

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

### **DESAFÍOS DE LA PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS EN LA CORDILLERA OCCIDENTAL DE LOS ANDES ECUATORIANOS**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN GESTIÓN PARA LA EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO**

**Ing. SHEIDY NATHALIE CEVALLOS PIEDRA, Msc.**  
sheidy.cevallos@epn.edu.ec

**DIRECTOR: JOSÉ LUIS RIVERA, PH.D**  
jose.riverap@epn.edu.ec

**OCTUBRE, 2018**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Ing. Sheidy Nathalie Cevallos Piedra, bajo mi supervisión.

---

**José Luis Rivera, PH.D**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, Sheidy Nathalie Cevallos Piedra, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Ing. Sheidy Nathalie Cevallos Piedra

## DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por su amor  
y apoyo incondicional todos los días de mi vida.

A mi esposo Álvaro Francisco,  
por ser el amor de mi vida, mi fortaleza  
y la alegría de mis días.

Sheidy.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por darme la oportunidad de despertar cada día y cumplir todos mis sueños.  
A mis padres por el amor y apoyo incondicional que me han ayudado a cumplir este objetivo planteado.

A mis hermanos, Wendy y Gabriel, gracias por ser grandes seres humanos y profesionales brillantes, por su cariño y apoyo siempre.

A mi esposo Álvaro, mi compañero de vida, estudios y sueños, gracias por tanto amor, paciencia, alegrías compartidas y por inspirarme a ser mejor cada día.

A Jose Rivera, Ph.D. director de este trabajo de titulación por el tiempo, conocimiento y experiencias transmitidas a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A la Ing. Matilde Urquizo y el equipo de profesionales de CELEC EP, que contribuyeron con sus conocimientos y experiencia para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de Halliburton, por el apoyo y experiencia compartidos, que han contribuido al desarrollo de este trabajo.

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	2
<b>1.1 Pregunta de Investigación</b> .....	3
<b>1.2 Objetivo General</b> .....	3
<b>1.3 Objetivos Específicos</b> .....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	4
2.1 Energía Geotérmica.....	4
2.1.1 Cinturón de Fuego del Pacifico.....	4
2.2 Geología de un Sistema Geotérmico.....	7
2.3 Sistema Geotérmico.....	7
2.4 Clasificación de los Sistemas Geotérmicos.....	9
2.5 Fases de Desarrollo de un Proyecto Geotérmico.....	11
2.6 Factores a Evaluar en la Perforación de Pozos Geotérmicos.....	13
2.7 Potencial Geotérmico en el Ecuador.....	14
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	18
3.1 Desafíos Técnicos.....	18
3.2 Desafíos Físicos y Ambientales.....	19
3.3 Desafíos Sociales.....	20
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSION</b> .....	20
4.1 Desafíos Técnicos identificados durante la Fase de Perforación de Pozos Geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos.....	21
4.1.1 Geología: Formaciones Geotérmicas.....	21
4.1.2 Perforación de Reservorios de Alta Temperatura.....	24
4.1.3 Selección del Taladro de Perforación.....	25
4.1.4 Pérdida Total de Circulación.....	31
4.1.5 Cementación.....	33
4.2 Desafíos Físicos y Ambientales identificados durante la Fase de Perforación de Pozos Geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos.....	35
4.2.1 Ubicación Geográfica del Área del Proyecto.....	36
4.2.2 Condiciones Climáticas y Temperatura de la Zona.....	39
4.2.3 Uso de Agua.....	41
4.3 Desafíos Sociales identificados durante la Fase de Perforación de Pozos Geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos.....	44

4.3.1	Selección de Personal .....	44
4.3.2	Trabajo a Gran Altitud y Áreas Remotas .....	45
4.3.3	Relación con la Comunidad .....	50
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	53
5.2	RECOMENDACIONES.....	54
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>56</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>59</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa Mundial de los Limites de las Placas Tectónicas.....	5
Figura 2:	Tipos de Zonas en la Corteza Terrestre con su respectivo Flujo de Calor .....	6
Figura 3:	Esquema de un Sistema Geotérmico Ideal. ....	9
Figura 4:	Perfil de Riesgos y Costos de un Proyecto Geotérmico en las diversas fases de desarrollo.....	12
Figura 5:	Áreas de Análisis Estudio Geotérmico Ecuador 1979 .....	15
Figura 6:	Proyectos de Generación no Convencional de Ecuador .....	17
Figura 7:	Modelo Geológico – Proyecto Chachimbiro .....	23
Figura 8:	Taladro de Perforación Proyecto Chachimbiro – 1000 HP .....	31
Figura 9:	Áreas Geotérmicas del Ecuador – Ubicación Proyecto Chachimbiro .....	37
Figura 10:	Precipitación Mensual (mm) – Área Proyecto Chachimbiro.....	40
Figura 11:	Balance Hídrico Mensual – Proyecto Chachimbiro.....	43
Figura 12:	Clasificación de Proyectos Geotérmicos en América del Sur según condiciones del Contexto Social .....	51
Figura 13:	Relaciones Comunitarias Proyecto Geotérmico Chachimbiro – Ecuador. ...	52

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Tipos de Zonas en la Corteza Terrestre .....	6
Tabla 2:	Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Ecuador. ....	17
Tabla 3:	Cuerpos de Agua Identificados Proyecto Chachimbiro.....	42

## RESUMEN

En el Ecuador como parte de la búsqueda de energías alternativas se ha planteado a la energía geotérmica como una opción para aportar al cambio de la matriz energética del país. Es así que en el año 2007, se impulsó una política gubernamental que promueve el aprovechamiento de este importante recurso en el Ecuador.

Sin embargo, el desarrollo de un proyecto geotérmico implica riesgos en sus fases de exploración, explotación, producción y perforación. Esta última fase, debido a que es una de las más representativas desde el punto de vista de inversión requiere un análisis detallado para su ejecución. De ahí que, este trabajo se desarrolló a partir de una metodología descriptiva que buscó analizar y definir los desafíos de la perforación de pozos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos.

Como resultado de la investigación se identificaron desafíos técnicos como: la selección del taladro y la ejecución de operaciones de perforación con pérdida total de circulación; en el aspecto físico-ambiental se identificaron desafíos relevantes como las condiciones de temperatura y uso de agua; en la parte social, se destacaron, la selección del personal, trabajo a gran altitud y áreas remotas además, de la relación con la comunidad.

De ahí que, la perforación de pozos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos implica grandes desafíos, los mismos que pueden ser gestionados a partir de una adecuada planificación en base a los requerimientos, técnicos, ambientales y sociales del proyecto, tomando como referencia la experiencia y tecnología de perforación de pozos de petróleo y gas disponible en el país.

**Palabras Clave:** Andes Ecuatorianos, Desafíos, Energía Renovable, Geotermia, Perforación



## **ABSTRACT**

In Ecuador, as part of the alternative energies search, geothermal energy has been considered as an option to contribute to the change of the country's energy matrix. Therefore, in 2007, a government policy was promoted driving the use of this important resource in Ecuador.

However, the development of a geothermal project involves risks in its exploration, exploitation, production and drilling phases. This last phase is one of the most representatives from the investment point of view and requires a detailed analysis for its execution. Hence, this work was developed from a descriptive methodology that sought to analyze and define the challenges of drilling geothermal wells in the Western Cordillera of the Ecuadorian Andes.

As a result of the investigation, technical challenges were identified as: the rig selection and the execution of drilling operations with total loss of circulation; in the physical-environmental aspect, relevant challenges were identified, such as temperature conditions and water use; in the social part, were distinguished, the personnel selection, work at high altitude and remote areas as well as the relationship with the community.

Hence, the drilling of geothermal wells in the Western Cordillera of the Ecuadorian Andes implies great challenges, which can be adequately managed from an appropriate planning, based on the technical, environmental and social requirements of the project, taking into account the oil and gas drilling experience and technology available in the country.

**Key Words:** Challenges, Drilling, Ecuadorian Andes, Geothermal, Renewable Energy



# DESAFÍOS DE LA PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS EN LA COODILLERA OCCIDENTAL DE LOS ANDES ECUATORIANOS

## 1. INTRODUCCIÓN

La perforación de pozos de petróleo ha evolucionado desde la perforación a percusión hace alrededor de 2000 años en China, hasta la perforación rotatoria que permitió la optimización de tiempos y costos en la industria petrolera mundial. La perforación en el Ecuador se inició en 1911, en la Península de Santa Elena con el pozo Ancón 1. En 1967, en la Amazonia, se perforó el pozo Lago Agrio 1 iniciando la era petrolera en el Ecuador (Andres Lloret, 2014). El reto actual en el país que busca impulsar el cambio de la matriz energética es aplicar la experiencia y tecnología en perforación de pozos de petróleo a la perforación de pozos geotérmicos.

De ahí que, actualmente en el Ecuador como parte de la búsqueda de energías alternativas se ha planteado a la energía geotérmica como una opción que contribuirá al cambio de la matriz energética. La fase de exploración de recursos geotérmicos en Ecuador se inició en 1979, fecha a partir de la cual se han analizado varios proyectos. Entre los de mayor prospectividad se pueden mencionar: Chachimbiro, Chacana y Tufiño Chiles (Instituto Nacional de Eficiencia Energetica y Energias Renovables, 2015). De estos prospectos, el Proyecto Geotérmico Chachimbiro cuyo estudio de pre factibilidad fue desarrollado por CELEC EP (Corporación Eléctrica del Ecuador) desde el 2012 (Instituto Nacional de Eficiencia Energetica y Energias Renovables, 2015) ha sido el de mayor avance, como parte de este estudio se estableció una probabilidad de éxito para el proyecto del 65% (Andres Lloret, 2014).

Al ser un proyecto de desarrollo único, ha constituido un nuevo mercado para las empresas contratistas de perforación con experiencia en pozos geotérmicos. En el Ecuador, la ejecución de esta fase de perforación de prueba será la primera oportunidad para aplicar la tecnología y experiencia de perforación de pozos de petróleo a la perforación de pozos geotérmicos, siendo crítico identificar los desafíos más importantes, así como las características físicas y ambientales del área que pueden impactar la exitosa gestión de este proyecto en su fase de desarrollo que para el Ecuador representa un importante avance en el campo de las energías alternativas.

Este proyecto aporta en el área de perforación al contribuir a reducir la incertidumbre existente en términos técnicos, ambientales y de manejo del personal durante la gestión de proyectos de

perforación de pozos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes en el país. Esto debido a que la perforación de pozos a gran altitud y altas temperaturas de fondo representa un reto importante para los contratistas de perforación que aplicarán la tecnología desarrollada para pozos de petróleo y gas en la industria geotérmica.

De esta manera, se ayudará a definir las operaciones asociadas a tiempos no productivos durante la ejecución del proyecto en su fase de perforación exploratoria, lo que contribuirá en la optimización de costos y tiempos relacionados a planificación, logística, aspectos técnicos, manejo de recursos, etc. Aportando de esta manera a reducir la incertidumbre que se pueda presentar en este tipo de proyectos de inversión de alto riesgo al tratarse de un pozo exploratorio y un tipo de energía alternativa que se comienza a evaluar en el Ecuador (Deloitte, 2008).

## **1.1 Pregunta de Investigación**

Considerando el potencial geotérmico del Ecuador y analizada la información disponible para el estudio, se plantea la pregunta que ha motivado el desarrollo de esta investigación: ¿Cuáles son los desafíos de la perforación de pozos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos?

Establecida la pregunta de investigación se planteó el objetivo general y objetivos específicos de la investigación.

## **1.2 Objetivo General**

Determinar los desafíos técnicos, ambientales y de manejo de personal durante la perforación de pozos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos son:

- Identificar los desafíos técnicos presentados durante la fase de perforación del proyecto geotérmico.
- Evaluar las características físicas y ambientales que pueden impactar la gestión del proyecto en su fase de perforación.
- Evaluar el impacto físico - psicológico en el personal durante la ejecución de operaciones de perforación en zonas remotas.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Energía Geotérmica**

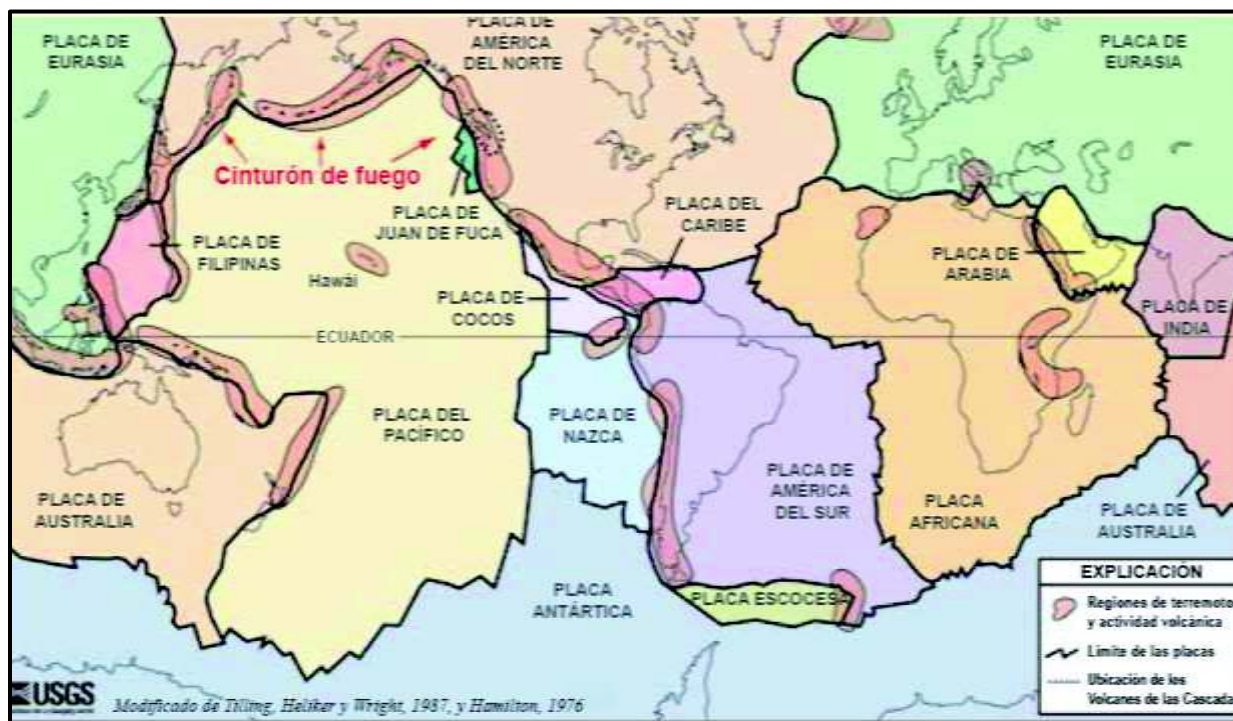
La energía geotérmica constituye un tipo de energía renovable, considerada como fuente de calor de la tierra originada de la descomposición de material radiactivo en su núcleo. El calor almacenado se encontrará en rocas, suelo, aguas subterráneas y aguas superficiales (continentales y marinas), y que se transfiere a la superficie mediante procesos de transferencia de calor como la conducción, convección y radiación (Erices, 2017).

El uso de energía geotérmica para la producción de electricidad, comenzó a inicios del siglo XX al construirse en Italia la primera instalación experimental que entró en funcionamiento en 1913. A enero del 2017, se contaba con una capacidad aproximada de 13.2 MW de energía geotérmica alrededor del mundo, su potencial explotable es mucho mayor que su utilización actual, teniendo una posibilidad de crecimiento en el balance general de energía del mundo de hasta el 0.5% para el año 2030 (Energy Sector Management Assistance Program, 2012).

#### **2.1.1 Cinturón de Fuego del Pacífico**

El Cinturón de Fuego del Pacífico está constituido por unos 452 volcanes activos; es decir; alrededor del 75% de los volcanes del mundo. Está conformado por las zonas de subducción de las placas más importantes del mundo, por lo que al estar en permanente fricción ocasiona acumulación de tensión; ver Figura 1. Al liberarse esta tensión, las zonas cercanas presentan

mayor actividad sísmica y volcánica es decir, un mayor potencial de energía geotérmica (Erices, 2017).



**Figura 1:** Mapa Mundial de los Límites de las Placas Tectónicas.

Fuente: (Energy Sector Management Assistance Program, 2012).

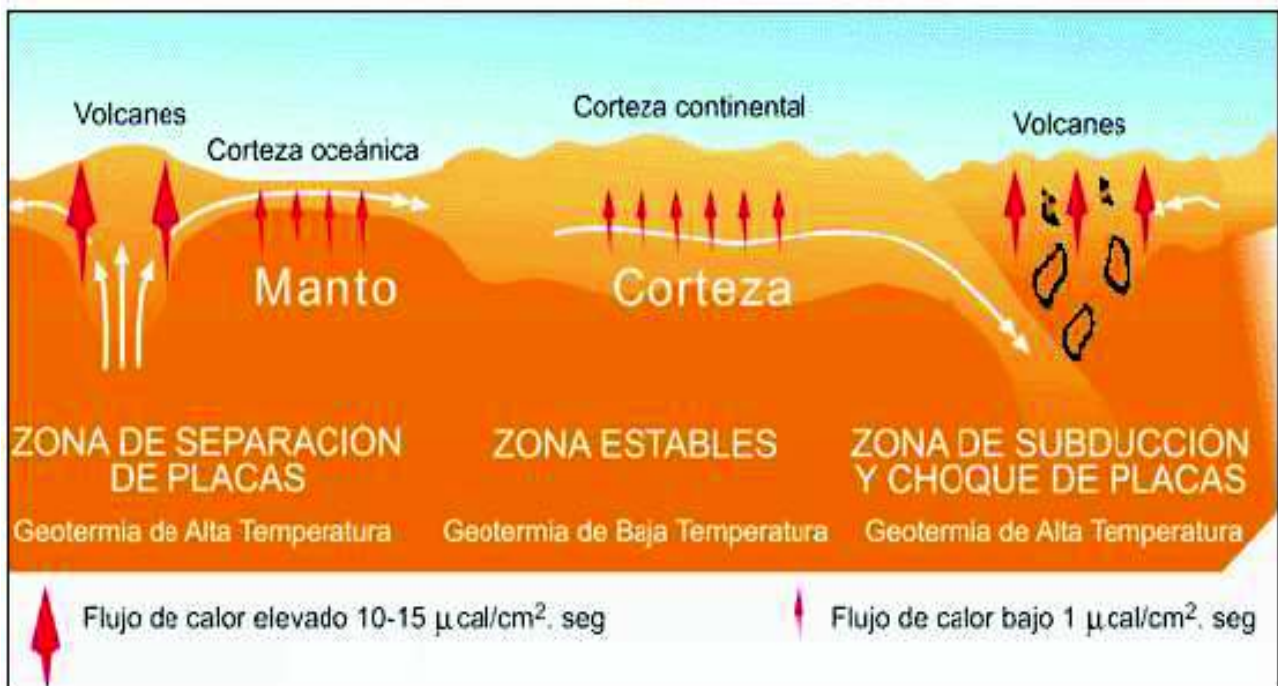
Ecuador se encuentra atravesado por la zona volcánica norte de la Cordillera de los Andes en la que se identifican más de 40 volcanes activos (Instituto Nacional de Eficiencia Energetica y Energias Renovables, 2015). Esto convierte al Ecuador en una zona de alto potencial para el desarrollo geotérmico. De ahí que, la corteza de la tierra puede tener una profundidad o espesor variable, depende del lugar de análisis, por lo que las zonas de mayor actividad volcánica tienden a ser zonas de corteza terrestre más delgada donde el flujo de calor es mayor. En la Tabla 1 se observan dos tipos de zonas que se pueden identificar en la corteza terrestre con su respectivo tipo de formación y gradiente geotérmico.

