

Evaluación De Brocas Usadas En Perforación De Yacimientos Petroleros Y Su Aplicabilidad A
Pozos Geotérmicos De Alta Entalpía En Colombia

Danna Brigith Lasso Ordoñez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Wilson Raul Carreño Velasco

Ingeniero de petróleo y máster en diseño, gestión y dirección de proyectos

Codirectores

Jhon Eduard Moreno Diaz

Ingeniero de petróleo

Libardo Armando Muñoz Salinas

Ingeniero de petróleo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Este logro, se lo quiero agradecer, infinitamente a Dios, porque él puso en mi vida la confianza y perseverancia suficiente para alcanzar este objetivo de vida sin desfallecer, también a mi papá Mauricio, mi mamá Lucero y mi hermano Stiven, sin ellos no habría podido formarme como una persona con valores y sueños que llevaron a la toma de buenas decisiones, entre ellas estudiar una carrera profesional, en donde con altos y bajos pude finalizar, su amor y apoyo incondicional fueron mi motor en cada parcial y actividad académica, ya que a pesar de la distancia, siempre estaban con sus palabras alentadoras y llenas de bonitos consejos, padres gracias por demostrarme el verdadero significado de una familia y que en esta vida todo es posible con disciplina y amor a las cosas.

A mi novio Janner, por su apoyo y motivación diaria, por extenderme su mano, aconsejarme incondicionalmente, en todo momento y situación.

Gracias a todos esos amigos y compañeros, que me ofrecieron una amistad sincera y me brindaron un plato de comida en esas noches largas de estudio, sin ustedes no hubiera sido posible encontrar el balance entre la paz y la presión universitaria, Laura, Ian, Erit, Andrea, Tatiana, Nicolas, Liz, Karen, Juliana, Melanie, Dayana, Salomé y Katy, mil gracias por haber sido parte de mi etapa universitaria, los llevaré con cariño en mis más grandes recuerdos de vida.

A mi director Máster Wilson Carreño y codirectores los ingenieros Jhon Eduard Moreno, Libardo Muñoz, por ser mis maestros en todo este proceso de investigación, haciendo un acompañamiento profesional para obtener excelentes resultados.

Agradecimientos

Agradezco a mi Universidad Industrial de Santander y a mi apreciada Escuela de Ingeniería de Petróleos por haberme brindado herramientas necesarias de conocimiento, como fueron profesores y grupos de investigación, entre ellos el Grupo De Investigación De Estabilidad De Pozos, con el cual viví experiencias muy alimentadoras en el simposio.

A Baker Hughes, por haberme colaborado con alguna información, que me fue de gran ayuda al momento de la redacción, ya que con algunos de sus tecnicismos se me facilitó la comprensión de la nueva línea de brocas para yacimientos geotérmicos.

Gracias a cada profesor que se tomó un papel de ser esa persona consejera con la cual adquirí, formarme como una profesional íntegra, permitiéndome aprender de cada uno de ellos su grandeza profesional y humana.

Al Ingeniero Wilson Raul Carreño, por su motivación e interés desde un principio para generar en mí el interés por descubrir lo importante del área de la perforación, por todo su apoyo, instrucciones y tiempo, para poder desarrollar mi trabajo de grado con su ayuda. Al ingeniero Libardo Muñoz, por ofrecerme bases, tiempo y acompañamiento en este entregable junto al proceso de sustentación final.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Marco teórico	15
1.1 Brocas de perforación	16
1.1.1 Brocas de arrastre.....	17
1.1.2 Brocas de compactos de diamante policristalino (PDC).....	18
1.1.3 Brocas de corte de rodillos (Tricónica).....	18
1.1.4 Brocas híbrida	20
1.2 Tipos de roca.....	21
1.2.1 Yacimientos geotérmicos en rocas incompletamente solidificadas.....	23
1.2.2 Yacimientos geotérmicos de roca caliente seca.....	23
1.2.3 Yacimientos geotérmicos en condiciones hipercríticas.....	23
1.2.4 Yacimientos geotérmicos geo-presurizados.....	24
1.2.5 Yacimientos geotérmicos magmáticos	24
1.2.6 Yacimientos geotérmicos marinos.....	25
1.3 Sistema geotérmico	25
1.3.1 Fuente de calor	26
1.3.2 Reservorio geotérmico	27
1.3.3 Sistema de suministro de agua.....	27
1.3.4 Capa sello.....	27
1.4 Tipos de yacimientos geotérmicos.....	28
1.4.1 Yacimientos de temperatura alta.....	29

