°	Fortuna	61	77	69
	Orosí-Cacao	33	41	37
Total		865	1108	986

Luego de más de 30 años, y teniendo a disposición gran cantidad de nuevos datos geocientíficos del subsuelo, el ICE se da a la tarea de realizar la actualización del potencial geotérmico de Costa Rica. Dicha actualización se abocó a la estimación del potencial geotermoeléctrico de los recursos con temperaturas mayores a 150°C, es decir, las áreas geotérmicas de clase A1 y A2 (Figuras 13 y 16).

Para el cálculo del potencial energético se utilizó el “método volumétrico”, descrito en OLADE-BID (1994 b), siendo este probablemente el más comúnmente utilizado en este tipo de estimaciones geotérmicas. Se basa en el cálculo de energía contenida en un cierto volumen de roca.

Tal como lo indica OLADE-BID (1994 b), los valores que se obtienen empleando métodos volumétricos, se consideran estimaciones; esto debido a que algunos de los parámetros usados en los cálculos son inferidos, y posiblemente puedan diferir de los que se obtengan

en el futuro, una vez que se perforen pozos profundos de exploración y/o desarrollo y al analizar los resultados de las pruebas y mediciones.

Lo ideal en este tipo de determinaciones es utilizar al mismo tiempo un enfoque probabilístico aplicado a los parámetros considerados en el cálculo; esto por cuanto dichos parámetros tienen una incertidumbre inherente al proceso de estimación utilizado. Para esto se utilizó la simulación de Montecarlo, la cual se basa en una distribución de probabilidades que trabaja con los parámetros inciertos encontrados, para hacer el respectivo cálculo de las reservas energéticas. Los cálculos se realizaron mediante el programa “@RISK 8.2 Industrial”.

Para cada área geotérmica se definieron tres posibles juegos de datos, “mínimo”, “máximo” y “más probable”. Se entiende como “extensión mínima” el menor tamaño estimado que puede tener el yacimiento (conservadoramente hablando), “extensión máxima” como el máximo estimado (estimación más liberal), y “extensión más probable” como las condiciones más probables de encontrar. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que esta no es necesariamente la condición real: por ejemplo, se podría tener en la realidad una extensión del yacimiento más cercana a la probable, y sin embargo tener una temperatura más cercana a la condición mínima, y una porosidad cercana a los valores máximos. Es por esto que se recurre al análisis estadístico, para iterar entre la posible gama de condiciones y obtener la que tenga la mayor probabilidad de ocurrencia.

Para la estimación del potencial geotermoeléctrico se utilizaron algunos valores aplicados a otros estudios de pre-factibilidad en la zona del Rincón de la Vieja, Campo geotérmico Alfredo Mainieri Protti y prospecto geotérmico Poco-Sol; entre ellos: porosidad, densidad y calor específico de la roca, densidad y calor específico del fluido, y valores relacionados con el proceso industrial de conversión de energía (temperatura de reinyección, factor de recuperación, eficiencia de la conversión y factor de carga).

Las áreas máxima, más probable y mínima se definieron a partir de los contornos de las curvas de temperatura estimadas a 2,5 y 3 km de profundidad, seleccionando las que se consideran como representativas de las temperaturas mínima, más probable y máxima que se podrían encontrar, según lo observado en otros campos geotérmicos. En el apéndice D se indican los criterios utilizados para determinar las áreas mínimas, más probables y máximas.

Las temperaturas máxima, mínima y más probable del reservorio se obtienen del análisis de la información obtenida en cada zona, y realizando comparaciones con los campos geotérmicos existentes en Costa Rica.

Los espesores de los yacimientos se estimaron mediante un análisis estadístico de lo observado hasta el momento en los campos geotérmicos: Alfredo Mainieri Protti, Las Pailas y Borinquen.

La modelación realizada permite obtener tres probables resultados de potencial geotermoeléctrico de cada una de las áreas geotérmicas: mínimo (percentil 10), más probable (percentil 50) y máximo (percentil 90). Con el fin de tener un mayor nivel de confianza a la hora de reportar los potenciales de cada área, se decidió utilizar el correspondiente al percentil 10, mismo que representa un 90% de probabilidad de ocurrencia.

En el apéndice E se adjuntan la lista de parámetros utilizados en las modelaciones, así como los gráficos probabilísticos de la capacidad instalable obtenidos.

8.2 Metodología

El cálculo principal del potencial energético es el Recurso Base Accesible (RBA), el cual es la cantidad de calor almacenado en las rocas y fluidos del yacimiento considerado y que puede ser alcanzado por medio de pozos geotérmicos. Este cálculo solo considera el calor almacenado en el momento dado, y no considera el recambio energético producto de una posible recarga térmica existente. Esto se debe a que el nivel de conocimiento del yacimiento en el momento no permite una estimación relativamente razonable de dicha recarga. Por lo tanto, el dato obtenido del RBA es un valor de referencia, el cual se irá actualizando, conforme se incremente la exploración de los diferentes yacimientos.

El Recurso Geotérmico (RG) corresponde a la energía que puede ser recuperada en superficie, pues existen limitantes físicas y tecnológicas que impiden extraer todo el calor del yacimiento.

El trabajo Útil (W_u) es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de una cantidad de energía disponible, y depende de la eficiencia en la conversión de la energía térmica a energía mecánica, influenciado entonces por factores termodinámicos y tecnológicos.

La Energía Disponible (E) es la energía eléctrica que se puede obtener del trabajo útil, la cual depende de la temperatura del fluido y del ciclo de trabajo utilizado.

Para el cálculo del potencial energético se utilizarán las siguientes definiciones:

Recurso Base Accesible (RBA)

$$q_Y = C_v * A * E * (T - T_r)$$

Donde,

- q_Y : Energía térmica acumulada en el yacimiento (J)
 C_v : Capacidad calorífica del yacimiento por unidad de volumen (roca y fluidos) (J/m^3
 $^{\circ}C$)
 A : Área del yacimiento (m^2)
 E : Espesor del yacimiento (m)
 T : Temperatura del yacimiento ($^{\circ}C$)
 T_r : Temperatura base de referencia ($25^{\circ}C$)

Se tiene que

$$C_v = \rho_r * C_r * (1 - \Phi) + \rho_f * C_f * \Phi$$

Donde,

- ρ_r : densidad de la matriz de la roca
 C_r : calor específico de la matriz de la roca
 ρ_f : densidad del fluido del yacimiento
 C_f : calor específico del fluido del yacimiento
 Φ : porosidad del yacimiento

La *temperatura base de referencia* es la que se utiliza cuando se hace el cálculo de la energía disponible en todo el volumen, que no es igual a la energía finalmente utilizada para la posible generación eléctrica.

El *Recurso Base Accesible* incluye aquella energía que podría ser utilizada para otros usos: calefacción, industriales, recreación, entre otros. Para efectos del presente estudio, no se realizó este cálculo energético.

Recurso Geotérmico (RG)

$$RG = FRG * RBA$$

Donde,

- FRG : Eficiencia de la recuperación del yacimiento

Trabajo Útil (W_u)

$$W_u = FCI * RG$$

Donde,

- FCI : Eficiencia ideal de la transformación de energía térmica a mecánica

Energía Disponible (E)

$$E = FU * W_u$$

- Donde FU : Eficiencia disponible con respecto a la ideal

8.3 Estimación de la capacidad instalable a partir de las “reservas” y los “recursos” geotérmicos

Es importante indicar algunas de las consideraciones adoptadas para la realización de los cálculos de la capacidad instalable. Estos se realizaron en función de la temperatura de los recursos y el tipo de tecnología que se podría utilizar para su aprovechamiento. En el caso de los recursos mayores a 220°C se visualizó el aprovechamiento mediante plantas de condensación con un ciclo de separación; y los de 150 - 220°C mediante plantas de ciclo binario.

Para el cálculo de capacidad instalable se utilizó una temperatura mínima o de “abandono” de 165 °C para las plantas de condensación, y de 100 °C para las plantas binarias.

A diferencia del estudio del año 1991, para este estudio solo se consideró utilizar equipos de una separación.

8.3.1 *Capacidad instalable a partir de las “Reservas” geotérmicas*

Tal como se indicó en el apartado de definiciones, las “**reservas**” corresponden a los recursos localizados a una profundidad menor a 2,5 km, que podrían ser aprovechados y utilizados en lapso de 10 años.

Los cálculos indican que la capacidad instalable en el país de los recursos mayores a 220°C (Tabla 13), es de 1331 MWe. Cuando se excluyen del análisis los sectores con restricciones de acceso, se obtiene una capacidad instalable de 614 MWe. Este tipo de recursos de alta temperatura corresponden exclusivamente a las áreas de Clase A1.

Los valores específicos por área geotérmica oscilan entre un mínimo de 19 MWe en el área Orosí-Cacao, y un máximo de 592 MWe en el área Rincón de la Vieja. No obstante, los valores obtenidos se reducen considerablemente al excluir los sectores con restricciones de acceso, con un mínimo de 3 MWe en el área Orosí-Cacao y un máximo de 289 MWe en el Rincón de la Vieja.

Aparte del Rincón de la Vieja, las otras áreas de mayor interés son: Miravalles, Fortuna, Poás, Irazú Turrialba. El área de Platanar se podría clasificar como de interés intermedio, y de bajo interés las áreas: Tenorio, Barva y Orosí-Cacao.

Tabla 13. Estimación de la capacidad instalable de los prospectos con temperaturas mayores a 220°C (Clase A1) localizados hasta una profundidad máxima de 2,5 km. Se incluye el potencial total y el obtenido al excluir los sectores con restricciones de acceso.

Área Geotérmica	Potencial total calculado (MWe)	Potencial al excluir los sectores con restricciones (MWe)
Orosí-Cacao	19	3
Rincón de la Vieja	592	289
Miravalles	206	159
Tenorío	23	4
Fortuna	148	72
Platanar	37	9
Poás	121	37
Barva	45	3
Irazú-Turrialba	140	38
Total	1331	614

Para el caso de las áreas con recursos de 150-220°C, se estima una capacidad total 418 MWe (Tabla 14); la cual se reduce a 212 MWe al excluir del análisis los sectores con restricciones de acceso. Este tipo de recursos corresponden exclusivamente a las áreas de Clase A2.

Los valores específicos por área geotérmica oscilan entre un mínimo de 39 MWe en el área geotérmica Tilarán, y un máximo de 113 MWe en el área Puerto Viejo. Estos valores se reducen significativamente al excluir los sectores con restricciones de acceso, con un mínimo de 16 MWe en el área Tilarán y un máximo de 48 MWe en Puerto Viejo.

Otras áreas de alto interés son: San José y Liberia. Las áreas Caño Negro, San Jorge y Tilarán se consideran de interés intermedio.

Tabla 14. Estimación de la capacidad geotérmica para la generación de electricidad de los prospectos 150-220°C (Clase A2) localizados hasta una profundidad máxima de 2.5 km. Se incluye el potencial total y el obtenido al excluir los sectores con restricciones de acceso

Área Geotérmica	Potencial total calculado (MWe)	Potencial al excluir los sectores con restricciones (MWe)
Caño Negro	56	38
Liberia	67	46
Puerto Viejo	113	48
San José	98	26
San Jorge	45	38
Tilarán	39	16
Tigra	0	0
Total	418	212

8.3.2 Capacidad instalable a partir de los “Recursos” geotérmicos

Los “**recursos**” corresponden a la fracción del *recurso accesible* almacenada dentro de la profundidad máxima de 3 km y que podría extraerse económica y legalmente dentro de un tiempo futuro que, para el presente estudio, se establece en 30 años.

La tabla 15 resume los potenciales obtenidos para los “**recursos**” con temperaturas mayores a 220°C, es decir las áreas geotérmica clase A1. Se indica un potencial total del país de 2277 MWe; mientras que, al excluir los sectores con restricciones de acceso se obtiene un potencial de 1019 MWe (Tabla 15).

Los valores específicos por área geotérmica oscilan entre un mínimo de 35 MWe en el área Orosí-Cacao, y un máximo de 930 MWe en el área Rincón dela Vieja; los cuales se reducen de manera importante al excluir los sectores con restricciones de acceso, con un mínimo de 6 MWe en el área Orosí-Cacao y un máximo de 447 MWe en el Rincón de la Vieja.

A parte del Rincón de la Vieja, las otras áreas de mayor interés son: Miravalles, Fortuna, Irazú Turrialba y Poás. Las áreas Platanar y Barva se podría clasificar como de interés intermedio, y de intermedio-bajo las áreas: Tenorio y Orosí-Cacao.

Tabla 15. Estimación de la capacidad geotérmica para la generación de electricidad de los prospectos >220°C localizados hasta una profundidad máxima de 3 km

Área Geotérmica	Potencial total calculado (MWe)	Potencial al excluir los sectores con restricciones (MWe)
Orosí-Cacao	35	6
Rincón de la Vieja	930	447
Miravalles	340	234
Tenorío	38	8
Fortuna	288	155
Platanar	77	23
Poás	193	61
Barva	104	8
Irazú-Turrialba	272	77
Total	2277	1019

Para el caso de las áreas con recursos de 150-220°C (Clase A2), se estima una capacidad total 1908 MWe, la cual se reduce a 1102 MWe al excluir del análisis los sectores con restricciones de acceso (Tabla 16).

Los valores específicos por área geotérmica oscilan entre un mínimo de 18 MWe en el área geotérmica Tigra, y un máximo de 460 MWe en el área San José. Estos valores se reducen significativamente al excluir los sectores con restricciones de acceso, siendo de 0 MWe en el área Tigra y de 186 MWe en el área San José.

Otras áreas geotérmicas de alto interés son: Puerto Viejo, Liberia y Caño Negro. Las áreas San Jorge y Tilarán se consideran de interés intermedio; y el área Tigra como de bajo interés.

Tabla 16. Estimación de la capacidad geotérmica para la generación de electricidad de los prospectos 150-220°C localizados hasta una profundidad máxima de 3 km

Área Geotérmica	Potencial total calculado (MWe)	Potencial al excluir los sectores con restricciones (MWe)
Caño Negro	360	226
Liberia	360	256
Puerto Viejo	418	243
San José	460	186
San Jorge	176	132
Tilarán	116	59
Tigra	18	0
Total	1908	1102

9 Conclusiones

- Costa Rica se ubica en un contexto geológico favorable para el desarrollo de anomalías de calor en la parte superior de la corteza terrestre, lo cual, en determinados casos, lleva a la formación de sistemas geotérmicos de interés comercial.
- Las zonas de mayor potencial para la producción geotermoeléctrica, se encuentran asociadas con los volcanes de las cordilleras de Guanacaste, Tilarán (Volcán Arenal) y Central; las cuales coinciden parcialmente con extensas zonas dedicadas a la protección forestal. Esta situación, aunado a la existencia de otras zonas restringidas, condiciona el aprovechamiento pleno de los recursos geotérmicos del país.
- El estudio realizado permitió actualizar la subdivisión del país en provincias y áreas de acuerdo a los diferentes grados de interés (vocación geotérmica) para el aprovechamiento práctico del calor natural. Las áreas de clase A1 y A2 (caracterizadas por temperaturas mayores a 150°C a 3,0 km de profundidad) pueden representar, desde el punto de vista energético, objetivos de desarrollo para la producción de energía geotermoeléctrica; por otro lado, las áreas clase A1, A2, B1 y B2, podrían considerarse geológicamente favorables para diferentes aplicaciones de uso directo.
- De acuerdo a la categorización geotérmica realizada, las áreas con “vocación geotérmica óptima” o de prioridad 1 (A1, temp. Mayores a 220°C a 3,0 km profundidad) representan el 9% del territorio nacional (4706 km²) y las áreas con “vocación geotérmica buena” o de prioridad 2 (A2, temp. 150-220°C a 3,0 km profundidad) ocupan el 24% del territorio nacional (12155 km²). Sin embargo, si se excluyen los sectores con limitaciones de acceso indicadas en el párrafo anterior, las áreas disponibles se reducen considerablemente; representando las de clase A1 un 3% del territorio nacional (1728 km²) y las A2 a un 14 % (7201 km²).
- Los resultados del estudio de actualización indican que Costa Rica tiene un considerable potencial para la generación de electricidad por medio de energía geotérmica. Respecto a las “**Reservas**” (hasta los 2,5 km de profundidad), se estima una capacidad instalable de 1331 MWe para los sistemas geotérmicos mayores a 220°C y de 418 MWe para los de 150 - 220°C. Para los “**Recursos**” (hasta los 3,0 km

de profundidad) se estima una capacidad instalable de 2277 MWe para los sistemas geotérmicos mayores a 220°C y de 1908 MWe para los de 150 - 220°C.

- Con el fin de contar con estimaciones de los recursos que se podrían aprovechar bajo la legislación actual, se realizaron los cálculos del potencial geotérmico, excluyendo en dicha cuantificación los sectores correspondientes a: áreas forestales protegidas, humedales, reservas indígenas y zonas urbanas e industriales; lo cual evidentemente implica una reducción considerable del potencial accesible. Para las “**Reservas**” se estimó una capacidad instalable 614 MWe para los sistemas geotérmicos mayores 220°C y de 212 MWe para los de 150-220°C; en el caso de los “**Recursos**” se estimó un potencial de 1019 MWe para los yacimientos >220°C y de 1102 MWe para los de 150-220°C.
- Con la incorporación del proyecto geotérmico Borinquen I en el año 2027, el País contará con una capacidad geotermoeléctrica instalada de 305 MWe. Considerando dicho valor y los potenciales nacionales estimados para los recursos mayores a 220°C, aún se podrían desarrollar aproximadamente 309 MWe y 714 MWe adicionales, para las profundidades de 2,5 km y 3,0 km respectivamente. Lo anterior considerando el aprovechamiento por medio de plantas de condensación, con un ciclo de separación.
- En cuanto a la generación de electricidad con recursos de media-baja entalpía, la industria geotérmica brinda hoy día soluciones con plantas binarias capaces de generar electricidad con recursos con temperaturas superiores a 80°C; no obstante, este tipo de soluciones son más rentables a partir de los 140°C. A la fecha el ICE no ha incursionado en el aprovechamiento de este tipo de recursos debido a que ese ha enfocado en el aprovechamiento de los recursos de mayor contenido energético, sin embargo, si las condiciones del mercado lo permiten, este sería un nicho por explorar a futuro.
- Se evaluaron de manera preliminar, las características geotérmicas de siete sectores de interés: Suroeste del volcán Tenorio, Arenal-Poco Sol, Norte del volcán Platanar-Porvenir, Oeste del volcán Platanar-Porvenir, Bajos del Toro, Vara Blanca-Poasito y Sur del volcán Turrialba. La valoración indica que el sector “Arenal-Poco Sol” es el que presenta condiciones más favorables para la eventual existencia de un recurso de interés para generación eléctrica, seguido de “Norte volcán Platanar-Porvenir” y “Suroeste del volcán Tenorio”.

10 Recomendaciones

- Continuar los estudios de valoración del potencial geotérmico en las áreas de prioridad 1 y 2, conforme a las necesidades energéticas del país y a los recursos disponibles.
- Estudiar las alternativas tecnológicas existentes en plantas de generación eléctrica mediante el uso de recursos geotérmicos, sean estas flash o binarias, tanto enfocadas a grandes desarrollos, como crecimiento modular, dando énfasis a la flexibilidad operativa que cuenta la tecnología existente, con el fin de estabilizar y facilitar la operación de los sistemas a largo plazo.
- Efectuar el seguimiento de los avances tecnológicos hacia el aprovechamiento de los recursos de 100-150°C para la generación eléctrica, dando énfasis al costo, eficiencia y rentabilidad.

11 Bibliografía

- Alvarado. G. 1984. Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias Básicas. Escuela Centroamericana de Geología. Tesis de Licenciatura en Geología, San José, Costa Rica.
- Alvarado. G. & Vargas. A. 2017. Historia del descubrimiento y aprovechamiento de las fuentes termales en Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 57, 55-84, 2017 ISSN: 0256-7024. San José, Costa Rica.
- Badilla. D. 2022. Estudio geofísico mediante métodos electromagnéticos para la prospección del potencial geotérmico del país. Proyecto Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica. C.S. Exploración Subterránea, Área de Geofísica, Ingeniería y Construcción. Informe interno. 91 págs.
- Barrantes. R. 2012. Utilización de la energía residual geotérmica del proyecto geotérmico Miravalles para el secado de cebolla. A Thesis proposal Presented to The Academic Department of the School of Engineering in Partial Fulfilment of the Requirements For the Degree of Master Scientiae in Mechanical Engineering. Atlantic International University Honolulu, Hawaii. Summer, 2012. 164 págs.
- Boden. D.R. 2017. Geologic Fundamentals of Geothermal Energy. CRC Press. ISBN 9781498708777. 425 Págs.
- Brook, C.A., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti, M. y Muffler, L.J.P., 1978. Hydrothermal Convection Systems with Reservoir Temperatures $>90^{\circ}\text{C}$, en Assesment of Gethermal Resources of the United States (L.J.P. Muffler, editor). U.S. Geological Survey. Circular 790, pp. 18-85.
- Chavarría, L., Rodríguez, A., & Vallejos, O. 2009. Reconocimiento geotérmico del sector norte del volcán Rincón de la Vieja. Instituto Costarricense de Electricidad, Centro de Servicio de Recursos Geotérmicos. Área de Geociencias, Grupo de Exploración. Informe interno. 50 págs.
- Chavarría, L., Fajardo, H, & Vallejos, O. 2011. Reconocimiento Geotérmico del área Arenal-Poco Sol. Cantones de San Carlos y San Ramón. Instituto Costarricense de Electricidad. Centro de Servicio Recursos Geotérmicos. Área de Geociencias. Grupo de Exploración. Informe interno. 94 págs.

- Fajardo, H., 2013. Campaña inicial reconocimiento geoquímico en la hacienda El Roble, flanco norte del volcán Irazú. Instituto Costarricense de Electricidad. Proyectos y Servicios Asociados. Centro de Servicio Recursos Geotérmicos. Área de Geociencias. Informe interno. 27 págs.
- Fournier, R.O & Truesdell, A.H., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters: *Geochim. Acta*, 37, 515-525.
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators: *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765.
- ICE-ENEL. (1989). Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmica en la República de Costa Rica. Fase I, estudio de reconocimiento, informe final. Proyecto COS/83/t01/a/71/99. San José. Instituto Costarricense de Electricidad, ENEL ente nazionale per l'energia elettrica/ung, pisa Italia con la colaboración de: ELC electroconsult, geotérmica italiana, geosystem. Informe interno.
- ICE. (1991). Evaluación del Potencial Geotérmico de Costa Rica. San José, noviembre de 1991. Instituto Costarricense de Electricidad. Informe interno. 70 págs.
- Jackson, J.A. (1997). *Glossary of Geology*. Alexandria, Virginia. United States: American Geological Institute. Cuarta edición.
- Lee, K.C. (1996). Classification of geothermal resources- an engineering approach. Proceedings, Twenty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, Enero 22-24, 1996.
- Molina, F. (2009). Modelo para zonificar el recurso geotérmico de alta entalpía aplicando técnicas geoespaciales, Las Pailas, Complejo Volcánico Rincón de la Vieja, Guanacaste Costa Rica. (M.Sc. Thesis). Universidad Nacional de Costa Rica y Universidad de Costa Rica. 87 págs.
- Mena, K. (1998). Diseño técnico económico de un sistema de secado de granos básicos, utilizando como fuente de energía el vapor generado por un pozo de baja presión del Campo Geotérmico Miravalles. (Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química) Universidad de Costa Rica.
- Muffler. P.-Cataldi, R., 1978. Methods for regional assesment of geothermal resources.- *Geothermics*; 7: 53-89.

- Noorollahi, Y. (2005). Application of GIS and remote sensing in exploration and environmental management of Námafjall geothermal area. Tesis de maestría no publicada, Universidad de Islandia.
- OLADE-BID. (1994 a). Guía para estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos. Organización Latinoamericana de Energía- Banco Interamericano de Desarrollo. Quito-Ecuador Abril, 1994. 138 págs.
- OLADE-BID. (1994 b). Guía para la evaluación del potencial energético en zonas geotérmicas durante las etapas previas a la factibilidad. Organización Latinoamericana de Energía- Banco Interamericano de Desarrollo. Quito, Ecuador. Abril, 1994. 22 págs.
- OLADE-BID. (1994 c). Guía de información para planificadores. Organización Latinoamericana de Energía- Banco Interamericano de Desarrollo. Quito-Ecuador Mayo, 1994. 27 págs.
- Regenauer-Lieb. K., Poh. J. & Wellmann. F. (2014). Probabilistic Assessment of Geothermal Resource Bases. CSIRO Earth Science and Resource Engineering- The University of Western Australia. Conference paper. Citado el 18-10-2021 : <https://www.researchgate.net/publication/237197663>.
- Solano, H., Coto, M. (2002). Desarrollo de un servicio de secado de productos agrícolas a través de fluidos geotérmicos residuales y su respectivo plan estratégico de implementación. (Tesis para optar por el grado académico de Máster en Administración de Empresas con Énfasis en Gerencia de Proyectos) Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.
- UNFC (2009). Clasificación Marco de las Naciones Unidas para la energía fósil y los recursos y reservas minerales 2009. United Nations Framework Classification (UNFC). Comisión Económica para Europa. Naciones Unidas, Nueva York y Ginebra, 2010.
- UNECE (2016). Especificaciones para la aplicación de la Clasificación Marco de las Naciones Unidas para la energía fósil y los recursos y reservas minerales 2009 (CMNU-2009) respecto a los Recursos de energía geotérmica. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE). Ginebra, septiembre 2016. 31 págs.
- Van Wees, J-D., Boxem, T., Calcagno, P., Dezayes, C., Lacasse, C. & Manzella, A. (2013). A Methodology for Resource assessment and application to core countries.
- Williams, C. F. (2004). Development of Revised Techniques for Assessing Geothermal Resources. PROCEEDINGS, Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 26-28, 2004 SGP-TR-175.

12 Apéndices

12.1 Apéndice A: Fichas técnicas de las nacientes termales muestreadas

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTCU-1-5-1-22 (Ref. muestra 4, ICE, 1991)	Ubicación: Margen derecho aguas abajo del río Cuajiniquil. Cuajiniquil, La Cruz, Guanacaste..	Propietario: Dentro del Parque nacional Santa Rosa
CRTM05 Norte: 1206859.8	CRTM05 Este: 321897.3	Elevación (m s.n.m.): 65
Fecha: 5-1-2022	Hora: 11 am	Tipo de Manifestación: Fuente termal
Temperatura de la muestra (°C): 36.8	Conduct. Eléctrica (µS/cm): 3980	pH: 6.6
Color: Incolora	Olor: No	Burbujeo: Continuo, leve
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.5	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Parcialmente nublado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: El agua brota del aluvión. En los alrededores afloran rocas sedimentarias y posibles tobas.	Formación geológica: Sedimentación clástica del Paleógeno	Estructuras: Buzamiento 40° al NF
Observaciones adicionales: El agua brota en dos puntos del aluvión, separados unos 3 m. Presencia de algas verdes. Bosque secundario.		
Fotografía 1		
		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTGA-1-6-1-22 (Ref. muestra. 2-C, ICE, 1991)		Ubicación: El Gavilán, Dos Ríos de Upala, Alajuela.	Propietario: Jorge Viales. Rancho de Don Chu.
CRTM05 Norte: 1206178.05		CRTM05 Este: 355537.91	Elevación (m s.n.m.): 380
Fecha: 6-1-2022	Hora: 11:30 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 50.2		Conduct. Eléct. (μS/cm): 5620	pH: 6.3
Color: Incolora, precipitado anaranjado		Olor: Leve a azufre	Burbujeo: No
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): 1-1.5	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.			
Litología: Bloques de lava en matriz de suelo café rojizo.		Formación geológica: Depósitos Pre-Rincón de la Vieja	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: El agua llega por una tubería de 2 pulgadas. Abundan costras de CaCO_3 y manganeso que forman pequeñas terrazas en la piscina. Precipitados anaranjados de óxidos de hierro.			
Fotografía 1			
			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLA-1-7-1-22 (Ref. muestra. 1-C, ICE, 1991)		Ubicación: Quebrada Huacas. Los Andes, La Cruz, Guanacaste.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1233128.66		CRTM05 Este: 337464.48	Elevación (m s.n.m.): 106
Fecha: 7-1-2022	Hora: 10:30 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 52		Conduct. Eléct. (μS/cm): 4530	pH: 7.31
Color: Incolora.		Olor: moderado a azufre	Burbujeo: Constante
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): 0.25	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.			
Litología: Posibles sedimentos marinos (arena) y lapilli, tono verdoso, ricos en CaCO ₃ . Capas buzan 083°/44°. (dirección estratigráfica aprox. N-S).		Formación geológica: Sedimentación clástica del Paleógeno?	Estructuras: Estratificación N-S y vetas irregulares de calcita N-S, hasta de 20 cm.
Observaciones adicionales: Abundan vetillas de CaCO ₃ y algas verdes.			
<p>Fotografía 1</p>  <p>Naciente termal</p>		<p>Fotografía 2</p>  <p>Naciente termal</p>	
<p>Fotografía 3</p> 		<p>Fotografía 4</p> 	

Aspecto general de la quebrada Huacas		Estratificación N-S
Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos
Código: NFLA-1-7-1-22 (Ref. muestra. Entre 1-C y 1-D, ICE, 1991)	Ubicación: Quebrada Huacas. Los Andes, La Cruz, Guanacaste.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1233149.6	CRTM05 Este: 337495.05	Elevación (m s.n.m.): 104
Fecha: 7-1-2022	Tipo de Manifestación: Naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 28	Conduct. Eléct. (μS/cm): 6150	pH: 8.05
Color: Incolora.	Olor: moderado a azufre	Burbujeo: Constante
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.1	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.		
Litología: Posibles sedimentos marinos tipo arenisca, tono verdoso, ricos en CaCO_3 . Capas buzan 083°/44°. (dirección estratigráfica aprox. N-S).	Formación geológica: Sedimentación clástica del Paleógeno?	Estructuras: Estratificación N-S y vetas irregulares de calcita N-S, hasta de 20 cm.
Observaciones adicionales: Abundan costras de CaCO_3 , algas verdes y escasos precipitados blancos.		
Fotografía 1 	Fotografía 2 	
Naciente o lloradero termal	Vetas irregulares de CaCO_3	
Fotografía 3 	Fotografía 4 	
	Vetas de calcita aprox. N-S	

Roca aflorante y vetas de calcita N-S		
Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos
Código: NTLA-2-7-1-22 (Ref. muestra. 1-D, ICE, 1991)	Ubicación: Quebrada Huacas. Los Andes, La Cruz, Guanacaste.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1233216.5	CRTM05 Este: 337611.6	Elevación (m s.n.m.): 77
Fecha: 7-1-2022	Hora: 11::30 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 47		Conduct. Eléct. (μS/cm): 6340
Color: Incolora.		Olor: moderado a azufre
Muestra para: Iones mayoritarios		Burbujeo: Intermitente
Caudal estimado (l/s): 0.25		Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.		
Litología: Posibles sedimentos marinos (arenas) tono verdoso, ricos en CaCO_3 . Capas buzan $083^\circ/44^\circ$. (dirección estratigráfica aprox. N-S). En el sitio se presentan bloques métricos de lava rotulados con leyenda "ICE".	Formación geológica: Sedimentación clástica del Paleógeno?	Estructuras: Estratificación N-S y vetas irregulares de calcita N-S, hasta de 20 cm.
Observaciones adicionales: Presencia de algas verdes.		
Fotografía 1		
		
Naciente termal bajo bloques métricos. Se encontraba marcada con la leyenda "ICE".		

Fotografía 2

Afloramiento rocoso (sedimentos marinos) con rumbo N-S (subvertical), cuyo fracturamiento coincide con las vetas de calcita y salida de agua termal. Al fondo de observa uno de los bloques de la fotografía 1.

Fotografía 3

Bloque rodado de veta de CaCO_3 presente en el aluvión.

Fotografía 4

Contacto litológico observado a unos 50 m aguas abajo de la Fuente termal. Buzamiento $110^\circ/22^\circ$. A 25 m de la confluencia con el río Sábalos.

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLA-3-7-1-22 (Ref. muestra. 1-A, ICE, 1991)	Ubicación: Río Sábalos. Los Andes, La Cruz, Guanacaste.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1233262.35	CRTM05 Este: 337714.71	Elevación (m s.n.m.): 72
Fecha: 7-1-2022	Hora: 12:00 md	Tipo de Manifestación: Naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 62	Conduct. Eléct. (μS/cm): 5980	pH: 8.09
Color: Incolora.	Olor: moderado a azufre	Burbujeo: Constante
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.2	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.