**Tabla 1:** Tipos de Zonas en la Corteza Terrestre

TIPOS DE ZONAS EN LA CORTEZA TERRESTRE			
TIPOS DE ZONAS	TIPOS DE FORMACIONES	GRADIENTE GEOTERMICO (°C&#226;m)	FLUJO DE CALOR ( $\mu\text{cal/cm}^2\text{s}$ )
ZONAS ESTABLES (Flujo Normal)	Formaciones Impermeables (No explotable)	30	1
	Formaciones Permeables (Recursos Geotermicos de Baja Temperatura)		
ZONAS INESTABLES (Flujo Elevado)	Formaciones Permeables (Roca Caliente Seca)	150-300	10-15
	Formaciones Impermeables (Recursos Geotermicos de Alta Temperatura)		

Fuente: (Erices, 2017)

Adicionalmente, en la Figura 2 se observan las zonas que presentan actividad volcánica y permiten la producción de geotermia de alta temperatura como separaciones, subducción y choque de placas. En las zonas estables, debido al flujo bajo de calor, se genera geotermia de baja temperatura.



**Figura 2:** Tipos de Zonas en la Corteza Terrestre con su respectivo Flujo de Calor

Fuente: (Erices, 2017)

## **2.2 Geología de un Sistema Geotérmico**

Los campos geotérmicos se desarrollan en una variedad de ambientes geológicos y tipos de rocas como las volcánicas, sub-volcánicas, ígneas y metamórficas. De ahí que, los reservorios geotérmicos están asociados a rocas volcánicas, volcano-sedimentarias y sedimentarias con permeabilidad primaria o secundaria, así como también pueden estar asociados a rocas plutónicas que no son parte del reservorio como granitos o granodioritas que constituyen la fuente de calor del sistema (P. Dumas, 2013).

El común denominador de estos campos es la alta permeabilidad y la naturaleza fracturada y fallada de las formaciones en las cuales se encuentra el reservorio. La alta permeabilidad es uno de los requisitos fundamentales para la existencia de un sistema geotérmico así como la temperatura y presencia de fluido.

Una característica de la mayoría de sistemas geotérmicos es que son sistemas de “baja presión”. Las altas temperaturas en este tipo de sistemas resultan en densidades de fluido en el reservorio que son menores que las del agua fría. Perforar a través de estas zonas de alta permeabilidad y baja presión se caracteriza por frecuentes pérdidas totales de circulación del fluido de perforación, siendo este uno de los desafíos de la perforación de pozos geotérmicos más comunes y de gran impacto a las operaciones (P. Dumas, 2013).

De manera adicional, en los sistemas geotérmicos volcánicos, muchas de las formaciones superficiales tienen baja densidad aparente de los materiales como cenizas, tobas, brechas; las cuales además de ser permeables son a menudo no consolidadas y tienen un bajo gradiente de fractura por lo que tienen poca resistencia en el caso de una arremetida.

## **2.3 Sistema Geotérmico**

Un sistema geotérmico hace referencia a todas las partes de un sistema hidrotérmico (base de vapor o agua) que incluye diversos elementos como la zonas de recarga, sub superficie y flujo saliente del sistema. Este tipo de sistema presenta algunos componentes, como (Ver Figura 3):

- **Fuente de Calor - Intrusión Magmática**

La fuente de calor en un sistema geotérmico se refiere a un cuerpo de lava de alrededor de unos 600°C a 900°C, a una profundidad de alrededor de 10 km. Al producirse una liberación de



energía (sismos) el magma se desplaza a través de fallas hacia la corteza terrestre, la lava puede llegar a superficie y dar origen a volcanes o formación de nueva roca. En caso de que la energía no sea suficiente para salir a la superficie el magma se queda en la corteza y transmite calor a las rocas circundantes (Erices, 2017).

- **Zona de Recarga**

En este tipo de sistemas viene de áreas de recarga como mares, ríos, lagos, que proporcionan agua meteórica fría que se filtra a través del suelo (grietas – fallas) hacia capas inferiores (Erices, 2017).

- **Yacimiento Geotérmico**

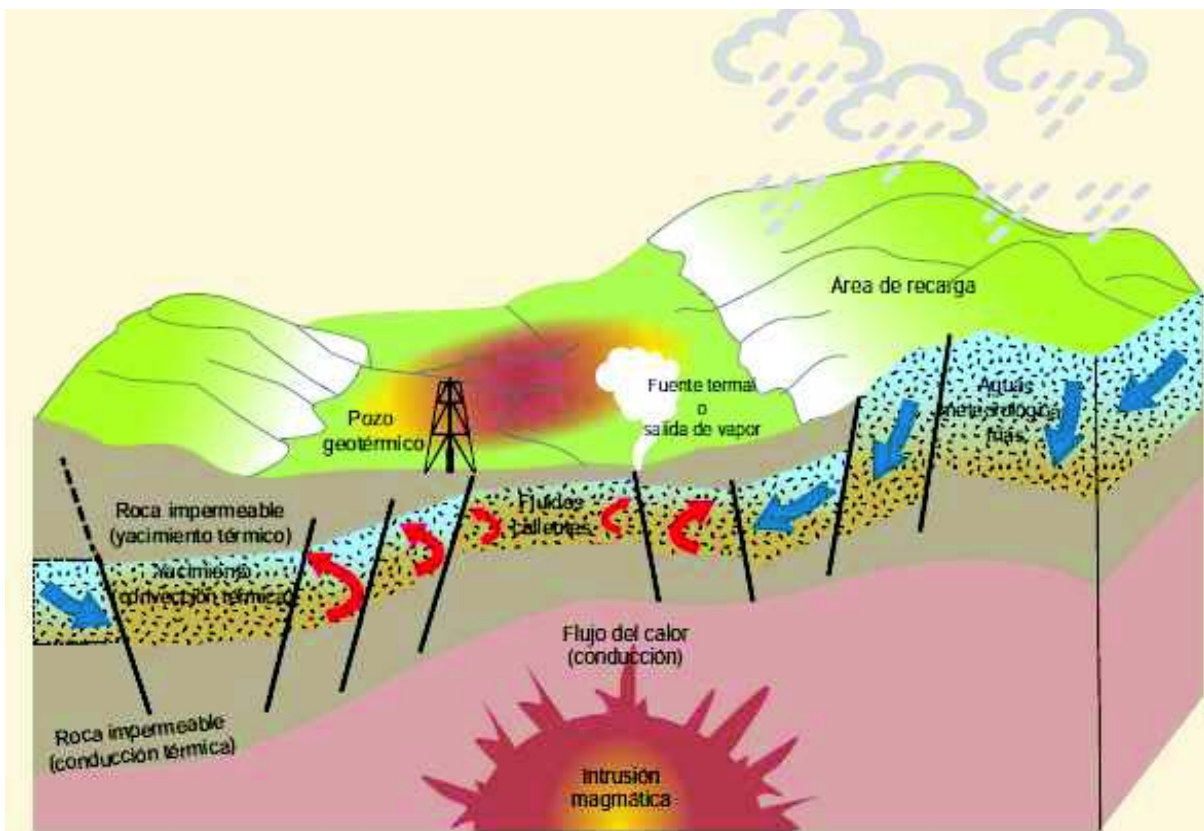
El yacimiento geotérmico tiene como propósito acumular fluido (agua) hasta que este se caliente o evapore. Constituye el volumen de rocas permeable, al cual se accede a través de la perforación. Para que un yacimiento geotérmico sea explotable se debe tener suficiente calor natural que se transformará en presión y lleve el vapor a superficie (Erices, 2017).

- **Capa Impermeable**

La capa impermeable en un reservorio geotérmico evita que los fluidos salgan del sistema, permitiendo de esta manera que en el reservorio alcancen temperaturas superiores a la normal. Este tipo de reservorios se caracteriza por estar constituido por rocas arcillosas o precipitación de sales de las fuentes termales (Energy Sector Management Assistance Program, 2012).

- **Pozos Geotérmicos**

Se denominan pozos geotérmicos a aquellos que llegan al reservorio y acceden al fluido o vapor caliente que se transfiere a través de tubería a la central eléctrica.



**Figura 3:** Esquema de un Sistema Geotérmico Ideal.

Fuente: (Energy Sector Management Assistance Program, 2012)

## 2.4 Clasificación de los Sistemas Geotérmicos

Los sistemas geotérmicos pueden clasificarse en base a su nivel térmico es decir entalpia, que cuantifica la cantidad de energía térmica que un objeto intercambia con su entorno (kJ/kg o kcal/kg); siendo estos:

### De Acuerdo a la Temperatura

- **Entalpia Alta:** Es parte de las zonas inestables de la corteza terrestre donde se tienen gradientes geotérmicos altos a profundidades entre los 1500 y 3000 m. Se encuentra alrededor de los límites de placas tectónicas, zonas calientes y volcánicas. Estos

sistemas geotérmicos presentan temperaturas superiores a 200 °C y son utilizados para la producción de electricidad (Erices, 2017).

- **Entalpia Media:** Estos tipos de sistemas se encuentran en ambientes geológicos sedimentarios o cercanos a recursos de alta temperatura, a profundidades inferiores a los 2000 m. El rango de temperatura correspondiente a estos sistemas es de 150 a 200 °C. y son utilizados en la producción de electricidad, en la climatización de sistemas urbanos y procesos industriales (Erices, 2017).
- **Entalpia Baja:** Estos sistemas existen en la mayoría de países, en los mismos se presentan con temperaturas inferiores a los 150 ° C, en zonas estables de la corteza terrestre a profundidades entre 1500 y 2500 m. Este tipo de sistemas pueden tener usos directos como la calefacción, generación de energía eléctrica, etc. (Erices, 2017).

#### **De acuerdo a la Naturaleza del Sistema Geológico del que se originan**

- **Sistemas Geotérmicos Volcánicos:** Se encuentran asociados a la actividad volcánica, localizados dentro o cerca de los complejos volcánicos, la mayor parte en límites de las placas. Su fuente de calor son las intrusiones calientes o el magma y son fracturas permeables y zonas de falla las que controlan el flujo de agua. Este tipo de yacimientos tiene temperaturas que pueden ser mayores a 800 °C, en su mayoría no han sido explotados, debido a la tecnología requerida para resistir alta temperatura y corrosión (Erices, 2017).
- **Sistemas Geopresurizados:** Son similares a los yacimientos de petróleo y gas geopresurizado en donde el fluido se encuentra atrapado en trampas estratigráficas. En estos yacimientos el agua soporta presiones entre 40 a 90% por sobre la presión hidrostática correspondiente a la profundidad donde se encuentra. Este tipo de sistemas se caracterizan por encontrarse a profundidades mayores a los 6000 m. (Energy Sector Management Assistance Program, 2012). En este tipo de yacimiento se identifican tres tipos de energía: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluidos a alta presión).

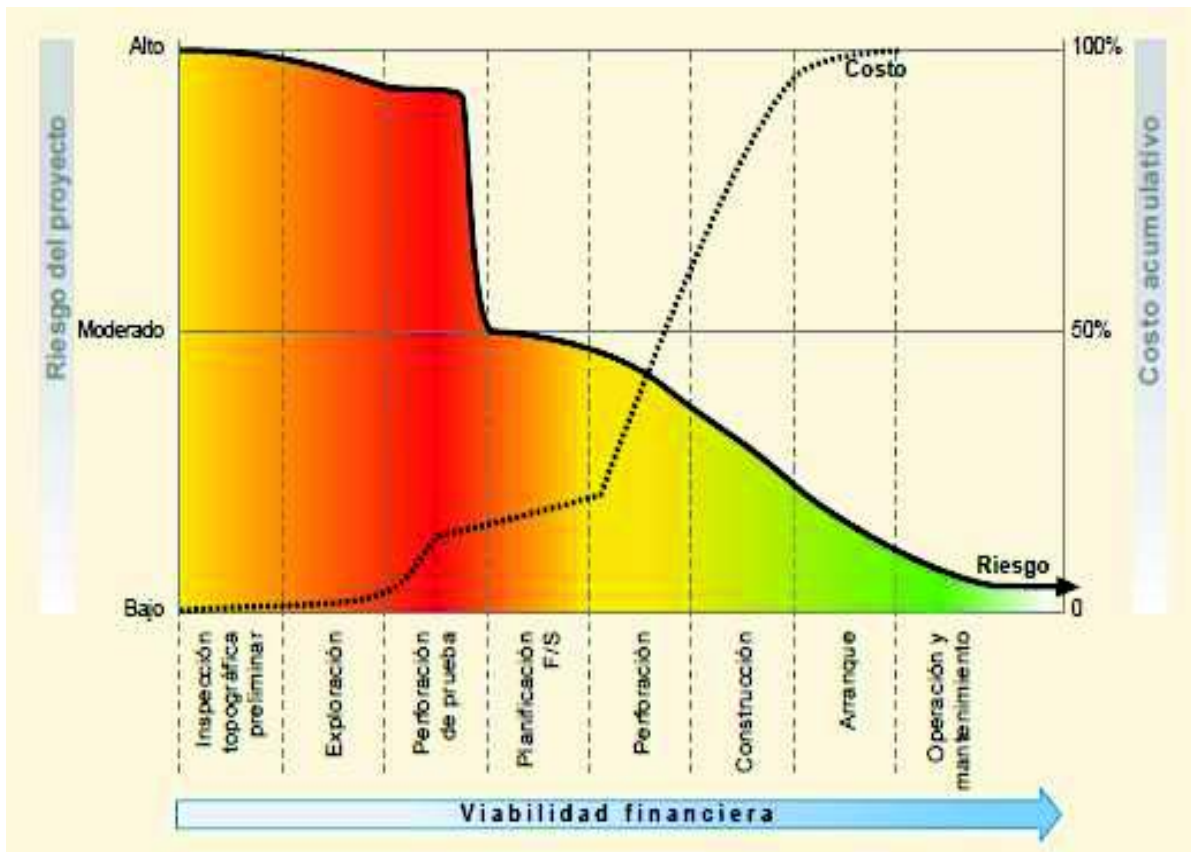
- **Sistemas Geotérmicos de Roca Seca Caliente (Hot Dry Rock- HDR) o Mejorados (Enhanced Geothermal System):** Este tipo de yacimientos se encuentran en zonas impermeables a una profundidad aproximada de entre 3 a 10 km. Constituye un volumen de roca que se ha calentado a través de un flujo de calor y al que a través de hidrofracturación se le puede mejorar la permeabilidad al inyectar altos volúmenes de agua a alta presión utilizando un pozo de inyección para fracturar las rocas (Erices, 2017).

## 2.5 Fases de Desarrollo de un Proyecto Geotérmico

Para la gestión de un proyecto geotérmico deben considerar los riesgos y costos asociados a su ejecución. Un proyecto de energía geotérmica se puede dar en varias fases de desarrollo antes del inicio de la fase de operación y mantenimiento, como:

- Inspección topográfica preliminar
- Exploración
- Perforación de prueba
- Revisión y planificación del proyecto
- Perforación de producción
- Construcción
- Arranque y puesta en servicio
- Operación y mantenimiento

El desarrollo de un proyecto geotérmico puede tomar entre 5 a 10 años, por lo que no puede considerarse como una solución rápida para problemas de suministro de energía a corto plazo. Estos proyectos se deben estructurar como parte de una estrategia de generación de electricidad a largo plazo; en los que existe un elevado nivel de riesgo financiero por el alto costo que implica el desembolso de inversión por adelantado. Los riesgos del proyecto son similares a los asociados a un proyecto de generación de energía conectado a la red eléctrica, como son: el riesgo de finalización o retraso, de precio o demanda de mercado, riesgo operativo y riesgo de normativas (Energy Sector Management Assistance Program, 2012).



**Figura 4:** Perfil de Riesgos y Costos de un Proyecto Geotérmico en las diversas fases de desarrollo.

Fuente: (Energy Sector Management Assistance Program, 2012).

Adicionalmente, se deben considerar otros riesgos propios de esta área, como: la fase de exploración, perforación de prueba, explotación y producción. En el caso de la perforación de prueba de pozos exploratorios, esta fase es considerada una de las más representativas debido a la cantidad de capital necesario para su ejecución y a la incertidumbre presente al no saber si el recurso geotérmico es suficiente para tener una recuperación de la inversión. Como se muestra en la Figura 4, la fase de perforación de prueba puede representar en este tipo de proyectos hasta el 15% del costo general del capital, en un punto en el que el riesgo de fracaso del proyecto todavía es bastante alto (Energy Sector Management Assistance Program, 2012).

En estos casos, se debe equilibrar la probabilidad de éxito en relación al costo que podría tener el fracaso del proyecto, por lo que la gestión del proyecto debe utilizar herramientas como un árbol de decisiones para evaluar los diferentes escenarios que presenta el proyecto; presentándose las siguientes opciones:

- Ejecutar la fase de perforación de producción y arriesgar el fracaso del proyecto, tomando en cuenta que esta fase requerirá de al menos un 30% de inversión en relación al costo general del proyecto.
- Ejecutar la fase de perforación de prueba utilizando un presupuesto establecido, que permita evaluar el potencial del proyecto reduciendo el riesgo con el conocimiento adquirido.
- Evaluar la información disponible para el prospecto y determinar que no es lo suficientemente atractivo para arriesgar un monto de inversión.

En el Ecuador, se ha trabajado en las fases iniciales de desarrollo de un proyecto geotérmico entre las que se pueden mencionar: la topográfica preliminar, exploración y perforación de prueba para el caso del Proyecto Geotérmico Chachimbiro, que en el mes de noviembre del 2017 terminó la perforación del primer pozo exploratorio del proyecto llegando a una profundidad de 2000 m.

## 2.6 Factores a Evaluar en la Perforación de Pozos Geotérmicos

Existen varios aspectos que se deben evaluar con la finalidad de garantizar el desarrollo óptimo de la fase de perforación de un pozo geotérmico, entre estos se pueden mencionar:

- **Diseño del Pozo:** El diseño de un pozo geotérmico es similar a los pozos de petróleo y gas; se realiza desde el reservorio hasta la superficie. La localización de la zona de producción determina la longitud del pozo y la tasa de flujo está en función del diámetro del hoyo. En el diseño también son importantes el tipo de tubería de revestimiento (*casing*) y el programa de cementación requerido para asegurar la integridad del pozo.
- **Perforación Direccional:** La necesidad de la utilización de herramientas direccionales dependerá de los objetivos geológicos establecidos para el pozo (interceptando tantas fracturas como sea posible). En este caso se puede trabajar utilizando simplemente una broca adecuada y un ensamblaje de fondo (BHA) que trabaje en función del comportamiento de las formaciones. Así también, se puede utilizar herramienta sofisticada como sistemas MWD y motores para cumplir con la trayectoria establecida bajo las condiciones de reservorio asociadas a un pozo geotérmico.