1.4.2	Yacimientos de temperatura media.....	29
1.4.3	Yacimientos de temperatura baja.....	30
1.4.4	Yacimientos de temperatura muy baja.....	30
2.	Objetivos.....	32
2.1	Objetivo general.....	32
2.2	Objetivos específicos	32
3.	Geología de formaciones de alta entalpía en Colombia.....	33
3.1.	Áreas y bloques geotérmicos de Colombia.....	34
3.1.1.	Área geotérmica de Paipa	35
3.1.2	Área geotérmica de San Diego	37
3.1.3	Área geotérmica del Volcán Paramillo De Santa Rosa.....	39
3.1.4	Área geotérmica de Nereidas -Botero Londoño	41
3.1.5	Área geotérmica Volcán Cerro Machín.....	42
3.1.6	Área geotérmica de La Caldera Del Paletará	43
3.1.7	Área geotérmica del Volcán Azufral.....	44
3.2	Litologías mundiales de yacimientos geotérmicos	45
3.2.1	Complejo Geotérmico The Geyser – Estados Unidos	46
3.2.2	Central de energía geotérmica Cerro Prieto.....	46
3.2.3	Complejo geotérmico Larderello – Italia.....	46
3.2.4	Central de energía geotérmica Olkaria – Kenia	47
3.2.5	Complejo geotérmico Makban – Filipinas.....	47
3.2.6	Complejo geotérmico Salton Sea – Estados Unidos.....	47
3.2.7	Complejo geotérmico Hellisheidi – Islandia.....	48

3.2.8 Complejo geotérmico Tiwi – Filipinas	48
3.2.9 Complejo geotérmico Darajat,	48
3.2.10 Complejo geotérmico Malitbog. 233 MW. Filipinas	49
4. Brocas de perforación y parámetros	49
4.1 Parámetros de perforación convencionales	50
4.2 Parámetros de perforación para yacimientos geotérmicos.....	51
4.3 Variables de operación.....	52
4.3.1 Parámetro τ	53
4.3.2 Energía mecánica específica (MSE)	54
4.3.3 Revoluciones por minuto (RPM)	56
4.3.4 Tasa de penetración (ROP)	56
4.3.5 Presión diferencial	57
4.3.6 Presión hidrostática (HP)	57
4.3.7 Caudal o flujo (Q)	58
4.3.8 Peso sobre la broca (WOB).....	58
4.3.9 Gradiente de presión	60
4.3.10 Área de flujo total (TFA)	61
4.3.11 Peso o densidad del lodo (MW).....	62
4.3.12 Cálculos de hidráulica de la broca (hhpb).....	62
4.3.12.1 Cálculo de caída de presión en la broca.....	64
4.4 Características de brocas de perforación.....	64
4.4.1 Brocas PDC.....	65
4.4.1.1 Características de las brocas.	66

4.4.1.1.1 Corona o cuerpo de la broca.	67
4.4.1.1.2 Aletas.	67
4.4.1.1.3 Espiga (Shank).	67
4.4.1.1.4 Boquillas.	67
4.4.1.1.5 Blank.	67
4.4.1.1.6 Canales de limpieza.	68
4.4.1.1.7 Limpieza hidráulica.	68
4.4.1.2 Diseño de brocas PDC.	69
4.4.1.2.1 Perfil de la corona.	69
4.4.1.2.2 Cortadores fijos.	70
4.4.1.2.3 Conos.	72
4.4.1.2.4 Nariz.	72
4.4.1.2.5 Hombro.	73
4.4.1.2.6 Boquilla.	73
4.4.1.2.7 Protección de calibre.	73
4.4.1.3 Caso estudio.	75
4.4.2 Brocas Tricónicas.	75
4.4.2.1 Diseño de brocas Tricónicas.	76
4.4.2.1.1 Tipos de cortadores.	77
4.4.2.1.2 Mecanismo de corte.	78
4.4.2.1.3 Cojinetes.	78
4.4.2.1.4 Sistemas de rodamiento no sellados.	79
4.4.2.1.5 Sistemas de rodamiento de cojinetes sellados.	79