Litología: Aluvión sobrejacido por rocas amarillentas-naranja de aspecto tobáceo.	Formación geológica: ND	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Lloradero de agua termal en el aluvión del río Sábalos (margen izquierdo aguas abajo). Algas color verde amarillento.		

Fotografía 1

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NFSR-1-11-1-22 (Ref. muestra. 32-E y 32-F, ICE, 1991)	Ubicación: 3 km al norte de San Miguel, Cañas, Guanacaste. Al lado de Finca LUISAN.	Propietario: Sergio Rojas.
CRTM05 Norte: 1148608.54	CRTM05 Este: 381877.10	Elevación (m s.n.m.): 47
Fecha: 11-1-2022	Hora: 10:45 am	Tipo de Manifestación: Agua de la quebrada Arenas (como referencia)
Temperatura de la muestra (°C): 28.7	Conduct. Eléct. (μS/cm): 3210	pH: 7.65
Color: Incolora.	Olor: No	Burbujeo: No
Muestra para: Iones mayoritarios (como referencia)	Caudal estimado (l/s): NA	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: Aluvión, brechas y lavas andesíticas.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Agua de la quebrada Arenas. Se tomó como referencia ya que no se había logrado encontrar la naciente reportada por un vecino de la zona. Se nota en los valores de conductividad la influencia de fluidos geotérmicos salinos. Hay costras de sal en las pareces del cauce.		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTSR-1-11-1-22		Ubicación: 3 km al norte de San Miguel, Cañas, Guanacaste. Al lado de Finca LUISAN.	Propietario: Sergio Rojas.
CRTM05 Norte: 1148607.55		CRTM05 Este: 381881.11	Elevación (m s.n.m.): 46
Fecha: 11-1-2022	Hora: 11:00 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 36.6		Conduct. Eléct. (μS/cm): 2790	pH: 6.01
Color: Incolora. Precipitados color naranja (óxidos de hierro)		Olor: No	Burbujeo: Intermitente
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): 0.10	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.			
Litología: Aluvión, brechas y lavas andesíticas.		Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Lloradero termal en el aluvión, se destaca por los precipitados color naranja intenso. Se nota en los valores de conductividad la influencia de fluidos geotérmicos salinos.			
Fotografía 1			
			
Lloradero de agua termal en el aluvión de la quebrada Arenas (margen derecho aguas abajo). Al fondo se aprecia el cauce de la quebrada Arenas.			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLM-1-11-1-22	Ubicación: Entrando hacia el este por camino de lastre, frente a RITEVE. A 3 km al norte de San Miguel, Cañas, Guanacaste.	Propietario: Hda, La Montaña.
CRTM05 Norte: 1148570.74	CRTM05 Este: 382656.15	Elevación (m s.n.m.): 71
Fecha: 11-1-2022	Hora: 1:20 pm	Tipo de Manifestación: Riachuelo con agua salina
Temperatura de la muestra (°C): 30.7	Conduct. Eléct. (μS/cm): 4820	pH: 7.51
Color: Incolora.	Olor: no	Burbujeo: no
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): ND	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: ND.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Riachuelo de poco caudal en un zanjo de 2-3 m de ancho por 1 m de hondo.		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos		
Código: NTLM-2-11-1-22		Ubicación: Entrando hacia el este por camino de lastre, frente a RITEVE. A 3 km al norte de San Miguel, Cañas, Guanacaste.	Propietario: Hda. La Montaña.
CRTM05 Norte: 1148617.63		CRTM05 Este: 382771.21	Elevación (m s.n.m.): 74
Fecha: 11-1-2022	Hora: 1:45 pm	Tipo de Manifestación: Humedal salino	
Temperatura de la muestra (°C): 32.7		Conduct. Eléct. (μS/cm): 14700	pH: 7.28
Color: Negra por material orgánica, agua estancada.		Olor: mal oliente, material orgánica	Burbujeo: no
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): ND	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.			
Litología: ND.		Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Agua estancada en tipo humedal o ciénaga. La composición debe tomarse con cautela debido a posible concentración por evaporación.			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLM-3-11-1-22 (Ref. muestra 32-A, ICE, 1991)	Ubicación: Entrando hacia el este por camino de lastre, frente a RITEVE. A 3 km al norte de San Miguel, Cañas, Guanacaste.	Propietario: Hda. La Montaña.
CRTM05 Norte: 1148401.31	CRTM05 Este: 383058.02	Elevación (m s.n.m.): 72
Fecha: 11-1-2022	Hora: 2 pm	Tipo de Manifestación: Naciente termal (ojo de agua)
Temperatura de la muestra (°C): 44.4	Conduct. Eléct. (μS/cm): 3310	pH: 6.54
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: sí
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.5	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: ND.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
<p>Observaciones adicionales: Ojo de agua bien formado, con un caudal aprox. 0.5 l/s. Se presenta en una cárcava de unos 3-4 m ancho por 3 de hondo. El agua cubre unos 25 cm de altura en el cauce. La naciente desemboca en una quebradita fría y más grande, con los siguientes parámetros de campo: cond: 1875; pH: 5.15; temp: 33.</p>		
<p style="text-align: center;">Fotografía 1</p>  <p>La naciente forma un ojo de agua de unos 30 cm de diámetro. Se observa el burbujeo en el centro de la naciente.</p>		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTST-1-11-1-22 (Ref. muestra 32-C, ICE, 1991)	Ubicación: Entrando hacia el este por camino de lastre, frente a RITEVE. A 3 km al norte de San Miguel, Cañas, Guanacaste.	Propietario: Finca Santa Teresa.
CRTM05 Norte: 1148602.13	CRTM05 Este: 383259.25	Elevación (m s.n.m.): 90
Fecha: 11-1-2022	Hora: 2:30 pm	Tipo de Manifestación: Naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 50.5	Conduct. Eléct. (μS/cm): 8160	pH: 6.57
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: continuo
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.2	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: ND.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Nacientes termales captadas en tipo piscinas excavadas. Debido a que el agua muestra estancamiento, la composición química debe manejarse con cautela, debido a posibles procesos de concentración.		

Fotografía 1

En el estanque se presenta gran cantidad de algas verdes. Se trató de tomar la muestra lo más cercano posible al punto de salida, esto para evitar contaminación de la muestra por estancamiento.

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTST-2-11-1-22 (Ref. muestra 32-C, ICE, 1991)	Ubicación: Entrando hacia el este por camino de lastre, frente a RITEVE. A 3 km al norte de San Miguel, Cañas, Guanacaste.	Propietario: Finca Santa Teresa.
CRTM05 Norte: 1148600.11	CRTM05 Este: 383277.250	Elevación (m s.n.m.): 91
Fecha: 11-1-2022	Hora: 2:45 pm	Tipo de Manifestación: Naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 47.5	Conduct. Eléct. (μS/cm): 6830	pH: 6.64
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: no
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.10	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: ND.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND

Observaciones adicionales:

Nacientes termales captadas en tipo piscinas excavadas. Debido a que el agua muestra cierto estancamiento, la composición química debe manejarse con cautela, debido a posibles procesos de concentración por evaporación.

Fotografía 1

En el estanque se presenta gran cantidad de algas verdes. Se tomó la muestra lo más cercano posible al punto de salida para evitar contaminación por estancamiento.

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTRC-1-13-1-22 (Ref. muestra 31, ICE, 1991)	Ubicación: Margen izquierda del río Chiquito. Río Chiquito, Tilarán, Guanacaste.	Propietario: Óscar Esquivel. (Finca donde estaba la mina Río Chiquito).
CRTM05 Norte: 1154367.64	CRTM05 Este: 405881.96	Elevación (m s.n.m.): 604
Fecha: 13-1-2022	Hora: 10:40 am	Tipo de Manifestación: Naciente ligeramente termal
Temperatura de la muestra (°C): 30.1	Conduct. Eléct. (μS/cm): 1816	pH: 5.52
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: no
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.10	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: Aluvión	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Lloradero de agua ligeramente termal en el aluvión. Costras de óxidos de hierro color anaranjado y algas verdes. Margen izquierda aguas abajo del Río Chiquito.		
Fotografía 1		
		
Naciente ligeramente termal en el aluvión del Río Chiquito.		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTRC-2-13-1-22 (Ref. muestra 38, ICE, 1991)		Ubicación: Margen izquierdo quebrada Agua Caliente, Río Chiquito de Tilarán, Guanacaste.	Propietario: ND		
CRTM05 Norte: 1154775.725		CRTM05 Este: 406270.149	Elevación (m s.n.m.): 580		
Fecha: 13-1-2022	Hora: 11 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 29		Conduct. Eléct. (μS/cm): ND	pH: 5.65		
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: Leve		
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): <0.1	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.		
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.					
Litología: Aluvión	Formación geológica: Fm. Monteverde a nivel regional.		Estructuras: ND		
Observaciones adicionales: Lloradero en el aluvión de la quebrada. La muestra no se muestreó debido a que luego se encontró muy cerca una naciente termal de gran magnitud (NTRC-3-13-1-22).					
Fotografía 1					
					

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTRC-2-13-1-22 (Ref. muestra 38, ICE, 1991)		Ubicación: Margen izquierdo quebrada Agua Caliente, Río Chiquito de Tilarán, Guanacaste.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1154751.73		CRTM05 Este: 406273.13	Elevación (m s.n.m.): 579
Fecha: 13-1-2022	Hora: 11:50 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 37		Conduct. Eléct. (μS/cm): 3450	pH: 6.42
Color: Incolora		Olor: Leve H ₂ S	Burbujeo: Leve
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): 3-4	Muestreado por: Jesús Núñez R. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 26°C.			
Litología: Aluvión		Formación geológica: Fm. Monteverde.	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Naciente con importante caudal, margen izquierdo (aguas abajo) de la quebrada Agua Caliente. Forma un chauchero de agua termal a 37°C.			
Fotografía 1			
			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTS-1-18-1-22 (Ref. muestra 22-C, ICE, 1991)		Ubicación: Balneario Salitral. Salitral de Bagaces, Guanacaste.	Propietario: Olman Ulate.
CRTM05 Norte: 1172120.97		CRTM05 Este: 364496.81	Elevación (m s.n.m.): 139
Fecha: 13-1-2022	Hora: 08:25 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 59.6		Conduct. Eléct. (μS/cm): 6190	pH: 6.52
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: continuo (intenso)
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): 1-1.5	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 26°C.			
Litología: Flujo piroclásticos gris claro.		Formación geológica: Fm. Bagaces.	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Ojo de agua de unos 20 cm de diámetro, que expulsa gran cantidad de gases sin olor. Precipitado de óxidos de hierro y formación de algas verdes en los bordes. Naciente apta para el muestreo de gases.			
Fotografía 1			
			
Medición de la temperatura con termómetro infrarrojo.			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTSL-1-19-1-22 (Ref. muestra 39-A, ICE, 1991)	Ubicación: Camino a Santa Lucía, Las Juntas de Abangares, Guanacaste.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1138240.945	CRTM05 Este: 393497.58	Elevación (m s.n.m.): 168
Fecha: 19-1-2022	Hora: 09:00 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 61.6	Conduct. Eléct. (μS/cm): 2620	pH: 6.45
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: continuo, débil
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.15	Muestreado por: Alberto Solórzano Q. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 27°C.		
Litología: Bloques de aluvión en suelo café oscuro.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Pequeño ojo de agua, de unos 6 cm de diámetro. Precipitado de óxidos de hierro y formación de algas verdes en los bordes. Al parecer las coordenadas de la muestra 39-A del ICE (1991) deben modificarse según las coordenadas de campo reportadas en esta ficha.		
Fotografías del sitio		
  		
Medición de la temperatura con termómetro infrarrojo y toma de parámetros.		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTIJ-1-19-1-22 (Ref. muestra 39-B, ICE, 1991)		Ubicación: Las Juntas de Abangares, Guanacaste.			
CRTM05 Norte: 1137637.88		CRTM05 Este: 394518.05			
Fecha: 193-1-2022	Hora: 10:30 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 49.2		Conduct. Eléct. (μS/cm): 5800	pH: 6.52		
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: continuo (intenso)		
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): 1-2	Muestreado por: Alberto Solórzano Q. Leyner Chavarría R.		
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 27°C.					
Litología: Bloques de aluvión en suelo café oscuro.	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: ND			
Observaciones adicionales: Ojo de agua de unos 80 cm de diámetro, con gran salida de gas sin olor (posiblemente CO ₂). Abundan bloques de travertino y cementación de las rocas circundantes con CaCO ₃ . Precipitados anaranjados de óxidos de hierro. A unos 30 m de esta naciente se presenta otra de similar aspecto, pero de menor tamaño (que corresponde a la muestra NTIJ-2). Naciente apta para el muestreo de gases.					
Fotografía 1					
					

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTIJ-2-19-1-22 (Ref. muestra 39-B, ICE, 1991)	Ubicación: Las Juntas de Abangares, Guanacaste.	Propietario: Finca Apuy
CRTM05 Norte: 1137659.84	CRTM05 Este: 394564.08	Elevación (m s.n.m.): 156
Fecha: 193-1-2022	Hora: 11:00 am	Tipo de Manifestación: Naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 51.3	Conduct. Eléct. (μS/cm): 5780	pH: 6.30
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: continuo (intenso)
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.1-0.2	Muestreado por: Alberto Solórzano Q. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: Bloques de aluvión en suelo café oscuro.	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Ojo de agua de unos 60 cm de diámetro, con gran salida de gas sin olor (quizá CO ₂). Abundan bloques de travertino y cementación de las rocas circundantes con CaCO ₃ . Precipitados anaranjados de óxidos de hierro. Es apta para el muestreo de gases.		
Fotografía 1		
		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLJ-3-19-1-22 (Ref. muestra 39-E, ICE, 1991)	Ubicación: Río Agua Caliente, Juntas de Abangares, Guanacaste.	Propietario: Río Agua Caliente
CRTM05 Norte: 1137704.83	CRTM05 Este: 394284.16	Elevación (m s.n.m.): 162
Fecha: 19-1-2022	Hora: 12:00 md	Tipo de Manifestación: Naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 70.6	Conduct. Eléct. (μS/cm): 5310	pH: 6.67
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: continuo (intenso)
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.1-0.2	Muestreado por: Alberto Solórzano Q. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 30°C.

Litología: Aluvión y rocas intensamente silicificadas.	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: ND
--	---	---------------------------

Observaciones adicionales:

Naciente termal en la margen derecha (aguas abajo) del río Agua Caliente. Pequeño ojo de agua (10 cm) con gran cantidad de gases sin olor. Precipitados anaranjados de óxidos de hierro. Es apta para el muestreo de gases.

Fotografías del sitio

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLJ-4-19-1-22 (Ref. muestra 39-E, ICE, 1991)	Ubicación: Río Agua Caliente, Juntas de Abangares, Guanacaste.	Propietario: Río Agua Caliente
CRTM05 Norte: 1137748.10	CRTM05 Este: 395306.20	Elevación (m s.n.m.): 164
Fecha: 193-1-2022	Hora: 12:00 md	Tipo de Manifestación: Naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 54.5	Conduct. Eléct. (μS/cm): 5080	pH: 6.28
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: leve
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.1	Muestreado por: Alberto Solórzano Q. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 30°C.

Litología: Aluvión y rocas intensamente silicificadas.	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: ND
--	---	---------------------------

Observaciones adicionales:

Brote de agua termal en una roca intensamente silicificada. Fue captada por un vecino y aprovechada en una piscina artesanal en roca excavada (tobas silicificadas). Costras de óxidos de hierro y algas verdes.

Fotografías del sitio

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLJ-5-19-1-22 (Ref. muestra 39-D, ICE, 1991)		Ubicación: Río Agua Caliente, Juntas de Abangares, Guanacaste.	
CRTM05 Norte: 1137889.07		CRTM05 Este: 395345.35	
Fecha: 19-1-2022	Hora: 12:30 pm	Tipo de Manifestación: Zona de nacientes termales	
Temperatura de la muestra (°C): 74.5		Conduct. Eléct. (μS/cm): 5450	pH: 6.38
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: continuo (intenso)
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): aprox. 1 sumando varias emanaciones	Muestreado por: Alberto Solórzano Q. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 30°C.			
Litología: Aluvión y rocas intensamente silicificadas.		Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Margen izquierdo (aguas abajo) río Agua Caliente. Zona de unos 30 m con varias salidas de agua termal y gases, sin olor. Costras de óxidos de hierro y algas verdes. Apto para muestreo de gases.			
Fotografías del sitio			
			
			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLJ-6-19-1-22	Ubicación: La Sierra, Las Juntas de Abangares, Guanacaste.	Propietario: Pueblo Antiguo Lodge (La Sierra).
CRTM05 Norte: 1137423.16	CRTM05 Este: 398234.05	Elevación (m s.n.m.): 241
Fecha: 19-1-2022	Hora: 2:30 pm	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 47.9	Conduct. Eléct. (µS/cm): 2780	pH: 7.34
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: no
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): aprox. 0.25-0.5	Muestreado por: Alberto Solórzano Q. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 30°C.

Litología: ND	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: ND
-------------------------	---	---------------------------

Observaciones adicionales:

Naciente termal ubicada en una montaña y captada para abastecer 3 piscinas en cascada. En la toma se aprecian delgadas costras posiblemente de sílice.

Fotografías del sitio

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTAN-1-24-1-22 Ref: Muestra 33, ICE (1991)	Ubicación: Centro recreativo del ANDE. San Miguel de Cañas, Guanacaste.	Propietario: Asociación Nacional de Educadores (ANDE)
CRTM05 Norte: 1143380.01	CRTM05 Este: 382876.90	Elevación (m s.n.m.): 85
Fecha: 24-1-2022	Hora: 9 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 54.7	Conduct. Eléct. (µS/cm): 5210	pH: 6.5
Color: Incolora (aunque la turbulencia del gas mezcla el agua con los óxidos de hierro) dando un tono anaranjado.	Olor: no	Burbujeo: continuo
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): aprox. 1-1.5	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 30°C.

Litología: ND	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: Nacientes alineadas en dirección E-O.
-------------------------	---	--

Observaciones adicionales:

En el sitio se presentan dos nacientes, las cuales se alinean en dirección E-O. La naciente NTAN-1-24-1-22 es un ojo de agua que forma una pileta de 12 m de diámetro y una zona de burbujeo de 2 m de diámetro. Precipitados abundantes de óxidos de hierro y abundante CaCO_3 que cementa el suelo y rocas circundantes. Esta naciente se ubica en una especie de montículo, por encima del terreno circundante.

Fotografías del sitio

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTAN-2-24-1-22 Ref: Muestra 33, ICE (1991)	Ubicación: Centro recreativo del ANDE, cañas, Guanacaste.	Propietario: Asociación Nacional de Educadores (ANDE)
CRTM05 Norte: 1143388.96	CRTM05 Este: 382922.911	Elevación (m s.n.m.): 85
Fecha: 24-1-2022	Hora: 9:30 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 57.2	Conduct. Eléct. (µS/cm): 5220	pH: 6.48
Color: Incolora (aunque la turbulencia del gas mezcla el agua con los óxidos de hierro dando tono naranja en la periferia).	Olor: no	Burbujeo: continuo
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): aprox. ND (el agua no tiene salida, por lo cual no se puede estimar)	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 30°C.		
Litología: ND	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: Nacientes alineadas en dirección E-O.
Observaciones adicionales: En el sitio se presentan dos nacientes, las cuales se alinean en dirección E-O. La naciente NTAN-2-24-1-22 es un ojo de agua que forma una pileta de 10 m de diámetro y una zona de burbujeo de 1 m de diámetro. Precipitados abundantes de óxidos de hierro y abundante CaCO_3 que cementa el suelo y rocas circundantes. Esta naciente se ubica en una depresión de unos 3 m por debajo del nivel del terreno, por lo cual el agua no se derrama en la superficie.		
<p style="text-align: center;">Fotografías del sitio</p>  <p>La naciente se ubica en un agujero de unos 3 m de hondo.</p>  <p>Burbujeo continuo y precipitados de óxidos de hierro.</p>		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTGU-1-24-1-22 Ref: Muestra 41, ICE (1991)	Ubicación: Fernández, Guacimal, Puntarenas.	Propietario: Mary Guillén y familia
CRTM05 Norte: 1126963.65	CRTM05 Este: 404371.96	Elevación (m s.n.m.): 197
Fecha: 24-1-2022	Hora: 11:30 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 62.4	Conduct. Eléct. (μS/cm): 2750	pH: 7.72
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: leve, intermitente
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): aprox. 1-1.5	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 34°C.

Litología: Lavas andesíticas	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: N60°E y N20°E
--	---	--------------------------------------

Observaciones adicionales:

Tienen una pequeña captación cilíndrica de unos 50 cm de diámetro, desde donde brota la abundante agua termal que alimenta 3 piscinas. El agua termal también brota a través de los planos de fractura en una lava andesítica gris oscuro. La propietaria indica que el agua termal brota en varios puntos de la propiedad.

Fotografías del sitio

Muestreo de la naciente termal. Sitio de la captación principal.



Roca andesítica-brechosa por donde brota agua termal.



Detalle de la roca fracturada por donde brota agua termal.



Detalle del caudal captado para las piscinas

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTGU-2-24-1-22 Ref: Muestra 42, ICE (1991)		Ubicación: Queb. Salitral. Los Ángeles de Guacimal, Puntarenas.	Propietario: ND		
CRTM05 Norte: 1123740.51		CRTM05 Este: 406485.88	Elevación (m s.n.m.): 222		
Fecha: 24-1-2022	Hora: 12:30 p.m.	Tipo de Manifestación: zona de nacientes termales			
Temperatura de la muestra (°C): 72.4		Conduct. Eléct. (μS/cm): 2160	pH: 7.45		
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: leve, intermitente		
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): aprox. 2-3 (sumando las diferentes salidas)	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.			
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 35°C.					
Litología: Lava dacítica gris.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno.	Estructuras: Fracturas 275°, 90°; capas de lava con buzamientos 250°/42° y 210°/68°			
Observaciones adicionales: Zona de nacientes termales en una finca a orillas de la carretera. El agua brota a través de varios puntos en una lava dacítica gris claro. En una de las nacientes abunda los depósitos de CaCO ₃ , que tiende a formar terrazas. La naciente a orillas del camino presenta 78°C.					
Fotografías del sitio: a) dentro de la finca					
					
Aspecto general de la naciente: terraza de roca dacítica y precipitados.					
					
Lava dacítica con fracturas E-O.			Detalle del burbujeo continuo.		
Detalle de una de las salidas de agua termal. Proceso de muestreo.					

Fotografías del sitio: b) cerca de la carretera

Aspecto general de la naciente localizada al lado de la carretera.



Detalle de la lava dacítica en capas.



Lava dacítica en capas (210°/68)

Naciente de 78°C.

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTMI-1-24-1-22 Ref: Muestra 46, ICE (1991)		Ubicación: Márgenes del río Naranjo. Santa Rosa de Miramar, Puntarenas.	Propietario: ND		
CRTM05 Norte: 1108928.79		CRTM05 Este: 420726.62	Elevación (m s.n.m.): 7		
Fecha: 24-1-2022	Hora: 3:20 p.m.	Tipo de Manifestación: zona de lloraderos termales en el aluvión			
Temperatura de la muestra (°C): 60.5		Conduct. Eléct. (μS/cm): 2400	pH: 6.85		
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: leve, intermitente		
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): aprox. 0.5 (sumando las diferentes salidas)		Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.		
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 38°C.					
Litología: Lavas andesíticas	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: ND			
Observaciones adicionales: Zona de lloraderos termales en el aluvión del río Naranjo (poza Aguacaliente). Se observan precipitados color naranja y escasas algas verdes.					
Fotografías del sitio:					
<p>Margen derecho del río Naranjo (aguas abajo)</p>  <p>Muestreo de una de las nacientes termales.</p>					
 <p>Detalle de la naciente: el agua brota en el aluvión del río.</p>					
<p>Margen izquierdo del río Naranjo (aguas abajo)</p>  <p>Muestreo de una de las nacientes termales.</p>  <p>Ubicación de uno de los lloraderos de agua termal en los Márgenes del río Naranjo.</p>					

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos		
Código: NTBA-1-25-1-22 Ref: Muestra 47-a y 47-B, ICE (1991)	Ubicación: Margen derecho río Barranca, sector de El Salvador de San Ramón, Alajuela.	Propietario: ND	
CRTM05 Norte: 1111415.51		CRTM05 Este: 433379.61	Elevación (m s.n.m.): 213
Fecha: 25-1-2022	Hora: 10:45 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 63.4		Conduct. Eléct. (μS/cm): 3850	pH: 6.81
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: moderado, continuo
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): aprox. 0.1-0.2	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 34°C.			
Litología: Lavas andesíticas y brechas	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: ND	

Observaciones adicionales:

Ojo de agua termal, el cual deposita CaCO_3 y óxidos de hierro, los cuales atrapan hojas y ramillas que, en conjunto, forman un montículo alrededor de la naciente. Al alejarse del montículo los depósitos de sílice tienden a formar pequeñas terrazas.

Fotografías del sitio

Montículo de travertino formado alrededor de la naciente



La naciente consiste en un ojo de agua de unos 80 cm de diámetro



Apariencia general de la naciente

Detalle de las capas de CaCO_3 y óxidos de hierro que componen el montículo

Detalle del depósito en el borde de una de las terrazas

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos		
Código: NTBA-2-25-1-22 Ref: Muestra 48-A, ICE (1991)	Ubicación: Margen derecho río Barranca, sector de Nagatac. San Ramón, Alajuela.	Propietario: ND	
CRTM05 Norte: 1111149.23		CRTM05 Este: 438785.09	Elevación (m s.n.m.): 339
Fecha: 25-1-2022	Hora: 2:20 p.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 55.6		Conduct. Eléct. (μS/cm): 3450	pH: 6.51
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: moderado, continuo
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): aprox. 0.5-1	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.

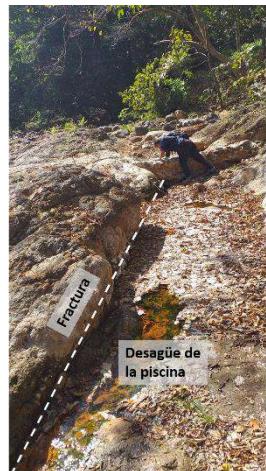
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 34°C.

Litología: Ignimbrita dacítica- riolítica gris- verdosa cortada por un dique piroclástico riolítico gris oscuro rumbo E-O.	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: Agua brota por fracturas 085°-090° en brecha fina alterada a sílice y clorita. La brecha es cortada por un dique piroclástico riolítico, de tono gris oscuro de 12 cm de espesor. Otras fracturas de la brecha: N40°E.
--	---	---

Observaciones adicionales:

El agua termal brota de la brecha a través de una fractura de unos 20 m, rumbo E-O (paralela al dique).

Fotografías del sitio

Fractura E-O por donde brota la Naciente termal. Ignimbrita con alteración hidrotermal intensa.



Muestreo de la naciente



Dique piroclástico (gris oscuro) E-O de 12 cm de espesor que corta la ignimbrita.

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos
Código: NTOR-1-26-1-22. Ref: Muestra 50-A y 50-B, ICE (1991)	Ubicación: Queb. Salitral. Calle Los Alumbres, Hda. Vieja, Orotina, Puntarenas.
CRTM05 Norte: 1096245.10	CRTM05 Este: 447132.02
Fecha: 26-1-2022	Hora: 10 a.m.
Temperatura de la muestra (°C): 51	Conduct. Eléct. (µS/cm): 3300
Color: Incolora	Olor: no
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): aprox. 0.1-0.2
	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 35°C.

Litología: Roca con intensa alteración hidrotermal (tono naranja-amarillento-pardo en su parte exterior y gris verdoso en parte interna) rica en sulfuros. Zonas con acumulación de bloques andesíticos grises relativamente sanos (posibles diques). Fracturas predominantes: N25-45°E, 90°. Este tipo de roca alterada es visible desde la Ruta 27 hasta el río Tárcoles.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: Agua brota por fractura N45°E, 90°, donde es evidente la depositación de óxidos de hierro color amarillo intenso.
---	---	--

Observaciones adicionales:

El agua termal brota de la brecha a través de una fractura vertical de 1 m de alto por 2 m de longitud, rumbo N45°E. En esta quebrada se observan otras zonas fracturadas donde posiblemente sale agua termal durante el invierno.

Fotografías del sitio

Muestreo de la naciente termal.



Muestreo de la naciente termal



Detalle de la naciente termal



Roca alterada y fracturada (N15°E, 90°), margen del río Tárcoles.



Roca alterada y fracturada (N25°E, 90°), margen del río Tárcoles.

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTLC-1-26-1-22. Ref: Muestra 49, ICE (1991)	Ubicación: Queb. Calera, Calle Calera. San Ramón, Alajuela.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1105557.80	CRTM05 Este: 445696.20	Elevación (m s.n.m.): 698
Fecha: 26-1-2022	Hora: 1 p.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal (lloradero)
Temperatura de la muestra (°C): 38.8	Conduct. Eléct. (μS/cm): 4040	pH: 6.21
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: leve, continuo
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): aprox. 1 (sumando varias salidas)	Muestreado por: Orontes Madrigal M. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 35°C.		
Litología: Agua brota del aluvión en el margen derecho (aguas abajo) de la quebrada Calera	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: El agua termal brota en varios puntos del aluvión de la quebrada, formando pequeñas terrazas de óxidos de hierro, hojas, ramitas.		
Fotografías del sitio		
 Apariencia general de la naciente termal (zona color naranja). Al fondo el cauce de la quebrada Calera.		
  Aspecto general de la naciente termal. Depósitos ricos en óxidos de hierro.		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTCN-1-8-2-22 Ref: Muestra 56, ICE (1991)		Ubicación: Balneario Termales Acosta. Cangrejal de Acosta, San José.	Propietario: William Garro.
CRTM05 Norte: 1080216.778		CRTM05 Este: 476659.923	Elevación (m s.n.m.): 530
Fecha: 8-2-2022		Tipo de Manifestación: naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 40.5		Conduct. Eléct. (μS/cm): 2350	pH: 7.66
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: No
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.7	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.	
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.			
Litología: Tobitas, areniscas, brechas e ignimbritas del Mioceno Inferior y Superior.		Formación geológica: Sedimentación clástica del Neógeno	Estructuras: Buzamiento de las capas decimétricas: 340°/60°.
Observaciones adicionales: El agua brota en planos de estratificación 34°/60° y otras fracturas.			
Fotografías del sitio			
    			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NFS-1-10-2-22 Ref: Muestra 63-E, ICE (1991)	Ubicación: Margen sur del río Tarrazú. San Andrés de León Cortez.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1077756.09	CRTM05 Este: 490458.44	Elevación (m s.n.m.): 1115
Fecha: 10-2-2022	Hora: 11:00 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente salina
Temperatura de la muestra (°C): 25	Conduct. Eléct. (μS/cm): 11460	pH: 6.38
Color: Incolora	Olor: No	Burbujeo: Leve, continuo
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): <0.1	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 27°C.

Litología: Brecha silicificada, tono gris claro.	Formación geológica: Sedimentación Clástica del Neógeno	Estructuras: El río sigue dos patrones de fractura: N15°E 90°; N55E, 80 NO;
--	---	--

Observaciones adicionales:

Naciente salina a temperatura ambiente, de muy bajo caudal. Deposita CaCO_3 y sales en los alrededores. Previo al muestreo fue drenada con el fin de eliminar al agua empozada.

Fotografías del sitio

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTSC-1-8-2-22 Ref: Muestra 59, ICE (1991)		Ubicación: Margen izquierdo (aguas abajo) del río San Cristóbal Sur, a unos 90 m del cauce, en propiedad privada tipo balneario. San Cristóbal Norte, Desamparados, San José	Propietario: Silvio Bonomelli.		
CRTM05 Norte: 1079673.71		CRTM05 Este: 498244.29	Elevación (m s.n.m.): 1467		
Fecha: 8-2-2022	Hora: 09:00 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 48.9		Conduct. Eléct. (μS/cm): 6590	pH: 6.56		
Color: Levemente lechosa		Olor: no	Burbujeo: leve, continuo		
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.090	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.			
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.					
Litología: Lavas andesíticas y brechas	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno		Estructuras: 340°, 90° (perpendiculares al río).		
Observaciones adicionales: Depósitos salinos y de CaCO ₃ en las paredes y alrededores de las nacientes.					
Fotografías del sitio					
		Captación de la naciente. Depósitos de óxidos de hierro en el fondo de la pileta.			
		Costras de sales y CaCO ₃ en los alrededores de la naciente			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTSC-2-8-2-22 Ref: Muestra 59, ICE (1991)	Ubicación: Margen izquierdo (aguas abajo) del río San Cristóbal Sur, a unos 90 m del cauce, en propiedad privada tipo balneario. A 5 m de la naciente NTSC-1. San Cristóbal Norte, Desamparados, San José	Propietario: Silvio Bonomelli.
CRTM05 Norte: 1079673.71	CRTM05 Este: 498247.296	Elevación (m s.n.m.): 1467
Fecha: 8-2-2022	Hora: 09:25a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 41.9	Conduct. Eléct. (μS/cm): 6600	pH: 6.62
Color: Levemente lechosa	Olor: no	Burbujeo: leve, continuo
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.090	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.		
Litología: Lavas andesíticas y brechas	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno	Estructuras: 340°, 90°, perpendiculares al río
Observaciones adicionales: Depósitos salinos y de CaCO ₃ en las paredes de los alrededores de las nacientes.		