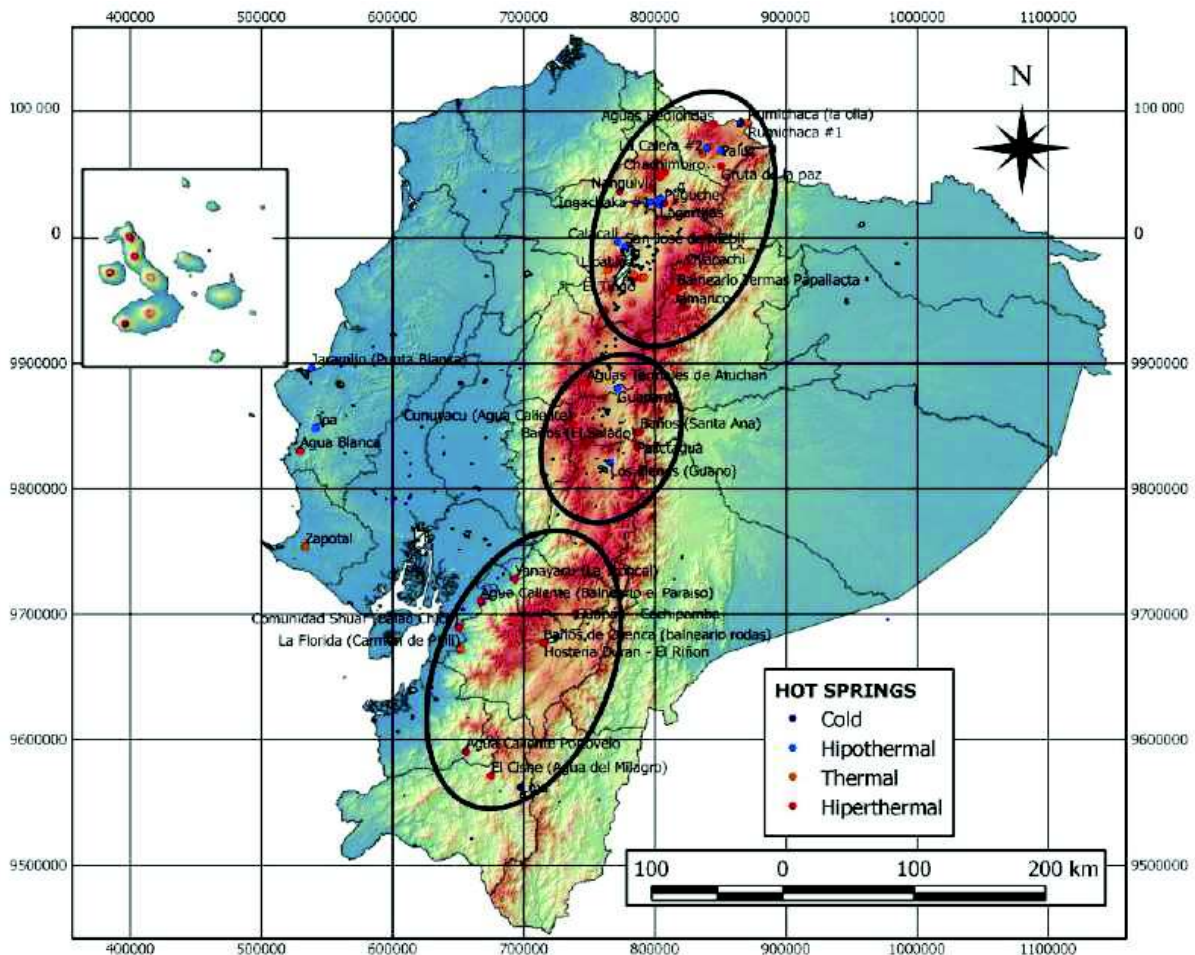
- **Tasa de Penetración (ROP):** Muchos de los costos atribuidos a la perforación dependen directamente del tiempo de operación (renta de taladro y gastos asociados a compañías de servicios). En este caso, es importante evaluar el desempeño de la broca utilizada durante la perforación en término de velocidad de perforación y vida útil. Sin embargo, no siempre es fácil determinar la mejor aplicación para optimización de desempeño de la broca al trabajar en la perforación de pozos exploratorios donde las formaciones no son conocidas. En la relación de trabajo broca/formación hay tres factores que pueden cambiarse para obtener un mejor rendimiento, entre ellos están: la velocidad de rotación, peso sobre la broca (WOB) e hidráulicas donde la experiencia interviene para obtener la mejor combinación de los factores mencionados.
- **Broca y Herramientas:** La naturaleza abrasiva de las formaciones de los reservorios geotérmicos acelera el desgaste de las herramientas de fondo. Esto puede generar viajes adicionales para reemplazar las brocas que se encuentren fuera de calibre, así como los estabilizadores, reemplazo de tubería de perforación y daño en las paredes de las herramientas como el caso de los martillos de perforación. Existen tres factores que pueden afectar la broca y la vida de las herramientas de fondo entre los que se puede mencionar a la litología, parámetros de perforación y diseño del ensamblaje de fondo. De estos factores se puede trabajar con los dos últimos para mejorar la vida útil de las herramientas.

## 2.7 Potencial Geotérmico en el Ecuador

La investigación referente al potencial geotérmico en el Ecuador se inició en el año 1979. El primer proyecto de investigación geotérmico desarrollado en el país se realizó con el aporte de la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) y el ex-INECEL (Instituto Ecuatoriano de Electrificación). El propósito principal fue identificar las áreas de recursos geotérmicos de alta entalpía para la generación de energía eléctrica. Esta investigación se centró en su primera etapa de investigación geológica, en el análisis de zonas con reciente actividad volcánica (Andrés Lloret, 2014).

En su segunda etapa se realizó un análisis hidrogeológico, basado en la reconstrucción de las condiciones hidrogeológicas del país. Se realizó mediciones de los parámetros meteorológicos así como el análisis de muestras de agua (caliente/fría) donde se presentaron manifestaciones térmicas. Este estudio identificó la necesidad de realizar una investigación más detallada (pre

factibilidad) para determinar características de permeabilidad en los prospectos que se habían identificado hasta ese momento más prometedores (Chachimbiro, Chacana y Tufiño) (Andres Lloret, 2014). En la Figura 5 se observan las áreas identificadas al finalizar el estudio de 1979.



**Figura 5:** Áreas de Análisis Estudio Geotérmico Ecuador 1979

Fuente: (Andres Lloret, 2014).

Por las condiciones políticas y económicas del país en la década de los 80's los proyectos de desarrollo energético fueron suspendidos. La iniciativa de desarrollo de recursos geotérmicos se reactivó en 1998 y en un estudio realizado por la CEPAL (Comisión Económica para Latinoamérica y el Caribe) para Latinoamérica se posicionó al Ecuador como primer candidato para el desarrollo de este tipo de proyectos debido a su alto potencial de recursos geotérmicos;



el gobierno ecuatoriano solicitó asistencia técnica internacional de la CEPAL para el desarrollo de una estrategia para la explotación de recursos geotérmicos en el país.

En el 2002, de nuevo se interrumpe el desarrollo de este tipo de proyectos debido a la situación económica del país. Sin embargo, en el 2007 se impulsa en el Ecuador una política para cambio de la matriz energética promoviendo la energía geotérmica; su uso estaba limitado solo a balnearios y piscinas termales con una capacidad instalada de 5.16 MWt anuales (Andres Lloret, 2014). El potencial geotérmico estimado del país es de entre 1700 a 8000 MWe, por lo que con la finalidad de aprovecharlo, el Estado ecuatoriano trabaja en el estudio de varios prospectos geotérmicos de interés prioritario, como:

- **Geotérmico Chachimbiro.**

**Zona de Ubicación:** Provincia de Imbabura, Cantón San Miguel de Urcuqui.

**Estado:** Estudios de prefactibilidad avanzada.

- **Geotérmico Chacana-Jamanco.**

**Zona de Ubicación:** Provincia de Napo, Cantón Quijos.

**Estado:** Estudios de prefactibilidad inicial.

- **Geotérmico Tufiño.**

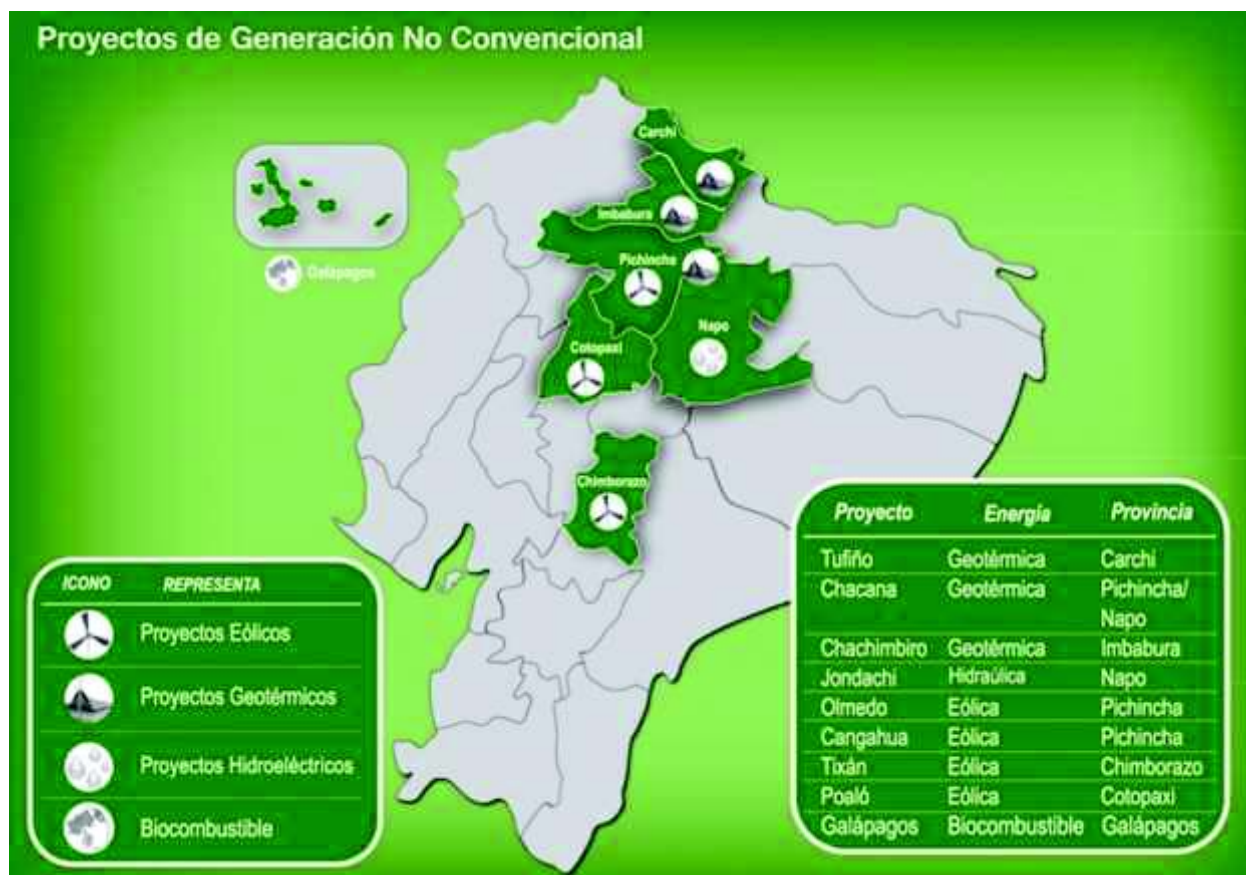
**Zona de Ubicación:** Provincia de Carchi, Cantón Tulcán - Ecuador y Departamento de Nariño, Municipio de Cumbal - Colombia

**Estado:** Estudios de prefactibilidad inicial, realizados en conjunto con Colombia.

- **Geotérmico Baños de Cuenca.**

**Zona de Ubicación:** Provincia de Azuay, Cantón Cuenca.

**Estado:** Estudios de prefactibilidad inicial en curso.



**Figura 6:** Proyectos de Generación no Convencional de Ecuador

Fuente: (CELEC EP Termopichincha , 2016)

Los prospectos Tufiño, Chachimbiro y Chacana (Figura 6) cuentan con estudios de pre factibilidad, con resultados favorables que determinan la presencia de recursos aptos para la generación geotermo-eléctrica. En la Tabla 2 se describen las áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Ecuador.

**Tabla 2:** Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Ecuador.

Provincia Geológica	Region Administrativa	Area Geotérmica	Temperatura Estimada/ medida (°C)	Potencial Reportado (MWe)
Cordillera Occidental	Nariño/Carchi	Tufiño-Chiles	230	138
	Imbabura	Chachimbiro	225-260	81
Cordillera Oriental	Napo	Chacana	>180	52

Fuente: (Bona & Coviello, 2016)

Por la probabilidad de éxito, el proyecto del área geotérmica de Chachimbiro pudo continuar con su desarrollo al obtener financiación con recursos no reembolsables de cooperación internacional de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), que proporcionó recursos para la financiación de la fase de perforación de prueba del primer pozo exploratorio del país a 2000 m para la evaluación del reservorio geotérmico (Coviello, 2000), marcando un hito en la búsqueda de generación de electricidad con fuentes renovables en el país.

### **3. METODOLOGÍA**

Este trabajo se desarrolló a partir de una metodología descriptiva que busca definir y analizar los desafíos de la perforación de pozos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos. Su aplicación permitió analizar la información disponible de las operaciones de perforación de pozos geotérmicos en América del Sur y de la perforación de un pozo exploratorio realizado en el Ecuador en la Provincia de Imbabura, como parte de la etapa de estudios de Pre factibilidad Avanzada del Proyecto Chachimbiro.

La metodología permitió un adecuado manejo e interpretación de los datos disponibles contribuyendo a la evaluación correcta de los desafíos técnicos, desafíos físicos y ambientales y desafíos sociales.

#### **3.1 Desafíos Técnicos**

La perforación de pozos geotérmicos puede presentar desafíos importantes durante la ejecución de sus operaciones, por lo que a partir del uso de la metodología descriptiva se han identificado varios desafíos técnicos relevantes para análisis, como:

1. Geología: formaciones geotérmicas.
2. Reservorios de alta temperatura.
3. Selección de taladro de perforación.
4. Pérdida total de circulación.
5. Cementación

Estos desafíos se seleccionaron ya que constituyen elementos relevantes que diferencian la perforación de pozos geotérmicos de la perforación de pozos de petróleo y gas. La perforación

de pozos geotérmicos desde el punto de vista técnico se diferencia de la perforación de pozos de petróleo y gas por factores como: la temperatura, tipos de formaciones a perforar, presiones de reservorio, métodos de completación etc. Cada uno de estos factores influirán durante la ejecución de las operaciones de perforación dando origen a los desafíos mencionados, constituyéndose como elementos técnicos que deben ser analizados como parte de la fase de planificación del proyecto, con la finalidad de contribuir a su éxito durante la ejecución del mismo (Capuano, 2014).

### **3.2 Desafíos Físicos y Ambientales**

La mayoría de los proyectos geotérmicos en América del Sur, se caracterizan por su asociación con la actividad volcánica de alta cordillera localizada en zonas remotas generalmente de gran valor ecológico e hidrológico. Algunos desafíos físicos y ambientales que se han considerado para el análisis realizado fueron:

1. Ubicación geográfica del área del proyecto.
2. Condiciones climáticas y temperatura de la zona.
3. Uso de agua.

Los desafíos físicos y ambientales seleccionados constituyen elementos críticos que pueden afectar las condiciones generales de ejecución de las operaciones de perforación. Los elementos físicos del área como su ubicación geográfica, la elevación del terreno del área de interés geotérmico, la accesibilidad y las condiciones climáticas de la zona tienen una influencia directa en el aspecto logístico del proyecto, que a su vez impactan la factibilidad de desarrollo del recurso geotérmico (Bona & Coviello, 2016).

En lo referente a los desafíos identificados desde el punto de vista ambiental, la disponibilidad de agua y la conservación ambiental, puede implicar la intervención de una zona protegida con restricciones para el desarrollo geotérmico. De ahí que, estos elementos deben ser adecuadamente evaluados para determinar las posibilidades de desarrollo del proyecto, debido a que la mayoría de proyectos geotérmicos en América del Sur se localizan en zonas elevadas de valor ecológico, hidrológico y cercanas a áreas de conservación ambiental que pueden generar limitaciones ambientales relevantes (Bona & Coviello, 2016).

### **3.3 Desafíos Sociales**

El análisis de los diferentes desafíos en el área social que pueden influir en la ejecución de un proyecto geotérmico en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, empleando la metodología descriptiva, ha permitido identificar desafíos importantes dentro del componente social del proyecto, como:

1. Selección del personal
2. Trabajo a gran altitud y áreas remotas
3. Relación con la comunidad

Con la finalidad de evaluar la viabilidad de un proyecto geotérmico a largo plazo es importante analizar su componente social, por lo que los desafíos seleccionados representan un referente a evaluar que permitirá conocer las condiciones de trabajo en el área de interés y la aceptación del proyecto por parte de las comunidades cercanas.

Es importante destacar que para el caso del análisis de las variables sociales se ha considerado la aplicación de un cuestionario aplicado a una muestra del personal que participó en la fase de perforación del primer pozo exploratorio del Proyecto Chachimbiro, con la finalidad de determinar la percepción del personal de su entorno laboral durante su participación en el proyecto.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSION**

El análisis se realizó tomando como base la referencia de proyectos geotérmicos ejecutados en América del Sur y la experiencia adquirida durante la perforación de prueba realizada en el Proyecto Chachimbiro. A continuación se detallan los desafíos identificados en cada una de las áreas anteriormente mencionadas.

## **4.1 Desafíos Técnicos identificados durante la Fase de Perforación de Pozos Geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos**

Durante la fase de preparación de un proyecto de perforación, la planificación y diseño del pozo juegan un papel importante. Esta premisa se aplica tanto para la perforación de pozos de petróleo y gas como para la perforación de pozos geotérmicos. Sin embargo, condiciones severas relacionadas a la altitud, clima y locación remota pueden afectar seriamente al personal y equipo que constituyen la base de las operaciones de perforación. Los desafíos técnicos a considerar en el análisis se detallan a continuación.

### **4.1.1 Geología: Formaciones Geotérmicas**

En los sistemas geotérmicos se identifican varios tipos de rocas, como: el granito, granodiorita, cuarcita, basalto, riolita y toba volcánica. Estos tipos de formaciones, en comparación a las formaciones sedimentarias para el almacenamiento de petróleo y gas, se caracterizan por ser calientes (intervalos de producción desde 160 °C a valores superiores a los 300 °C) y en su mayoría duras (240 MPa de esfuerzo compresivo), abrasivas (contenido de cuarzo superior al 50%), altamente fracturadas (fracturas de centímetros) y de baja presión. Otra característica importante que se deben considerar en este tipo de formaciones que a menudo contienen fluidos altamente corrosivos y en algunos otros casos con un alto contenido de sólidos (Sandia National Laboratories, 2010).

Con estos antecedentes se puede inferir que la perforación de este tipo de formaciones puede considerarse un desafío, donde la tasa de penetración (ROP) y la vida de la broca son relativamente bajas; la corrosión es un serio problema que debe ser considerado en la planificación; las pérdidas parciales y totales de circulación son frecuentes y severas, siendo todos estos problemas agravados por las altas temperaturas.

Comúnmente los sistemas geotérmicos casi siempre contienen dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ). Estos gases contribuyen con el problema de corrosión durante las operaciones, el  $H_2S$  particularmente limita los materiales que pueden ser utilizados por el equipo de perforación y la tubería de revestimiento (*casing*) con aceros de menor resistencia debido a que los de alta resistencia presentaran falla por agrietamiento a causa del  $H_2S$ . De manera adicional, el  $H_2S$  representa un riesgo de seguridad importante para el personal durante el

desarrollo de las operaciones de perforación. Las limitaciones de uso de material, así como los riesgos de seguridad asociados, generalmente incrementan los costos de perforación de los pozos geotérmicos (Sandia National Laboratories, 2010).