4.4.2.1.5 Cuerpo de la broca.	81
4.4.3 Brocas Híbridas.....	83
4.4.3.1 Ventajas de las brocas Híbridas	83
4.4.3.2 Híbridas Kymera.	84
4.5 Línea de brocas para yacimientos geotérmicos	84
4.5.1 Brocas Xplorer	85
4.5.1.1 Brocas Thermoblade.	86
4.5.2 PDC geotérmica	87
4.5.3 Híbrida Kymera geotérmica.....	87
4.5.4 Tricónica geotérmica	87
4.6 Ejemplos de pozos perforados con brocas PDC, Híbrida Y Tricónica.....	88
4.6.1 Venelle-2 - broca especial PDC	88
4.6.1 IDDP-2 – PDC e Híbridas.....	89
5. Catálogo	90
6. Conclusiones	97
7. Recomendaciones	99
Referencias Bibliográficas	100

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Clasificación de rocas</i>	22
Tabla 2 <i>Clasificación por entalpía</i>	31
Tabla 3 <i>Áreas y bloques geotérmicos</i>	34
Tabla 4 <i>Compresibilidad de la roca</i>	53
Tabla 5 <i>Características de los cortadores</i>	71
Tabla 6 <i>Ángulo de ataque de la broca PDC</i>	72
Tabla 7 <i>Código IADC para brocas PDC</i>	74
Tabla 8 <i>Estructura de corte</i>	77
Tabla 9 <i>Tipos de cojinetes</i>	79
Tabla 10 <i>IADC de brocas tricónicas</i>	82
Tabla 11 <i>Diseño de pozo tipo para yacimientos geotérmicos en Colombia</i>	91
Tabla 12 <i>Catálogo de brocas para yacimientos geotérmicos</i>	92
Tabla 13 <i>Características de brocas PDC</i>	95
Tabla 14 <i>Características de brocas tricónicas</i>	96

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Broca de arrastre</i>	17
Figura 2 <i>Broca de compactos de diamante policristalino (PDC)</i>	18
Figura 3 <i>Broca de corte de rodillos</i>	19
Figura 4 <i>Broca híbrida o combinada</i>	20
Figura 5 <i>Ciclos de rocas</i>	21
Figura 6 <i>Composición Química de la Tierra</i>	26
Figura 7 <i>Temperatura global de la superficie terrestre y oceánica</i>	28
Figura 8 <i>Localización Del Área Geotérmica Paipa</i>	36
Figura 9 <i>Localización del área geotérmica de San Diego</i>	38
Figura 10 <i>Localización geotérmica de Santa Rosa</i>	40
Figura 11 <i>Localización geotérmica Nereidas-Botero Londoño</i>	42
Figura 12 <i>Localización del área geotérmica del volcán Cerro Machín</i>	43
Figura 13 <i>Localización del área geotérmica de la Caldera del Paletará</i>	44
Figura 14 <i>Localización geotérmica del Azufral</i>	45
Figura 15 <i>Profundidad vs presión</i>	60
Figura 16 <i>Partes de una broca PDC</i>	66
Figura 17 <i>Partes generales de una broca PDC</i>	68
Figura 18 <i>Geometría del cortador fijo</i>	70
Figura 19 <i>Mecanismo de corte en las brocas PDC</i>	71
Figura 20 <i>Boquillas de rosca</i>	73

Figura 21	<i>Partes de una broca tricónica</i>	76
Figura 22	<i>Mecanismos de corte en broca tricónica</i>	78
Figura 23	<i>Estructura de un cojinete sellado</i>	80
Figura 24	<i>Broca cónica de rodillo premium xplorer</i>	86
Figura 25	<i>Broca thermoblade</i>	87

Resumen

Título: Evaluación De Brocas Usadas En Perforación De Yacimientos Petroleros Y Su Aplicabilidad A Pozos Geotérmicos De Alta Entalpía En Colombia*

Autor: Danna Brigith Lasso Ordoñez**

Palabras Clave: Brocas, yacimientos geotérmicos, alta entalpía, perforación.