Fotografías del sitio



Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTSC-3-8-2-22 Ref: Muestra 59, ICE (1991)	Ubicación: Pequeña quebrada N-S con varias nacientes termales pequeñas. En propiedad tipo balneario. San Cristóbal Norte, Desamparados, San José	Propietario: Silvio Bonomelli.
CRTM05 Norte: 1079635.779	CRTM05 Este: 498182.26	Elevación (m s.n.m.): 1483
Fecha: 8-2-2022	Hora: 09:45a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 63.2	Conduct. Eléct. (μS/cm): 6930	pH: 7.12
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: leve, continuo
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.29 (sumando varias salidas de agua, captadas para las piscinas en tubo de 1.5").	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.		
Litología: Lavas andesíticas y brechas	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno	Estructuras: ND
Observaciones adicionales: Depósitos de CaCO ₃ en las paredes de los alrededores de las nacientes.		
Fotografías del sitio		
 Captación de la naciente.	 Aspecto general de la quebrada.	 Caudal captado para las piscinas.

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTSC-4-8-2-22 Ref: Muestra 59, ICE (1991)		Ubicación: A unos 25 m Este de la naciente NTSC-3. En propiedad tipo balneario. San Cristóbal Norte, Desamparados, San José			
CRTM05 Norte: 1079631.80		CRTM05 Este: 498160.264			
Fecha: 8-2-2022	Hora: 09:25a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 41.8		Conduct. Eléct. (μS/cm): 7100	pH: 7.2		
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: No		
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): <<0.10	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.			
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.					
Litología: Lavas y brechas	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno		Estructuras: ND		
Observaciones adicionales: Depósitos de travertino (CaCO ₃) de 5 m x2 m, con espesor de 0.25 m. La roca se siente tibia. Capa aceitosa muy delgada en la parte superior del agua estancada. Depósitos de óxidos de hierro y algas verdes.					
Fotografías del sitio					
					
Delgada capa aceitosa en la superficie del agua estancada.		Sitio hacia donde escurre el agua de la naciente.			
Naciente termal de bajo caudal.					

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTSC-5-8-2-22 Ref: Muestra 59, ICE (1991)		Ubicación: Margen izquierda (aguas abajo) del río San Cristóbal Sur. Cristóbal Norte, Desamparados, San José.	Propietario: Silvio Bonomelli.		
CRTM05 Norte: 1079530.71		CRTM05 Este: 498244.255	Elevación (m s.n.m.): 1386		
Fecha: 8-2-2022	Hora: 10:25a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 58.9		Conduct. Eléct. (µS/cm): 6640	pH: 6.55		
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: No		
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): <0.10	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.		
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 26°C.					
Litología: Lavas y brechas	Formación geológica: Vulcanismo Mioceno		Estructuras: 340°, 90°		
Observaciones adicionales: Depósitos de travertino (CaCO_3) en la pared norte del cauce, de aprox. 7 m de altura. Depósitos de óxidos de hierro y algas verdes en la naciente.					
Fotografías del sitio					
 La naciente termal brota por fractura en rocas cubiertas por depósitos de CaCO_3 .		 Espesos depósitos de travertino.			
 Depósitos salinos en los alrededores de la naciente termal.					

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos		
Código: NTCA-1-8-2-22 Ref: Muestra 60, ICE (1991)	Ubicación: Bermejo, Cartago.	Propietario: Administrada por: Johny Fuentes.	
CRTM05 Norte: 1090008.35	CRTM05 Este: 502010.631	Elevación (m s.n.m.): 1398	
Fecha: 8-2-2022	Hora: 12:30 p.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 57.1	Conduct. Eléct. (μS/cm): 4750	pH: 6.68	
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: Continuo, fuerte	
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.7	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.	
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.			
Litología: Suelos residuales.	Formación geológica: Sedimentación clástica del Neógeno	Estructuras: ND	
Observaciones adicionales: Ojo de agua en un valle dedicado a la agricultura e industria. Dimensiones de la naciente 1x1 m, fuerte emanación de gases sin olor. En la superficie del agua se forma una delgada corteza de color blanco y naranja, quizá sílice y óxidos de hierro.			
Fotografías del sitio			
			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTNA-1-9-2-22 Ref: Muestra 63-B, ICE (1991)		Ubicación: Hda. Navarro, en pequeña quebrada. Navarro, Cartago.	Propietario: ND
CRTM05 Norte: 1084270.54		CRTM05 Este: 512895.107	Elevación (m s.n.m.): 1087
Fecha: 9-2-2022	Hora: 09:00 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 43		Conduct. Eléct. (μS/cm): 1612	pH: 7.58
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: No
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): < 0.1 -0.15	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.	

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.

Litología: Posibles rocas sedimentarias o tobas muy fracturadas.	Formación geológica: Sedimentación Clástica del Neógeno	Estructuras: Buzamiento 305°/28°.
--	---	---

Observaciones adicionales:

Tres pequeñas nacientes en pequeña quebrada. Alimentan una piscina en propiedad sin acceso.

Fotografías del sitio

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTRP-1-9-2-22 Ref: Muestra 63-C, ICE (1991)		Ubicación: H. Río Perlas. Navarro, Cartago.			
CRTM05 Norte: 1083735.139		CRTM05 Este: 512399.594			
Fecha: 9-2-2022		Tipo de Manifestación: naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 54.9		Conduct. Eléct. (μS/cm): 1731			
Color: Incolora		Olor: no			
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): 1			
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.		Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.			
Litología: Posibles rocas sedimentarias muy fracturadas.		Formación geológica: Sedimentación Clástica del Neógeno			
Estructuras: A 100 m al este de la naciente: rocas posiblemente sedimentarias muy fracturadas 288°/76°; 034°/42°; 28°/80°.					
Observaciones adicionales: Se muestreó en una cascada artificial que da a la piscina. En esta cascada se deposita una costra de sílice blanco.					
Fotografías del sitio					
					
					

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTBO-1-9-2-22 Ref: Muestra 63-D, ICE (1991)		Ubicación: Balneario Orosi. Orosi, Cartago.	Propietario: Familia Martínez		
CRTM05 Norte: 1083208.69		CRTM05 Este: 515679.581	Elevación (m s.n.m.): 1080		
Fecha: 9-2-2022	Hora: 11:30 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 36.3		Conduct. Eléct. (μS/cm): 1589	pH: 7.14		
Color: Incolora		Olor: no	Burbujeo: No		
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): 1 (indicado por uno de los propietarios)	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.		
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 25°C.					
Litología: Sedimentos continentales y de transición marina	Formación geológica: Sedimentación Clástica del Neógeno	Estructuras:			
Observaciones adicionales: Se muestreó en la toma principal. Se muestreó antes del sistema de cloración por goteo.					
<p align="center">Fotografías del sitio</p> 					

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTBO-2-9-2-22 Ref: Muestra 63-D, ICE (1991)	Ubicación: Balneario Orosi. Orosi, Cartago.	Propietario: Familia Martínez
CRTM05 Norte: 1083225.68	CRTM05 Este: 515670.6	Elevación (m s.n.m.): 1078
Fecha: 9-2-2022	Hora: 12:15 p.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 33.5	Conduct. Eléct. (μS/cm): 1235	pH: 7.39
Color: Incolora	Olor: no	Burbujeo: No
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): ND	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 27°C.		
Litología: Sedimentos continentales y de transición marina	Formación geológica: Sedimentación Clásica del Neógeno	Estructuras:
Observaciones adicionales: Se muestreó en el tanque de captación		

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTBO-1-9-2-22 Ref: Muestra 63-E, ICE (1991)		Ubicación: Balneario Orosi. Orosi, Cartago.	
CRTM05 Norte: 1082980.179		CRTM05 Este: 516170.276	
Fecha: 9-2-2022		Tipo de Manifestación: naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 52.9		Conduct. Eléct. (μS/cm): 3810	pH: 6.88
Color: Incolora		Olor: Muy leve a H ₂ S	Burbujeo: Leve
Muestra para: Iones mayoritarios		Caudal estimado (l/s): ND. Quizá superior a 1	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 27°C.			
Litología: Sedimentos continentales y de transición marina		Formación geológica: Sedimentación Clástica del Neógeno	Estructuras:
Observaciones adicionales: Se muestreó en la toma principal, localizada a 1 km al norte del balneario. Se encuentra en una caseta cerrada, donde se tiene el sistema de bombeo. Se trasiega el agua en una tubería PVC de 1.5 pulgadas.			
<p style="text-align: center;">Fotografías del sitio</p> 			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTIB-1-3-3-2022 Ref: Muestra 66-A, 66-B, ICE (1991)		Ubicación: Afluente del Río Caliente. Montecarlo de Pérez Zeledón.	Propietario: Inversiones Bernina
CRTM05 Norte: 1,033,036.31		CRTM05 Este: 544607.01	Elevación (m s.n.m.): 821
Fecha: 3-3-2022	Hora: 9:00 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal	
Temperatura de la muestra (°C): 36.8		Conduct. Eléct. (μS/cm): 2370	pH: 9.57
Color: Incolora		Olor: No	Burbujeo: Leve, discontinuo
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.2	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.	
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 27°C.			
Litología: Lava andesíticas con vesículas llenas de calcita.		Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno (29-7 Ma).	Estructuras: Estratificada en paquetes decimétricos con orientación 233°/50°
Observaciones adicionales: Pequeña naciente ligeramente termal brota al lado de paquetes de lava andesítica estratificada en paquetes decimétricos y centimétricos.			
Fotografías del sitio			
			

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTIB-2-3-3-2022 Ref: Muestra 66-C, ICE (1991)	Ubicación: Margen izquierda (aguas abajo) del Río Caliente. Montecarlo de Pérez Zeledón.	Propietario: Inversiones Bernina
CRTM05 Norte: 1,033,205.33	CRTM05 Este: 544423.463	Elevación (m s.n.m.): 812
Fecha: 3-3-2022	Hora: 9:40 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 35.3	Conduct. Eléct. (μS/cm): 2170	pH: 9.55
Color: Incolora	Olor: No	Burbujeo: No
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.4	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.		
Litología: Lava andesíticas con vesículas llenas de calcita.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno (29-7 Ma).	Estructuras: Estratificada en paquetes decimétricos con orientación 280°/20°

Observaciones adicionales:

La naciente brota de una pared de lava andesítica (estratificada, con vesículas llenas de mineral color blanco, posiblemente calcita) y llega directamente a un tanque de captación hecho de concreto y piedras.

Fotografías del sitio

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTUJ-1-2-3-2022 Ref: Muestra 67B, ICE (1991)		Ubicación: <i>El Carmen de Ujarrás, Buenos Aires, Puntarenas.</i>	Propietario: Termales <i>El Carmen de Ujarrás</i>		
CRTM05 Norte: 1028208.9		CRTM05 Este: 577246.5	Elevación (m s.n.m.): 866		
Fecha: 2-3-2022	Hora: 9:00 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 50.1.		Conduct. Eléct. (μS/cm): 2440	pH: 7.66		
Color: Incolora.		Olor: No	Burbujeo: No		
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.5 (estimado en de una manguera que alimenta una de las piscinas)	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.			
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.					
Litología: ND	Formación geológica: Intrusivos granitoides con facies gabroides del Mioceno (11.5- 5.9 Ma).	Estructuras: ND			
Observaciones adicionales: Muestra tomada en la salida de una manguera plástica que alimenta una de las piscinas. Se ubica en la margen izquierda (aguas abajo) del río Ceibo.					
Fotografía del sitio					
 <div style="position: absolute; bottom: 0; left: 43%; width: 15%; background-color: yellow; color: black; padding: 5px; text-align: center;"> Labores de muestreo </div>					

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica	Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos	
Código: NTUJ-2-2-3-2022 Ref: Muestra 67B, ICE (1991)	Ubicación: El Carmen de Ujarrás, Buenos Aires, Puntarenas.	Propietario: Margen izquierdo (aguas abajo) del río Ceibo.
CRTM05 Norte: 1028697.6	CRTM05 Este: 577131.5	Elevación (m s.n.m.): 914
Fecha: 2-3-2022	Hora: 9:40 a.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal
Temperatura de la muestra (°C): 63.7.	Conduct. Eléct. (μS/cm): 2460	pH: 7.52
Color: Incolora.	Olor: H ₂ S	Burbujeo: No se observa, aunque sí hay desgasificación.
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 0.5-0.75 (sumando varias de las salidas)	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.

Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente):

Despejado. Temperatura ambiente aprox. 30°C.

Litología: Roca intrusiva de grano fino intensamente fracturada, lo cual facilita el ascenso del agua termal.	Formación geológica: Intrusivos granitoides con facies gabroides del Mioceno (11.5- 5.9 Ma).	Estructuras: Verticales con rumbo 155° y 075°
---	--	--

Observaciones adicionales:

El agua brota en una roca competente de grano fino, que exhibe un intenso fracturamiento vertical que favorece el ascenso del fluido termal. Acá se forma un acantilado vertical de unos 10 m producto de la erosión del río Ceibo.

Fotografía del sitio

Proyecto: Actualización del Potencial Geotérmico de Costa Rica		Institución: ICE, Centro de Servicio Recursos Geotérmicos			
Código: NTAC-1-1-3-2022 Ref: Muestra 68, ICE (1991)		Ubicación: Agua Caliente de Pittier. San Vito de Coto Brus, Puntarenas.	Propietario: Margen derecha (aguas abajo) del río Cotón.		
CRTM05 Norte: 989435.9		CRTM05 Este: 618751.3	Elevación (m s.n.m.): 939		
Fecha: 1-3-2022	Hora: 2:00 p.m.	Tipo de Manifestación: naciente termal			
Temperatura de la muestra (°C): 33.78		Conduct. Eléct. (μS/cm): 651	pH: 7.89		
Color: Incolora. El fondo de la piscina tiene un ligero tono verde-celeste.		Olor: No	Burbujeo: No		
Muestra para: Iones mayoritarios	Caudal estimado (l/s): 1.5	Muestreado por: Alex Bogantes S. Leyner Chavarría R.			
Condiciones Climáticas (incluir temperatura ambiente): Despejado. Temperatura ambiente aprox. 28°C.					
Litología: Aluvión.	Formación geológica: Vulcanismo del Mioceno (29-7 Ma) y flujos de detritos (1-2 Ma).	Estructuras: ND			
Observaciones adicionales: La naciente brota entre bloques andesíticos del aluvión. En el sitio existe una piscina artesanal hecha con bloques de lava del aluvión del río, siendo esta de gran belleza.					
Fotografías del sitio					
					

12.2 Apéndice B: Tabla de geotermómetros químicos

Muestra	Localización	pH	Conductividad μS/cm	Temperatura medida, °C	Na_K_Ca Fournier & Truesdell 1973, °C
NTLA-1-7-1-22	Los Andes, La Cruz. Q. Huacas	7.31	4530	52	125.9
NFLA-1-7-1-22	Los Andes, La Cruz. Q. Huacas	8.05	6150	28	126.8
NTLA-2-7-1-22	Los Andes, La Cruz. Q. Huacas	7.87	6340	47	128.0
NTLA-3-7-1-22	Los Andes, La Cruz. R. Sábalos	8.09	5980	62	127.2
NFSR-1-11-1-22	Cañas, finca Sergio Rojas	7.65	3210	28.7	125.2
NTSR-1-11-1-22	Cañas, finca Sergio Rojas	6.01	2790	36.6	113.2
NTLM-1-11-1-22	Cañas, hda. La Montaña.	7.51	4820	30.7	119.8
NTLM-2-11-1-22	Cañas, hda. La Montaña. Referencia 32-B de ICE (1991)	7.28	14700	32.7	138.5
NTLM-3-11-1-22	Cañas, hda. La Montaña. Referencia 32-A de ICE (1991)	6.54	3310	44.4	127.9
NTST-1-11-1-22	Cañas, finca Santa Teresa. Referencia 32-C de ICE (1991)	6.57	8160	50.5	130.6
NTST-2-11-1-22	Cañas, finca Santa Teresa. Referencia 32-C de ICE (1991)	6.64	6830	47.5	126.1
NTSA-1-18-1-22	Salitral de Bagaces	6.3	6190	59.6	149.1
NTLJ-6-19-1-22	Las Juntas, La Sierra.	7.34	2780	47.9	80.0
40	Finca Trampa, ICE (1991)	6.36	6500	36.6	150.7
NTGU-1-24-1-22	Fernández de Guacimal. Puntarenas. Referencia 41 de ICE (1991)	7.72	2750	62.4	117.8
NTGU-2-24-1-22	Los Ángeles de Guacimal. Puntarenas. Referencia 42 de ICE (1991)	7.45	2160	72.4	136.4
NTGU-3-24-1-22	Los Ángeles de Guacimal. Puntarenas. Referencia 42 de ICE (1991)	7.29	2160	78	137.8
Muestra	Localización	pH	Conductividad μS/cm	Temperatura medida, °C	Na_K_Ca Fournier & Truesdell 1973, °C

NTSC-1-8-2-22	San Cristobal de Desamparados. Referencia 59 de ICE (1991)	6.56	6590	48.9	163.0
NTSC-2-8-2-22	San Cristobal de Desamparados. Referencia 59 de ICE (1991)	6.62	6600	41.9	188.9
NTSC-3-8-2-22	San Cristobal de Desamparados. Referencia 59 de ICE (1991)	7.12	6930	63.2	159.3
NTSC-4-8-2-22	San Cristobal de Desamparados. Referencia 59 de ICE (1991)	7.2	7100	41.8	161.1
NTSC-5-8-2-22	San Cristobal de Desamparados. Referencia 59 de ICE (1991)	6.55	6640	58.9	158.0
NTCN-1-8-2-22	Cangrejal de Acosta. Referencia 56 de ICE (1991)	7.45	2350	40.5	103.8
NTNA-1-9-2-22	Finca en Navarro. Referencia 63-B de ICE (1991)	7.58	1612	43	105.3
NTRP-1-9-2-22	H. Río Perlas, Navarro. Referencia 63-C de ICE (1991)	8.45	1731	54.9	99.3
NTIB-1-3-3-2022	Montecarlo de Pérez Zeledón. Afluente R. Caliente, finca de Inversiones Bernina. Referencia 66-A y 66-B de ICE (1991)	9.53	2370	36.8	90
NTIB-2-3-3-2022	Montecarlo de Pérez Zeledón. R. Caliente, finca de Inversiones Bernina. Referencia 66-C de ICE (1991)	9.49	2170	35.3	86
NTUJ-1-2-3-2022	Ujarraz de Perez Zeledón, piscina. Referencia 67-A de ICE (1991)	7.4	2440	50.1	122
NTUJ-2-2-3-2022	Ujarraz de Perez Zeledón, naciente. Referencia 67-A de ICE (1991)			63.7	118

12.3 Apéndice C: Detalle de las investigaciones de campo realizadas en el presente estudio de actualización

Como complemento a la información disponible de estudios previos, se planificaron y ejecutaron campañas de campo orientadas a la recolección de datos técnicos en seis áreas de interés, denominadas: Suroeste del volcán Tenorio, Norte del volcán Platanar-Porvenir, Oeste del volcán Platanar-Porvenir, Bajos del Toro, Vara Blanca-Poasito y sur del volcán Turrialba (Figura C.1). Adicionalmente, se incluyó en el análisis geológico, geofísico y en la clasificación de las Naciones Unidas, al prospecto geotérmico Arenal-Poco Sol, en el que se había realizado en el 2011 el estudio de reconocimiento geotérmico acompañado de estudios geofísicos básicos.

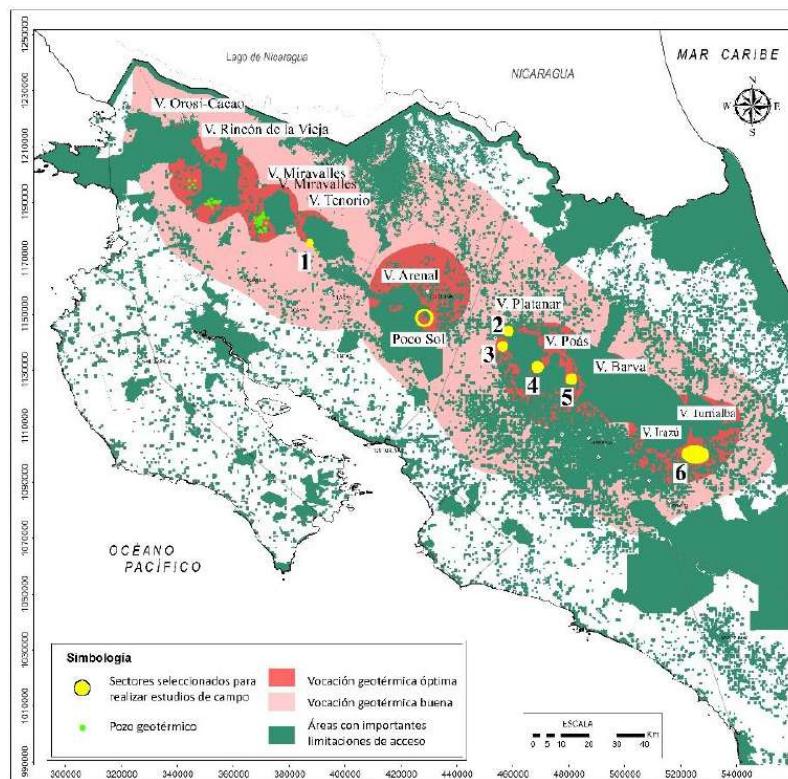


Figura C.1. Áreas seleccionadas para realizar los estudios de campo: 1) suroeste del volcán Tenorio; 2) norte del volcán Platanar-Porvenir; 3) oeste del volcán Platanar-Porvenir; 4) Bajos del Toro; 5) Vara Blanca-Poasito; 6) sur del volcán Turrialba. Adicionalmente, se muestra la localización del prospecto geotérmico Arenal-Poco Sol.

Las labores de campo se ejecutaron durante la segunda mitad del año 2021 e inicios del 2022, y abarcaron las siguientes disciplinas de estudio:

- **Geología:**

Mapeo y caracterización de los rasgos litoestratigráficos, mineralógicos, tectónicos e hidrotermales de cada sitio de interés; información necesaria para entender el contexto geológico y sus implicaciones desde el punto de vista geotérmico.

- **Geoquímica:**

Mapeo y caracterización geoquímica de nacientes termales y aplicación de geotermómetros. Esta técnica permite estimar las temperaturas de equilibrio de los fluidos geotérmicos en el posible reservorio, lo cual es trascendental para entender el contexto geotérmico y plantear hipótesis de trabajo.

- **Geofísica:**

Se utilizaron sondeos electromagnéticos pasivos de amplio espectro (BMT), cada uno contando con su respectiva corrección mediante sondeos electromagnéticos activos en el dominio del tiempo (TDEM). Estos sondeos fueron utilizados para definir parámetros geofísicos que podrían estar asociados a la existencia de reservorios geotérmicos. La campaña de campo fue realizada por el C.S. Explotación Subterránea (Badilla, 2022) y las interpretaciones fueron complementadas por personal del área Fuentes Geotérmicas, División Generación.

- **Sensores remotos:**

Se realizaron sobrevuelos mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT) con el objetivo de identificar zonas con anomalías geotérmicas, así como contar con rasgos morfológicos que facilitaran y complementaran las labores de mapeo de campo. Para ello se utilizaron sensores en color verdadero (RGB) y térmico infrarrojo.

- **Ambiental**

Se realizaron mediciones acústicas de ruido ambiente, que permitieron obtener el nivel de presión sonora (Lp) en los diferentes sectores de estudio. Complementariamente, para determinar la calidad del aire, se consideró realizar mediciones de gases como Sulfuro de Hidrógeno (H2S) y Dióxido de Carbono (CO2), ya que tienen relación con ambientes volcánicos y actividades antrópicas.

Adicionalmente, se realizó la clasificación de los prospectos geotérmicos, utilizando las metodologías de CMNU (2009) y UNECE, 2016. Los resultados se muestran en el apartado II-7 del presente apéndice.

C.1 Suroeste del volcán Tenorio

Área seleccionada por encontrarse en un sector con gradiente geotérmico favorable (entre las isotermas de 200 y 250 °C estimadas a 2.5 km de profundidad), existencia de manifestaciones termales, un marco estructural interesante y por encontrarse fuera de los límites de las zonas forestales protegidas (Figura C.2).

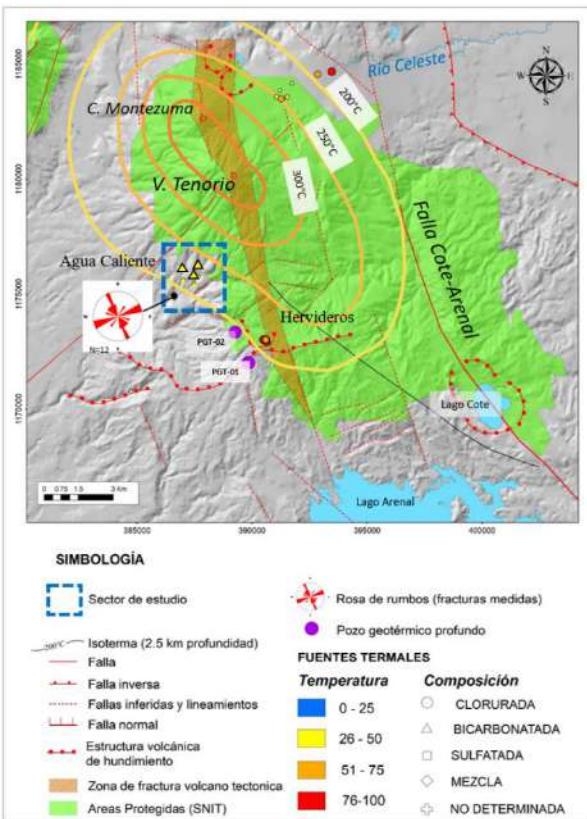


Figura C.2. Área Suroeste del Volcán Tenorio.

C.1.1 Geología

Predominan las coladas de lava andesítica con fuerte meteorización, caracterizadas por espesos suelos café rojizo, asociadas a una actividad antigua del volcán Tenorio.

Agua Caliente de Cañas; esto con el fin de conocer sus características morfológicas y térmicas.

Previo al trabajo de campo fue necesario realizar una planificación de las rutas de vuelo, en la que se consideraron aspectos meteorológicos, técnicos y legales, con el fin de que las operaciones de los VANT cumplieran con los objetivos y regulaciones.

En total se realizaron 7 sobrevuelos, con lo cual se logró cubrir un área de 115.6 ha (Figura C.3).

Propiamente en el área recorrida, las nacientes termales no superan los 30 °C, siendo de composición bicarbonatada. No obstante, a 3km al sureste, se presentan, nacientes termales y hervideros de lodo con temperaturas cercanas al punto de ebullición; siendo estas de composición sulfatada.

En este último sector es donde el ICE perforó dos pozos profundos entre el 2000-2001; sin embargo, ambos mostraron baja permeabilidad y moderada temperatura.

Los datos de campo evidencian dos tendencias principales de fracturamiento: NO-SE y NE-SO. Estas tienen buena correlación con estructuras regionales como las fallas Arenal-Cote y Chiripa.

C.1.2 Sensores remotos

Se realizaron sobrevuelos con sensores color verdadero y térmico infrarrojo en los alrededores de la comunidad de

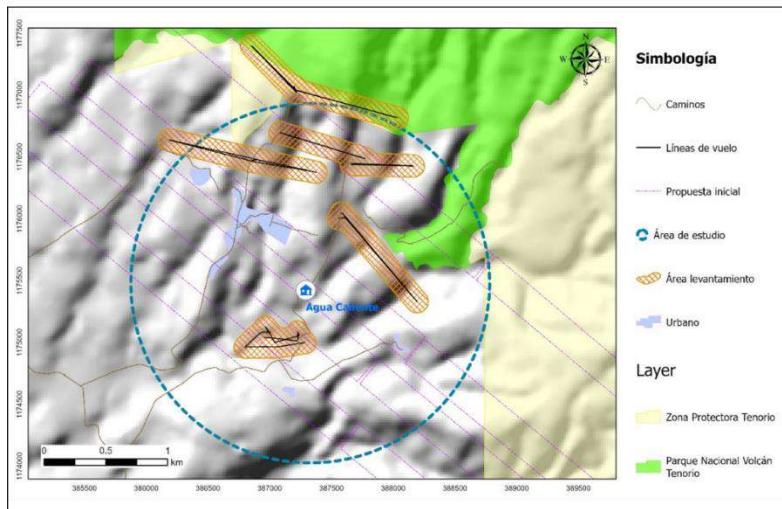


Figura C.3. Sectores con cobertura de imágenes térmicas. Agua Caliente, Cañas.

Temperaturas máxima y mínima: durante los sobrevuelos se analizó en tiempo real la oscilación térmica de la superficie del terreno, permitiendo determinar que los sectores cuya cobertura (uso del suelo) es pasto, suelo desnudo/quemado o cultivos transitorios, presentan las temperaturas más altas (30 a 37 °C), debido a su capacidad para adsorber la luz solar; mientras que las áreas con bosque y cuerpos de agua, presentaron las temperaturas más bajas (20 a 25 °C), Figura C.4.

Mediante el uso del sensor térmico no se logró identificar manifestaciones geotérmicas, empero en la zona existen algunas nacientes termales con temperaturas cercanas a 30°C. Lo anterior se debe estas nacientes tienen temperaturas relativamente bajas y son enmascaradas por efecto de la radiación solar.



Figura C.4 Temperaturas obtenidas con el sensor térmico infrarrojo.

En la Tabla C.1 se presenta un resumen de los datos más relevantes.

Características	Valores
Líneas de vuelo	7
Altura de vuelo	120 m
Distancia total recorrida por el VANT	21.14 km
Velocidad de vuelo	8 m/s
Metodología de vuelo	Waypoints (puntos de interés) y vuelo libre
Nº total de fotografías capturadas	6877
Formato de salida de las fotografías	JPG, RJPG y TIFF
Temperatura máxima	37 °C
Temperatura mínima	20 °C
Ejemplos de imágenes obtenidas	 
	RGB
	Térmico

Tabla C.1. Datos relevantes de la campaña de teledetección.

C.1.3. Medición de parámetros ambientales

El trabajo de campo consintió en realizar mediciones acústicas de ruido ambiente, que permitieron obtener el nivel de presión sonora (Lp) en diferentes sectores del área de estudio. Complementariamente, para determinar la calidad del aire, se consideró realizar mediciones de gases como Sulfuro de Hidrógeno (H2S) y Dióxido de Carbono (CO2), ya que tienen relación con ambientes volcánicos y actividades antrópicas. En la Figura C.5 se presentan los resultados de las mediciones realizadas, las cuales podrán contribuir a estudios de línea base y al análisis integral que permitirá orientar esfuerzos hacia el aprovechamiento del recurso geotérmico.

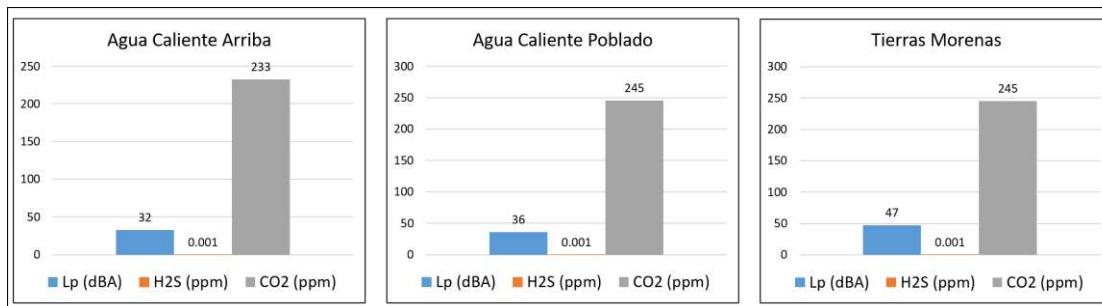


Figura C.5. Mediciones ambientales realizadas en diferentes localidades del suroeste del volcán Tenorio.