Todos los recursos hidrotermales comerciales corresponden a sistemas de doble porosidad que tienen porosidad y permeabilidad de matriz y de fractura. La alta productividad de los sistemas geotérmicos está relacionada directamente con la alta permeabilidad de la fractura existente en el reservorio (Sandia National Laboratories, 2010). El sistema de fractura de alta productividad es requerido para hacer que los proyectos geotérmicos sean económicamente viables. Sin embargo, este tipo de sistema es la base de los problemas de pérdida de circulación encontrados al perforar pozos geotérmicos.

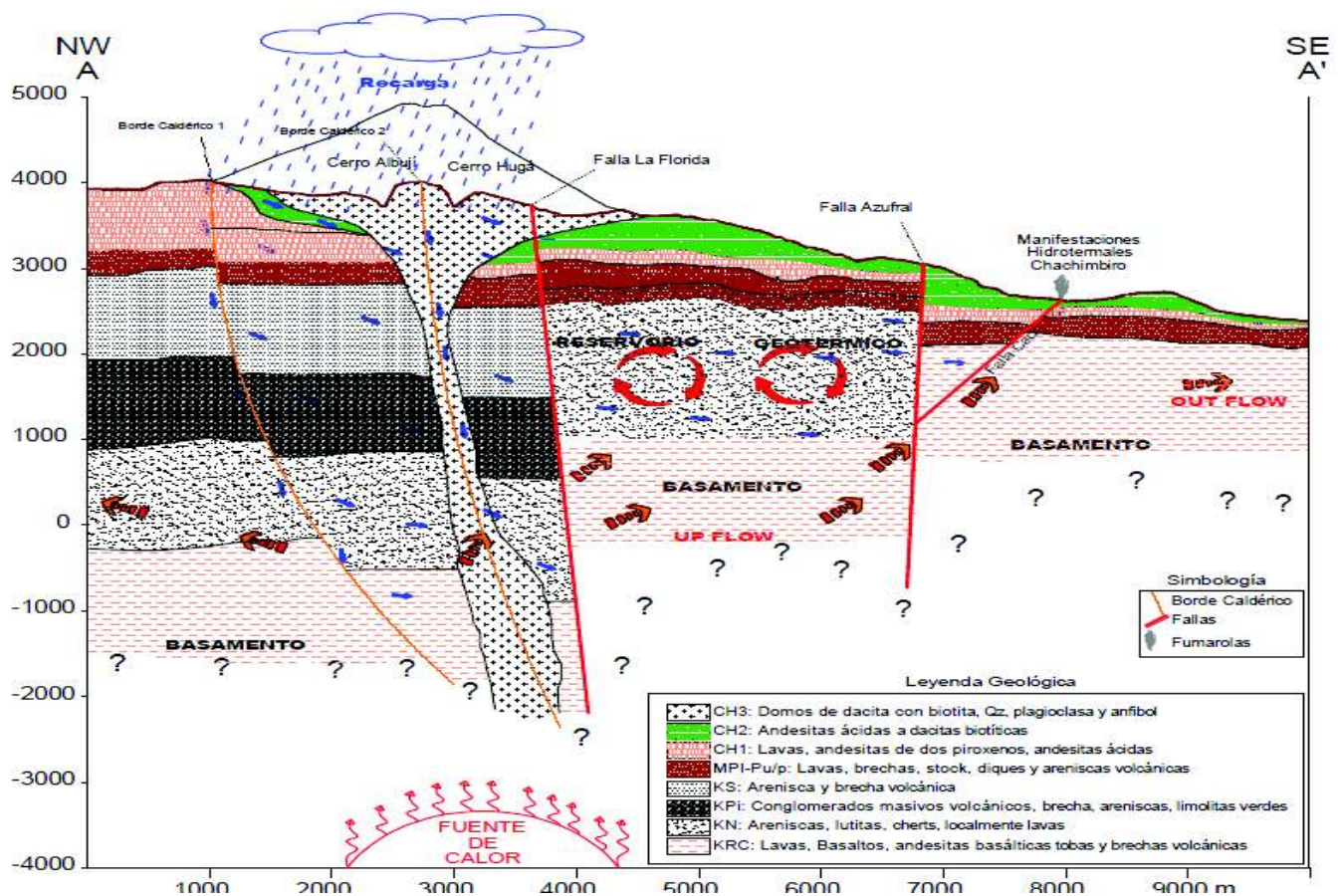
Se debe destacar que, en el caso de la pérdida de circulación el tiempo y materiales utilizados para su remediación representan un porcentaje importante del presupuesto de perforación. En el caso de las formaciones de baja presión, su presencia está asociada directamente a problemas de pega diferencial por lo que también constituye un impacto importante para los costos de perforación. Varios pozos geotérmicos han sido abandonados ante la imposibilidad de atravesar la zona de pérdida; en otros casos se ha tenido que trabajar con cemento para aislar estas zonas evitando afectar el reservorio y tratando de asegurar buenos trabajos de cementación para garantizar la integridad mecánica del pozo.

Otro de los desafíos que se considera, son las pérdidas totales de circulación, donde no se tienen retorno de fluido a superficie evitando de esta manera la recuperación de ripios de perforación que permitan determinar la columna estratigráfica de la zona lo que dificulta confirmar la geología del sistema y correlacionar la columna obtenida con la geología de superficie. Esto es base fundamental para la elaboración y desarrollo de un sistema geotérmico por lo que debe ser prioritario y las contingencias como toma de núcleos, recuperación de muestras, etc. deben ser previstas como contingencias en la fase de planificación de las operaciones de perforación.

En el Ecuador, la historia volcánica del área del prospecto Chachimbiro que es la zona donde se realizó el primer pozo geotérmico del país, sugiere la presencia de una persistente fuente de calor magmática. Dentro del modelo geológico para este prospecto se menciona que el tectonismo controlado por la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana evidencia la presencia de fallas regionales NE-SW, que atraviesan el Ecuador continental. Esta misma tendencia tiene los lineamientos denominados La Florida y Azufral, que en si no son fallas

regionales, son posibles fallas relacionadas a fallas regionales como la del Ángel al Norte de Chachimbiro que si es una falla regional e identificada (Valencia, 2013).

Las investigaciones desarrolladas sugieren que la Falla Azufral controla el ascenso de los fluidos termales y el análisis estructural establece un ambiente favorable para el desarrollo de una red de fracturas con una elevada permeabilidad. En lo referente a la estratigrafía está dada por rocas sedimentarias y volcánicas cuaternarias (espesor 1000 m). El ascenso de los fluidos se da por medio de la Falla Azufral que a la vez se interconecta con las Fallas Cachiyacu y Huarmiyacu donde se puede pensar que siguen la dirección para su descarga tanto al sureste como al suroeste, Ver Figura 7. La roca reservorio estaría presente en la Unidad Chachimbiro 1. La recarga del sistema se estima sobre los 3000 msnm, donde se localizan los páramos que son parte de las subcuencas de la cuenca hidrográfica del Río Mira (Torres & Urquizo, 2013).



**Figura 7:** Modelo Geológico – Proyecto Chachimbiro

Fuente: (Torres & Urquizo, 2013)



#### 4.1.2 Perforación de Reservorios de Alta Temperatura

En el Ecuador, las operaciones de perforación de pozos de petróleo y gas se ejecutan en la Cuenca Oriente con una temperatura en fondo de aproximadamente 99°C (210 °F) a una profundidad promedio de 10000 ft. Por lo que todos los equipos utilizados en operaciones de perforación en el país se encuentran disponibles para trabajar generalmente a esta temperatura. (Barba, 2017)

La perforación de pozos geotérmicos tiene como objetivo reservorios con alta temperatura, en el caso del Proyecto Chachimbiro para la perforación del primer pozo exploratorio se consideró una temperatura de reservorio estimada en 200 °C (392 °F) a profundidades más someras que las alcanzadas en la perforación de pozos en la Cuenca Oriente del Ecuador (CELEC EP , 2018). La variación en el rango de temperatura estimado para la operación representa un cambio significativo en las especificaciones de sarta de perforación, componentes del BHA, tipo de fluido de perforación, etc.

Esta temperatura se transfiere a toda la tubería y afectan los equipos de fondo que se encuentran trabajando con un fluido caliente. De ahí que se identifican algunos desafíos asociados a la temperatura durante el desarrollo de las operaciones de perforación, como (Vollmar, 2013) :

- Afectación en los componentes con elastómeros (sellos, estatores de los motores de fondo, tapones, etc.).
- Afectación de componentes electrónicos de herramientas de registros eléctricos, direccionales, geo navegación que pueden ser destruidos por las altas temperaturas.
- Incremento del efecto de corrosión en los componentes de la sarta de perforación y BHA.
- Degradación del fluido de perforación a altas temperaturas.
- Afectación de la integridad de la tubería de revestimiento (*casing*).
- Afectación de las propiedades del cemento.

Estos desafíos se pueden resolver al incorporar durante la fase de planificación del proyecto un listado adecuado de equipos y prácticas operativas de acuerdo a las condiciones de reservorio esperadas para la perforación. Las opciones que se pueden manejar para el caso de los pozos a perforarse en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos son:

- Establecer de manera adecuada las especificaciones requeridas para la tubería de perforación y BHA a utilizarse durante las operaciones, considerando tamaño, peso, grado, recubrimiento interno de la tubería (definir las especificaciones asociadas al

recubrimiento de la tubería de perforación de acuerdo a la temperatura de fondo esperada). La tubería y componentes del BHA deben contar con una inspección vigente para poder tener definida la condición de ingreso de los mismos al pozo.

- En locación disponer de un enfriador de fluido de perforación (mud cooler) para disminuir y controlar la temperatura del fluido en el sistema de circulación; lo que permite mantener sus propiedades y evitar su degradación.
- En el escenario de no tener retorno de fluido de perforación en superficie, se debe asegurar un suministro continuo de agua para enfriar la sarta de perforación y componentes del BHA ante la decisión de continuar las operaciones de perforación con pérdida total de circulación.
- Asegurar que el peso, grado y conexión de la tubería de revestimiento (casing) a instalarse en cada sección del pozo sean los adecuados, de acuerdo a las condiciones de presión y temperatura del pozo, especialmente por la presencia de fuerzas compresivas generadas por la expansión térmica.
- Asegurar que la tubería de revestimiento (*casing*) se encuentre completamente cementado con la finalidad de que los esfuerzos generados por la temperatura estén adecuadamente distribuidos. Se debe trabajar en un diseño de lechada de cemento adecuada que prevenga su degradación térmica.

#### 4.1.3 Selección del Taladro de Perforación

Uno de los principales retos en las operaciones de perforación en la Cordillera Occidental de los Andes es la selección del taladro de perforación; se debe establecer un balance entre la capacidad del equipo para operar en un ambiente de altitud considerable y clima adverso; y la necesidad de que el equipo presente todas las condiciones de confiabilidad de funcionamiento al operar en un área remota en la que la locación presenta espacio físico limitado.

Para cumplir con la capacidad operativa requerida para la perforación de pozos geotérmicos se deben considerar las siguientes opciones de taladro:

- **Taladro Mecánico:** por las condiciones de altitud donde se encuentran las zonas de interés geotérmico en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos (>3000 m), se debe considerar como opción la selección de un taladro mecánico; sus componentes trabajan con motores a diésel, son comunes y muy utilizados en la industria de petróleo y gas. Este aspecto es importante en la evaluación, ya que de requerirse repuestos se

los puede suministrar sin mayores inconvenientes por ser comunes en la industria, además el mantenimiento se puede dar sin inconvenientes.

Sin embargo, es importante tener presente que la eficiencia de los motores a diésel debido a la reducción en los niveles de oxígeno por la altitud se puede ver afectada. Como referencia se puede tener una reducción del 45% de los niveles de oxígeno a alrededor de 5000 msnm. En función de algunos estudios realizados por los fabricantes, los motores tendrán alrededor del 50% de la potencia que presentan al nivel del mar (Roberto de Angelis, 2011) limitando de manera significativa la potencia disponible para el desarrollo de las operaciones de perforación.

Por lo tanto, por el empleo de taladros mecánicos se podrían considerar dos opciones:

- ✓ Taladro Mecánico con el doble de la capacidad requerida para las operaciones a realizar debido a las condiciones de gran altitud.
- ✓ Taladro Mecánico con la capacidad adecuada pero con motores de diésel con mayor capacidad para trabajo en condiciones de gran altitud.

En estos dos casos es importante tomar en cuenta el incremento de consumo de diésel que se tendrá en el proyecto debido a la capacidad requerida para las operaciones de los equipos mencionados.

- **Taladro Eléctrico:** se puede seleccionar este tipo de taladro con capacidad adicional en el generador integrado al sistema de potencia. Este tipo de taladro aporta con un eficiente uso de combustible y un control más preciso de los componentes del equipo. Sin embargo, por el nivel de tecnología que presenta es importante para locaciones remotas contar con todos los repuestos y personal técnico calificado para realizar mantenimiento y reparación para evitar que esto se convierta en un limitante para su uso en operaciones remotas (Roberto de Angelis, 2011).

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que son equipos de grandes dimensiones y requieren de mayor área para su instalación lo que puede constituirse en un limitante en el caso de locaciones remotas con espacio limitado.

- **Taladro Hidráulico:** puede trabajar normalmente hasta los 1500 msnm. Al trabajar a una mayor altitud se debe proporcionar a las bombas hidráulicas la presión mínima de trabajo que requieren de acuerdo a especificación de fabricante evitando cavitación y su posterior falla. Con la finalidad de garantizar el adecuado funcionamiento de las bombas hidráulicas debido a las condiciones de altitud se recomienda la instalación de un pressure blower (compresor) para tener una adecuada presión de trabajo de las bombas evitando fallas durante las operaciones de perforación en locaciones que se encuentran a una altitud superior a los 1500 m sobre el nivel del mar (Drillmec - Drilling Technologies , 2017). Además, se debe considerar ajustes a los motores de diésel para la adecuada entrega de combustible; así como destacar que son equipos de gran adaptabilidad para compensar los efectos de la altitud y que no requieren mucho espacio y equipos de soporte para su instalación, son equipos compactos.

Los elementos que pueden afectar la selección del taladro para los proyectos geotérmicos son varios, por lo que se debe considerar algunas variables de evaluación mínimas para realizar una adecuada selección, entre ellas se encuentran:

- **Capacidad del Taladro:** se refiere al peso que puede ser suspendido por el sistema de izaje del taladro para llegar a la profundidad de perforación planificada, considerando el peso de tubería, ensamblaje de fondo, peso de tubería de revestimiento (*casing*) a ser manejada para revestir el pozo durante las operaciones. Un margen de seguridad de overpull debe estar disponible para trabajar las sartas en caso de pega de tubería u hoyo apretado (Sandia National Laboratories, 2010).
- **Área de Ocupación del Taladro:** la contratista de perforación deberá proporcionar un diagrama de las dimensiones del taladro armado y listo para operación. En este diagrama deberá especificarse los puntos de acceso, salida así como las zonas de tránsito de carga. Se deberá tener ubicados todos los componentes del taladro e identificado el número de cargas que se movilizarán y desmovilizarán de la locación, con la finalidad de determinar si el equipo podrá instalarse en el área disponible, donde se ejecutaran las operaciones de perforación (Sandia National Laboratories, 2010).
- **Capacidad de las Bombas:** las bombas deben tener la suficiente capacidad volumétrica para darle al anular la velocidad requerida para el levantamiento de los cortes de perforación. Debido a que en los pozos geotérmicos se perforan hoyos de gran tamaño,

las bombas (y tanques) deben ser de mayor capacidad que las empleadas en la perforación de pozos de petróleo y gas. Las bombas también deben estar acondicionadas para manejar material de pérdida de circulación (LCM). Uno de los aspectos básicos a considerar es el control de pozos que en estos casos a diferencia de los pozos de petróleo y gas se realiza con el bombeo de agua fría al pozo por lo que las bombas deben estar siempre operativas (Sandia National Laboratories, 2010).

- **Ensamblaje de Fondo (BHA) y Sarta de Perforación:** el diseño del ensamblaje de fondo se define durante la fase de planificación con la finalidad de que el taladro disponga de todas las herramientas necesarias tomando en cuenta que se trata de una locación remota. Por lo que se debe verificar la disponibilidad de todos los elementos del BHA con su respectivo *back up* para evitar contratiempos de pérdida de tiempo asociados a logística y disponibilidad de repuestos.

En caso de que la sarta de perforación sea provista por el taladro, es importante verificar que la misma sea del tamaño, peso y grado requeridos, así como se cumpla con el rango de temperatura estimado para la ejecución de las operaciones. Se debe tener en cuenta también que al perforar pozos geotérmicos la probabilidad de encontrar presencia de H<sub>2</sub>S es muy alta por lo que la tubería y ensamblaje de fondo deberán cumplir con el tipo de material y requerimientos para servicio de H<sub>2</sub>S ya que su presencia puede dañar la sarta de perforación y BHA.

La responsabilidad sobre la inspección de la tubería y ensamblaje de fondo en caso de que se requiera reemplazos deberá ser claramente especificada en el contrato de perforación (Sandia National Laboratories, 2010).

- **Manejo de Fluidos de Alta Temperatura:** al perforar pozos geotérmicos es importante que los equipos y herramientas del taladro que estarán expuestas a altas temperaturas tenga la capacidad de soportar las mismas. Esto será especialmente importante de considerar en los retornos del fluido de perforación el cual tendrá una temperatura superior al retorno de fluidos en operaciones convencionales de perforación de pozos de petróleo y gas. En la mayoría de casos para la perforación de pozos geotérmicos se requerirá de un enfriador de fluido de perforación (mud cooler) en superficie cuando los retornos excedan la temperatura especificada como máxima.

El personal operativo debe estar consciente del riesgo que existe al trabajar con fluidos con alta temperatura y debe conocer como trabajar con herramientas y equipos en estas

condiciones debido a que varios sellos de elastómero pueden ser muy vulnerables a altas temperaturas y fallar generando fugas inesperadas de fluidos que ocasionen retrasos por tiempos de reparación no planificados en el proyecto (Sandia National Laboratories, 2010).

- **Instrumentación del Taladro:** es importante disponer de información completa sobre el desempeño del taladro durante el desarrollo de las operaciones de perforación para medir la eficiencia en las operaciones y la seguridad, por lo que se debe tener disponible a través de la instrumentación del taladro algunos parámetros esenciales como: tasa de flujo de ingreso y salida del pozo, temperatura de ingreso y salida del fluido de perforación, detección de H<sub>2</sub>S y gases explosivos, presión del stand pipe, velocidad de rotación, peso sobre la broca, torque, profundidad perforada, posición del bloque, tasa de penetración (ROP- *rate of penetration*). Estos parámetros deberían ser registrados digitalmente y visualizados por el personal operativo de campo e ingeniería para el monitoreo continuo de las operaciones del pozo (Sandia National Laboratories, 2010).
- **Soporte:** en operaciones remotas, una falla en las herramientas o componentes del taladro podría constituirse en un problema importante debido a que no hay compañías de soporte cercanas que permitan una reparación rápida de los equipos. En las operaciones de perforación en el área de Chachimero, la locación se encontraba cerca a zonas pobladas pero a unos 460 km de personal de soporte para reparación del taladro, suministro de equipos y herramientas. Es fundamental disponer de personal competente, herramienta y equipo de contingencia, así como un inventario completo de repuestos para el taladro que permita solucionar problemas que pudieran presentarse, evitando tiempos no productivos asociados a falta de personal o repuestos (Sandia National Laboratories, 2010).