Descripción

El estudio, de posibles diseños de brocas presentes en la industria del petróleo que puedan perforar yacimientos geotérmicos, soportando la energía de fricción sin afectar el rendimiento de la broca es algo desafiante hoy en día; debido al cambio energético que se plantea mundialmente. La veta madre de la energía geotérmica se encuentra entre 10560 ft y 63360 ft por debajo de la superficie de la Tierra, donde la roca está caliente (las temperaturas superan los 374 °C o 704 °F que si se pudiera bombear agua al área se volvería supercrítica, una fase similar al vapor con la que la mayoría de la gente no está familiarizada (Jorquera , 2021). Sin embargo, aunque sea algo nuevo, Colombia también debe buscar nuevos métodos de exploración de energías que ayuden a la economía del país, actualmente en la literatura no hay mucha información sobre la determinación de brocas optimas en formaciones colombianas, siendo así, es necesario generar un estilo de catálogo que pueda ser la base de futuras perforaciones en yacimientos geotérmicos, ofreciendo información primordial de las generalidades en brocas actuales del mercado petrolero y considerar las dificultades que se puedan presentar al momento de perforar, para con esto prolongar la vida útil de las brocas propuestas, optimizando el costo por pie de los proyectos en estos ambientes desafiantes de Colombia con alta entalpía.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleos. Ingeniería de petróleos. Director Wilson Raul Carreño Velasco. Ingeniero de Petróleos y Máster en Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos Codirector Jhon Eduard Moreno Diaz Ingeniero de Petróleos, Libardo Armando Muñoz Salinas Ingeniero De Petróleos.

Abstract

Title: Evaluation Of Drill Bits Used In Oilfield Drilling And Their Applicability To High Enthalpy Geothermal Wells In Colombia *

Author(s): Danna Brighth Lasso Ordoñez **

Key Words: Drill bits, geothermal reservoirs, high enthalpy, drilling.

Description

The study of possible drill bit designs in the oil industry that can drill geothermal reservoirs, withstanding frictional energy without affecting the performance of the drill bit is challenging today; due to the energy shift that is taking place worldwide. The mother lode of geothermal energy lies between 10560 ft and 63360 ft below the Earth's surface, where the rock is hot (temperatures exceed 374 degrees C or 704 F that if water could be pumped into the area it would become supercritical, a steam-like phase that most people are not familiar with. (Jorquera, 2021). However, although it is something new, Colombia must also look for new energy exploration methods that help the country's economy, currently in the literature there is not much information on the determination of optimal drill bits in Colombian formations, being so, it is necessary to generate a catalog style that can be the basis for future drilling in geothermal reservoirs, offering primary information on the generalities of the current drill bits in the oil market and considering the difficulties that may arise at the time of drilling, in order to extend the life of the proposed bits, optimizing the cost per foot of the projects in these challenging environments of Colombia with high enthalpy.

* Degree Work

**School of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Petroleum Engineering. Director Wilson Raul Carreño Velasco. Petroleum Engineer and Master in Design, Management and Project Management Co-Director Jhon Eduard Moreno Diaz Petroleum Engineer, Libardo Armando Muñoz Salinas Petroleum Engineer.

Introducción

Globalmente se ha generado un nuevo desafío enfocado en la generación de tecnologías limpias, como es la llamada “Transición energética”. La energía geotérmica hace parte de esta transición y se pueden encontrar someras o profundas, se obtienen por medio de aprovechamiento del calor al interior de la tierra; debido a la diferencia de temperatura es un reto obtener este recurso energético, ya que las energías fósiles que se habían estudiado hasta la actualidad son completamente diferentes en cuanto a condiciones químicas y físicas.