De acuerdo a la información obtenida los niveles de ruido oscilan entre 32-47 dBA, el H₂S es de 0.001 ppm y el CO₂ oscila entre 233-245 ppm.

C.1.4. Estudios geofísicos

En este sector se realizaron 5 sondeos electromagnéticos (Tabla C.2):

Sondeo	Coordenada X	Coordenada Y	Elevación (m.s.n.m)
TENAC3	388270	1177386	984
TNR013	386430	1176130	750
TNR012	384256	1177143	642
TENAC4	387835	1177665	911
TENAC1	387768	1177775	1061

Tabla C.2. Ubicación de los sondeos geofísicos.

Se obtuvo el siguiente modelo de capas resistivas de los sondeos (Tabla C.3):

Sondeo TNR013			Sondeo TNR012		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	26	248	1	31	263
2 (capa sello)	1	536	2 (capa sello)	1	367
3 (reservorio)	51	>2000	6		>2000

Sondeo TENAC4			Sondeo TENAC3		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	328	170	1	52	263
2 (capa sello)	5	769	2 (capa sello)	3	699
	12	>2000		17	>2000

Sondeo TENAC1		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	383	122
2	21	138
3 (capa sello)	6	>2000

Tabla C.3. Modelos resistivos para cada sondeo.

De los sondeos anteriores, particularmente el TNR013 (el más cercano al poblado de Agua Caliente) muestra una clara huella asociable a yacimientos geotermales, tal como se observa en la Figura C.6. Los sondeos TENAC4 y TENAC3 podrían corresponder a valores periféricos de un yacimiento geotermal.

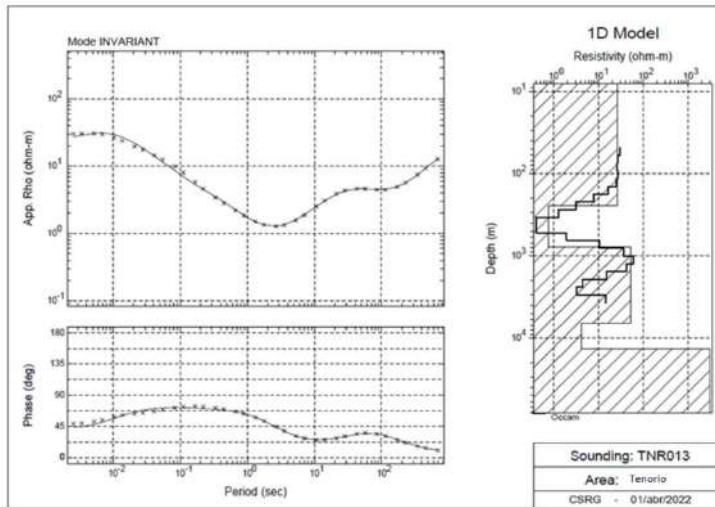


Figura C.6. La curva del sondeo TNR013 muestra una forma asociable a yacimientos geotermales. Así mismo los valores y espesores confirman un buen panorama para incrementar la exploración de este sector.

C.2. Arenal-Poco Sol

C.2.1. Geología

El resumen de las condiciones geológicas del sector de Poco Sol se muestra en el apartado 10.2.2 del presente informe.

C.2.2. Sensores remotos

No se realizó este tipo de actividades durante el presente estudio.

C.2.3. Medición de parámetros ambientales

No se realizó este tipo de actividades durante el presente estudio.

C.2.4. Geofísica

Los sondeos se realizaron en el año 2012 como parte del inicio de los estudios de pre-factibilidad del prospecto geotérmico Poco-Sol (Badilla y Guevara, 2012); algunos de ellos fueron reinterpretados por personal de Fuentes Geotérmicas para la integración en el presente documento.

De este sector se escogieron 5 sondeos electromagnéticos (Tabla C.4):

Sondeo	Coordenada X	Coordenada Y	Elevación (m.n.m)
PS001	426119	1146865	836
PS002	425844	1146973	795
PS028	427620	1144783	695
PS073	426631	1146174	835
PS074	427240	1145492	777

Tabla C.4. Ubicación de los sondeos geofísicos.

Con el siguiente resultado (Tabla C.5):

Sondeo PS001			Sondeo PS002		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	41	15	1	11	13
2	10	23	2	3	52
3	40	176	3	59	93
4 (capa sellado)	10	367	4	3	166
5 (reservorio)	42	>1000	5	4	89
			6	9	>1000
Sondeo PS073			Sondeo PS074		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	49	18	1	11	51
2	13	40	2 (capa sellado)	9	59
3	21	227	2	2	351
4	1	57	7	7	332
5	11	>1000	5 (reservorio)	19	>1000
Sondeo PS028					
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)			
1	81	49			
2	18	142			
3	4	132			
4	15	588			
5 (capa sellado)	8	625			
6	367	>1000			

Tabla C. 5. Modelo de capas resistivas de los sondeos.

El modelo resistivo correspondiente a la Figura C.7 indica un reservorio de poca resistividad y por tanto que estamos en una condición marginal y profunda de algún posible yacimiento geotermal.

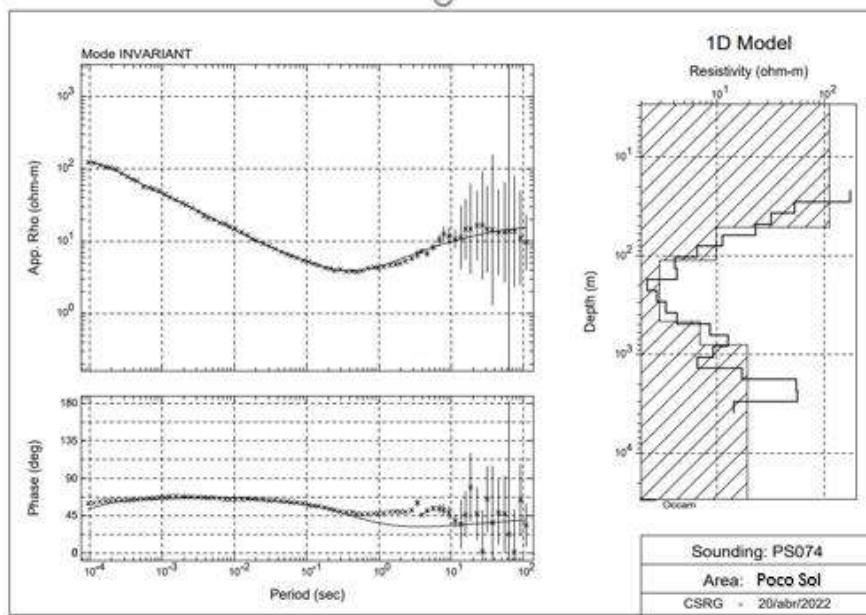


Figura C.7. La forma de la curva, así como los valores de resistividad eléctrica, indican un reservorio de poca resistividad y por tanto que estamos en una condición marginal y profunda de algún posible yacimiento geotermal.

C.3. Norte del volcán Platanar-Porvenir

C.3.1. Geología

Aunque el complejo volcánico Platanar-Porvenir no registra actividad volcánica histórica, en su flanco norte presenta múltiples nacientes termales con temperaturas de 35-58°C (composición Na-Cl-CO₃) distribuidas en los sectores de La Marina y La Palmera, Figura C.8.

Aunque se trata de fluidos Na-Cl, estos presentan un importante grado de dilución con aguas superficiales, por lo cual no son candidatas para la aplicación de geotermómetros minerales, Figura C.9.

Ambos sectores se alinean con la falla en dirección N-S, coincidente con la falla Aguas Zarcas y con el fracturamiento observado en superficie (N-S y NNO-SSE).

No se observó alteración hidrotermal en este sector.

No se descarta la existencia de rocas sedimentarias de origen marino en la parte media-inferior de la secuencia estratigráfica (p. ej. Formación Venado), la cual podría tener niveles de buena permeabilidad.

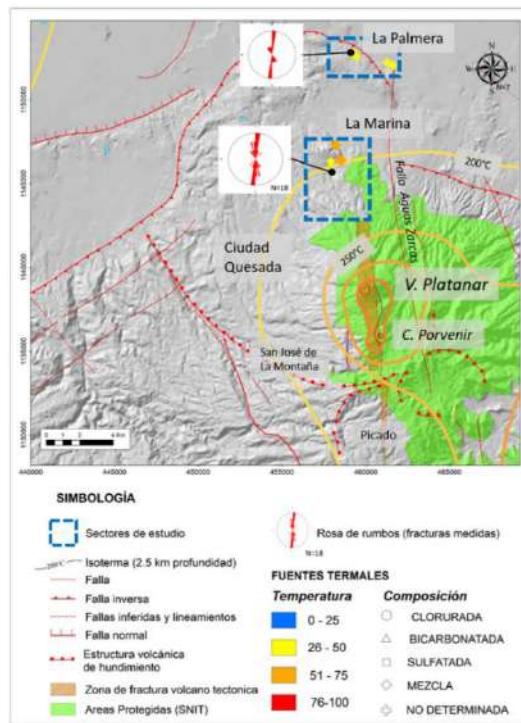


Figura C.8. Sectores de estudio en el flanco norte del complejo volcánico Platanar-Porvenir.

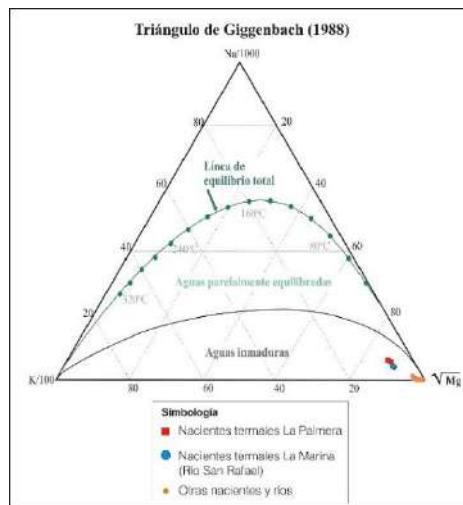


Figura C.9. De acuerdo al triángulo de Giggenbach, 1988, las nacientes termales de la zona se clasifican como “aguas inmaduras”. Composición química tomada de ICE (1991).

C.3.2. Sensores remotos

Esta campaña se desarrolló en los sectores de Aguas Zarcas-La Marina y La Palmera (Figura C.10), y tuvo una duración de dos semanas (julio del 2021).

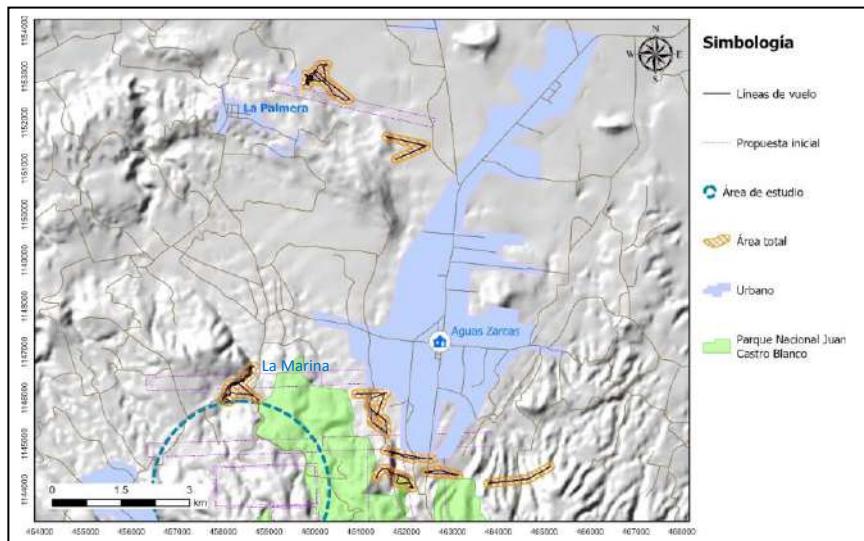


Figura C.10. Sectores cubiertos por medio de sensores remotos.

Aguas Zarcas-La Marina

Durante la campaña de teledetección fue necesario reajustar el cronograma de trabajo, debido a que las condiciones atmosféricas no eran las ideales para las operaciones con VANT.

Inicialmente se intentó realizar los sobrevuelos en horas de la mañana (incluso en la madrugada), sin embargo, debido a la presencia de lluvias intermitentes, neblina y viento superior al límite de resistencia del equipo, fue necesario volar en horas de la tarde, conllevando la captura de imágenes con índices de radiación/reflectividad del suelo mayores.

En total se recorrieron 23 km lineales, distribuidos en nueve líneas de vuelo y dos vuelos libres, cubriendo un área aproximada de 200 ha (Figura C.11).

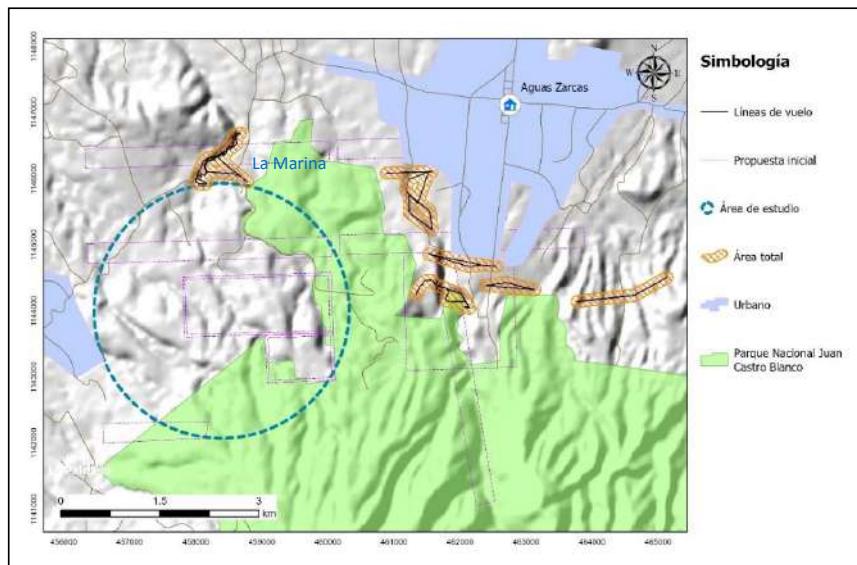


Figura C.11. Sectores con cobertura de imágenes térmicas.

En la comunidad de La Marina (Distrito de La Palmera, San Carlos), se analizó un sector donde afloran gran cantidad de nacientes termales de elevada temperatura (sector de El Tucano Resort & Thermal Spa), permitiendo obtener datos relevantes sobre la temperatura y distribución de estas.

Las temperaturas determinadas con el sensor térmico fueron de 27-55 °C, lo cual es muy consistente con los datos medidos en el campo: 35-56°C. Aguas abajo del balneario mencionado, la temperatura del cauce tiende a disminuir considerablemente, lo cual indica que las nacientes termales de mayor temperatura, se concentra en dicho sector (Figura C.12).

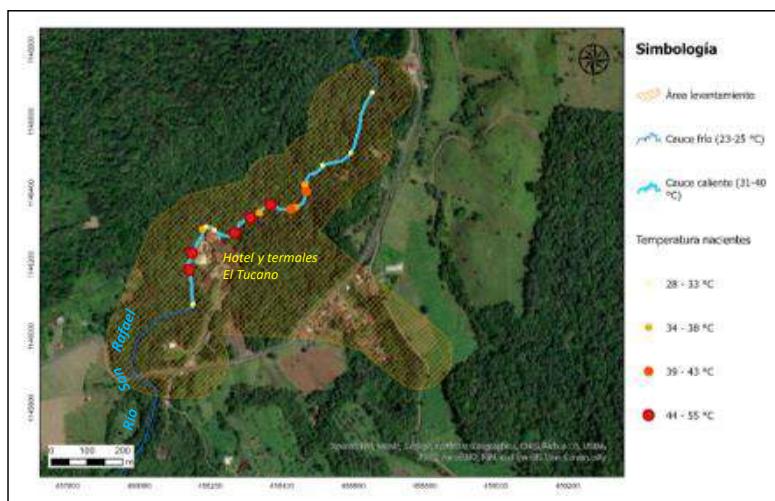


Figura C.12. Ubicación aproximada de las nacientes termales sobre el río San Rafael, identificadas mediante sobrevuelos con sensor térmico infrarrojo.

La Tabla C.6 presenta un resumen de los datos más relevantes.

Tabla C.6. Datos relevantes de la campaña de teledetección en Aguas Zarcas- y La Marina.

La Palmera

Se realizaron cuatro vuelos diurnos y uno nocturno; este último con el fin de corroborar una anomalía térmica observada en un pequeño afluente del río Köpper, en un sector cercano a la zona de nacientes termales registradas por el ICE en la década de 1980 (Figura C.13).

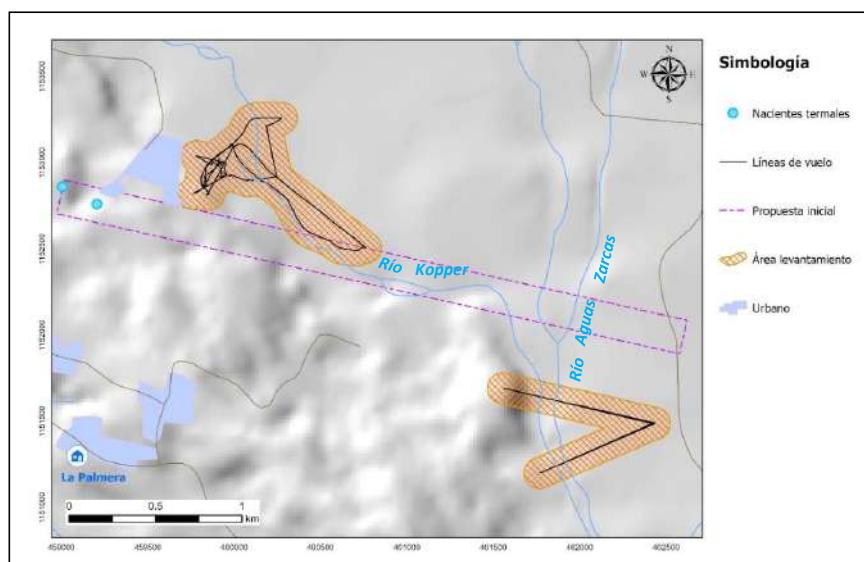


Figura C.13. Área con cobertura de imágenes térmicas.

Los datos obtenidos evidencian que el pequeño afluente corresponde a la escorrentía proveniente de la zona de manifestaciones termales de La Palmera; este presenta una temperatura de 27 a 36 °C a lo largo de su microcuenca, siendo mayor en la parte alta (cercano a las nacientes) y menor en la desembocadura con el río Köpper.

En el estudio Evaluación del Potencial Geotérmico de Costa Rica (ICE, 1991), las nacientes de La Palmera fueron reportadas con temperaturas de 32-45 °C, mientras que durante el trabajo geológico de campo del 2021 se midieron temperaturas de 29-37°C (durante la estación lluviosa). Estas temperaturas son muy coincidentes con los datos térmicos obtenidos en la presente campaña de teledetección.

Durante el trabajo de campo se contó con condiciones climáticas adecuadas para poder realizar sobrevuelos diurnos y nocturnos, lo cual facilitó la interpretación de los datos al disminuir/eliminar los efectos de la radiación solar, obteniéndose un mejor contraste de las anomalías geotérmicas (Figura C.14).

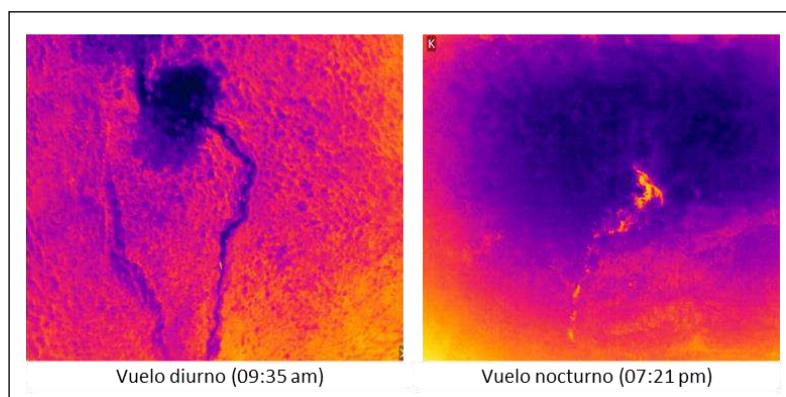


Figura C.14. Contraste térmico entre vuelo diurno con influencia de radiación solar sobre las superficies del terreno y un sobrevuelo nocturno.

Durante el día se determinó que el cauce presentaba una temperatura más baja que su entorno, mientras que, en la noche, la temperatura era mayor. Como se indicó anteriormente, el pasto suele absorber mayor radiación solar, por lo que cuando el sol calentó las superficies, la temperatura del entorno llegó a superar los 50 °C, mientras que el cauce mantuvo una temperatura de 34 a 36 °C.

En la Tabla C.7 se presenta un resumen de los datos más relevantes.

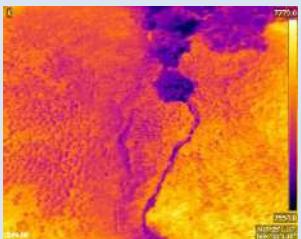
Características	Valores
Líneas de vuelo	5
Altura de vuelo	120 m
Distancia total recorrida por el VANT	14.31 km
Área explorada	77.9 ha
Velocidad de vuelo	8 m/s
Metodología de vuelo	Waypoints (puntos de interés) y vuelo libre
Nº total de fotografías capturadas	4658
Formato de salida de las fotografías	JPG y TIFF
Temperatura máxima	50 °C (diurna) 34 °C (nocturna)
Temperatura mínima	27 °C (diurna) 21 °C (nocturna)
Ejemplos de fotografías capturadas	 RGB  Térmico

Tabla C.7. Datos relevantes de la campaña de teledetección en La Palmera.

C.3.3. Medición de parámetros ambientales

El trabajo de campo consintió en realizar mediciones acústicas de ruido ambiente, que permitieron obtener el nivel de presión sonora (Lp) en diferentes sectores del área de estudio. Complementariamente, para determinar la calidad del aire, se consideró realizar mediciones de gases como Sulfuro de Hidrógeno (H2S) y Dióxido de Carbono (CO2), ya que tienen relación con ambientes volcánicos y actividades antrópicas. En la Figura C.15 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas en campo, las cuales podrán contribuir a estudios de línea base y al análisis integral que permitirá orientar esfuerzos hacia el desarrollo del potencial geotérmico de Costa Rica.

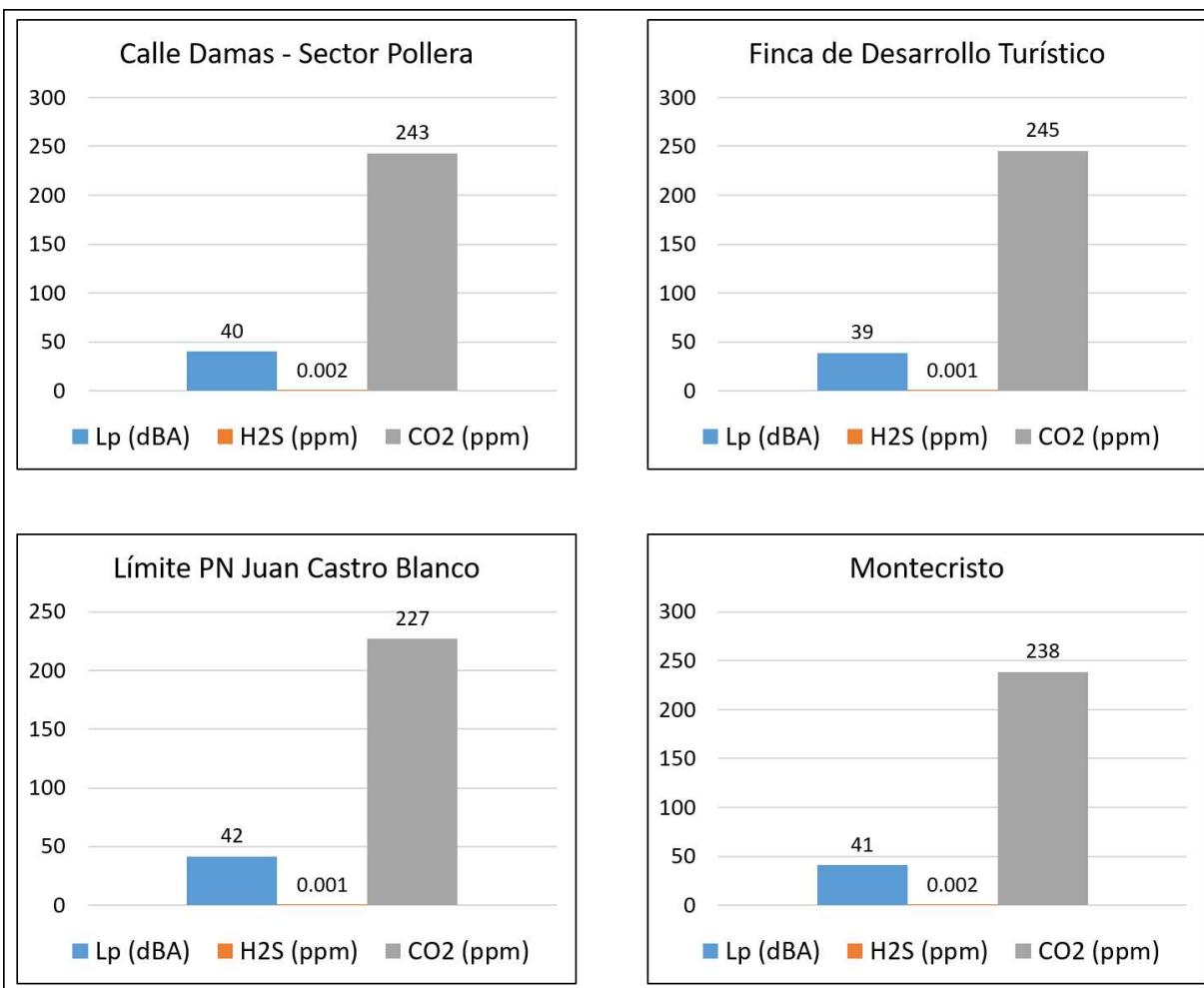


Figura C.15. Mediciones ambientales realizadas en diferentes localidades del sector norte del volcán Platanar.

De acuerdo a la información obtenida los niveles de ruido oscilan entre 39-42 dBA, el H₂S se encuentra entre 0.001-0.002 ppm y el CO₂ oscila entre 227-245 ppm.

C.3.4. Estudios geofísicos

En este sector se realizaron 11 sondeos electromagnéticos, de los cuales fueron seleccionados los 5 de mejor calidad para realizar la interpretación respectiva (Tabla C.8).

Sondeo	Coordinada X	Coordinada Y	Elevación (m.s.n.m)
Pla01	459673	1143395	929
Pla02	459161	1144007	870
Pla03	457733	1143256	853
Pla06	458028	1144811	672
Pla07	458175	1144100	735

Tabla C.8. Ubicación de los sondeos geofísicos.

La interpretación de los datos permitió elaborar los siguientes modelos de capas resistivas para los sondeos (Tabla C.9):

Sondeo PLA01			Sondeo PLA02		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	43	3	1	296	157
2	359	164	2	36	311
3 (capa sello)	14	796	3	262	1085
4 (reservorio)	126	>2000	4	12	1394

Sondeo PLA03			Sondeo PLA06		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	106	116	1	1291	180
2	8	14	2	92	233
3	33	804	3	377	426
4 (capa sello)	2	1152	4	25	597
			5 (capa sello)	1	459

Sondeo PLA07		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	199	90
2	17	2135

Tabla C.9. Estratigrafía resistiva de los diferentes sondeos.

De los anteriores, el sondeo PL01 muestra condiciones potenciales de encontrarse en los límites de un yacimiento geotermal Figura C.16.

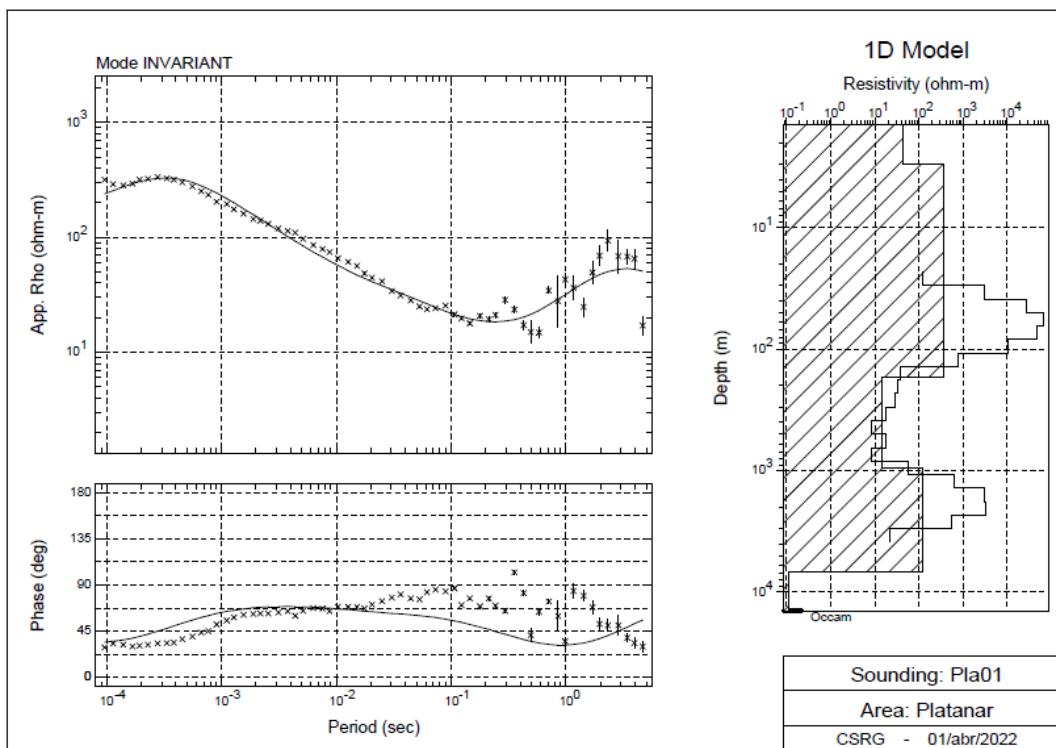


Figura C.16. Curva del sondeo PLA01. Muestra forma de v y presencia de una capa similar a la “capa sello” de yacimientos geotermales, sin embargo, a gran profundidad, potencialmente atribuible a encontrarse en la periferia de un yacimiento geotermal.

C.4 Oeste del volcán Platanar- Porvenir

C.4.1. Geología

Se recorrieron los sectores de San José de la Montaña y San Vicente, los cuales se localizan próximos a la cima del complejo volcánico Platanar- Porvenir. Tal como se aprecia en la Figura C.17, estos sectores se localizan en una zona de posible anomalía térmica, entre las isotermas de 200 y 250 °C, modeladas para una profundidad de 2.5 km.

Sobresalen algunos valles rodeados de serranías arqueadas, los cuales podrían corresponder a estructuras de colapso calderíco (sectores de San José de la Montaña y Palmira).

No se observaron nacientes termales ni evidencias de alteración hidrotermal. Las rocas se presentan frescas y la mayor parte del área se encuentra cubierta por una capa color café-naranja de piroclastos de caída y posibles oleadas, con espesores totales visibles de 2-6 m. Bajo esta capa afloran lavas y brechas de composición andesítica.