Para proceder con la selección del taladro en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos se debe analizar los equipos disponibles con la finalidad de encontrar un balance entre la capacidad del equipo para operar a esa altitud, las dificultades climáticas y lo remoto de la locación. Todo esto con el objetivo de poder seleccionar un equipo que permita ejecutar las operaciones de perforación hasta la profundidad propuesta pero a la vez permita que la logística y riesgos asociados a la movilización y operación del taladro en sitio sean factibles y permitan la ejecución del proyecto sin mayores contratiempos.

En el Proyecto Geotérmico Chachimbiro para la ejecución de las operaciones de perforación del primer pozo geotérmico del país, se seleccionó un taladro hidráulico semiautomático de 1000 HP (Ver Figura 8) con el objetivo de perforar a una profundidad de 2000 m (CELEC EP , 2018) . A continuación se destacan algunos factores que caracterizan a este tipo de taladro y que contribuyeron con la gestión de la fase de perforación exploratoria del proyecto:

- El área designada para la perforación del primer pozo geotérmico en el Ecuador localizada a 3600 m sobre el nivel del mar, se encontraba en una zona remota y de espacio limitado por lo que requería un taladro que una vez armado no ocupe mayor espacio físico. El taladro seleccionado se adaptó a la ubicación y condiciones de espacio requeridas para la ejecución del proyecto llegando a ocupar un espacio hasta un 40% menor respecto a los equipos convencionales, contribuyendo de esta manera también con una reducción en el trabajo de obra civil (CELEC EP , 2018).
- Este tipo de taladros, en gran parte de sus cargas cuenta con quinta rueda, lo que reduce en más de un 50% el tiempo de su movilización respecto a los taladros convencionales, favoreciendo así la gestión del proyecto desde el punto de vista logístico al optimizar su tiempo de movilización (Sandia National Laboratories, 2010).
- Este tipo de taladro permite aplicar peso adicional sobre el top drive en eventos de pega de tubería (stuck pipe).
- Aseguramiento en el área de salud y seguridad del personal debido a su condición de taladro semiautomático, que reduce la exposición del personal operativo a la ejecución de trabajos manuales durante la operación del equipo.



**Figura 8:** Taladro de Perforación Proyecto Chachimbiro – 1000 HP

Fuente: (CELEC EP , 2018)

#### **4.1.4 Pérdida Total de Circulación**

La pérdida de circulación constituye el desafío más común y costoso de la perforación de pozos geotérmicos. La pérdida de fluido de perforación en promedio puede llegar a representar el 10% del costo total del pozo en áreas geotérmicas maduras y a menudo más del 20% del costo en pozos exploratorios y áreas de desarrollo (Sandia National Laboratories, 2010).

En la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, este desafío común en la perforación de pozos geotérmicos, puede generar:

- Posible pega del BHA y tubería, este problema se puede presentar si el fluido de perforación falla con la limpieza del hueco y la capacidad del mismo para permitir el retorno de cortes a superficie.
- En este tipo de pozos, la zona de producción es una zona de pérdida total de circulación por lo que a veces resulta difícil curar estas zonas manteniendo su potencial productivo.



- Las pérdidas de circulación pueden causar repentinas caídas del nivel de fluido en el pozo, esto podría ocasionar que en formaciones de alta temperatura, fluidos de formación como gas, agua caliente o vapor ingresen al pozo generando una pérdida de control del mismo. Esto podría suceder en zonas productivas y no productivas.
- Difícil uso de materiales para pérdida de circulación debido a que el tope y la base de las zonas de pérdida por lo general son difíciles de definir. El material anti pérdida o cemento utilizados para sellar estas zonas suelen migrar de la zona objetivo especialmente si se ha perforado más bajo la zona de pérdida. De ahí que, la inversión realizada en este tipo de material y cemento puede ser importante afectando los costos planificados para el proyecto.
- Altos costos asociados a la pérdida de fluido de perforación especialmente en formaciones de alta temperatura, ya que el fluido se pierde en lugar de permitir su recirculación. Esto puede llegar a incrementar los costos de la operación debido a la necesidad de incorporar mayores volúmenes de fluido al sistema.

La pérdida total de circulación puede tratarse de diferentes maneras, a continuación se pueden mencionar algunas de ellas:

- Perforar con pérdida de circulación; si se tiene disponible en la zona de interés una fuente de agua adecuada se puede recomendar continuar perforando sin retornos. Sin embargo, en el caso de que no haya suficiente agua fresca disponible también se puede continuar perforando con el agua de formación producida (salmuera), la que usualmente se reinyecta si se está perforando una zona de desarrollo. Es recomendable bombear agua a altas tasas con la finalidad de mantener los cortes alejados de la sarta de perforación, previniendo de esta manera problemas de pega (empaquetamiento).
- Perforar con fluido de perforación de baja densidad (ligeros) como: aire, espuma o fluidos aireados. El aire puede ser utilizado cuando la producción de líquido es mínima o no existe. El uso de espuma tolera cierta cantidad de dilución de agua y los fluidos aireados que toleran una cantidad significativa de dilución, ya que son líquidos que se han inyectado con una determinada cantidad de gases. Este tipo de fluidos se caracterizan porque tienen una densidad menor o un poco mayor a la de la presión de poro permitiendo remediar las pérdidas totales de circulación, además de contribuir a evitar la pega diferencial.
- Uso de material anti pérdida; en el caso de que se anticipe una zona de pérdida de circulación severa se recomienda el uso de jets de gran tamaño en la broca o no colocar

los jets con la finalidad de poder bombear material anti pérdida de gran tamaño sean estos sólidos o material fibroso. Este método no es muy efectivo en fracturas de gran tamaño. Al igual que en el caso de las pérdidas que se presentan en los pozos de petróleo y gas, el material anti pérdida utilizado es orgánico o celulósico y no soporta las temperaturas de un pozo geotérmico por lo que se degrada con el tiempo. Esto puede constituirse en una ventaja ya que se puede utilizar en las zonas de formaciones productivas del pozo. Se debe tener especial cuidado cuando se tiene como parte del BHA un MWD que puede sufrir daños por el material anti pérdida, por lo que se tiene que coordinar con el personal MWD para su uso (Sandia National Laboratories, 2010).

- Uso de tapones de cemento en las zonas de pérdida de circulación, cuando el material anti pérdida no ha podido controlarlas. Luego de bombeado el tapón de cemento en la zona estimada de pérdida, se debe esperar el tiempo de fragüe del mismo con la finalidad de continuar perforando, en algunas ocasiones un tapón no es suficiente por lo que en una zona pueden llegar a bombearse varios tapones. Esta práctica es común en secciones no productivas.

#### **4.1.5 Cementación**

La cementación de pozos geotérmicos debe ser de buena calidad especialmente cuando las formaciones se han mostrado débiles o se han presentado problemas de pérdida total o parcial de circulación. El cemento en este tipo de pozos tiene funciones importantes entre las que se puede mencionar:

- ✓ Protege formaciones no consolidadas.
- ✓ Aisla zonas superficiales que están comunicadas con afluentes.
- ✓ Proporciona a la tubería de revestimiento (*casing*) soporte mecánico tomando en cuenta los ciclos térmicos a los que puede estar expuesta durante la fase de producción de un reservorio geotérmico.
- ✓ Protege a la tubería de revestimiento de la corrosión que le puede ocasionar los fluidos propios del reservorio geotérmico.

Debido a que las operaciones de cementación son similares a las realizadas para los pozos de petróleo y gas su ejecución durante las operaciones de perforación de pozos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos no se requieren esfuerzos importantes desde el punto de vista de la disponibilidad de recursos como: personal, materiales y equipo sin embargo, constituye un desafío desde el punto de vista técnico debido a:

- Durante la etapa de planificación se tiene que tener especial cuidado en el diseño de las lechadas de cemento. Uno de los factores que se debe tener en cuenta es que el cemento a utilizarse sea adecuado para el rango de temperatura que se espera en las zonas a cementar. Históricamente, la mayor modificación realizada al cemento convencional Clase “G” utilizado en pozos de petróleo y gas para su uso en pozos geotérmicos es el uso de retardantes y alrededor del 40% o más de sílice con la finalidad de evitar la pérdida de resistencia a la compresión del cemento generada a causa de su deshidratación por exposición a altas temperaturas. De esta manera, se evitaría la generación de fracturas que ocasionarían la migración de fluidos a través del cemento comprometiendo su integridad (Sandia National Laboratories, 2010).
- Durante la perforación de cada una de las secciones del pozo se debe monitorear de manera constante la temperatura de retorno del fluido de perforación y la de fondo en caso de que se disponga de sensores de temperatura, con la finalidad de ajustar el diseño de la lechada a las condiciones de temperatura del pozo contribuyendo de esta manera a una buena cementación.
- Durante las operaciones de cementación en este tipo de pozos, es crítico que no quede agua atrapada entre el cemento y la tubería de revestimiento (*casing*) debido a la posibilidad de que esto colapse el *casing* durante las variaciones de temperatura a las que se verá sometido el pozo durante su vida productiva.
- Uno de los desafíos más importantes durante la cementación de pozos geotérmicos, se puede presentar al tener pérdida de circulación durante la cementación, que ocasiona que el cemento no llegue a superficie incluso si se consideró en la planificación un porcentaje de exceso importante. En este caso, si el cemento no quedó muy lejos de la superficie se puede recomendar realizar un top job hasta tener nivel de cemento presente en superficie, Sin embargo, este problema puede trabajarse también de manera preventiva durante las operaciones de perforación al bombear tapones de cemento a medida que se presentan las zonas de pérdida de circulación con el objetivo de que las mismas no interfieran con las operaciones de cementación. Esta práctica debe ser considerada en la planificación del pozo debido a que pueden llegar a utilizarse de 10 a 20 tapones de cemento en una determinada sección lo que impactará directamente los costos del proyecto generando un incremento en el presupuesto si no fue considerado previamente como una contingencia (Sandia National Laboratories, 2010).

- La ejecución de cementaciones remediales, puede considerarse otro desafío ya que su ejecución implica operaciones complejas en el caso de los pozos geotérmicos, debido a que los perforados que se deben realizar deben ser nuevamente revestidos para proteger la integridad del pozo. Esta operación al ejecutarse, también podría incrementar el costo del proyecto al tratarse de una operación de remediación que implica el uso de mayor cantidad de recursos y tubería de revestimiento (*casing*) que es un tangible costoso para el proyecto.
- Una opción de gran utilidad que se puede considerar para la cementación de pozos geotérmicos es la utilización de cemento espumado que puede mitigar los efectos de la reducción de volumen de hidratación del cemento a través de la incorporación de gas en el cemento, disminuyendo así el alto riesgo de falla del mismo durante todas las fases de operación, incrementando su elasticidad y permitiendo que el cemento proporcione el aislamiento zonal requerido para la vida del pozo (McCulloch & Gastineau, 2003). La aplicación de esta tecnología en el país puede ser compleja, debido a que no es común el uso de cemento espumado durante las operaciones de cementación en la Cuenca Oriente, en caso de que se requiera utilizar se debería importar los materiales para la formulación de este tipo de cemento lo que podría incrementar los costos estimados de cementación en la primera fase de ejecución del proyecto. Sin embargo, podría contribuir de manera significativa con la reducción de tiempos y costos en las operaciones de perforación impactadas de manera significativa con pérdidas totales de circulación.

## **4.2 Desafíos Físicos y Ambientales identificados durante la Fase de Perforación de Pozos Geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos**

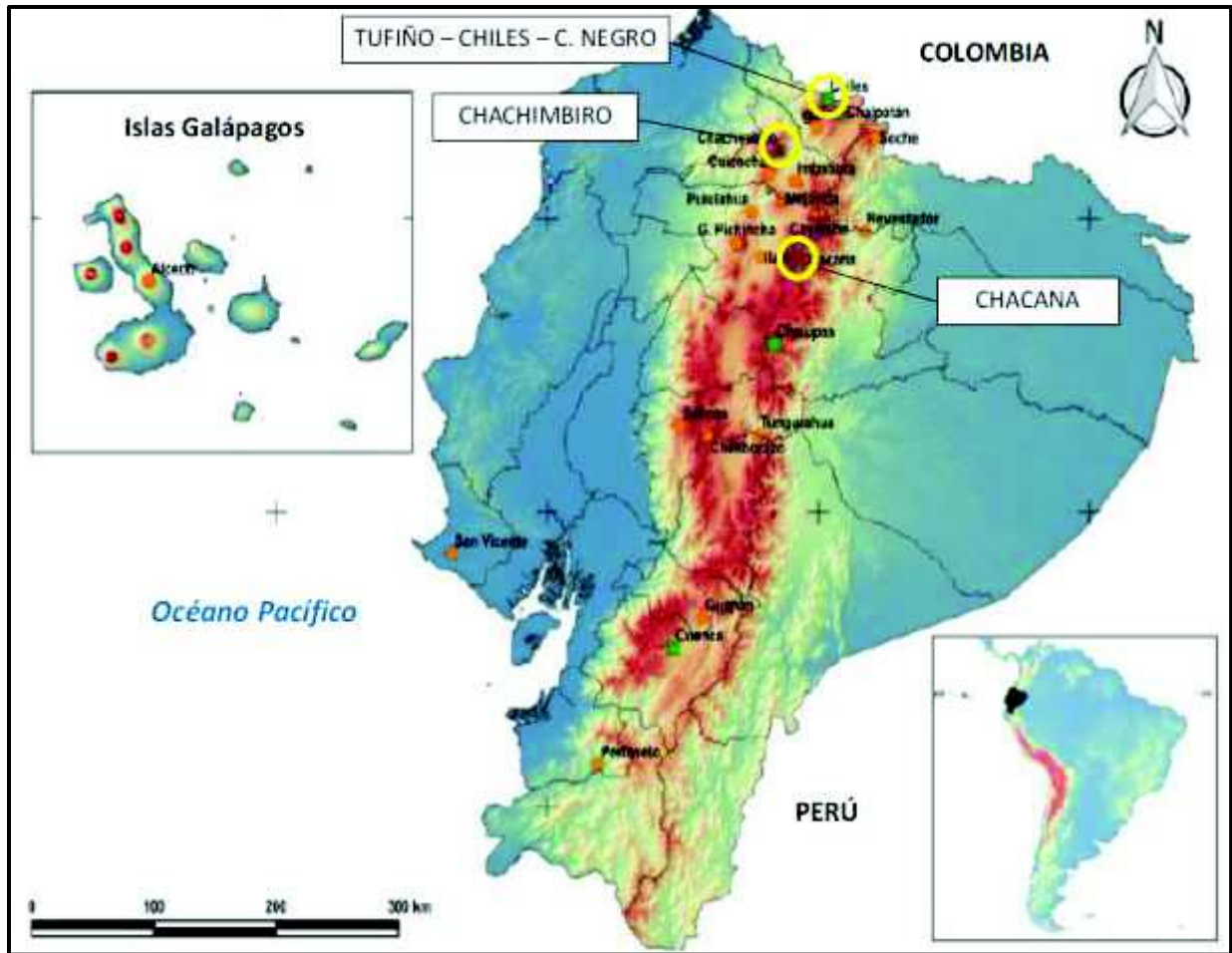
El desarrollo de proyectos geotérmicos en el Ecuador, como parte de la búsqueda de energías alternativas presenta como uno de sus objetivos contribuir con la incorporación a la matriz energética de un tipo de energía más amigable con el ambiente que reduce los gases de efecto invernadero y el calentamiento global. Por lo tanto, es importante realizar un análisis adecuado de los desafíos físicos y ambientales que se pueden presentar durante la ejecución de la fase de perforación del proyecto. Los desafíos físicos y ambientales seleccionados y que se

desarrollaran a continuación constituyen elementos críticos que pueden afectar las condiciones generales de ejecución de las operaciones de perforación.

#### **4.2.1 Ubicación Geográfica del Área del Proyecto**

La ubicación geográfica del área identificada para el desarrollo de un proyecto geotérmico puede constituirse en un desafío importante para su exitosa ejecución. La facilidad de acceso a la zona donde se ejecutará la fase de perforación exploratoria y de desarrollo puede constituirse en un factor crítico para la movilización de personal, equipo y materiales necesarios para la ejecución de las operaciones de perforación y posterior producción. De manera general, las instalaciones geotérmicas requieren poco espacio para su construcción y operación, el uso del espacio es puntual destinado a áreas para la construcción de vías de acceso, plataformas de perforación, líneas de conducción y la planta geotérmica (Marzolf, 2007).

En Ecuador, los recursos geotérmicos se han identificado principalmente en la porción septentrional de la cordillera Andina, asociados al volcanismo del área, también en la porción centro meridional de la cordillera y en las Islas Galápagos. Los estudios de reconocimiento geotérmico nacional han permitido la identificación de varios prospectos geotérmicos entre los que se encuentra y destaca el prospecto Chachimbiro, donde se perforó el primer pozo geotérmico exploratorio del país. Este prospecto se encuentra en la Cordillera Andina Occidental al norte de Ecuador, a unos 50 km al sur del límite con Colombia, 70 km al norte de Quito y 17 km al noreste de la ciudad de Ibarra (Bona & Coviello, 2016); Ver Figura 9.



**Figura 9:** Áreas Geotérmicas del Ecuador – Ubicación Proyecto Chachimbiro

Fuente: (Bona & Coviello, 2016)

El área geotérmica, se encuentra entre los 2800 y 4000 msnm, la zona de mayor interés donde se realizó la plataforma para la perforación del primer pozo exploratorio está a aproximadamente 3600 msnm en el lado oriental del complejo volcánico Huanguillaro, sobre el borde de la Reserva Ecológica Cotacachi – Cayapas. Esta zona es morfológicamente favorable y se encuentra fuera del área protegida de la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas. Los aspectos más relevantes a considerar para la ejecución de este tipo de proyectos desde el punto de vista de su ubicación geográfica, son:

- Para el desarrollo de este tipo de proyectos es pertinente identificar las vías de acceso disponibles, así como realizar un levantamiento de su estado, con la finalidad de determinar si permitirán la movilización de todos los equipos requeridos para la fase de perforación. Este es un aspecto crítico a evaluar, ya que en el caso de proyectos que se encuentran en sitios muy retirados y de difícil acceso en la cordillera, se requerirá

considerar inversiones significativas y de alto riesgo en infraestructura vial convirtiéndose en un factor decisivo para determinar la factibilidad de un proyecto de este tipo. Con el propósito de garantizar la movilización de todos los equipos especialmente el taladro de perforación que es el de mayor dimensión, se debe realizar un plan de movilización por parte de la empresa a cargo del mismo con la finalidad de asegurar que la vía disponible permita transportar los equipos sin problemas hasta la locación definida para las operaciones. En el caso del Proyecto Chachimbiro, el área tuvo disponible vías de acceso pavimentadas y un tramo de caminos de tierra que comunicaban sectores principalmente con actividades agrícolas y forestales, la vía tuvo que ser ampliada y recibió mantenimiento con la finalidad de garantizar la accesibilidad requerida para el proyecto (Bona & Coviello, 2016).