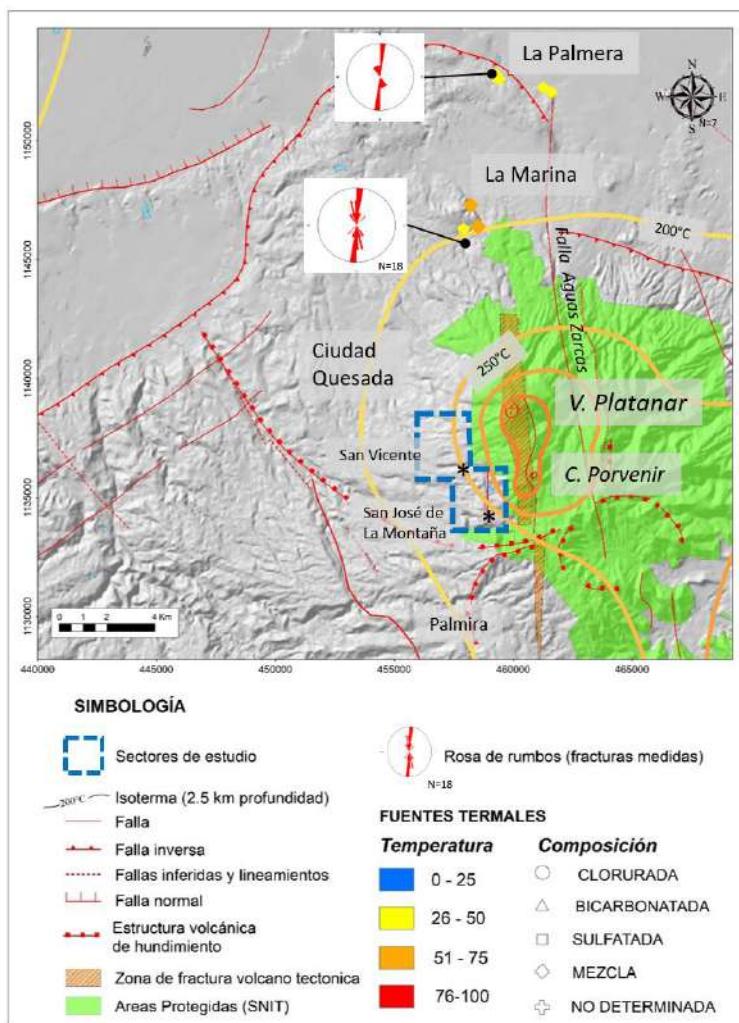


Figura C.17. Sectores de estudio en el flanco oeste del complejo volcánico Platanar-Porvenir.

Las fracturas presentan una orientación predominante N-S, las cuales pueden alcanzar varios metros de extensión y formar imponentes cataratas (Figura C.18).



Figura C.18. a) En la catarata San Vicente y otras localidades predominan las fracturas verticales con orientación predominante norte-sur. b) Detalles del sistema de fracturas en brechas andesíticas.

C.4.2. Sensores remotos

Pese a que las condiciones atmosféricas no fueron favorables para las operaciones con VANT; fue posible realizar cuatro vuelos, cubriendo un área total de 86.9 ha, Figura C.19.

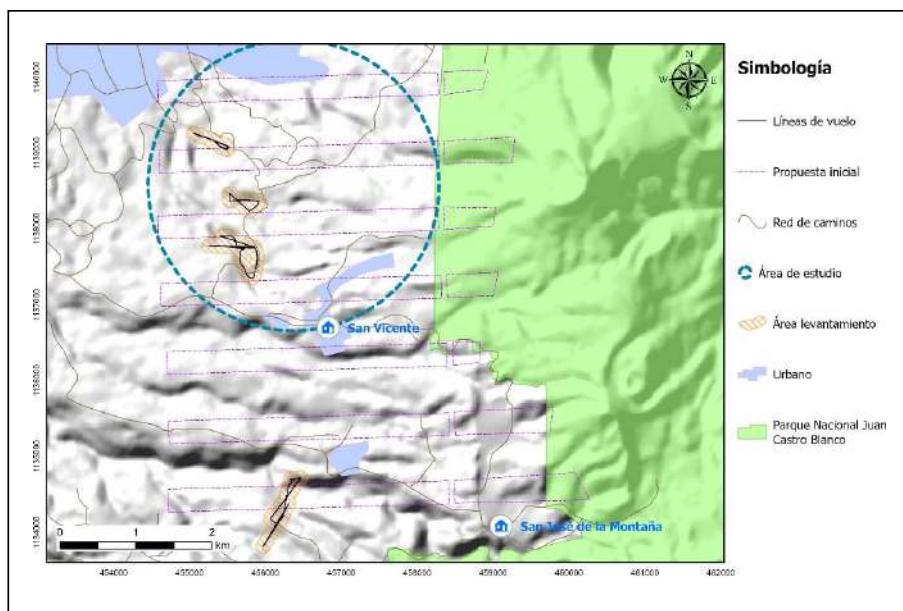


Figura C.19. Área con cobertura de imágenes térmicas.

No se identificaron zonas de alteración hidrotermal, ni rasgos morfológicos sobresalientes.

En la Tabla C.10 se presentan los datos más relevantes.

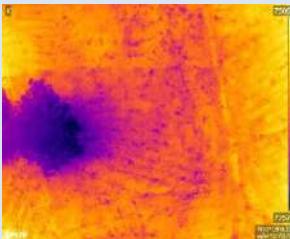
Características	Valores
Líneas de vuelo	4
Altura de vuelo	120 m
Distancia total recorrida por el drone	18.3 km
Área explorada	86.9 ha
Velocidad de vuelo	8 m/s
Metodología de vuelo	Waypoints (puntos de interés)
Nº total de fotografías capturadas	5320
Formato de salida de las fotografías	JPG y TIFF
Temperatura máxima	32 °C (influencia radiación solar)
Temperatura mínima	15 °C
Ejemplo fotografías capturas	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>RGB</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Térmico</p> </div> </div>

Tabla C.10. Datos de la campaña de teledetección en San José de la Montaña-San Vicente.

C.4.3. Medición de parámetros ambientales

El trabajo de campo consintió en realizar mediciones acústicas de ruido ambiente, que permitieron obtener el nivel de presión sonora (Lp) en diferentes sectores del área de estudio. Complementariamente, para determinar la calidad del aire, se consideró realizar mediciones de gases como Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) y Dióxido de Carbono (CO₂), ya que tienen relación con ambientes volcánicos y actividades antrópicas. En la Figura C.20 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas en campo, las cuales podrán contribuir a estudios de línea base y al análisis integral que permitirá orientar esfuerzos hacia el desarrollo del potencial geotérmico de Costa Rica.

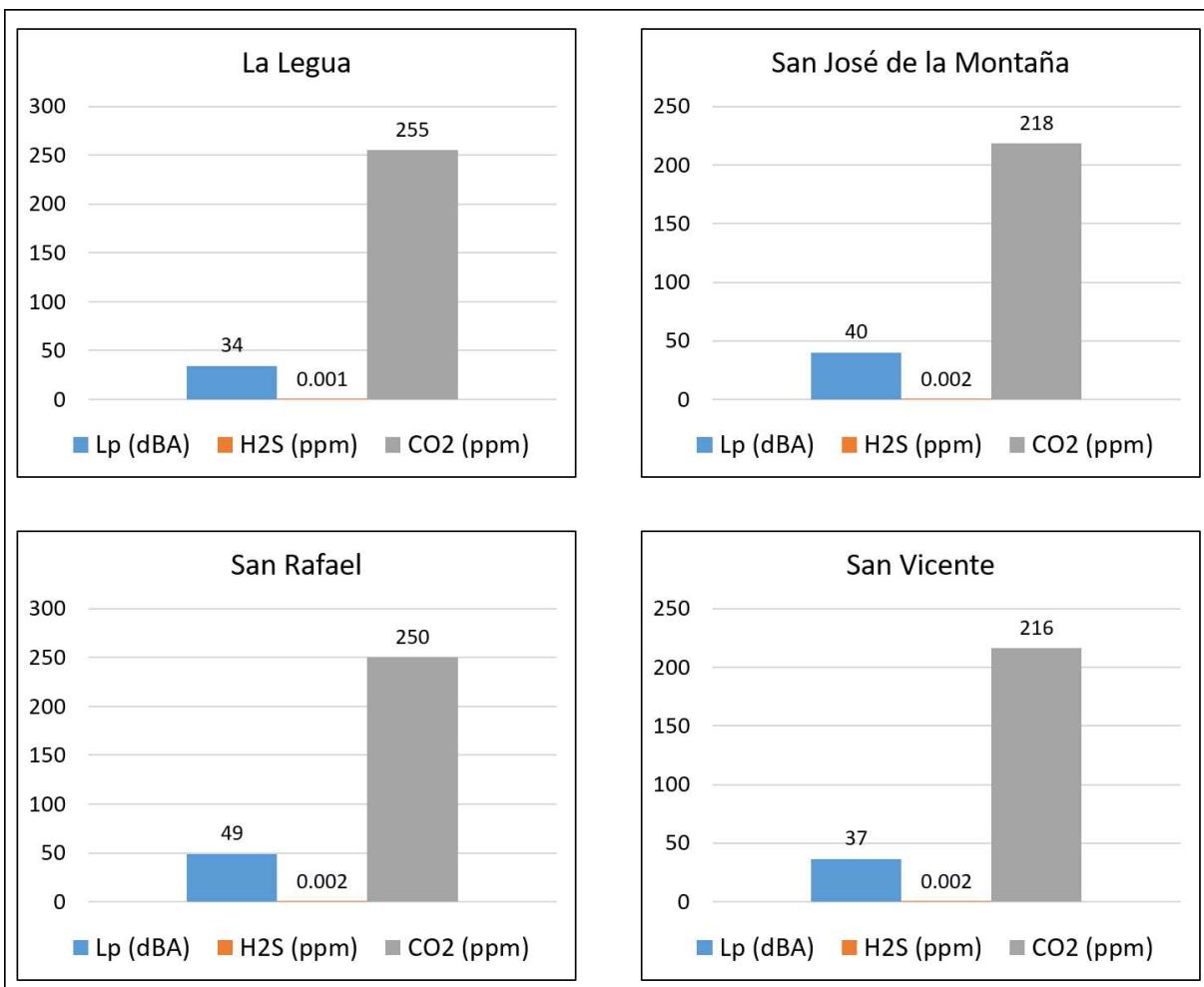


Figura C.20. Mediciones ambientales realizadas en diferentes localidades del sector oeste del volcán Platanar.

De acuerdo a la información obtenida los niveles de ruido oscilan entre 37-40 dBA, el H₂S es de 0.002 ppm y el CO₂ oscila entre 216-255 ppm.

C.4.4. Estudios geofísicos

En este sector se realizaron los sondeos Pla10 y Pla11. En ellos no se observa una estratigrafía geoeléctrica asociable a la existencia de un yacimiento geotérmico de alta entalpía.

C.5. Bajos del Toro

C.5.1. Geología

El área de estudio se localiza entre el complejo volcánico Platanar-Porvenir y el volcán Poás, en una zona formada por valles (aluviales y relleno volcánico) rodeados de montañas escarpadas de origen volcánico. Presenta una elevación media de 1400 m.s.n.m.

Predominan las alternancias de lavas y brechas frescas de composición andesítica; así como lavas andesítico-dacíticas, laharos y coluvios.

La zona se considera interesante desde el punto de vista térmico, debido a su relativa cercanía a los volcanes Poás y Platanar, ubicada entre las isotermas de 250-350 °C (modeladas para 2.5 km de profundidad, Figura C.21).

No obstante, durante los recorridos de campo y entrevistas, no se identificaron nacientes termales en la zona. Solamente se menciona la existencia de una naciente termal en la cuenca alta del río Desagüe (fuera del área de estudio) y otras, 12 km al norte del sector de estudio, en la zona de Marsella, en las márgenes del río Toro.

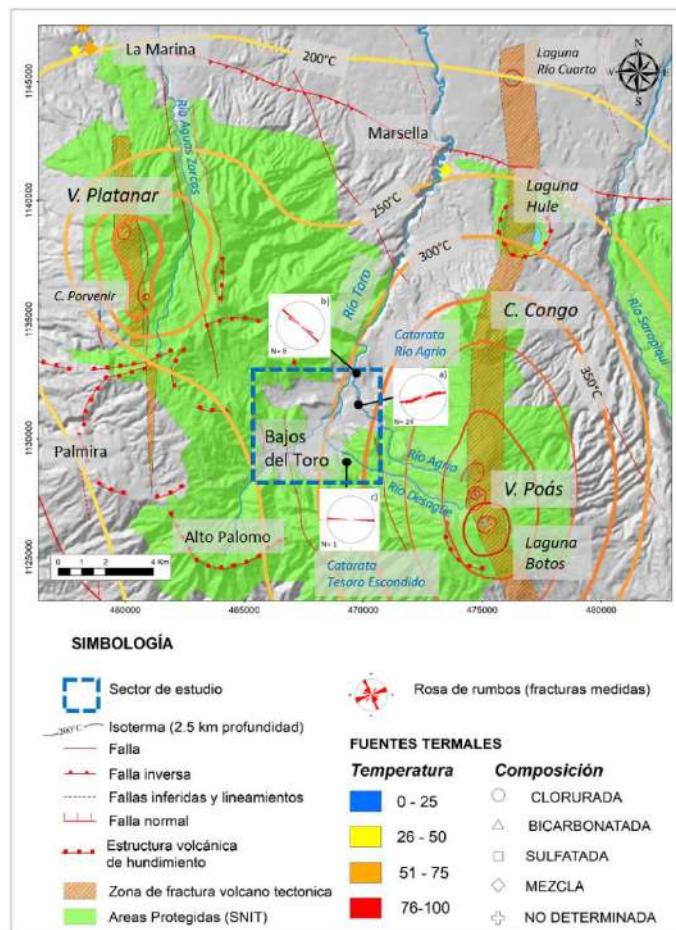


Figura C.21. a) Ubicación del sector Bajos del Toro.

Se reconocieron dos patrones estructurales predominantes: N 80 E (en la catarata río Agrio) y N 40 O (en el río Toro). Sin embargo, a nivel regional se considera que existen grandes zonas de debilidad cortical con dirección norte-sur, las cuales han favorecido el ascenso del magma tanto en el volcán Poás como en el Platanar-Porvenir.

C.5.2. Sensores remotos

Durante la campaña fue posible realizar múltiples sobrevuelos, debido a condiciones atmosféricas favorables para la operación de los VANT (Figura C.22); sin embargo, no fue posible identificar zonas con anomalías térmicas. En este sector se registraron las temperaturas del suelo más bajas de toda la campaña de prospección realizada en el país, con un promedio de 18 °C.

Adicionalmente se realizó un vuelo exploratorio en el sector de Marsella, 13 km al noreste de Bajos del Toro. El objetivo fue delimitar las nacientes termales que afloran en un sector del río Toro, las cuales son aprovechadas en el balneario Recreo Verde (temperatura 35-40°C). No obstante, debido a la elevada temperatura ambiente y la incidencia de la radiación solar, no fue posible obtener los resultados esperados desde el punto de vista térmico.

En total se recorrieron 33 km lineales, cubriendo un área de 223.8 ha. Los sobrevuelos se realizaron en su mayoría en las primeras horas de la mañana, esto para reducir la influencia de la radiación solar sobre las superficies a estudiar.

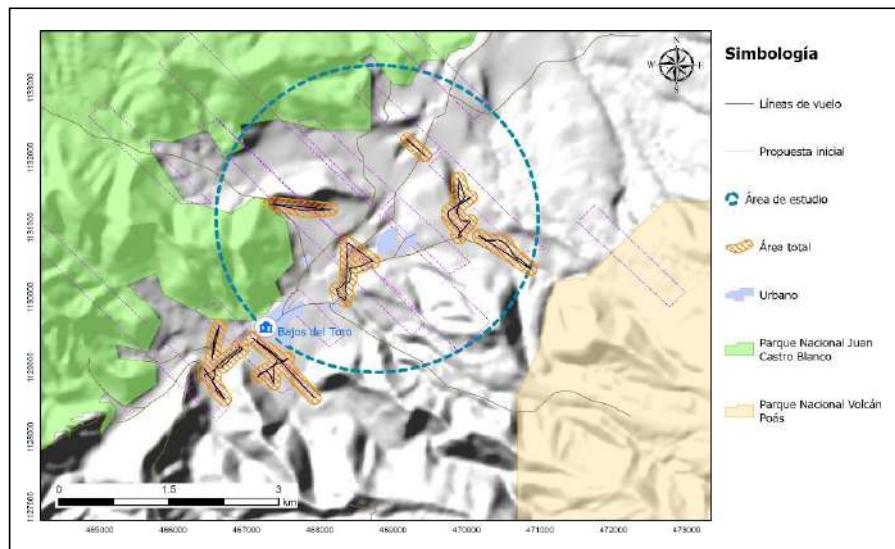


Figura C.22. Área con cobertura de imágenes térmicas.

La mayor parte del área explorada corresponde con los cauces de los ríos Toro, Gorrión, Anonos, Desagüe y Agrio, en los cuales se identificaron sectores con presencia de óxidos de hierro (Figura C.23).



Figura C.23. Sector del río Toro con afloramiento de óxido de hierro.

Durante el trabajo de campo se aprovechó para realizar un sobrevuelo nocturno en la laguna de Río Cuarto (estructura craterica de origen volcánico) para tratar de identificar zonas con anomalías térmicas. Durante el sobrevuelo se identificó un pequeño sector con una temperatura anómala de 38 °C, por lo que se procedió planificar y realizar una evaluación diurna. En ella se determinó que dicho sector correspondía a una zona de deslizamiento, sin cobertura vegetal (Figura C.24) y no a una anomalía geotérmica. Lo anterior se explica por el hecho de que la zona desprovista de vegetación, durante las horas de radiación solar, alcanza una mayor temperatura que sus alrededores, lo cual se refleja incluso durante la noche.



Figura C.24. Zona sin cobertura vegetal (deslizamiento) en uno de los bordes de la Laguna de Río Cuarto. El sensor térmico infrarrojo indicaba una temperatura de 38°C durante la noche. Fue descartada como anomalía geotérmica luego de la inspección diurna.

A continuación, se presentan los datos de campo más relevantes (Tabla C.11).

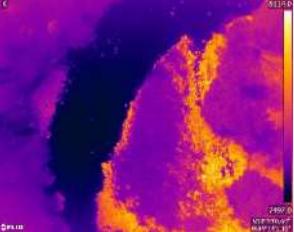
Características	Valores
Líneas de vuelo	10
Altura de vuelo	120 m
Distancia total recorrida por el VANT	33 km
Área explorada	223.8 ha
Velocidad de vuelo	8 m/s
Metodología de vuelo	Waypoints (puntos de interés en Bajos del Toro) y vuelo libre (Laguna Rio Cuarto)
Nº total de fotografías capturadas	11372
Formato de salida de las fotografías	JPG y TIFF
Temperatura máxima	55°C (influencia radiación solar)
Temperatura mínima	16 °C
Ejemplos de las imágenes obtenidas	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>RGB</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Térmico</p> </div> </div>

Tabla C.11. Datos técnicos de la campaña de teledetección en el sector de Bajos del Toro.

C.5.3. Medición de parámetros ambientales

El trabajo de campo consintió en realizar mediciones acústicas de ruido ambiente, que permitieron obtener el nivel de presión sonora (Lp) en diferentes sectores del área de estudio. Complementariamente, para determinar la calidad del aire, se consideró realizar mediciones de gases como Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) y Dióxido de Carbono (CO₂), ya que tienen relación con ambientes volcánicos y actividades antrópicas. En la Figura C.25 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas en campo, las cuales podrán contribuir a estudios de línea base y al análisis integral que permitirá orientar esfuerzos hacia el desarrollo del potencial geotérmico de Costa Rica.

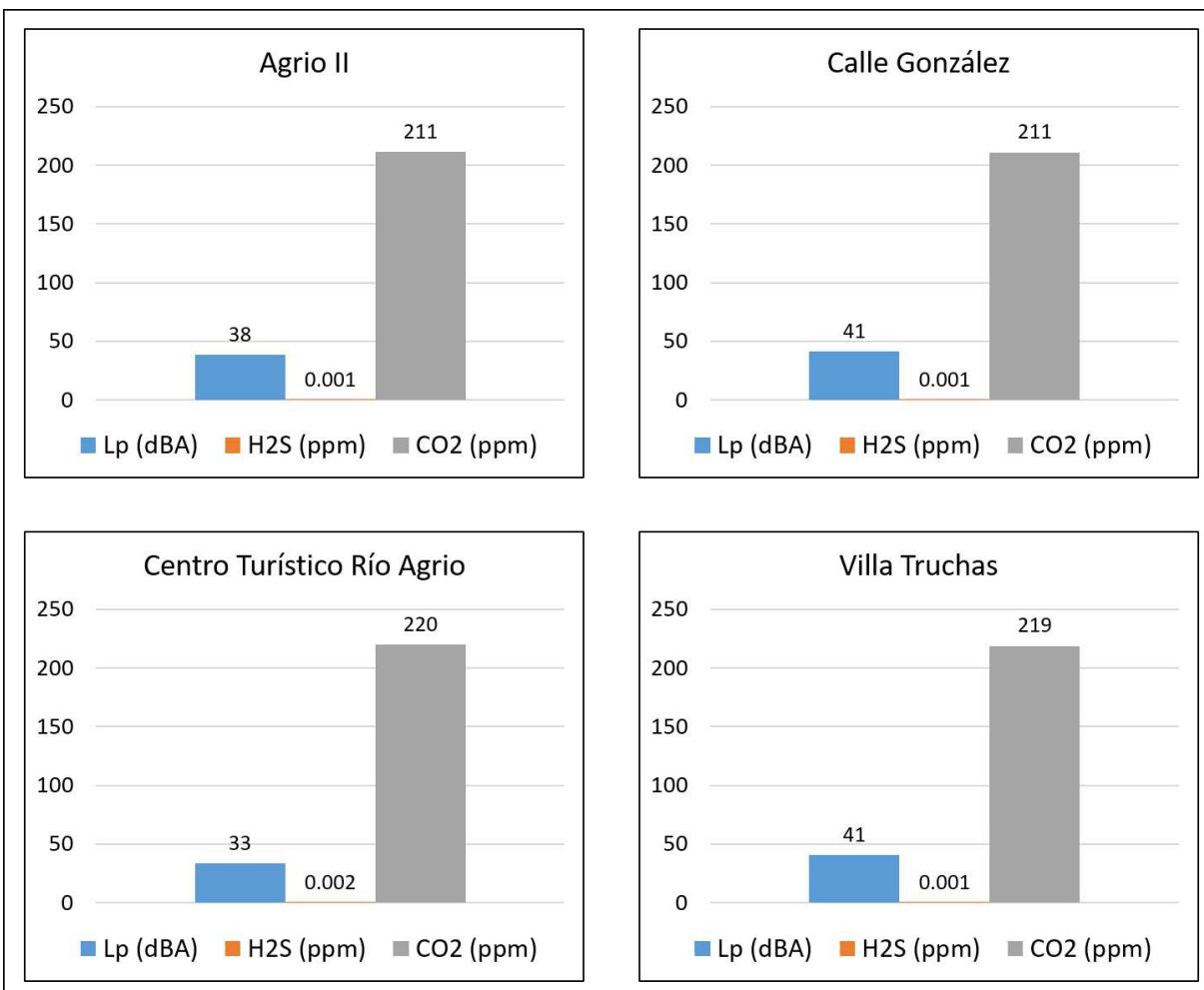


Figura C.25. Mediciones ambientales realizadas en diferentes localidades del sector Bajos del Toro.

De acuerdo a la información obtenida los niveles de ruido oscilan entre 33-41 dBA, el H₂S se encuentre entre 0.001-0.002 ppm y el CO₂ oscila entre 211-220 ppm.

C.5.4. Estudios geofísicos

En este sector se escogieron 3 de 6 sondeos electromagnéticos realizados (Tabla C.12).

Sondeo	Coordinada X	Coordinada Y	Elevación (m.s.n.m)
Tor03	468114	1131324	1395
Tor05	467720	1130560	1396
Tor06	468760	1131284	1275

Tabla C.12. Ubicación de los sondeos geofísicos.

En la Tabla C.13 se presenta los modelos de capas resistivas obtenidos (por sondeo):

Sondeo TOR03			Sondeo TOR05		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	177	77	1	80	54
2	104	799	2	1275	193
3	47	539	3	95	208
4	531	376	4	531	>1000

Sondeo TOR06		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	186	1687
2 (capa sello)	9	>2000

Tabla C.13. Estratigrafía resistiva de los diferentes sondeos.

Los sondeos realizados no mostraron sistemas atribuibles a yacimientos geotermales o bien extremadamente profundos como en el sondeo TOR06 mostrado en la Figura C.26.

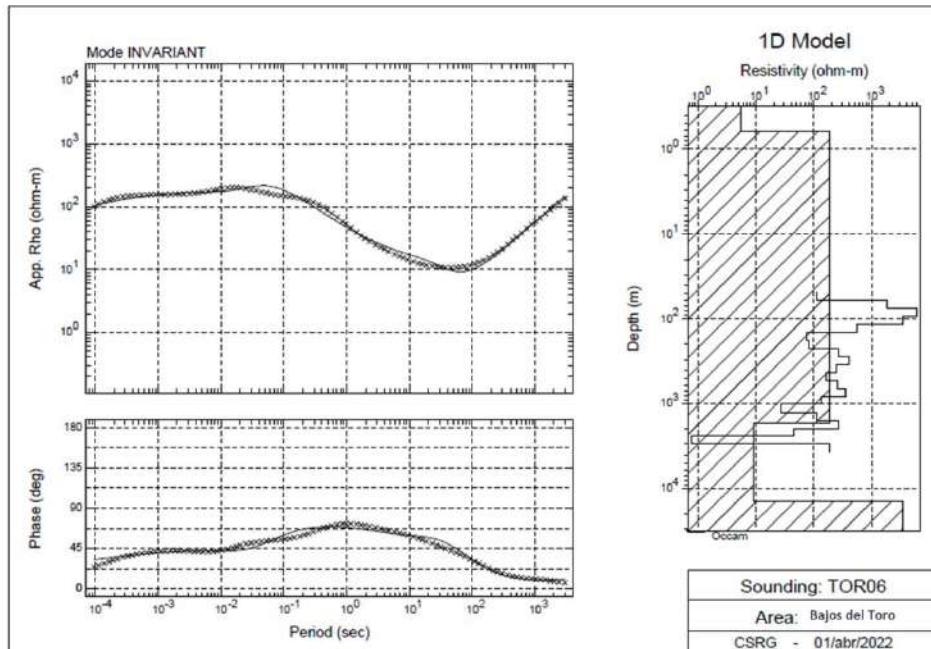


Figura C.26. Curva del sondeo TOR06. La forma de la curva muestra similitud a la v, sin embargo, los valores de resistividad y principalmente profundidad no corresponden a distribuciones típicas de yacimientos geotermales.

C.6. Vara Blanca-Poasito

C.6.1. Geología

El área se extiende entre los poblados de Poasito, Vara Blanca y cataratas la Paz (Figura C.27).

El lado oeste del área corresponde a una zona de moderada pendiente, con cauces profundos producto de la erosión en materiales piroclásticos de poca dureza.

El sector norte presenta mayores pendientes, cauces encañonados producto de la erosión en lavas andesíticas y dacíticas fracturadas que conforman la base de la secuencia de roca local. Presenta en su mayoría una cobertura de bosque primario y es aprovechada principalmente para el turismo, en especial por sus bellas cataratas.

Esta zona se considera interesante desde el punto de vista geotérmico, debido a su relativa cercanía a los volcanes Poás y Barva; estando localizada entre las isotermas de 250-400 °C (modeladas para 2.5 km de profundidad). No obstante, durante los recorridos de campo y entrevistas a los pobladores, no se identificaron nacientes termales.

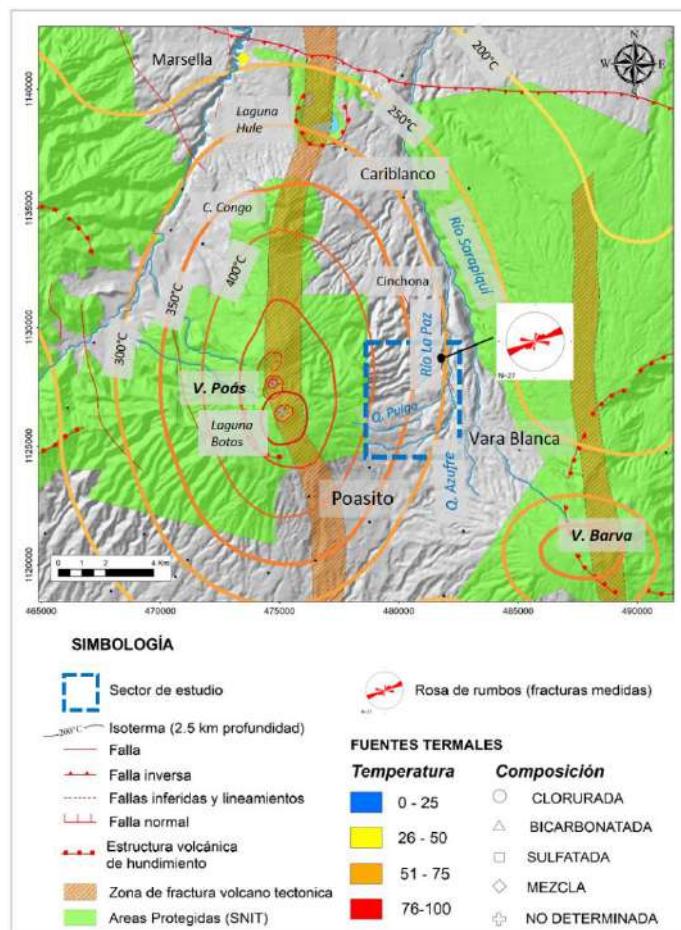


Figura C.27 Ubicación del sector Vara Blanca- Poasito.

Solamente se identificó una zona de nacientes frías con intensa precipitación de azufre y salida de H₂S en un tramo de la quebrada Azufre; fenómeno posiblemente relacionado a la desgasificación de un cuerpo magmático profundo. En este sitio se observan bloques métricos de travertino, los cuales sugieren la existencia de fluidos saturados en sílice, que podrían estar asociados a fluidos profundos con temperaturas superiores a 100 °C.

C.6.2. Sensores remotos

El trabajo de campo se realizó la última semana de agosto del 2021. En este periodo fue necesario realizar ajustes en las actividades planificadas, debido a que las condiciones atmosféricas dificultaban la captura de datos térmicos y la visibilidad del equipo. La mayor parte del tiempo estuvo nublado y con presencia de lluvias intermitentes.

Pese a estas condiciones atmosféricas, fue posible realizar el levantamiento de datos térmicos de 48.1 km lineales, con un área de cobertura de 286 ha (Figura C.28).

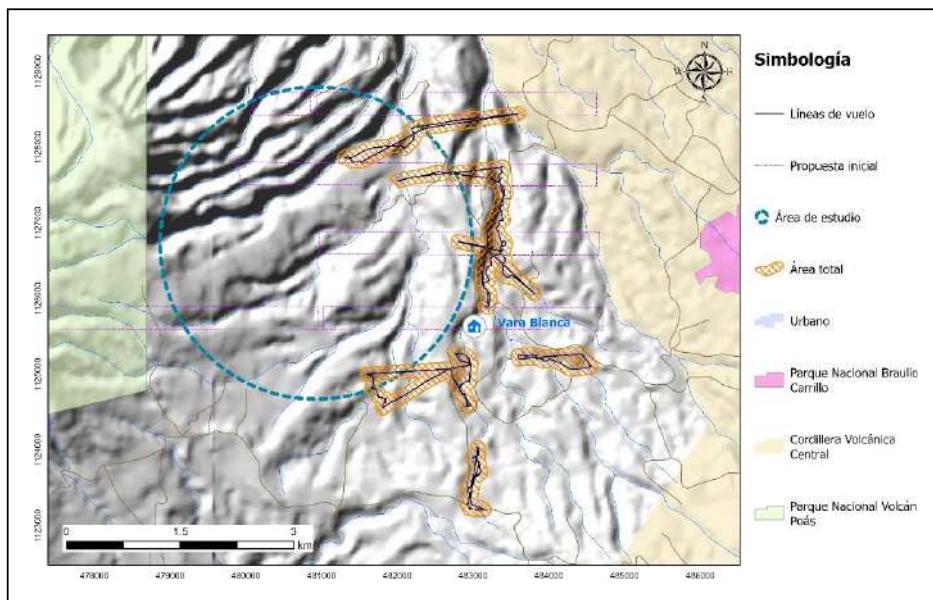


Figura C.28. Área con cobertura de imágenes térmicas.

Debido a las características geológicas observadas en la quebrada Azufre, se realizaron tres sobrevuelos para determinar la temperatura máxima y mínima del cauce; así como intentar identificar zonas de alteración hidrotermal (Figura C.29).

En los primeros dos vuelos no fue posible obtener datos relevantes debido a la espesa neblina, en el tercer sobrevuelo se determinó que el rango de temperatura del cauce era de 16 a 25 °C, con lo cual se descartó la existencia de una anomalía térmica en este sitio.