- En función de las condiciones de acceso a la zona donde se va a ejecutar el proyecto, se deberá establecer un plan de mantenimiento y cuidado vial, esto con el propósito de mantener las vías en las mejores condiciones para el tránsito del personal y equipos asignados al proyecto, así como el normal tránsito de la población de la zona.
- Se debe realizar un proceso de socialización de las actividades de movilización y desmovilización de personal, equipos y materiales con la población de la zona con la finalidad de evitar ocasionar dificultades en el desarrollo de actividades diarias de la comunidad.
- Otro aspecto importante a considerar en este tipo de proyectos es que la zona definida para la construcción de las plataformas para perforación, debe tratar de ubicarse cerca de la línea de transmisión eléctrica nacional. Se debe hacer una planificación adecuada de la ubicación, para que las facilidades de conexión a la red eléctrica del proyecto sean favorables para su desarrollo (Bona & Coviello, 2016).
- Durante la evaluación de las restricciones ambientales del proyecto se debe establecer si se encuentra dentro de un área de conservación natural o sitio protegido. En este caso pueden existir regulaciones que impliquen restricciones o prohibiciones para el desarrollo de proyectos geotérmicos por la sensibilidad ambiental de la zona. De ahí que, una restricción asociada a protección ambiental puede condicionar fuertemente las posibilidades de ejecución de este tipo de proyectos. Ecuador está conformado para áreas protegidas y reservas naturales a lo largo de su territorio.

En la zona correspondiente a la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, se encuentran algunas áreas protegidas como: la Reserva Ecológica el Ángel, Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas, Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, de ahí que se debe tener presente al evaluar la factibilidad de este tipo de proyectos en el país que la intervención de áreas protegidas implican procesos de evaluación y aprobación ambiental extensos dependiendo del nivel de conservación establecido (Ministerio del Ambiente, 2018). Esto puede afectar los tiempos para la ejecución del proyecto o restringir completamente la intervención del área de interés. En el caso de la perforación del primer pozo exploratorio del Proyecto Geotérmico Chachimbiro el área intervenida se encontró fuera del área protegida de la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas, por lo que no estuvo afectada por restricciones asociadas a la conservación ambiental establecida para zonas protegidas; sin embargo, se trabajó en el cumplimiento de lo establecido en el plan de manejo ambiental del proyecto (Bona & Coviello, 2016).

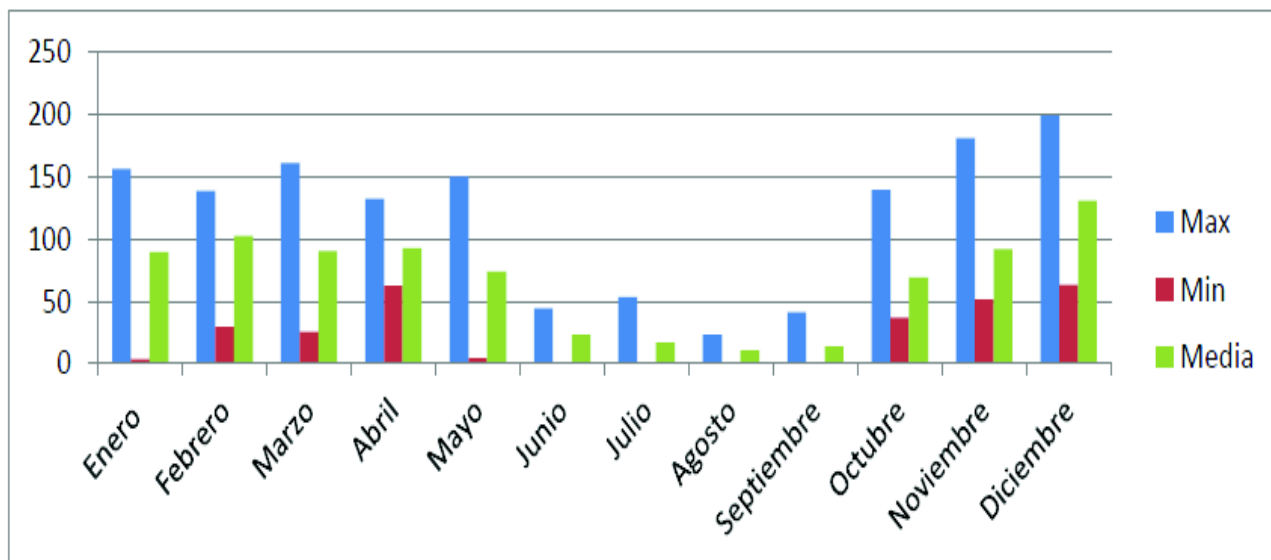
#### **4.2.2 Condiciones Climáticas y Temperatura de la Zona**

Las condiciones climáticas y de temperatura constituyen en un desafío importante para el trabajo del personal y equipo que participe durante las operaciones de perforación en las fases de exploración y desarrollo del proyecto. Es fundamental para la adecuada gestión de este tipo de proyectos determinar, durante la fase de planificación, las condiciones climáticas y de temperatura que predominarán en el área de interés geotérmico.

En las áreas de interés geotérmico en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, se debe considerar la presencia de bajas temperaturas, las que son registradas por estaciones meteorológicas presentes en la zona. El rango de temperatura referencial para la fase de perforación exploratoria en el Proyecto Geotérmico Chachimbiro fue de entre 5°C a 17 °C que al combinarse con las condiciones de altitud hacen difícil el trabajo de personal y equipo del taladro de perforación (Avila, 2016). La variación de temperatura entre el día y la noche en estas condiciones determinaron que el personal utilice equipo de protección personal térmico con el propósito de protegerse de las condiciones climáticas adversas que se presentaron durante las jornadas de trabajo. De esta manera, se buscó contribuir con la prevención de enfermedades que pueden afectar la salud del personal debido a las condiciones bajas de temperatura.



Dentro de las condiciones climáticas identificadas para la zona, el análisis del Proyecto Geotérmico Chachimbiro (Avila, 2016), presentó una referencia del nivel de precipitaciones que se pueden experimentar en esta zona mencionada, Ver Figura 10.



**Figura 10:** Precipitación Mensual (mm) – Área Proyecto Chachimbiro

Fuente: (Avila, 2016)

La información referencial del nivel de precipitaciones de la zona de interés se utiliza para programar los meses más adecuados en la planificación para el arranque y ejecución del proyecto. Como se observa en la figura, la época del año en la se presenta menor cantidad de precipitaciones es entre junio y septiembre; situación que contribuye significativamente en el desarrollo logístico del proyecto ya que permitirá programar etapas como la movilización y desmovilización de equipos, que constituyen etapas críticas debido a su magnitud, las lluvias pueden afectar significativamente las condiciones de las vías de acceso disponibles.

El conocimiento de las condiciones climáticas y temperaturas estimadas en las cuales se va a ejecutar el proyecto como se había mencionado inicialmente, constituyen un desafío importante en el caso de los proyectos que se desarrollen en el país; esto debido a que las condiciones climáticas y temperatura son completamente diferentes a las que se presentan en el desarrollo de proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas. Este cambio importante implica que tanto el personal como los equipos deben prepararse adecuadamente para evitar problemas de salud, adaptación y logísticos que afecten la ejecución del proyecto en tiempo y costo.

### 4.2.3 Uso de Agua

Para la ejecución de proyectos geotérmicos se requiere tener acceso a una fuente de agua permanente durante las etapas inicial (perforación de prueba), de desarrollo y operación del proyecto. El uso de agua debe ser administrada adecuadamente con la finalidad de minimizar el impacto ambiental que se puede generar. En un proyecto geotérmico el agua puede tener diferentes usos entre los que se pueden mencionar:

- Etapa de Perforación.
- Estimulación de Reservorios.
- Uso en la Planta Geotérmica.

En este caso, se busca determinar como el uso del agua puede constituirse en un desafío durante la etapa de perforación. El agua es considerada un elemento crítico en esta fase, ya que se utiliza para la preparación de fluido el mismo que tiene funciones importantes como: proporciona a la broca un medio de enfriamiento, permite la remoción de cortes para mantener la limpieza del pozo, lubrica la sarta de perforación, mantiene la estabilidad del pozo, permite controlar el pozo y compensar pérdidas parciales, totales o por evaporación en caso de que estas se presenten.

El volumen de agua requerido para este tipo de operaciones se debe buscar durante la fase inicial del estudio de pre factibilidad del proyecto, identificando una fuente de alto flujo, un río (de estar disponible) o de manera complementaria establecer una zona de recolección temporal de agua para su uso (Massachusetts Institute of Technology , 2006).

La disponibilidad de recursos hídricos (agua) es de gran importancia para la ejecución de proyectos geotérmicos a nivel mundial, por lo que es vital contar con este recurso para el proyecto geotérmico que está iniciándose actualmente en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos. En Ecuador, en la zona cercana al proyecto se cuenta con un ecosistema único, el páramo que comienza a 5000 msnm y se extiende hasta alrededor de los 3600 msnm, este ecosistema, es muy importante debido a su capacidad de retención de agua, por lo que su existencia contribuye al ser una fuente de agua cercana al proyecto (Avila, 2016).

En la fase previa al inicio de las operaciones de perforación exploratoria, se deben realizar varios análisis que permitan determinar los elementos hidrológicos clave para su ejecución. Para el Proyecto Chachimbiro se reconocieron algunos cuerpos de agua superficiales cercanos al área de intervención, Ver Tabla 3.

**Tabla 3:** Cuerpos de Agua Identificados Proyecto Chachimbiro

<b>NOMBRE</b>	<b>ALTURA (msnm)</b>	<b>CAUDAL (L/s)</b>
Acequia La Banda (Punto 1)	3617	3.65
Acequia La Banda (Punto 2)	3628	3.075
Quebrada Azufral	3645	4.41
Acequia Pisangacho	2857	2.04
Acequia Mindaburlo (Punto 1)	2868	3.51
Acequia Mindaburlo (Punto 2)	2890	2.9
Quebrada Turucucho	2910	8.47
Quebrada Pijumbi	3610	0.18

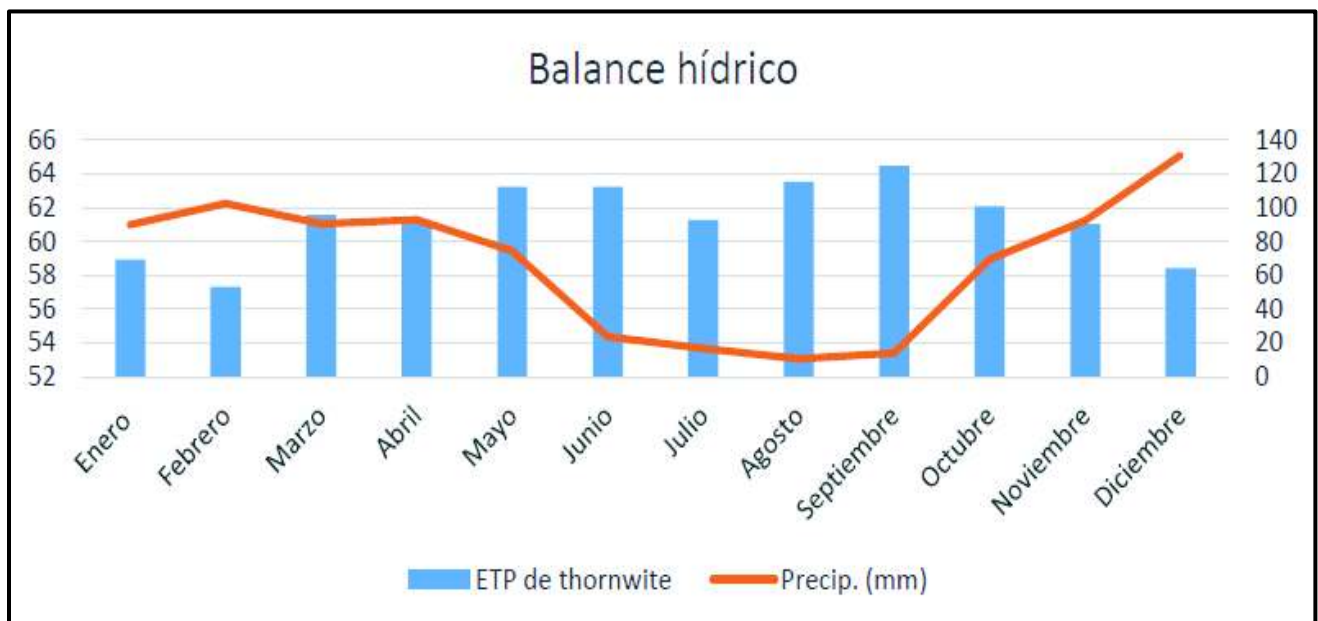
Fuente: (Avila, 2016)

De los cuerpos de agua superficial identificados, la Acequia La Banda (Punto 1) es la que se encontró más cercana al área donde se construyó la plataforma destinada para la fase de perforación exploratoria del proyecto. Aguas abajo de este punto se identificó una planta de tratamiento de agua para su aprovechamiento. De ahí que se aseguró, para el desarrollo de las operaciones de perforación una fuente de agua con un caudal de aproximadamente 3.65 l/s (Avila, 2016). Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta es la ubicación del campamento que se instalará durante la fase de perforación, con la finalidad de tener una provisión adecuada de este recurso para suplir el consumo requerido por el personal durante su estancia en la zona.

Durante el desarrollo de la fase de perforación exploratoria el consumo de agua debe registrarse con la finalidad de monitorear el eficiente consumo de este recurso. Se debe tomar en cuenta además, que se requerirá tratar y disponer el agua utilizada (campamento) para asegurar su calidad, este proceso deberá ser ejecutado de acuerdo a los parámetros ambientales establecidos en el plan de manejo ambiental desarrollado para el proyecto. De manera adicional, se puede considerar la construcción de piscinas de almacenamiento de agua en la locación destinada para las operaciones de perforación, con la finalidad de tener un volumen de agua de contingencia disponible en caso de que se presenten pérdidas totales de circulación y se pierda el fluido preparado para el desarrollo de las operaciones de perforación.

Debido a la importancia que tiene para este tipo de proyecto tener una fuente de agua disponible de manera permanente, determinar el balance hídrico de la zona de interés es una herramienta útil, ya que permitirá conocer de manera aproximada la disponibilidad de agua en diferentes etapas del año, contribuyendo de manera positiva a la gestión y planificación adecuada del proyecto.

Del análisis de elementos hidrológicos clave para la fase de perforación exploratoria desarrollada para el Proyecto Geotérmico Cachimbiro de (Avila, 2016), se obtuvo una referencia del balance hídrico del área; Ver Figura 11:



**Figura 11:** Balance Hídrico Mensual – Proyecto Chachimbiro

Fuente: (Avila, 2016)

En la figura se puede observar de manera referencial para la zona analizada las fases del año en las que el balance hídrico es superior, es decir, en el que se espera que el volumen de agua circulando en ríos, arroyos, canales, humedad del suelo, etc. sea mayor asegurando la presencia de este recurso para la fase de perforación. Para el caso del Proyecto Chachimbiro los valores más representativos se encuentran entre los meses de octubre y mayo.

Con la finalidad de tener una adecuada gestión de un proyecto geotérmico desde el punto de vista ambiental, el uso del agua al ser este un recurso tan sensible se deberá coordinar,

especialmente si el proyecto alcanza una fase de desarrollo con la finalidad de no afectar las demandas de agua local para consumo de la población, agricultura u otros propósitos.

### **4.3 Desafíos Sociales identificados durante la Fase de Perforación de Pozos Geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos**

En América del Sur se han presentado déficits persistentes en la prestación de servicios de energía, los que se han agravado ante el crecimiento demográfico de la región, relacionado principalmente a la alta concentración poblacional en áreas urbanas. El aprovechamiento y uso sostenible de los recursos renovables como el existente en el área geotérmica, contribuye de manera significativa a reducir las barreras de desarrollo, ayudando a mejorar la productividad de las economías de las regiones donde el recurso se encuentra presente.

En Ecuador, la ejecución de operaciones de perforación en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, desde el punto de vista social, implica desafíos importantes a nivel comunitario y del personal participante de las operaciones a ejecutarse como parte del proyecto. Se detallan a continuación los desafíos más destacados desde este punto de vista:

#### **4.3.1 Selección de Personal**

La mayor parte de las operaciones de perforación de pozos se realizan en la Región Amazónica, por lo que la selección de personal no considera aspectos como las condiciones de trabajo a gran altitud y bajas temperaturas. En la selección de personal para la ejecución de proyectos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos estos factores se deben considerar ya que son críticos para asegurar que el personal pueda desempeñar sus funciones sin que sus condiciones físicas y de salud se vean afectadas. Esta selección debe ser cuidadosa y deberá considerar algunos criterios como:

- **Lugar de Residencia:** es preferible dar preferencia a personal residente en áreas localizadas en altitudes iguales o superiores a 2500 msnm. Personal residente en áreas inferiores a 2500 msnm son susceptibles a experimentar efectos en su salud debido a la aparición del mal de altura. Para la ejecución de operaciones de perforación en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos se recomienda verificar el lugar de residencia del personal que participará en el proyecto prefiriendo residentes de las ciudades de la Región Sierra.

- **Revisión de Historia Clínica Ocupacional:** en el proceso de selección de personal se debe revisar que dentro de la historia clínica ocupacional del personal se identifiquen antecedentes patológicos importantes que pudieran comprometer su salud, además de identificar a aquellos trabajadores con hábitos tóxicos que impedirían realizar el trabajo con normalidad. Algunas enfermedades y hábitos que pueden comprometer la salud del personal en condiciones de gran altitud (Roberto de Angelis, 2011), son:
  - ✓ Enfermedades Cardiovasculares: Hipertensión arterial (HTA)
  - ✓ Enfermedades Pulmonares: Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC)
  - ✓ Enfermedades Hematológicas: Anemia
  - ✓ Enfermedades Neurológicas: Epilepsia
  - ✓ Enfermedades Metabólicas: Obesidad, Diabetes mellitus (DM)
  - ✓ Hábitos: Tabaquismo, alcoholismo.
  
- **Revisión de Antecedentes previos de Exposición:** en el proceso de selección también se debe identificar si el personal ha estado expuesto a condiciones de gran altitud y baja temperatura, y si han tenido efectos en su salud por la exposición a estas condiciones. El personal que es susceptible de volver a padecer sintomatología asociada a estas condiciones ambientales, no podrá trabajar bajo estas condiciones, ya que estaría poniendo en riesgo su salud.

#### **4.3.2 Trabajo a Gran Altitud y Áreas Remotas**

Durante la planificación de proyectos de perforación en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos se debe considerar que el personal disponga de las competencias técnicas necesarias para la ejecución de este tipo de operaciones visto que en el país no se trabaja usualmente a gran altitud donde los niveles de oxígeno pueden reducirse significativamente entre 35% y 50% comparado con las condiciones de trabajo en la Región Amazónica (Roberto de Angelis, 2011).