Figura C.29. Quebrada Azufre (cruce Vara Blanca-Poasito).

En la Tabla C.14 se presentan los datos más relevantes del estudio en Vara Blanca.

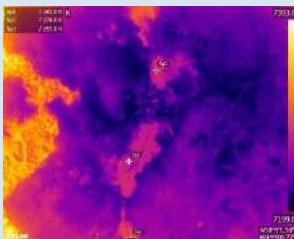
Características		Valores
Líneas de vuelo	10	
Altura de vuelo	90 m	
Distancia total recorrida por el VANT	48.1 km	
Área explorada	286 ha	
Velocidad de vuelo	8 m/s	
Metodología de vuelo	Waypoints (puntos de interés)	
Nº total de fotografías capturadas	11307	
Formato de salida de las fotografías	JPG y TIFF	
Temperatura máxima	25 °C	
Temperatura mínima	16 °C	
Ejemplos fotografías capturas		 
		RGB Térmico

Tabla C.14. Datos técnicos de la campaña de teledetección en Vara Blanca.

C.6.3. Medición de parámetros ambientales

El trabajo de campo no se logró realizar en este sector, ya que los equipos presentaron problemas por el nivel de altura del sitio y desconfiguración que no permitió realizar las mediciones.

C.6.4. Estudios geofísicos

En este sector se escogieron 3 sondeos de 5 sondeos electromagnéticos realizados (Tabla C.15).

Sondeo	Coordinada X	Coordinada Y	Elevación (m.s.n.m)
Var01	483126	1123355	1952
Var02	479693	1124720	1909
Var03	481275	1123960	1839

Tabla C.15. Ubicación de los sondeos geofísicos.

La interpretación de los datos permitió elaborar los siguientes modelos de capas resistivas para los diferentes sondeos (Tabla C.16):

Sondeo Var01			Sondeo Var03		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	65	28	1	193	28
2	3	166	2	31	166
3 (capa sello)	16	742	3	126	742
4 (reservorio)	26	>2000	4	18	717

Sondeo Var02		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	91	247
2	149	>2000

Tabla C.16. Estratigrafía resistiva de cada sondeo.

En este sector y como lo muestra la Figura C.30, el sondeo Var01 muestra lo que podría ser el límite de un yacimiento geotermal con contacto al reservorio.

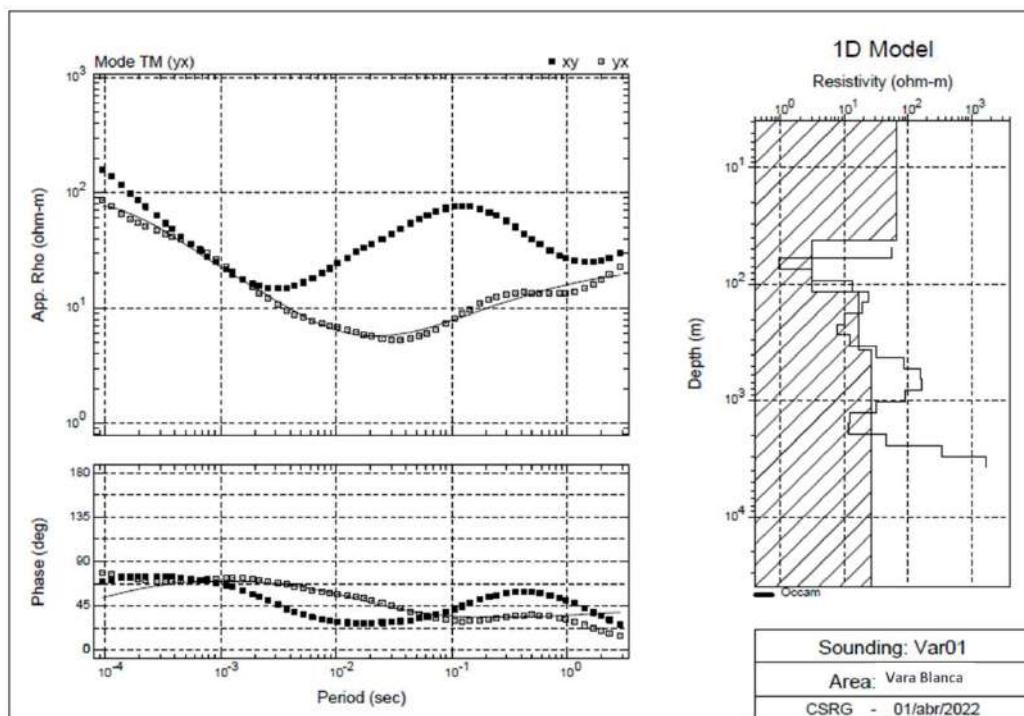


Figura C.30. Curva del sondeo Var01. La forma de la curva y valores de resistividad y profundidad muestran potencialmente asociación con el contexto de un límite de un yacimiento geotermal.

C.7. Sector sur del volcán Turrialba

C.7.1. Geología

El área estudiada se localiza en el sector norte del cantón de Turrialba, en el flanco sur del volcán del mismo nombre (Figura C.31).

Al norte del poblado de La Pastora predominan las pendientes altas y muy altas, correspondientes con coladas de lava andesítica, piroclastos indiferenciados y lahares.

Hacia el centro del sector de estudio, se observa una estructura arqueada de 7 km de longitud, la cual, según observaciones de campo, corresponde a la corona de un macro-deslizamiento. Esto se corrobora por el tipo de depósitos que afloran en toda esta zona y la morfología propia de procesos de remoción en masa. A pesar de la fuerte a moderada pendiente que predomina en la zona, en la parte interna del posible deslizamiento se presentan algunas zonas planas con lomas redondeadas, morfología que sugiere procesos de remoción en masa.

Tomando en consideración la secuencia de rocas aflorante en la zona, no se descarta que, dentro del sector de estudio, se presenten rocas sedimentarias de origen marino en la parte media-inferior de la secuencia estratigráfica. Esto debería ser objeto de análisis posterior debido a las implicaciones que pueda tener desde el punto de la permeabilidad profunda.

No se observaron evidencias de alteración hidrotermal ni presencia de manifestaciones hidrotermales dentro del sector de estudio. Los parámetros de campo en ríos y quebradas

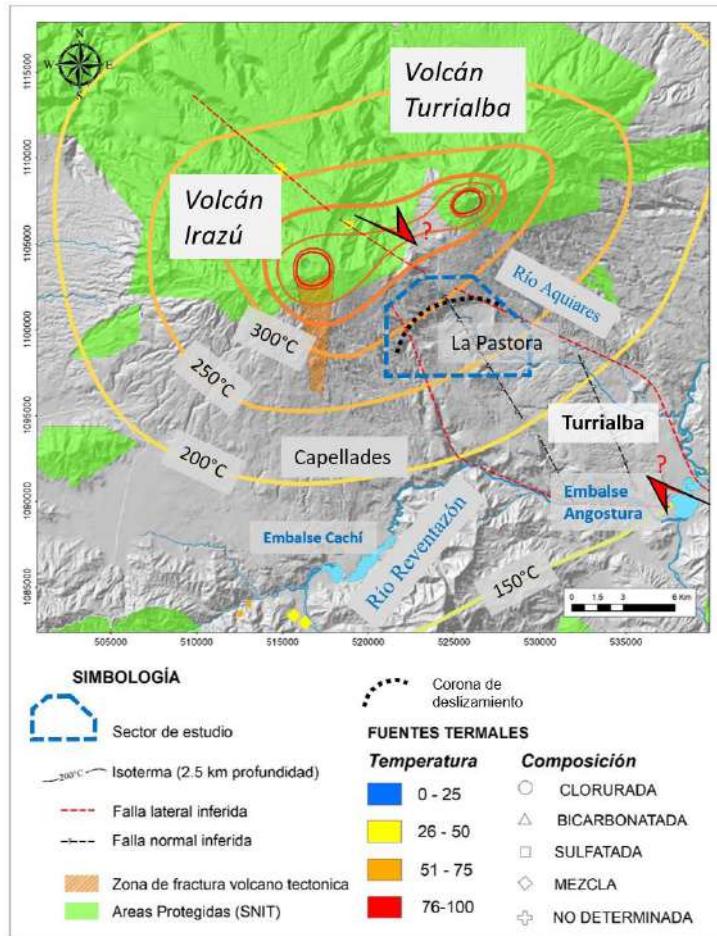


Figura C.31. Ubicación del sector sur del volcán de Turrialba.

Los patrones de drenaje sugieren un importante control estructural a nivel regional; tal es el caso de los ríos Reventazón y Aquiares y la quebrada Honda, los cuales conforman una estructura trapezoidal producto de posibles sistemas NO-SE y NNO-SSE. Se infiere que dicha estructura pudo haberse originado por sistemas de fallas de desplazamiento dextrales NO-SE.

indican que se trata de aguas con bajo contenido de sólidos disueltos, con pH= 7 -7.8 y conductividades de 60 – 150 µS/cm.

Fuera del área sector de estudio, entre los volcanes Irazú y Turrialba, ICE (1991) y Fajardo (2013) reportan la existencia de nacientes termales sulfatadas y otras, producto de mezclas, con temperaturas de 68 °C y 27-37 °C, respectivamente. Hacia el sureste del sector de estudio, en las márgenes del río Reventazón, un vecino de Turrialba reportó de manera verbal la existencia de una fuente termal; no obstante, durante el trabajo de campo no fue posible encontrarla. Se recomienda la búsqueda y eventual muestreo de esta naciente durante la estación seca, cuando los niveles de las aguas superficiales hayan disminuido.

C.7.2. Sensores remotos

En el mes de agosto del 2021, se realizó una campaña de teledetección mediante el uso de drones y sensores aerotransportados en el cantón de Turrialba; con el fin de evaluar las características térmicas del suelo, e identificar rasgos morfológicos importantes (Figura C.32).

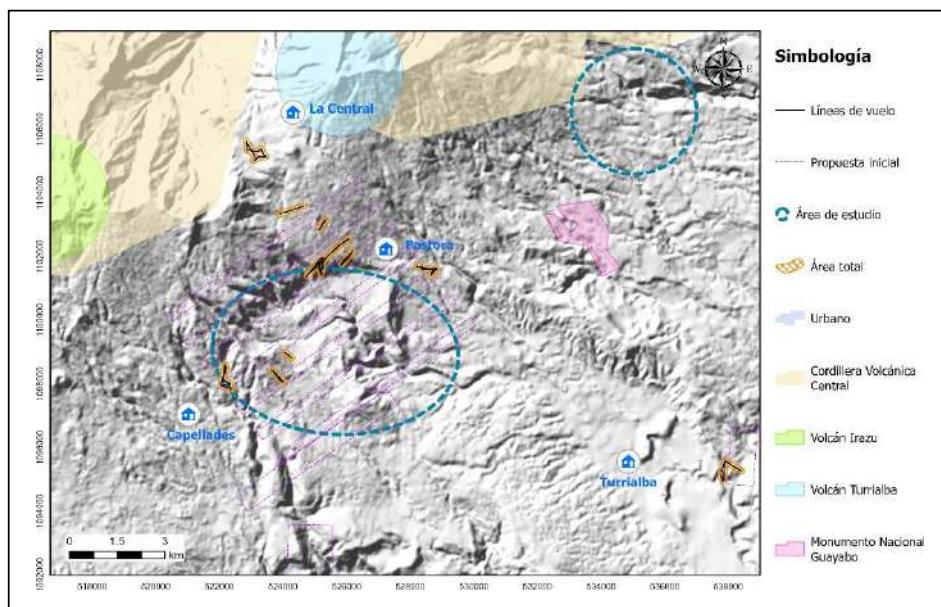


Figura C.32. Área con cobertura de imágenes térmicas.

Esta investigación permitió la exploración de un área total de 208.5 ha y 37.3 km lineales, en donde se evaluaron tres sectores: Las Ánimas, Pastora-La Central y Capellades.

Las Ánimas

Este sector de estudio se localiza en la confluencia de los ríos Turrialba y Reventazón, cerca de la comunidad de Las Ánimas. La evaluación realizada consistió en la identificación de rasgos térmicos en una sección del río Turrialba, en la cual, según lo indicado por vecinos, se

sospechaba la localización de una naciente termal, sin embargo, debido a la temperatura ambiente y la cobertura vegetal, no fue posible identificar el sitio de interés.

A continuación, se presentan los datos más relevantes del estudio de sensores remotos aerotransportados realizados en el sector de Las Ánimas (Tabla C.17).

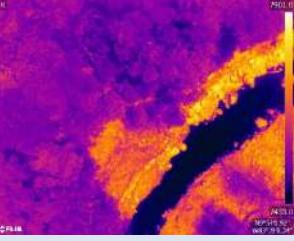
Características	Valores
Líneas de vuelo	2
Altura de vuelo	120
Distancia total recorrida por el VANT	4.5 km
Área explorada	27.44 ha
Velocidad de vuelo	8 m/s
Metodología de vuelo	Waypoints (puntos de interés)
Nº total de fotografías capturadas	1091
Formato de salida de las fotografías	JPG y TIFF
Temperatura máxima	46 °C
Temperatura mínima	22 °C
Ejemplos de fotografías capturas	 RGB  Térmico

Tabla C.17. Datos técnicos de la campaña de teledetección en Las Ánimas.

Pastora-La Central

Se realizó el levantamiento de 8 líneas de vuelo en las comunidades de Pastora y La Central, con un área de cobertura total de 134.2 ha y 24.7 km lineales. La prospección consistió en el levantamiento de datos térmicos en líneas de vuelo perpendiculares a los cauces de los ríos Turrialba, Sereno y Jesús María, con la intención de delimitar rasgos morfológicos-estructurales de interés.

Pese a que inicialmente se contaban con las condiciones idóneas para realizar las actividades de campo, se presentaron algunas pérdidas de conexión entre la aeronave y el control, por lo que fue necesario llevar el equipo a un taller certificado para su revisión.

A raíz de este inconveniente, fue necesario priorizar los sitios de levantamiento, por lo que quedaron muchas áreas sin explorar. De los sitios evaluados, no se identificaron rasgos hidrotermales. Por otro lado, se observaron gran cantidad de zonas inestables producto de las condiciones lluviosas ocurridas en julio del 2021.

En la Tabla C.18 se presentan los datos más relevantes de la campaña de teledetección en las comunidades de la Pastora y La Central.

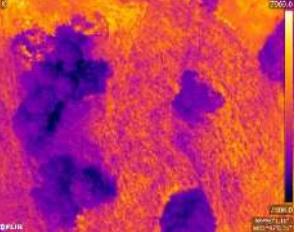
Características	Valores
Líneas de vuelo	8
Altura de vuelo	90 y 120
Distancia total recorrida por el drone	24.7 km
Área explorada	134.2 ha
Velocidad de vuelo	8 m/s
Metodología de vuelo	Waypoints (puntos de interés)
Nº total de fotografías capturadas	7322
Formato de salida de las fotografías	JPG y TIFF
Características	Valores
Temperatura máxima	50 °C (suelo desnudo)
Temperatura mínima	11 °C
Ejemplos de fotografías capturadas	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>RGB</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Térmico</p> </div> </div>

Tabla C.18. Datos técnicos de la campaña de teledetección en la Pastora-La Central.

Capellades

El último sitio evaluado en el sector de Turrialba, fue Capellades, en donde se realizaron tres líneas de vuelo con una longitud total de 8.17 km, cubriendo un área de 46.91 ha.

Durante campaña de prospección, no se identificaron zonas con anomalías geotérmicas, ni tampoco rasgos morfológicos importantes.

La Tabla C.19 presenta los datos más relevantes de la campaña de teledetección realizada en Capellades.

Tabla C.19. Datos técnicos de la campaña de teledetección en Capellades.

C.7.3. Medición de parámetros ambientales

El trabajo de campo consintió en realizar mediciones acústicas de ruido ambiente, que permitieron obtener el nivel de presión sonora (Lp) en diferentes sectores del área de estudio. Complementariamente, para determinar la calidad del aire, se consideró realizar mediciones de gases como Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) y Dióxido de Carbono (CO₂), ya que tienen relación con ambientes volcánicos y actividades antrópicas. En la Figura C.33 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas en campo, las cuales podrán contribuir a estudios de línea base y al análisis integral que permitirá orientar esfuerzos hacia el desarrollo del potencial geotérmico de Costa Rica.

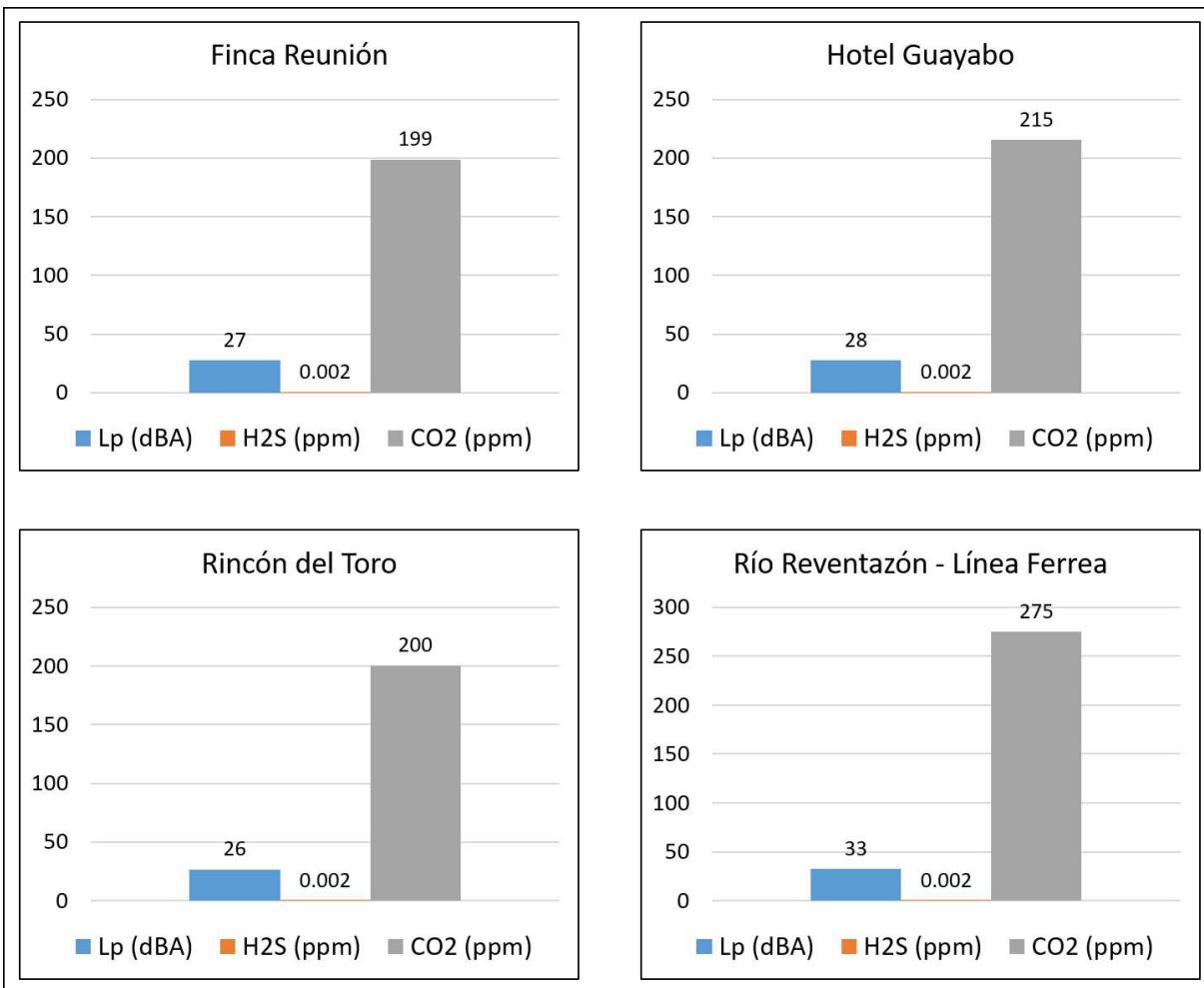


Figura C.33. Mediciones ambientales realizadas en diferentes localidades del sector sur del volcán Turrialba.

De acuerdo a la información obtenida los niveles de ruido oscilan entre 26-33 dBA, el H₂S es de 0.002 ppm y el CO₂ oscila entre 199-275 ppm.

II.6.4. Estudios geofísicos

En este sector se escogió 1 de 4 sondeos electromagnéticos realizados (Tabla C.20).

Sondeo	Coordinada X	Coordinada Y	Elevación (m.s.n.m)
Coli03	525056	1101138	1700

Tabla C.20. Ubicación de los sondeos geofísicos.

La interpretación de los datos permitió elaborar el siguiente modelo de capas resistivas, para el sondeo seleccionado (Tabla C.21):

Sondeo Turrialba		
Capa resistiva	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)
1	>30	477
2 (capa sello)	11	>1000

Tabla C.21. Estratigrafía resistiva del sondeo seleccionado.

El modelo resistivo correspondiente a la Figura C.34 podría indicar que el sondeo se ubicó en un sitio marginal de algún posible yacimiento geotermal.

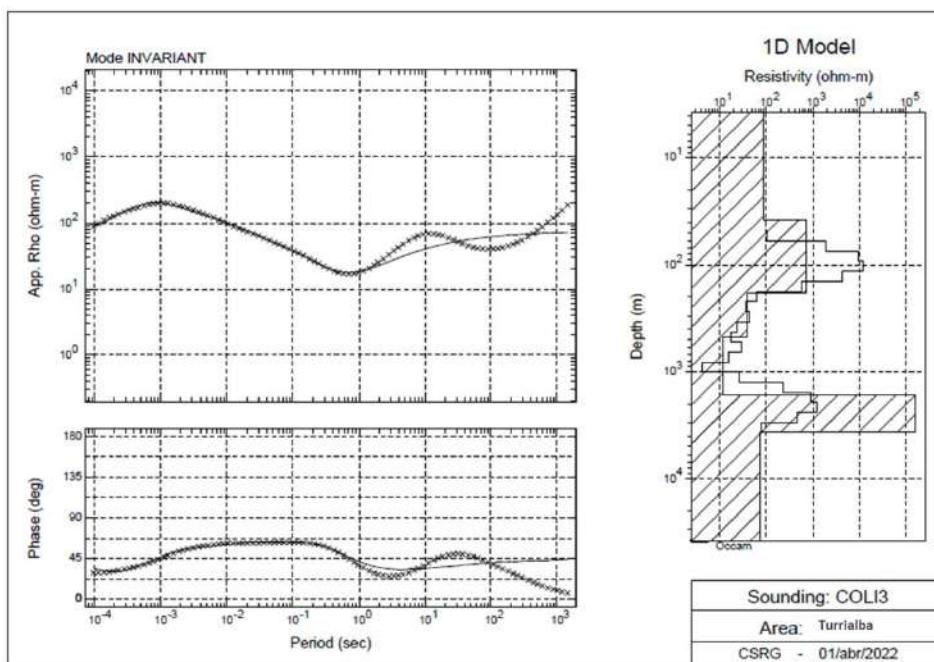


Figura C.34. Curva del sondeo COLI3. Se observa la típica forma en v, los valores de resistividad y espesores podrían atribuirse a estar localizado el sondeo en un sitio marginal de un yacimiento geotermal.

C.8. Clasificación Marco de las Naciones Unidas para la energía fósil y los recursos y reservas minerales (CMNU-2009), aplicada a los recursos de energía geotérmica (UNECE, 2016).

Dentro de las aplicaciones prácticas que ha establecido la UNECE, se encuentra la adaptación de la clasificación de las Naciones Unidas para la energía fósil y los recursos y reservas minerales (CMNU-2009) para prospectos y proyectos geotérmicos, siendo un esfuerzo por normalizar la manera en que se informa el potencial de energía renovable. Dicha clasificación

considera las variables socio-económicas (eje E), la viabilidad del proyecto (eje F) y las incertidumbres significativas que afectan la cantidad de recursos estimados (nivel de conocimiento geológico, eje G).

De acuerdo al nivel de información actual, todos los prospectos analizados se encuentran en el mismo nivel de reconocimiento de exploración (Tabla C.20).

Estudios geocientíficos							
Área de estudio	Subsectores de estudio	Área evaluada km ²	Geología	Geoquímica	Sensores remotos	Parámetros ambientales	Geofísica
Tenorío	Aguas Calientes	6.6	X	X	X	X	X
Arenal-Poco Sol	Poco Sol	690	X	X	X	-	X
Platanar-Porvenir	La Palmera	11.7	X	X	X	X	
	Aguas Zarcas – Muelle	36.1	X	X	X	X	X
	San José de la Montaña – San Vicente	11.6	X	X	X	X	X
Poas	Bajos del Toro	15.1	X	X	X	X	X
	Vara Blanca – Poasito	13.3	X	X	X		X
Turrialba	Las Ánimas – Reventazón	15.6	X	X	X	X	
	Santa Cruz	50.1	X	X	X	X	X

Tabla C.20. Nivel de conocimiento geocientífico de cada uno de los sectores analizados.

Eje E (variables socio-económicas). Tabla C.21.

Categoría	Razonamiento para Clasificación
E3.2	No se espera que el tema se resuelva dentro de un futuro previsible. Tomando como base el rango más bajo exploratorio en todos los temas del entorno (legal, ambiental, mercado, entre otros), no se puede determinar la viabilidad económica de la extracción debido a la información insuficiente en la fase de exploración.

Tabla C.21. Clasificación obtenida en el eje E.

Eje F (viabilidad del proyecto). Tabla C.22.

Categoría	Definición de CMNU - 2009	Razonamiento para Clasificación
F3.3	Proyecto en Exploración	Estas zonas están en etapas tempranas de las actividades de exploración. Puede deducirse de los estudios geológicos regionales las condiciones favorables para el descubrimiento potencial de yacimientos en una provincia geotérmica.

Tabla C.22. Clasificación obtenida en el eje F.

Eje G (incertidumbres significativas de la cantidad de recursos estimados- nivel de conocimiento geológico). Tabla C.23.

Categoría	Definición de CMNU - 2009	Razonamiento para Clasificación
G4	Proyecto de Exploración	Cantidades estimadas relacionadas con un yacimiento potencial, basadas principalmente en evidencia indirecta.

Tabla C.23. Clasificación obtenida en el eje G.

Por lo tanto, con el nivel de conocimiento actual y de acuerdo a la clasificación de la CMNU (2009) y UNECE, 2016, los prospectos geotérmicos analizados se clasifican en la categoría E3.2/F3.3/G4, correspondiente a proyectos de exploración (Figura C.34).

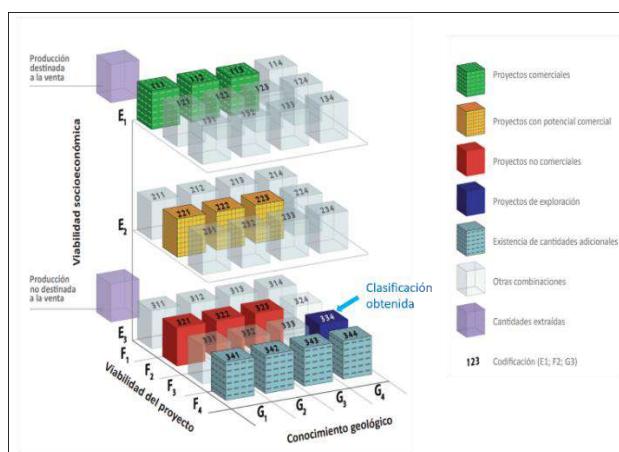


Figura C.34. Diagrama ternario para la clasificación de los recursos (CMNU, 2009). En este caso todos los proyectos analizados se clasifican con el código E3; F3; G4, correspondiente a Proyectos de Exploración.

12.4 Apéndice D: Criterios para la definición de las áreas mínima, más probable y máxima a 2,5 y 3,0 km de profundidad

Las áreas se definieron utilizando como criterio los contornos de las isotermas modeladas a 2,5 y 3,0 km de profundidad, según se indica en la tabla 1.

Clase	Tipo de área	Límite externo	Límite interno
Clase A1	Área mínima	Isoterma de 300°C	No aplica
Clase A1	Área más probable	Isoterma de 220°C	No aplica
Clase A1	Área máxima	Isoterma de 200°C	No aplica
Clase A2	Área mínima	Isoterma de 150°C	Isoterma de 200°C
Clase A2	Área más probable	Isoterma de 150°C	Isoterma de 220°C
Clase A2	Área máxima	Isoterma de 150°C	Isoterma de 300°C

Tabla 1. Criterios utilizados para la definición de las áreas mínima, más probable y máxima de las clases con temperaturas $\geq 150^{\circ}\text{C}$ (Clases A1 y A2).

12.5 Apéndice E: Estimaciones de la capacidad instalable de las diferentes áreas geotérmicas.

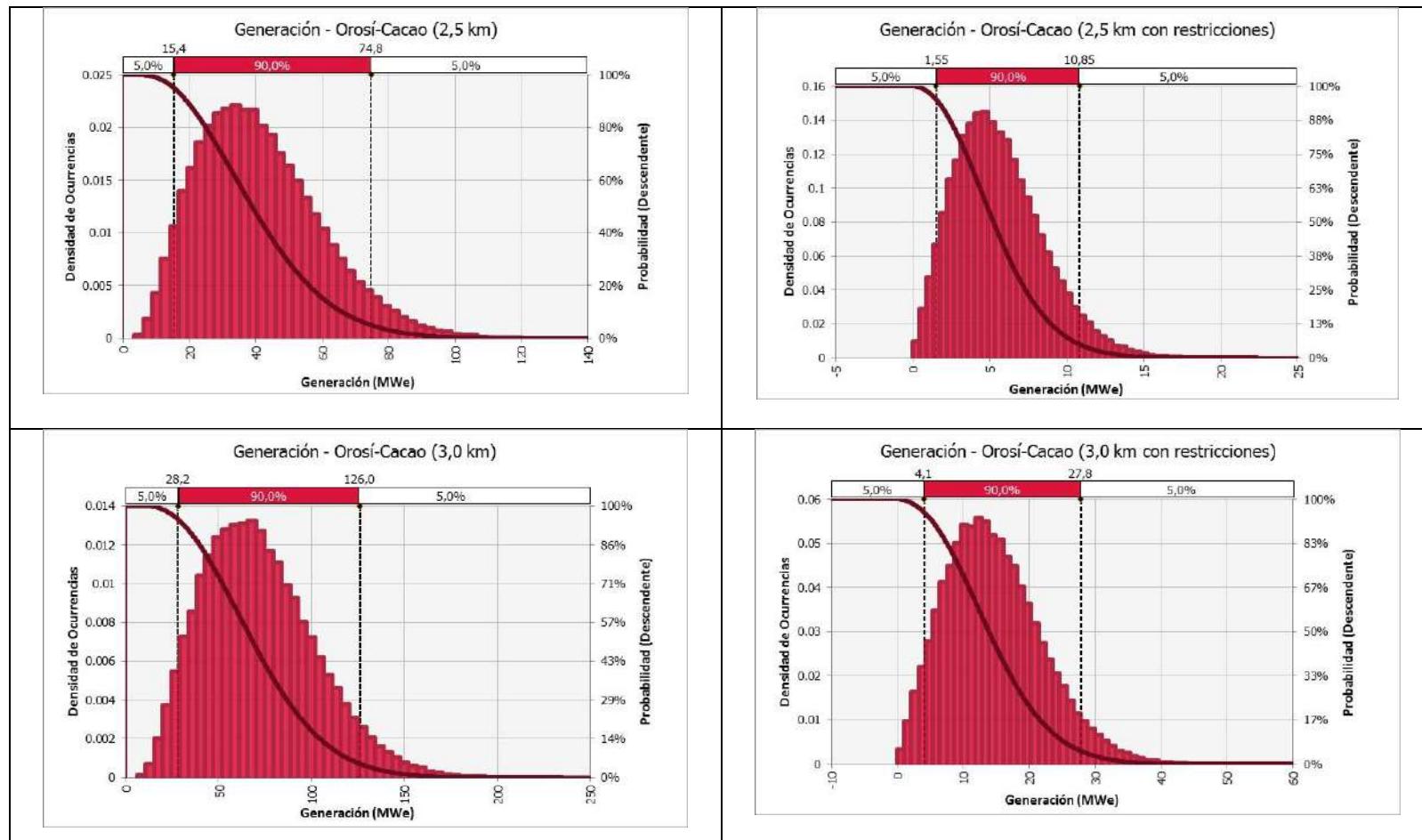
E.1. Parámetros utilizados

Área Geotérmica	Zona	Área km ²	Espesor m	Calor Específico Roca kJ/kg°C	Porosidad %	Temp. del yacimiento °C	T. Final °C	Densidad Roca kg/m ³	Recuperación de Calor %	Eficiencia de la Conversión %	Factor de Planta %	Tiempo años																
Arenal-Pocosol	2.5	264	679	804	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Arenal-Pocosol	2.5R	112	345	426	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Arenal-Pocosol	3.0	420	994	1191	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Arenal-Pocosol	3.0R	199	549	698	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Barba	2.5	38	244	340	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Barba	2.5R	1	23	48	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Barba	3.0	71	459	581	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Barba	3.0R	3	34	66	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Caño Negro	2.5	329	447	742	320	640	960	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Caño Negro	2.5R	248	324	429	320	640	960	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Caño Negro	3.0	2167	2338	2755	480	800	1120	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Caño Negro	3.0R	1355	1484	1703	480	800	1120	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Irazu-Turrialba	2.5	155	684	914	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	260	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	12	89	90	91	30
Irazu-Turrialba	2.5R	40	178	261	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	260	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	12	89	90	91	30
Irazu-Turrialba	3.0	221	1061	1396	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	260	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	12	89	90	91	30
Irazu-Turrialba	3.0R	54	304	422	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	260	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	12	89	90	91	30
Liberia	2.5	399	534	897	320	640	960	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Liberia	2.5R	284	382	555	320	640	960	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Liberia	3.0	2134	2313	2807	480	800	1120	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Liberia	3.0R	1541	1679	1955	480	800	1120	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Miravalles [Conocido]	2.5	32	1000	1200	1400	700	955	4.186	8	9	10	235	240	250	165	2300	800	20	22.5	25	10.7	11	11.5	89	90	91	30	
Miravalles [Conocido]	2.5R	32	1000	1200	1400	700	955	4.186	8	9	10	235	240	250	165	2300	800	20	22.5	25	10.7	11	11.5	89	90	91	30	
Miravalles [Conocido]	3.0	32	1000	1200	1400	700	955	4.186	8	9	10	235	240	250	165	2300	800	20	22.5	25	10.7	11	11.5	89	90	91	30	
Miravalles [Conocido]	3.0R	32	1000	1200	1400	700	955	4.186	8	9	10	235	240	250	165	2300	800	20	22.5	25	10.7	11	11.5	89	90	91	30	
Miravalles [Nuevo]	2.5	0	118	134	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	10	15	20	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Miravalles [Nuevo]	2.5R	0	18	28	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	10	15	20	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Miravalles [Nuevo]	3.0	16	269	317	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	10	15	20	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Miravalles [Nuevo]	3.0R	0	123	168	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	250	165	2300	800	10	15	20	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Orosi-Cacao	2.5	20	121	146	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	230	240	165	2300	800	10	15	20	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Orosi-Cacao	2.5R	0	16	23	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	230	240	165	2300	800	10	15	20	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Orosi-Cacao	3.0	31	166	202	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	230	240	165	2300	800	10	15	20	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Orosi-Cacao	3.0R	0	33	49	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	230	240	165	2300	800	10	15	20	10	10.7	11.5	89	90	91	30
Platánar-Porvenir	2.5	24	236	320	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	230	240	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.5	11	89	90	91	30
Platánar-Porvenir	2.5R	0	65	94	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	230	240	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.5	11	89	90	91	30
Platánar-Porvenir	3.0	41	365	541	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	230	240	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.5	11	89	90	91	30
Platánar-Porvenir	3.0R	1	115	200	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	230	240	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.5	11	89	90	91	30
Poas	2.5	215	469	556	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	275	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	12.8	89	90	91	30
Poas	2.5R	70	139	165	320	640	960	0.795	4.186	2	5	8	220	235	275	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	12.8	89	90	91	30
Poas	3.0	260	587	689	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	275	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	12.8	89	90	91	30
Poas	3.0R	88	173	217	480	800	1120	0.795	4.186	2	5	8	220	235	275	165	2300	800	1.75	4.5	7	10	10.7	12.8	89	90	91	30
Puerto Viejo	2.5	680	938	1428	320	640	960	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Puerto Viejo	2.5R	343	422	501	320	640	960	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Puerto Viejo	3.0	2285	2676	3569	480	800	1120	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Puerto Viejo	3.0R	1449	1633	1821	480	800	1120	0.795	4.186	1	2.5	4	150	170	220	100	2300	800	0.75	2	5	7	7.7	10	89	90	91	30
Rincon de la Vieja [Conocido]	2.5	54	1000	1100	1200	700	955	4.186	8	9	10	250	255	265	165	2300	800	20	22.5	25	11.5	11.7	12.4	89	90	91	30	
Rincon de la Vieja [Conocido]	2.5R	32	1000	1100	1200	700	955	4.186	8	9	10	250	255	265	165	2300	800	20	22.5	25	11.5	11.7	12.4	89	90	91	30	

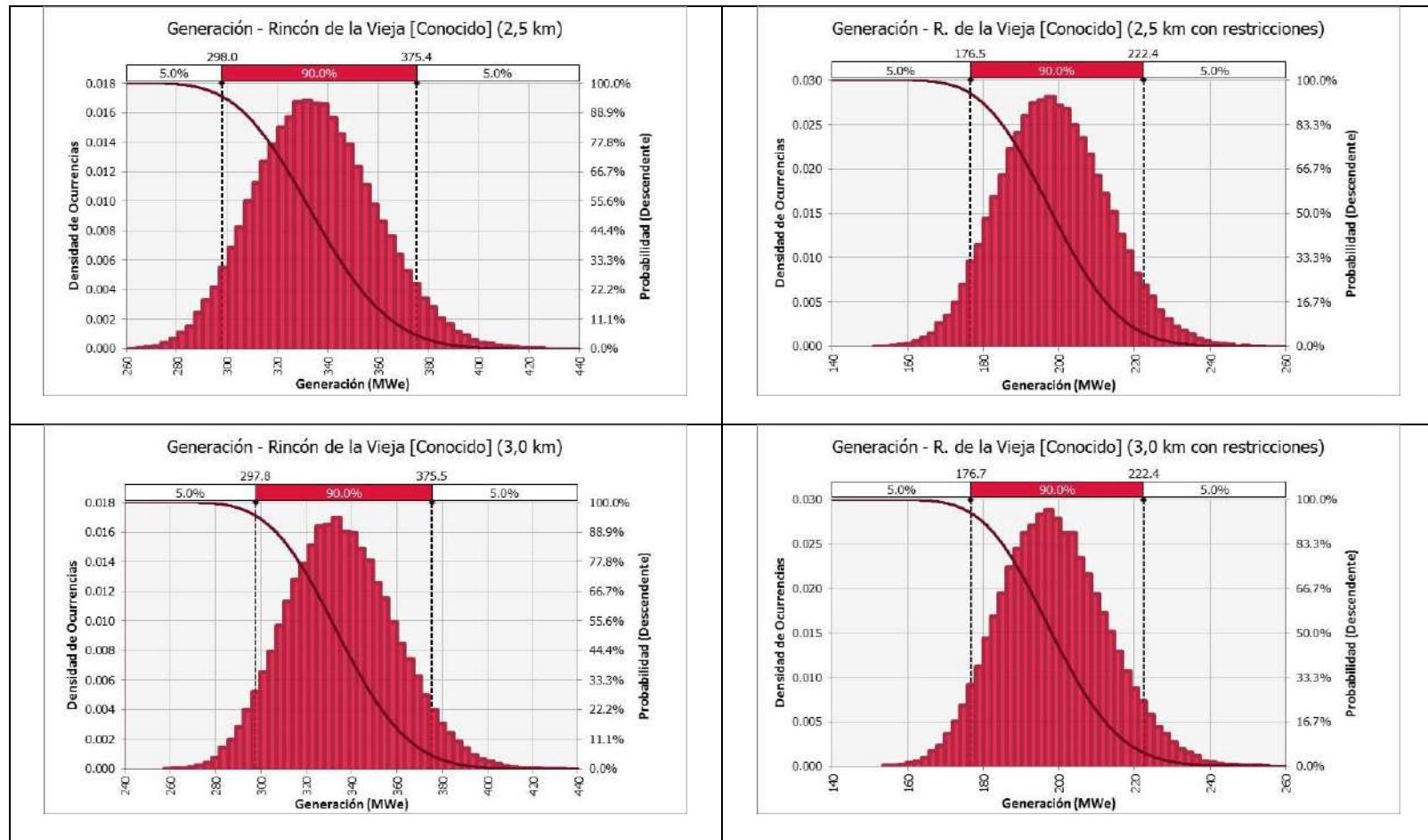
E.2. Gráficos de distribución probabilística del potencial (por área geotérmica)

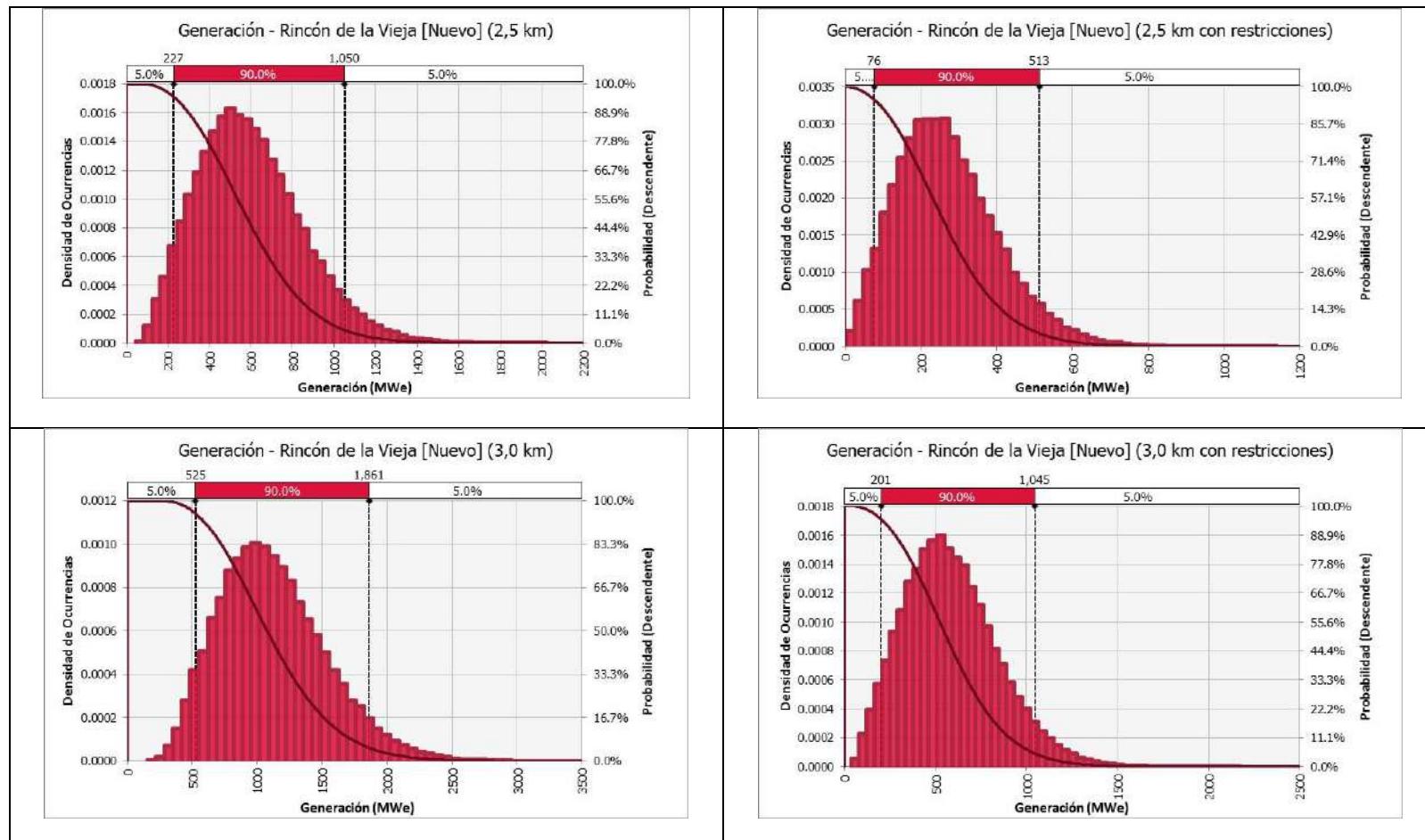
ÁREAS DE CLASE A1

Orosí-Cacao

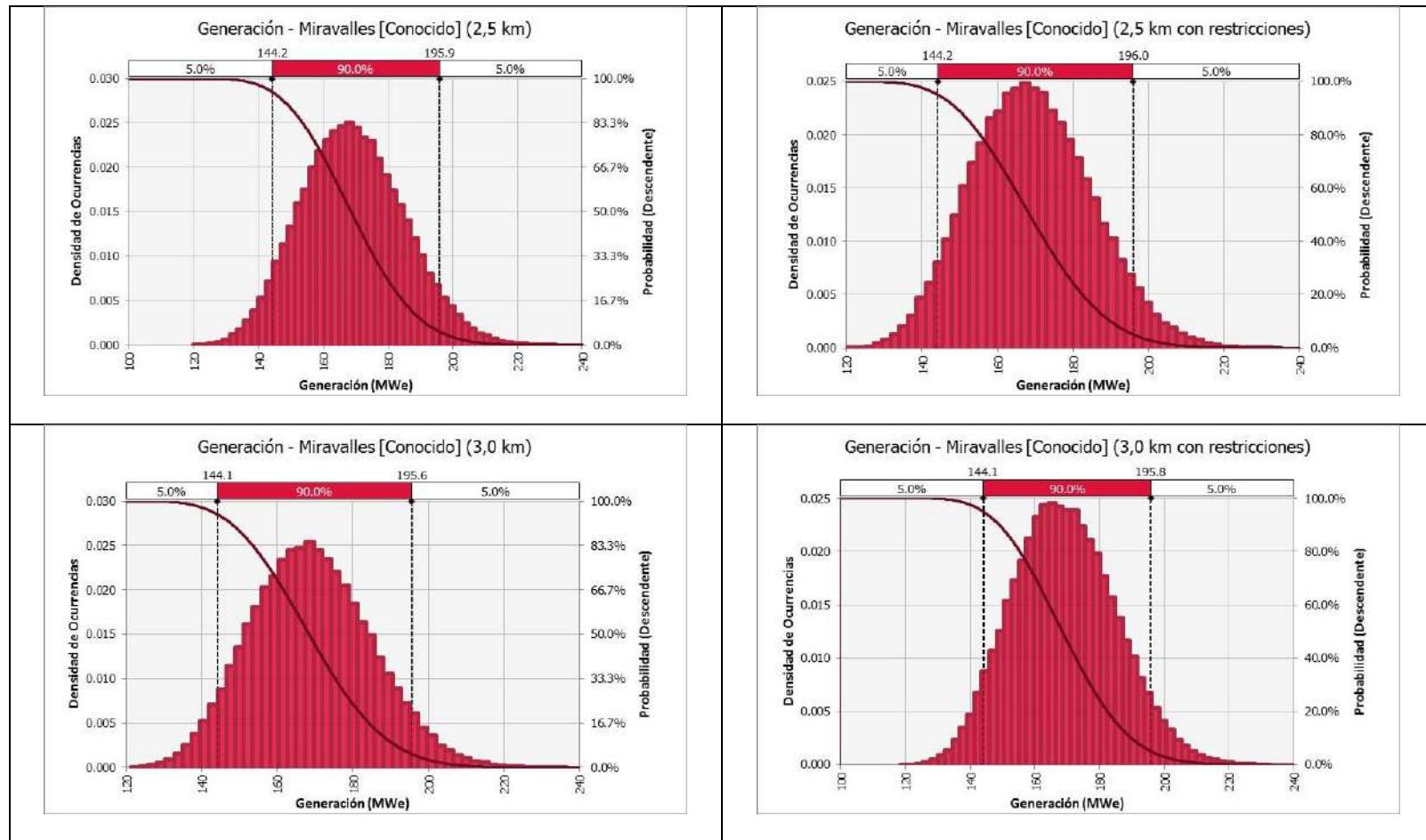


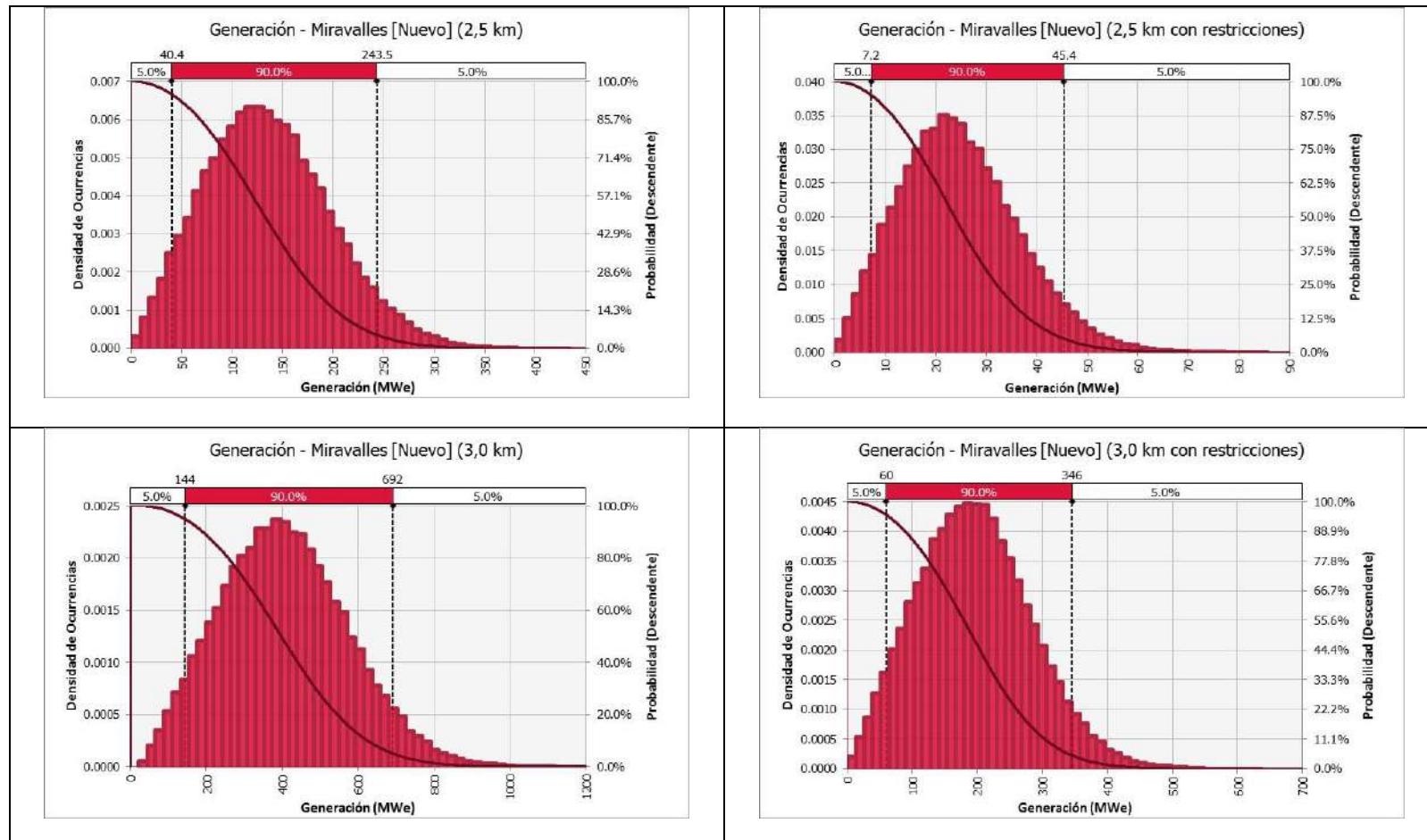
Rincón de la Vieja (sectores conocidos)

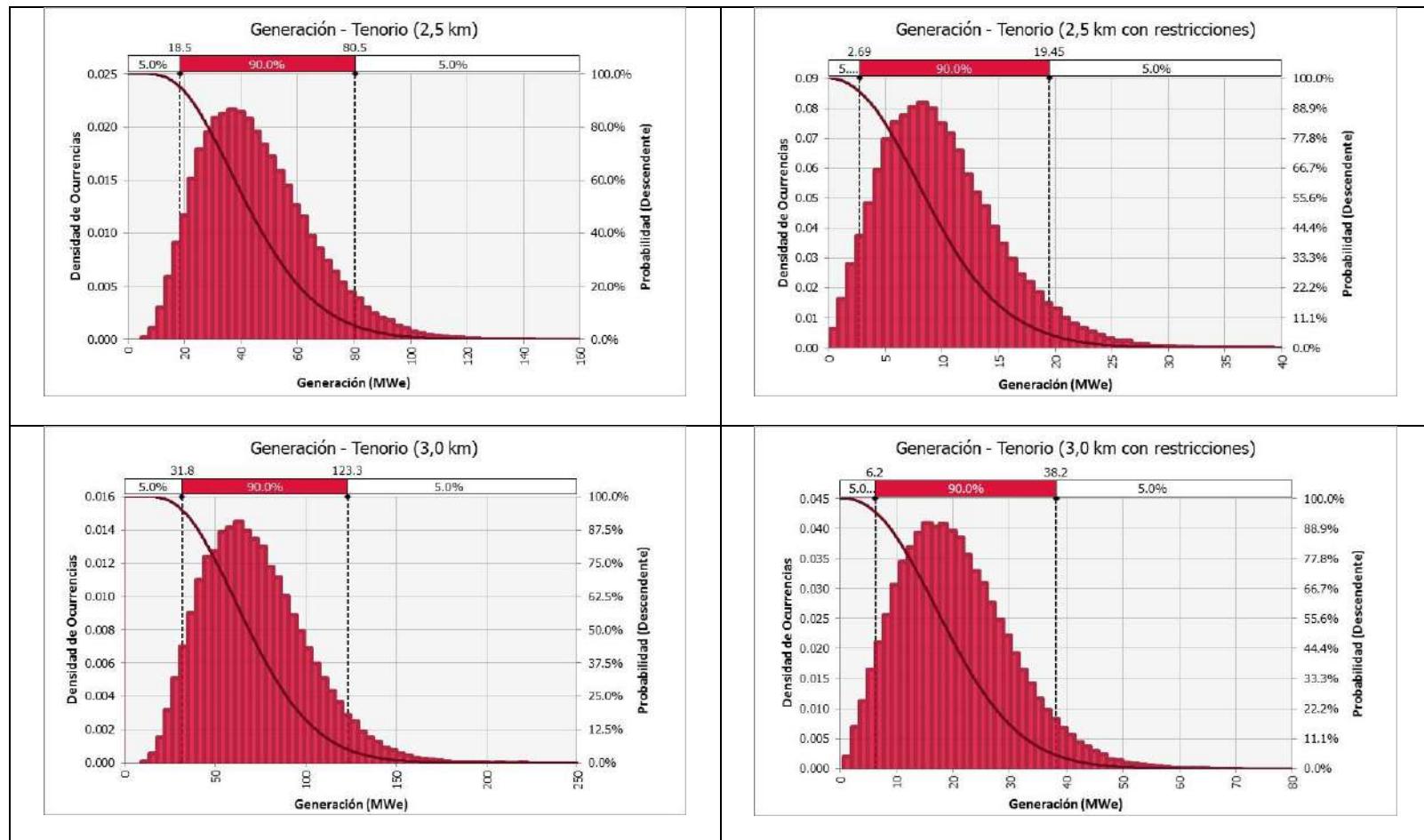


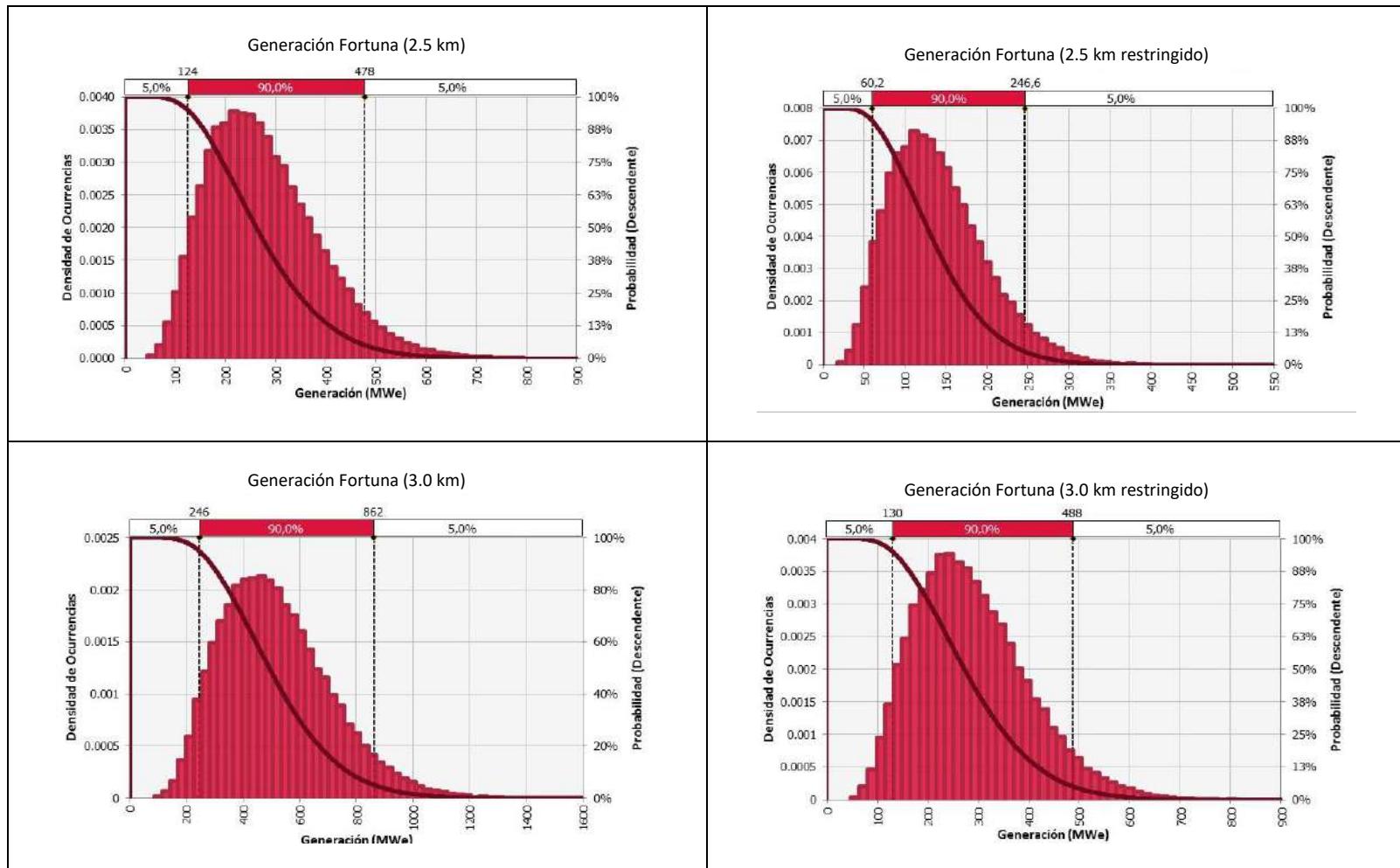
Rincón de la Vieja (sectores nuevos o desconocidos)


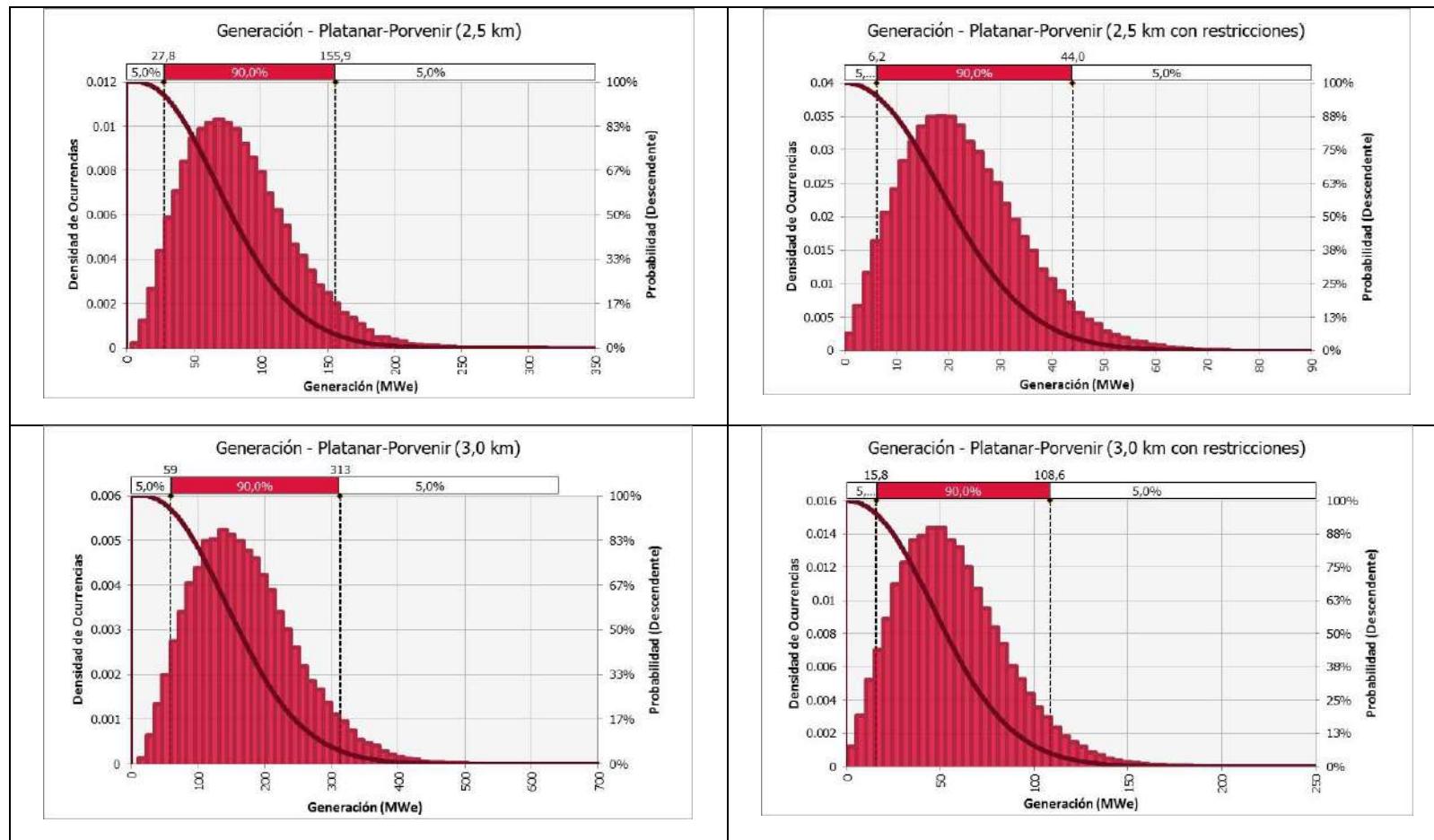
Miravalles (sectores conocidos)