Debido a la localización del área de interés geotérmico en el Ecuador, los efectos de la altitud pueden ser experimentados por el personal, lo que implica reacciones fisiológicas que puede tener el cuerpo humano como respuesta a la exposición a la baja presión de oxígeno que se tiene

a gran altitud. En base a estos antecedentes, se debe trabajar de manera preventiva con el personal que pasó el proceso de selección para el proyecto a través de acciones como:

- **Entrenamiento:** que prepare al personal para reconocer los signos y síntomas ocasionados por la exposición a condiciones de gran altitud. Varios de los síntomas que se deben identificar por parte del personal son:

1. Mal de Altura: también conocido como Soroche; constituye reacciones fisiológicas del cuerpo humano como respuesta a la falta de oxígeno por las condiciones de altitud. El mal de altura se puede identificar con los siguientes indicadores (Instituto de Salud Publica Gobierno de Chile , 2015):

- ✓ Dolor de cabeza (cefalea)
- ✓ Dificultad para dormir (insomnio)
- ✓ Inapetencia
- ✓ Náuseas o vómitos
- ✓ Mareo o sensación de vértigo
- ✓ Dificultad respiratoria con esfuerzo
- ✓ Fatiga
- ✓ Frecuencia cardíaca rápida (taquicardia)

2. Edema agudo pulmonar de altitud (Complicación) - Aparición súbita: condición caracterizada por:

- ✓ Dificultad para respirar en reposo
- ✓ Tos y/o expectoración con sangre
- ✓ Respiración crepitante o burbujeante
- ✓ Dolor torácico
- ✓ Coloración azulada de la piel
- ✓ Febrícula
- ✓ Alteración del nivel de conciencia (en ocasiones)

3. Edema cerebral de altitud (Complicación) - Menos frecuente: condición caracterizada por:

- ✓ Alteración del sistema nervioso central con riesgo para la vida
- ✓ Dolor de cabeza intenso
- ✓ Pérdida de la coordinación de los movimientos
- ✓ Debilidad y pérdida del nivel de conciencia
- ✓ Desorientación
- ✓ Pérdida de memoria
- ✓ Alucinaciones
- ✓ Comportamiento psicótico e incluso coma

Por lo tanto, las condiciones de gran altitud pueden generar reacciones diversas en el personal asignado al proyecto por lo que este aspecto es crítico para la adecuada planificación y gestión del mismo por el efecto que puede tener en su ejecución el estado de salud del personal. También es importante considerar que esta condición puede agravarse en invierno y en las noches, al combinar la altitud con bajas temperaturas y viento a velocidad moderada en zonas montañosas como el área de interés analizada en el caso de Ecuador, haciendo que la temperatura efectiva sobre el cuerpo sea aún más baja. Este aspecto debe considerarse ya que, el frío afecta la capacidad de trabajo del personal y en algunos casos puede llegar a impedir realizar una actividad.

En las operaciones desarrolladas en el primer pozo perforado en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos se consideró el uso de equipo de protección personal térmico evitando que las bajas temperaturas tuvieran un alto impacto en la condición de salud del personal.

- **Desarrollo de un Plan de Aclimatación:** adaptar de manera gradual el cuerpo de una persona a las condiciones de gran altitud y temperatura con la finalidad de que pueda tolerar mejor sus efectos. Se recomienda realizar este proceso unos días antes de que el personal se traslade a la zona donde se ejecutarán las operaciones. De manera general, se puede tener una pauta de diez días de trabajo a gran altitud seguidos de un período similar de reposo al nivel del mar, siendo esta probablemente, la jornada de trabajo más aceptable para cumplir con un adecuado proceso de aclimatación para favorecer la correcta oxigenación de los trabajadores. Sin embargo, debido a la logística, planificación de tiempos y costos del proyecto se podría considerar un tiempo de aclimatación mínimo para el personal de 3 días al superar los 3000 msnm especialmente



si su lugar de residencia no es la Región Sierra del Ecuador y se encuentran cercanos al nivel del mar (Fundacion para la Prevencion de Riesgos Laborales, 2015).

El plan de aclimatación del personal se ejecutará de manera adecuada considerando los siguientes aspectos:

- ✓ Evitar enfriarse; llevar ropa abrigada, de preferencia térmica, y el EPP para zonas frías.
  - ✓ Beber mucho líquido, de preferencia agua (2-3L/día), garantizando hidratación permanente del personal.
  - ✓ Suministrar una dieta rica en azúcares y carbohidratos (fruta, entre otros) de fácil digestión.
  - ✓ Capacitar permanentemente al personal para el reconocimiento temprano de los signos y síntomas asociados al denominado mal de altura y sus posibles complicaciones.
- **Control Médico:** de manera similar a lo que pasa en las operaciones de perforación de pozos de petróleo y gas, en las operaciones de perforación de pozos geotérmicos se debe realizar un control médico permanente en locación. Sin embargo, en los proyectos de perforación que se desarrollen en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos el control médico permanente forma parte del programa de vigilancia de la salud de los trabajadores enfocada en aspectos específicos asociados a la condición de la posible presencia del mal de altura, como:
- ✓ Monitoreo de signos vitales cada 12 horas durante los 3 primeros días.
  - ✓ Administración de oxígeno extra de ser posible previa verificación de los signos vitales del trabajador.
  - ✓ En caso de que los síntomas asociados al mal de altura persistan o la condición empeore, se recomienda que el personal afectado salga de la locación y descienda rápidamente a una altitud menor (500 a 1000m.) o al centro de salud más cercano para realizar una evaluación (Fundacion para la Prevencion de Riesgos Laborales, 2015).

Finalmente, con el propósito de determinar la percepción del personal sobre su entorno laboral al trabajar, en condiciones de gran altitud y baja temperatura se realizó un cuestionario a una muestra del personal que participó en el Proyecto Chachimbiro. La muestra analizada (16 personas) corresponde a personal operativo que trabajó en diferentes frentes de las operaciones de perforación. Los resultados relevantes del cuestionario fueron:

En lo referente a selección del personal, de la consulta realizada (Anexo 1) se obtiene como resultado que alrededor del 69% de las personas consultadas tienen como lugar de residencia ciudades localizadas en la Región Sierra del Ecuador lo que contribuye en su proceso de adaptación a las condiciones de trabajo en el área de interés para este tipo de proyectos geotérmicos localizados a más de 2500 msnm. Sin embargo, es importante considerar que debido a que la mayor parte de operaciones de perforación se dan en la Región Amazónica un porcentaje importante del personal con experiencia se encuentra radicado en esta región. De los resultados obtenidos, el 31% del personal reside en la ciudad del Coca que se encuentra localizada a menos de 2500 msnm, por lo que el personal debe participar del plan de aclimatación, conocer los efectos del denominado mal de altura para identificarlos oportunamente y participar de un control médico preventivo continuo durante su estadía en el área.

En lo referente a las bajas temperaturas, el 88% del personal que fue consultado consideró que en su lugar de trabajo hacía mucho frío confirmando que en el área hay temperaturas bajas que pueden llegar a impactar la salud y consecuentemente el desempeño del personal en caso de no tomarse las previsiones adecuadas relacionadas con la dotación de equipo de protección personal, además de calefacción acorde a las condiciones climáticas del área de operación.

Al analizar el esfuerzo físico requerido del personal durante las operaciones de perforación, el 50% del personal consultado expresa que hace mucho esfuerzo físico durante la ejecución de su trabajo; de este porcentaje un 25% manifiesta que siempre tiene alta exigencia física. El personal que realiza alta exigencia física debe considerar y saber identificar las reacciones fisiológicas del cuerpo humano como respuesta a la falta de oxígeno por las condiciones de altitud, con la finalidad de prevenir efectos adversos en su salud por el esfuerzo físico que realizan.

De manera adicional, se consultó sobre la percepción de riesgo que tiene el personal y si considera que puede accidentarse durante la ejecución de su trabajo, como resultado se obtuvo que el 63% siempre está preocupado debido a la posibilidad de sufrir un accidente. En este caso es importante que se considere que las áreas de interés geotérmico en la Cordillera Occidental

de los Andes, se encuentran localizadas en zonas de difícil acceso por lo que se tiene que tener preparado y socializado un plan de emergencias y de evacuación médica en caso de que se requiera.

### **4.3.3 Relación con la Comunidad**

La explotación de recursos naturales implica siempre una interacción directa con el territorio, por lo que puede interferir el contexto social del área de interés del proyecto y constituirse en un importante desafío para la ejecución del mismo. La factibilidad del desarrollo de proyectos geotérmicos se puede ver condicionada ante elementos externos, siendo uno de los más representativos el entorno social; es decir, la relación con la comunidad y su aceptación del proyecto.

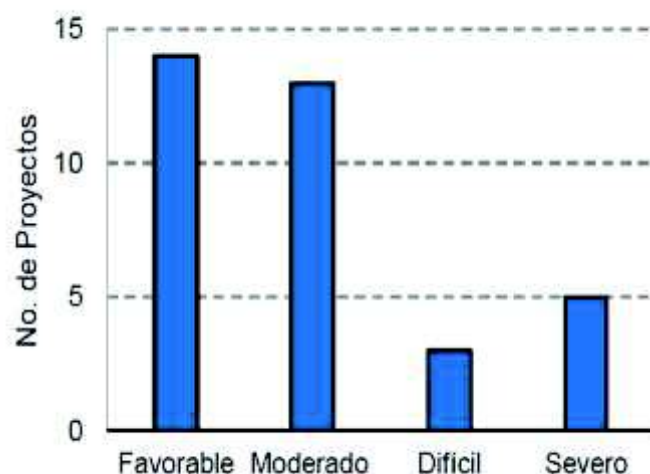
En América del Sur, la mayor parte de proyectos geotérmicos están asociados con actividad volcánica en la cordillera por lo que se localizan en zonas remotas. Esta ubicación, por lo general, se encuentra alejada de grandes zonas pobladas, pero corresponde a zonas de gran valor ecológico e hidrológico para la población. De manera adicional, se debe considerar que muchas de estas áreas de interés geotérmico pertenecen a comunidades indígenas, para las cuales la tierra representa su medio de sustento económico, además de tener gran significado cultural y espiritual (Bona & Coviello, 2016).

La CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) realizó una evaluación del contexto social de algunos proyectos geotérmicos en América del Sur, analizando la aceptabilidad de este tipo de proyectos por parte de las comunidades locales, instituciones, organizaciones y la sociedad en general.

La evaluación se realizó con información de 37 proyectos (Figura 12). De los datos obtenidos, el 77% de proyectos presentó una condición favorable o moderada para su desarrollo con una buena aceptación del entorno social o la posible ocurrencia de conflictos que pueden manejarse fácilmente. Sin embargo, 23% de estos proyectos presentó oposición social y el 14% se enfrenta a condiciones severas con una oposición social muy fuerte y condiciones de negociación muy difíciles. Se identifican como las áreas más complejas, a los territorios indígenas en el sur de Colombia y la zona del altiplano del sur de Perú y norte de Chile (Bona & Coviello, 2016).

### Contexto social

Clasificación	Cantidad	Porcentaje
Favorable	14	40,00
Moderado	13	37,14
Difícil	3	8,57
Severo	5	14,29
Total	35	100
Falta de Datos	2	



**Figura 12:** Clasificación de Proyectos Geotérmicos en América del Sur según condiciones del Contexto Social

Fuente: (Bona & Coviello, 2016)

En el caso del Ecuador, el estudio evaluó el Proyecto Geotérmico Chachimbiro localizado en la Cordillera Occidental de los Andes y categorizó la influencia del entorno social para el proyecto como moderada. Esta categoría implica que en la zona se pueden presentar potenciales conflictos, no obstante son manejables y permitirían su ejecución (Bona & Coviello, 2016). Por lo tanto, para la gestión de los proyectos se requiere la adecuada planificación de relaciones comunitarias en el área de influencia del proyecto.

El trabajo con la comunidad es crítico para la definición de la factibilidad de este tipo de proyectos por lo que debe enfocarse en la generación de vínculos estables siendo necesario contar con personal adecuado encargado del área de relaciones comunitarias. Es así, que para el caso del Proyecto Chachimbiro, el trabajo de relaciones comunitarias fue realizado por personal especializado de CELEC EP Termopichincha, que trabajó con las comunidades de Cochapata y Azaya, en la socialización del proyecto y plan de manejo ambiental al ser estas las poblaciones ubicadas en la zona de influencia del mismo (CELEC EP Termopichincha, 2017).

Este proceso de socialización permitió que la comunidad conozca las medidas a aplicarse con la finalidad de preservar el entorno y recursos de la zona de influencia del proyecto, así como las actividades programadas como parte del proyecto que contribuyen a mejorar sus condiciones de vida. El trabajo que se realiza con la comunidad es importante con la finalidad de que conozcan el proyecto y los beneficios que este desarrollo tendrá para las comunidades y su vida diaria.

Como parte de las acciones realizadas de cooperación con la comunidad en la zona de interés se destacan: jornadas de atención médica y odontológica, socialización del proyecto y plan de manejo ambiental, talleres de prácticas de higiene y manipulación de alimentos. Todos estos esfuerzos se desarrollaron con la finalidad de contribuir con la comunidad y dar cumplimiento al Plan de Manejo Ambiental del Proyecto Geotérmico Chachimbiro, que tiene como uno de sus ejes fundamentales el relacionamiento comunitario a través de la generación de oportunidades de empleo de mano de obra no calificada para los habitantes de las comunidades cercanas (CELEC EP Termopichincha, 2017).



**Figura 13:** Relaciones Comunitarias Proyecto Geotérmico Chachimbiro – Ecuador.

Fuente: (CELEC EP Termopichincha, 2017)

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- La energía geotérmica se constituye en una fuente de energía eléctrica renovable, accesible y fiable. El Ecuador, al encontrarse en el cinturón de fuego del Pacífico, puede aprovechar este importante recurso para la generación de energía eléctrica y procesos productivos, además de fines turísticos.
- La identificación de los desafíos representativos de la fase de perforación en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos constituye un elemento crítico para el éxito de un proyecto geotérmico; esta fase corresponde a alrededor del 15% del costo total del proyecto en la etapa exploratoria, por lo que impacta de manera significativa en su éxito y desarrollo futuro.
- Los desafíos técnicos, físicos-ambientales, sociales del proyecto deben ser identificados en la fase inicial del proyecto con la finalidad de realizar una gestión y planificación cuidadosa de todas las etapas de operación posteriores, considerando especialmente los efectos que puede tener en el personal y equipo el trabajo en condiciones de gran altitud, bajas temperaturas y locaciones remotas.
- De los desafíos técnicos identificados para el desarrollo de proyectos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, los factores determinantes para su éxito son la selección del taladro y la ejecución de operaciones de perforación con pérdida total de circulación.
- La selección del taladro y la ejecución de operaciones con pérdida total de circulación deberán ser superados al encontrar un balance entre la capacidad del equipo para operar en esta área y una planificación adecuada de contingencias para trabajar con pérdidas totales en la fase de perforación.
- Los desafíos físico-ambientales más relevantes de los proyectos geotérmicos son las condiciones de temperatura y uso de agua.
- La identificación de una fuente de agua para su uso durante la ejecución de las operaciones es indispensable, ya que este recurso se utiliza en la etapa de perforación de manera permanente como suministro vital para el personal y la ejecución de las operaciones. De ahí que, se debe contar con los permisos correspondientes, así como trabajar por un consumo eficiente durante la ejecución del proyecto.

- Los desafíos identificados en la parte social, condiciones físico - psicológicas del personal fueron: la selección del personal, trabajo a gran altitud y áreas remotas además de la relación con la comunidad. Los tres desafíos identificados son cruciales para la adecuada gestión del proyecto ya que sin el aporte del componente humano y soporte comunitario no se podría ejecutar el proyecto.
- El trabajo a gran altitud necesita de un proceso de aclimatación y monitoreo médico continuo, con la finalidad de que se pueda identificar oportunamente cambios en el estado de salud del personal.
- El proceso de socialización del proyecto y buen manejo de las relaciones comunitarias es fundamental para evitar conflictos con la población de la zona de influencia del proyecto, especialmente en temas relacionados a la preservación del entorno y uso de recursos naturales para la ejecución del proyecto.
- La perforación de pozos geotérmicos en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos implica grandes desafíos. Sin embargo, la curva de aprendizaje alcanzada y la tecnología utilizada en las operaciones de perforación de pozos de petróleo y gas en el país, constituyen un gran soporte para la ejecución de este proyecto que busca aportar a través de la energía geotérmica al cambio de la matriz energética del Ecuador.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Para la selección de taladros, analizar los equipos disponibles en el mercado con la finalidad de que el equipo permita alcanzar la profundidad propuesta, así como que sus dimensiones se adapten al espacio disponible en el área de interés geotérmico, contribuyendo con la logística y riesgos asociados a la movilización y operación del taladro en zonas remotas.
- Por las condiciones climáticas y temperatura predominante en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, tanto el personal como los equipos deben estar adecuadamente preparados para evitar problemas de salud, adaptación, funcionamiento y logísticos que afecten la ejecución en tiempo y costo de los proyectos geotérmicos.

- En la etapa de planificación del proyecto se debe identificar una fuente de agua cercana a la zona del proyecto geotérmico y establecer el proceso de monitoreo eficiente del consumo de este recurso para no afectar las demandas de consumo de la población, agricultura u otros propósitos.
- Para el desarrollo de las operaciones de perforación en la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos se verificará el lugar de residencia del personal prefiriendo, en lo posible, residentes de ciudades de la Región Sierra, con la finalidad de que su proceso de adaptación se de con mayor facilidad.
- Desarrollar un plan de aclimatación para adaptar de manera gradual al personal a las condiciones de gran altitud y bajas temperaturas, con la finalidad de que pueda realizar su trabajo y tolerar mejor los efectos de las condiciones del área previniendo problemas de salud.
- El trabajo de relaciones comunitarias se realizará a través de personal adecuado, que fortalezca la relación entre las comunidades del área de influencia y el proyecto, mediante su adecuada socialización y difusión de los beneficios que el mismo traerá para las comunidades y su vida diaria.



## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Andres Lloret, J. L. (2014). *Geothermal Development in Ecuador, History, Current Status and Future*. El Salvador : United Nations University - La Geo SA.
- Avila, M. A. (2016, Enero). Análisis de Elementos Hidrológicos y Meteorológicos Clave para la Fase de Perforación Exploratoria del Proyecto Geotérmico Chachimbiro utilizando Indicadores Ambientales. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Internacional SEK.
- Barba, D. (2017, Mayo). *GRADIENTE GEOTERMAL DE LAS CUENCAS DE ANTE-ARCO DEL ECUADOR*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/316973237\\_GRADIENTE\\_GEOTERMAL\\_DE\\_LAS\\_CUENCAS\\_DE\\_ANTE-ARCO\\_DEL\\_ECUADOR](https://www.researchgate.net/publication/316973237_GRADIENTE_GEOTERMAL_DE_LAS_CUENCAS_DE_ANTE-ARCO_DEL_ECUADOR)
- Bona, P., & Coviello, M. (2016, Abril). Valoración y Gobernanza de los Proyectos Geotérmicos en América del Sur. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Capuano, L. E. (2014, Noviembre 21). Geothermal Well Drilling, the differences between Geothermal Drilling and Oil and Gas Drilling. Capuano Engineering Company.
- CELEC EP (2018). *Chachimbiro Proyecto Geotermico* . Retrieved from <https://m.youtube.com/watch?v=IHA11xH5fSc>
- CELEC EP Termopichincha (2016). *Generación No Convencional* . Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/retos-empresariales/proyectos-de-generacion-no-convencional>
- CELEC EP Termopichincha (2017, Febrero 16). *Socialización del Plan de Manejo Ambiental del Proyecto Chachimbiro*. Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/noticias-termopichincha/467-socializacion-del-plan-de-manejo-ambiental-del-proyecto-chachimbiro>
- CELEC EP Termopichincha (2017, Mayo 20). *Termopichincha apoya a la comuna de Azaya con taller de prácticas de higiene y manipulación de alimentos*. Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/retos-empresariales/proyectos-de-generacion-no-convencional/proyecto-geotermico/chachimbiro>

- Coviello, M. F. (2000, Junio 23). Estudio para la Evaluacion del Entorno del Proyecto Geotermico Binacional "Tufino-Chiles-Cerro Negro". Comision Economica para America Latina y el Caribe (CEPAL).
- Deloitte (2008). *Department of Energy –Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Geothermal Project*. Deloitte.
- Drilmecc - Drilling Technologies (2017). *Effects of Altitude on Hydraulic Pumps* . Drilmecc.
- Energy Sector Management Assistance Program (2012, Junio). Manual de Geotermia: Como Planificar y Financiar la Generacion de Electricidad . Washington, Estados Unidos : Grupo del Banco Mundial.
- Erices, S. A. (2017, Enero 31). Estudio de Factibilidad para la Instalacion de una Central Geotermica en Chile . Concepcion, Chile: Universitat Politecnica de Catalunya .
- Fundacion para la Prevencion de Riesgos Laborales (2015). Buenas Practicas para la prevencion de Riesgos Laborales de los Trabajadores Expuestos a Condiciones Climatologicas Adversas. Fundacion para la Prevencion de Riesgos Laborales.
- Instituto de Salud Publica Gobierno de Chile (2015, Junio). Trabajo en Altura Geografica en Chile . Chile : Instituto de Salud Publica Gobierno de Chile .
- Instituto Nacional de Eficiencia Energetica y Energias Renovables (2015). *Plan de Lineas de Investigacion para el Desarrollo de la Geotermia*. Quito: INER - Instituto Nacional de Eficiencia Energetica y Energias Renovables.
- Marzolf, N. (2007, Diciembre). Emprendimiento de la Energia Geotermica en Colombia. Medellin, Colombia: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Massachusetts Institue of Technology (2006). *The Future of Geothermal Energy* . Idaho: Massachusetts Institue of Technology .
- McCulloch, J., & Gastineau, J. (2003, Octubre 12-15). Life Cycle Modelling of Wellbore Cement Systems Used for Enhanced Geothermal Systems development. Coso Operating Company.
- Ministerio del Ambiente (2018). Areas Protegidas Region Andes . Ecuador : <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/todas-areas-protegidas-por-region?t=S>.
- OLADE (n.d.). Sistema de Informacion Economico de Energia .