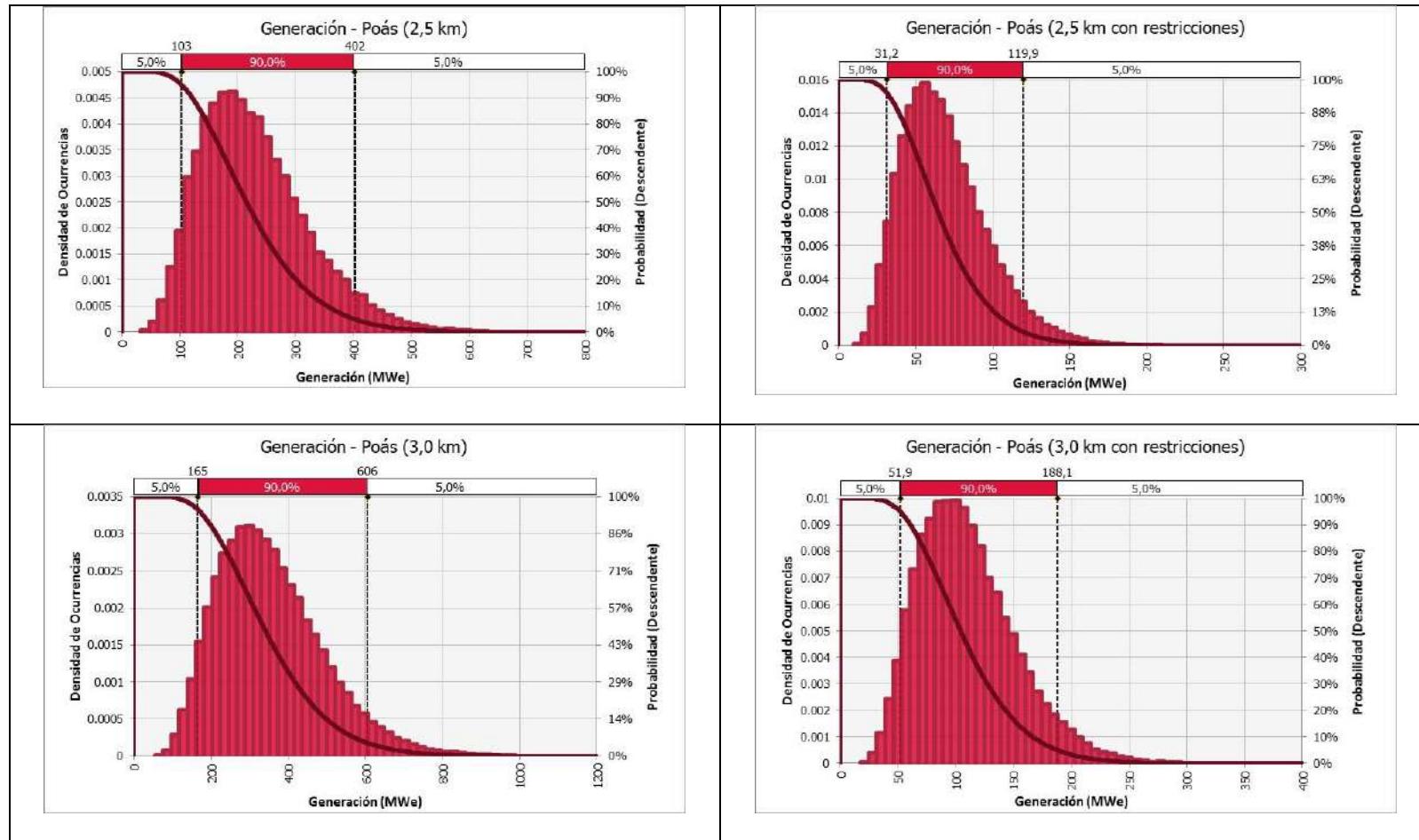


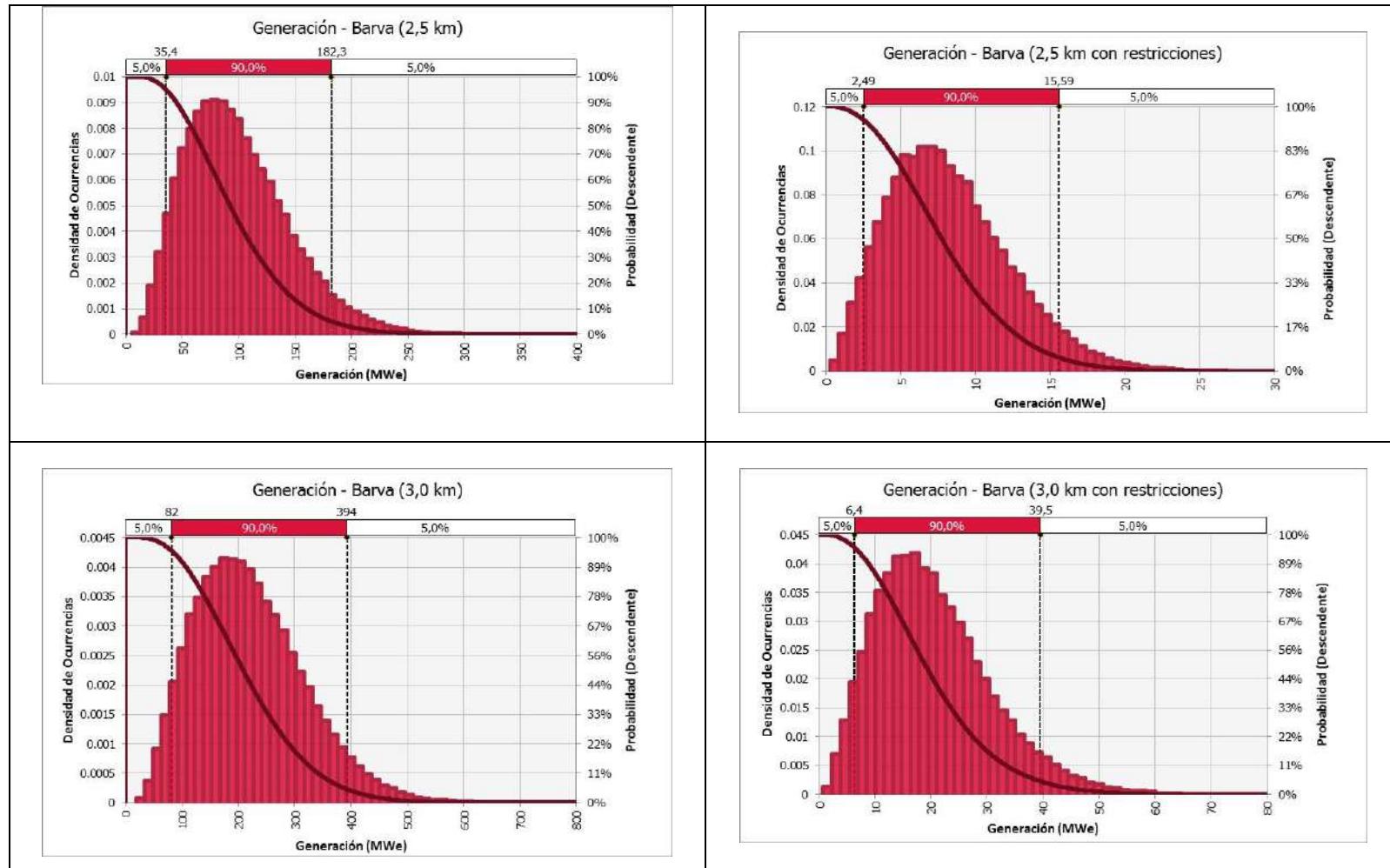
Miravalles (sectores nuevos o no conocidos)


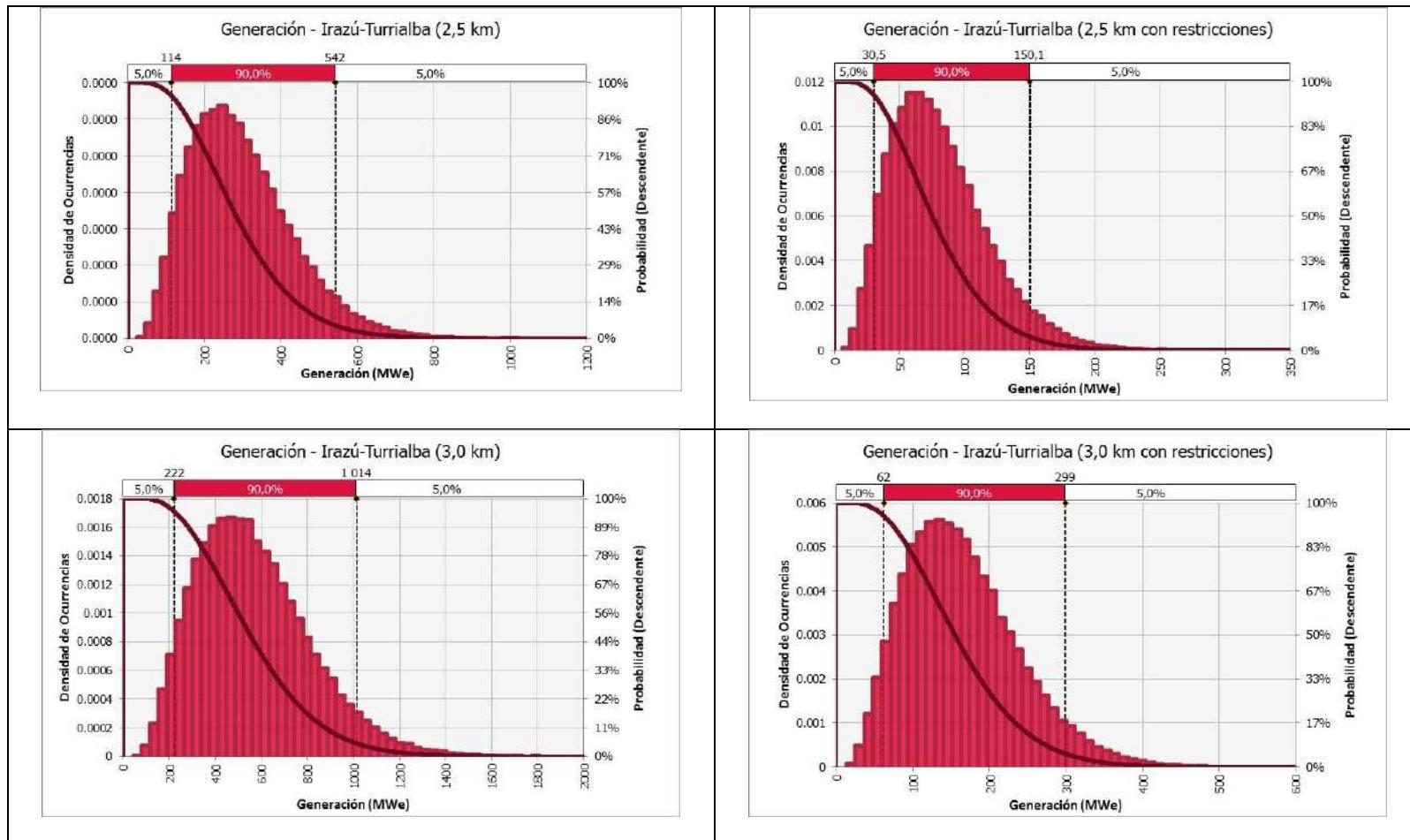
Tenorio


Fortuna


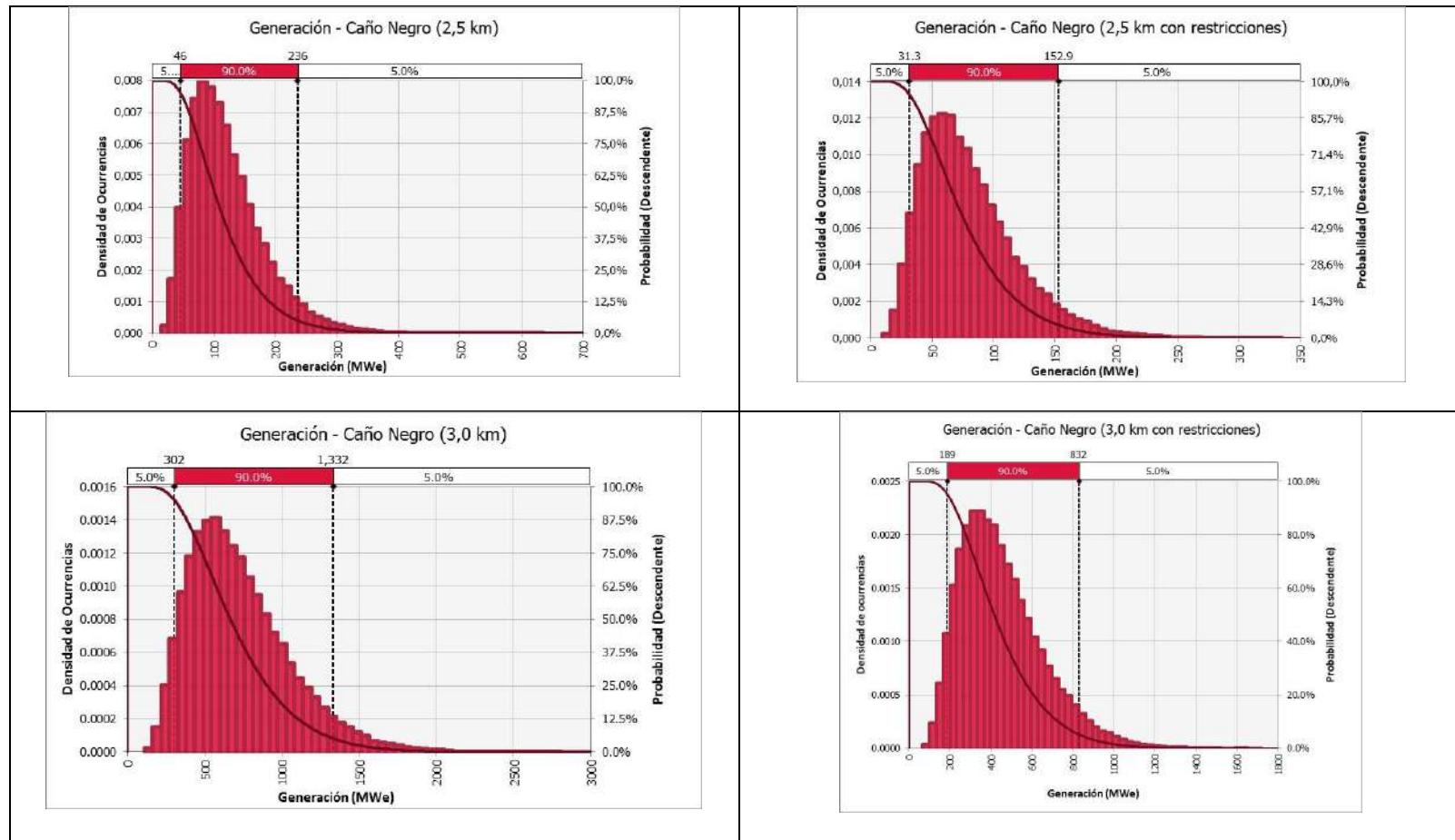
Platanar-Porvenir


Poás


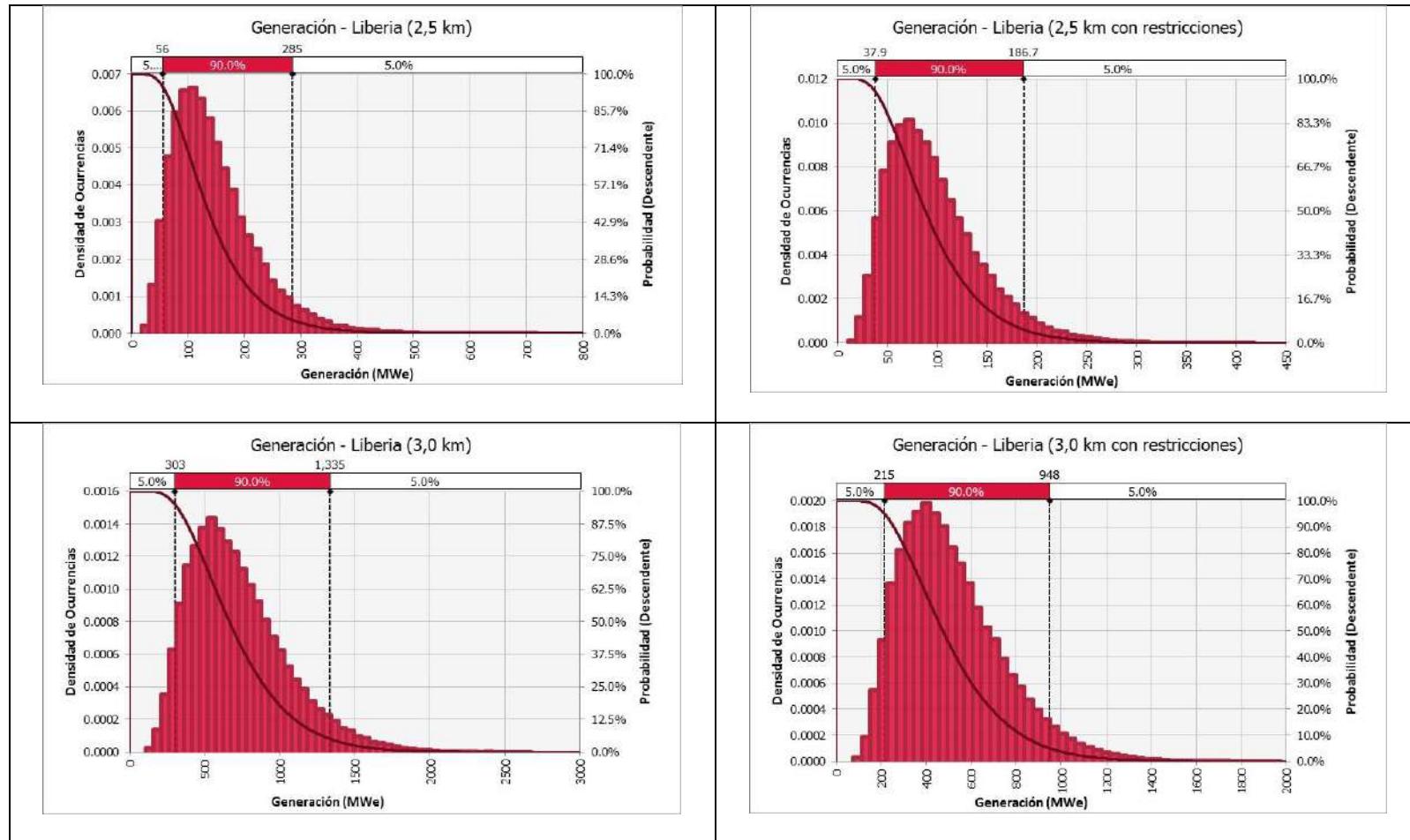
Barva


Irazú-Turrialba

ÁREAS DE CLASE A2

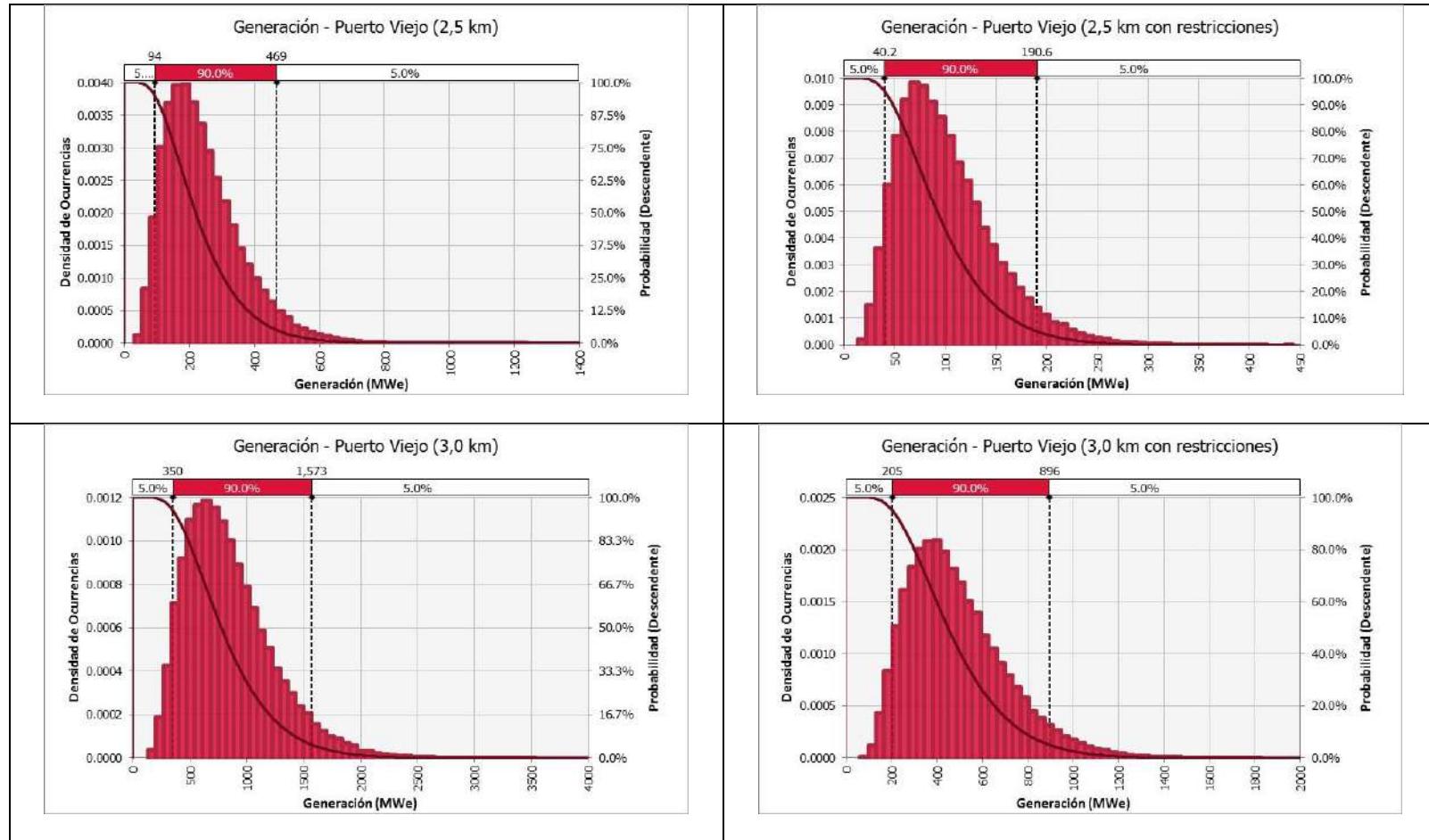
Caño Negro



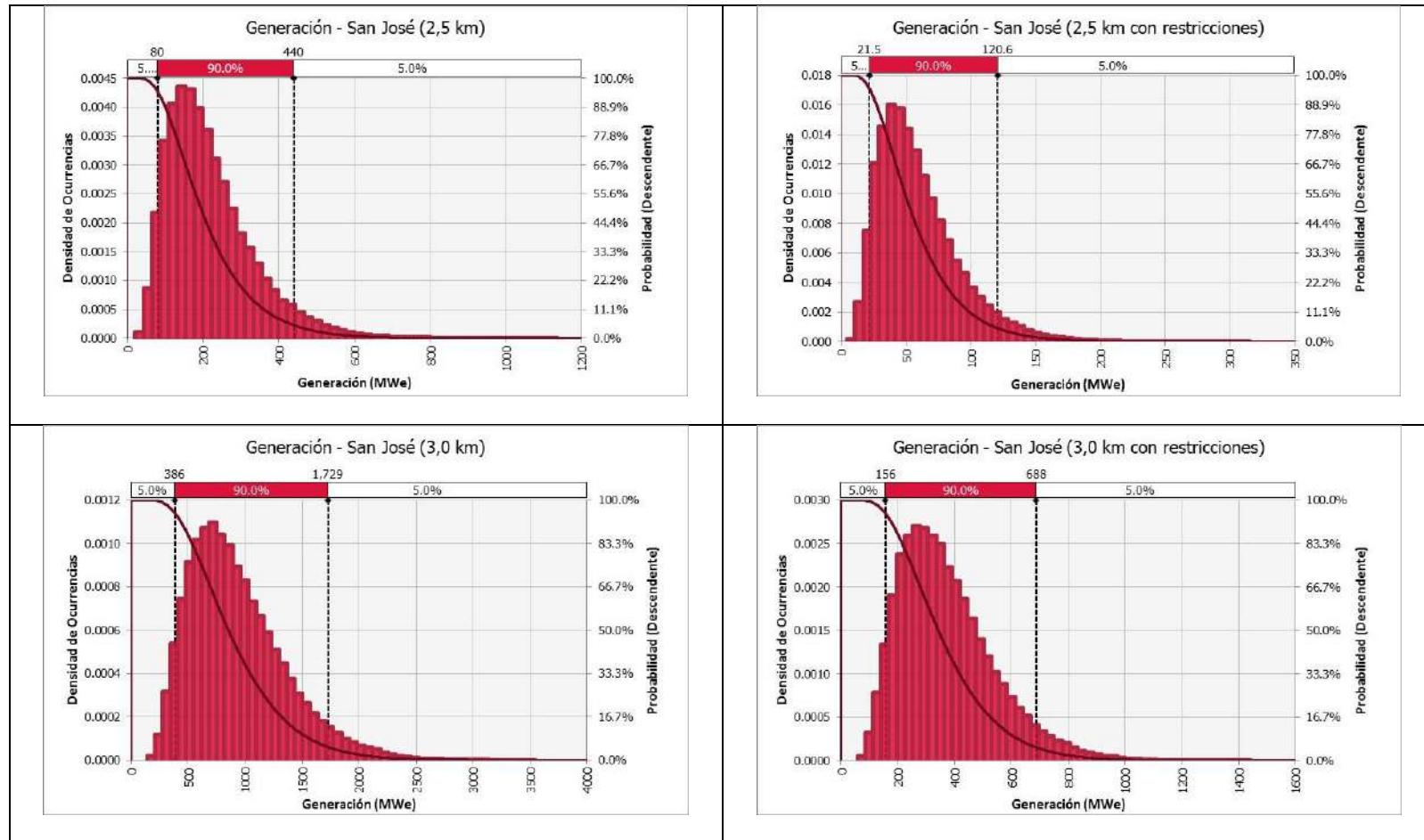
Liberia



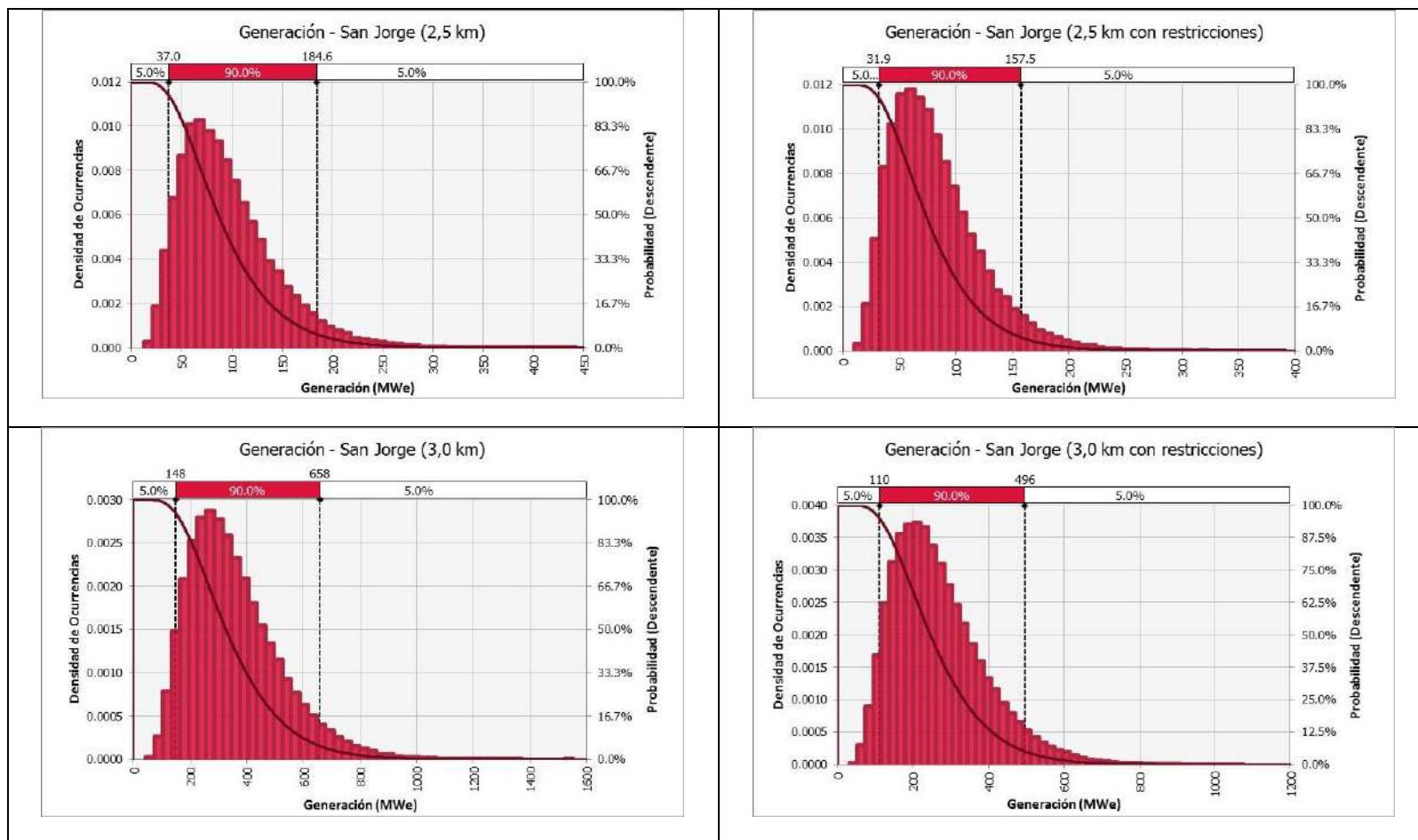
Puerto Viejo



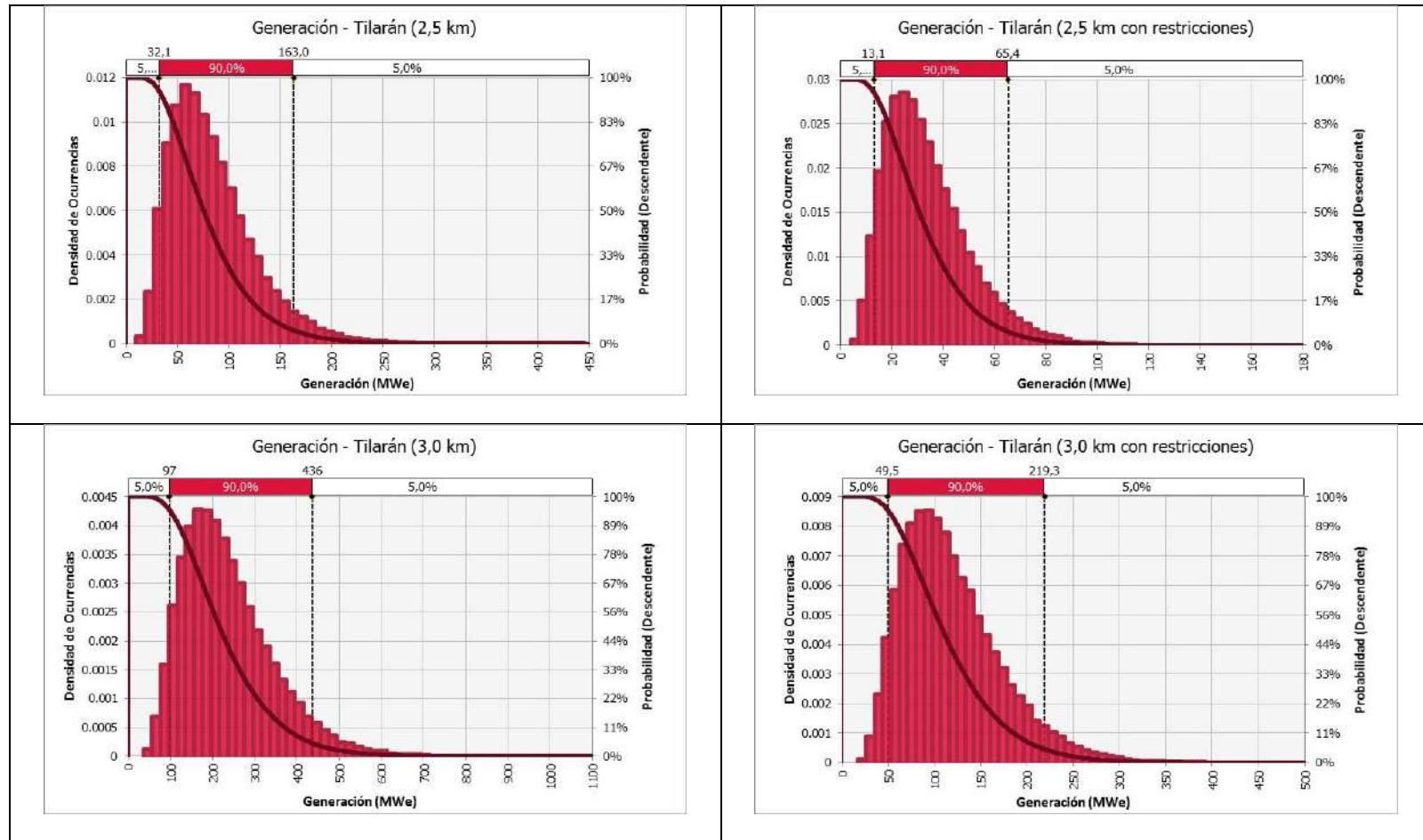
San José



San Jorge



Tilarán



Área Tigrá