- P. Dumas, M. A. (2013). *Report on Geothermal Drilling* . Geoelec.
- De Angelis, M. H. (2011, Marzo 1-3). Challenges of Drilling in the Chilean Antiplano. Amsterdam, Netherlands: SPE/IADC.
- Sandia National Laboratories. (2010, Diciembre). Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling. Albuquerque, New Mexico, United States: Sandia National Laboratories.
- Torres, L. A., & Urquiza, M. (2013, Diciembre 7). Evaluacion del Estudio de Prefactibilidad Inicial Proyecto Geotermico de Chachimiro - Ecuador. Ciudad Universitaria: Programa Regional de Entrenamiento Geotermico (PREG).
- Valencia, M. (2013, Abril 18). Taller de Energia Geotermica . Ecuador : CELEC EP.
- Vollmar, V. W. (2013). *Geothermal Drilling Best Practices: The Geothermal translation of conventional drilling recommendations - main potential challenges*. Bochum, Germany: IGA Academy.

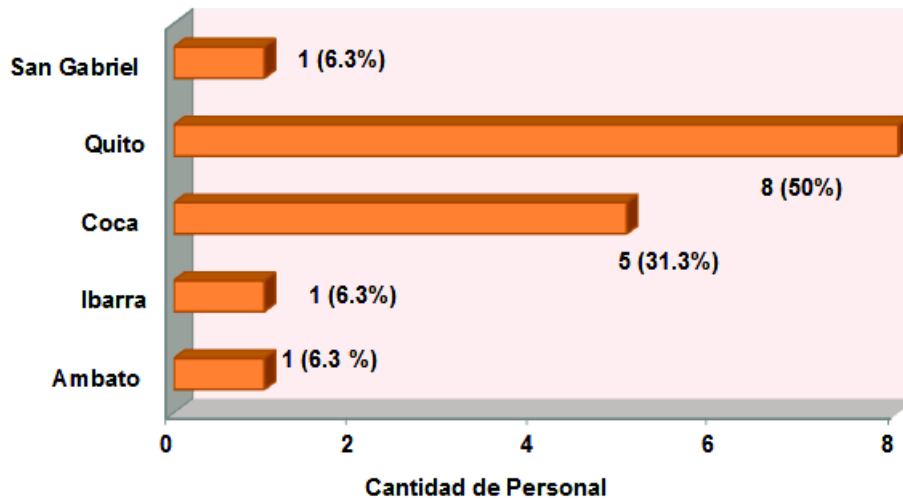
## 7. ANEXOS

### RESULTADOS DEL CUESTIONARIO REALIZADO A PERSONAL DEL PROYECTO CHACHIMBIRO

#### 1. Cuál es su lugar de residencia actual?

CIUDAD	CANTIDAD	PORCENTAJE
Ambato	1	6.3%
Ibarra	1	6.3%
Coca	5	31.3%
Quito	8	50.0%
San Gabriel	1	6.3%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

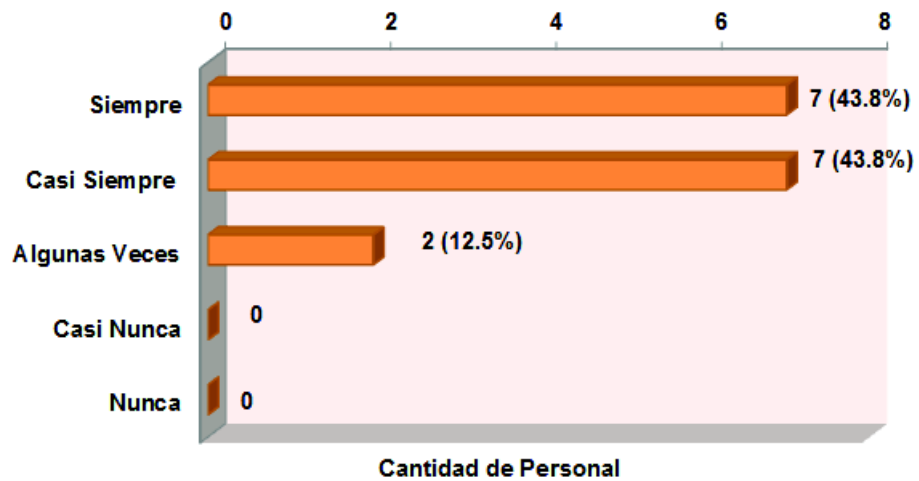
#### CIUDAD DE RESIDENCIA DEL PERSONAL



#### 2. En su lugar de trabajo actual (Locación Proyecto Geotérmico Chachimbiro) considera que hace mucho frio?

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	7	43.8%
Casi Siempre	7	43.8%
Algunas Veces	2	12.5%
Casi Nunca	0	0.0%
Nunca	0	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

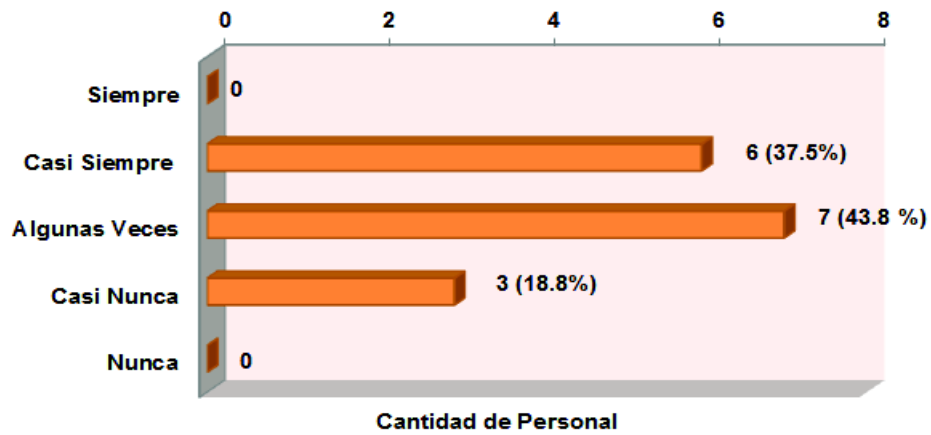
**PERCEPCION DE TEMPERATURA DEL SITIO DE TRABAJO**



3. Considera que el ruido en su lugar de trabajo (Locación Proyecto Geotérmico Chachimbiro) es molesto?

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	0	0.0%
Casi Siempre	6	37.5%
Algunas Veces	7	43.8%
Casi Nunca	3	18.8%
Nunca	0	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

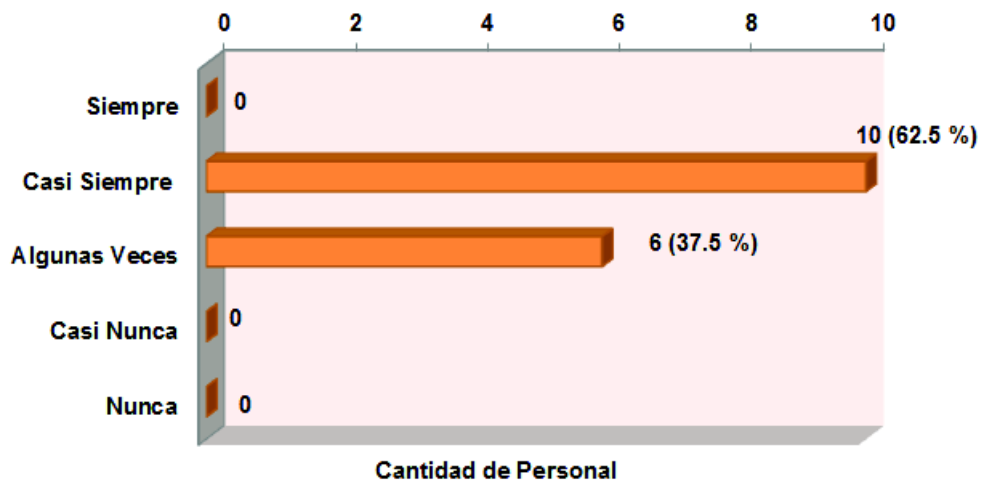
**PERCEPCION DEL RUIDO EN EL LUGAR DE TRABAJO**



**4. El desarrollo de su trabajo incluye horario nocturno?**

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	0	0.0%
Casi Siempre	10	62.5%
Algunas Veces	6	37.5%
Casi Nunca	0	0.0%
Nunca	0	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

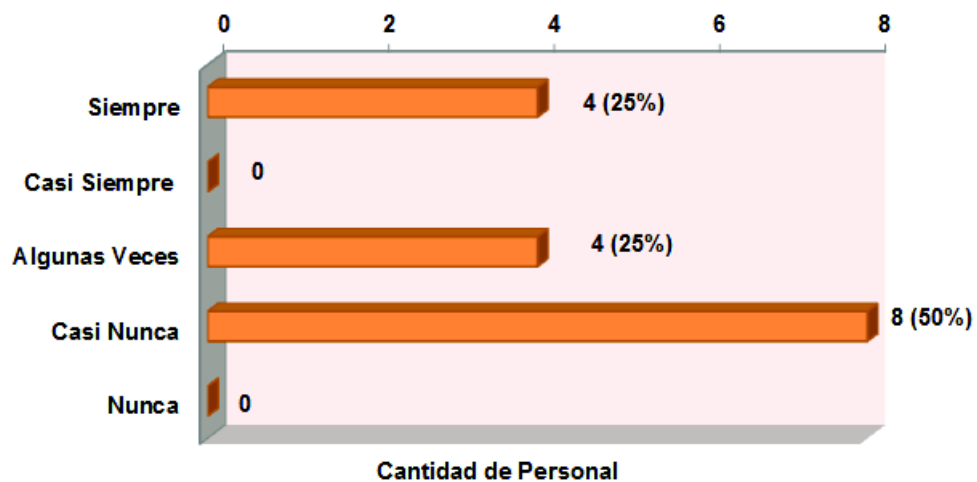
**TRABAJO NOCTURNO DEL PERSONAL**



5. El trabajo que realiza le exige hacer mucho esfuerzo físico?

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	4	25.0%
Casi Siempre	0	0.0%
Algunas Veces	4	25.0%
Casi Nunca	8	50.0%
Nunca	0	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

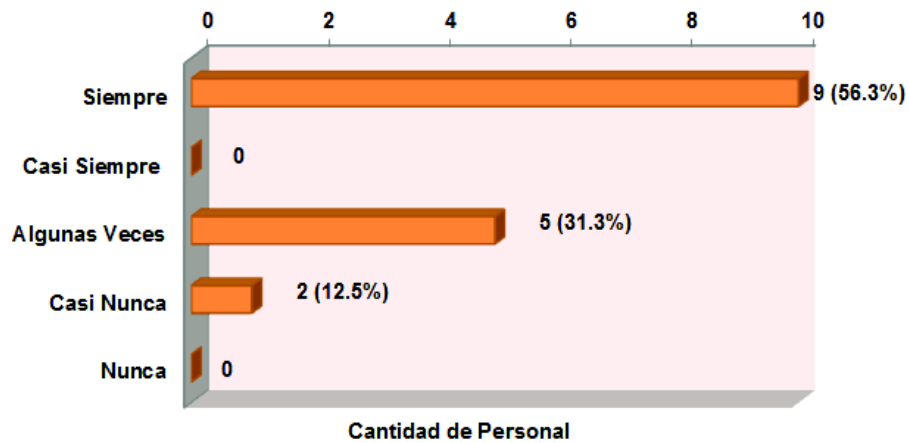
**ESFUERZO FISICO REQUERIDO PARA EL TRABAJO**



6. Durante el desarrollo de su trabajo le preocupa accidentarse?

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	10	62.5%
Casi Siempre	0	0.0%
Algunas Veces	5	31.3%
Casi Nunca	1	6.3%
Nunca	0	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

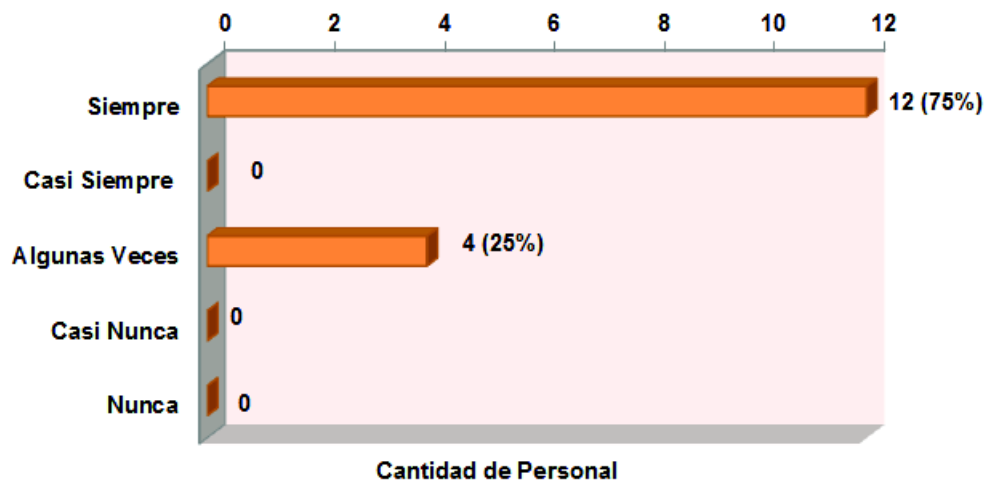
**PERCEPCION DE ACCIDENTABILIDAD EN EL TRABAJO**



7. Como parte de sus funciones, es responsable por la seguridad de otros?

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	12	75.0%
Casi Siempre	0	0.0%
Algunas Veces	4	25.0%
Casi Nunca	0	0.0%
Nunca	0	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

**RESPONSABILIDAD POR LA SEGURIDAD LABORAL**

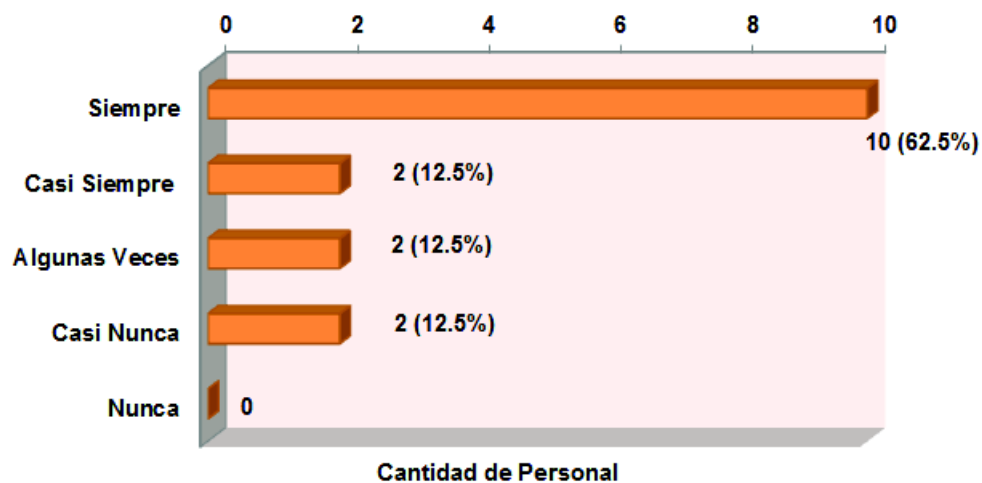




8. Recibe capacitación útil para realizar su trabajo?

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	10	62.5%
Casi Siempre	2	12.5%
Algunas Veces	2	12.5%
Casi Nunca	2	12.5%
Nunca	0	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

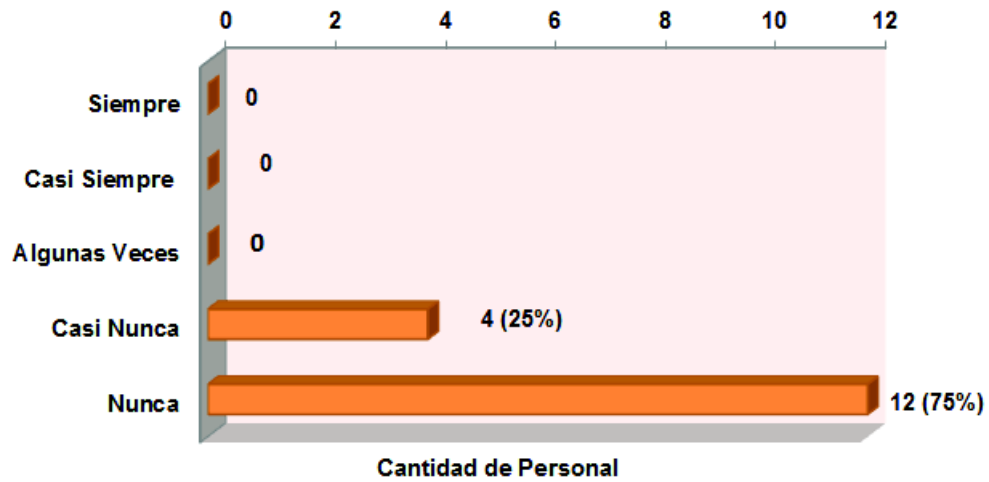
**CAPACITACION DEL PERSONAL**



9. En su trabajo se presentan situaciones en las que debe pasar por alto normas y procedimientos?

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	0	0.0%
Casi Siempre	0	0.0%
Algunas Veces	0	0.0%
Casi Nunca	4	25.0%
Nunca	12	75.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

### APLICACION DE NORMAS O PROCEDIMIENTOS



### 10. Le agrada su ambiente de trabajo?

RESPUESTA	CANTIDAD	PORCENTAJE
Siempre	9	56.3%
Casi Siempre	4	25.0%
Algunas Veces	3	18.8%
Casi Nunca	0	0.0%
Nunca	0	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>100%</b>

### AMBIENTE DE TRABAJO DEL PERSONAL