La perforación de estos yacimientos tiene condiciones similares a las de la industria del petróleo y gas en escenarios convencionales, pero hay algunas características que son distintivas en los yacimientos geotérmicos, como dureza de las rocas, tasa de producción, la vida útil del pozo y también otros factores económicos.

Por lo anteriormente mencionado se busca identificar un diseño de broca apropiado que esté presente en la industria petrolera y pueda ser usado como componente del conjunto de herramientas necesario para la perforación en Colombia de futuros campos geotérmicos. “Las formaciones geológicas presentes están compuestas de rocas ígnea o metamórfica, las cuales presentan condiciones desafiantes, como por ejemplo los elevados valores de compresibilidad de la formación (USC/CCS) que no son fáciles de perforar con tecnologías convencionales. Así que el análisis del rendimiento de la broca en un pozo geotérmico es muy importante, ya que ofrecería información adecuada en las próximas operaciones” (Marbun et al., 2019).

1. Marco teórico

El mundo actual se ha enfocado en búsqueda a nuevas fuentes de energía, desencadenando la llamada transición energética, con el fin de minimizar el uso de energías fósiles como lo son el petróleo, gas natural, y carbón. Este proyecto ha sido el foco de muchos países, algunos de ellos como: EUA, Indonesia, Filipinas, Islandia, México, Italia; donde se encuentran las 10 plantas de energía geotérmica más grandes del mundo (Saunders, 2018) buscando reducir el consumo de energías no renovable y ayudar a el cambio climático.

Para el aprovechamiento de esta fuente de energía se han desarrollado nuevas técnicas de perforación y bombeo que faciliten explotar la energía geotérmica en varias zonas del mundo, superando ciertas desventajas al momento de perforar, debido a que en los campos geotérmicos existen condiciones diferentes a las de un campo petrolero, hay que considerar ciertos factores principales como son el tipo de roca, la temperatura y la presión. “Los tipos de rocas comunes en los yacimientos geotérmicos son rocas ígneas y rocas metamórficas que incluyen granito, granodiorita, cuarcita, grauvaca, basalto, riolita y toba volcánica. En comparación con las formaciones sedimentarias de la mayoría de los yacimientos de petróleo y gas, las formaciones geotérmicas son, por definición, calientes (intervalos de producción de 160 °C a más de 300 °C) y, a menudo, duras (resistencia a la compresión de 34809 psi), abrasivas (contenido de cuarzo superior a 50%), altamente fracturado (aberturas de fractura de centímetros), y bajo presión. A menudo contienen fluidos corrosivos y algunos fluidos de formación tienen un contenido de sólidos muy alto. Estas condiciones significan que la perforación suele ser difícil, la velocidad de penetración y la vida útil de la broca suelen ser bajas” (Marbun et al., 2019). Todo esto debido a las altas temperaturas, considerando que los gases que afectan los campos geotérmicos son el

dióxido de carbono disuelto o libre (CO_2) y/o sulfuro de hidrógeno (H_2S); es necesario identificar el tipo de equipo que se vea menos limitado por todas estas condiciones y poder perforar de manera segura y eficiente.

1.1 Brocas de perforación

Las brocas de perforación usadas en yacimientos geotérmicos son uno de los componentes más importantes a tener en cuenta, ya que al desarrollar un pozo el proceso de perforación puede correr con innumerables riesgos y daños por mala selección. La función principal de esta herramienta es triturar o cortar la roca, conectándola en la parte inferior de la sarta de perforación. Hay que tener claro que cuando se desgasta excesivamente o deja de avanzar en profundidad es necesario remplazarla. La mayoría de las brocas funcionan raspando o triturando la roca, o ambas cosas, generalmente debido a un movimiento de rotación, todo lo que hay en una plataforma de perforación ayuda directa o indirectamente (Marbun et al., 2019).

Los tres factores principales que afectan la mayor parte del rendimiento y la vida útil de la broca son la litología, los parámetros de perforación y el diseño del ensamblaje del fondo del pozo. El ingeniero de perforación tiene poco o ningún control sobre la litología, pero a veces se pueden lograr mejoras significativas, mediante un uso adecuado del lodo de perforación que brinde rendimiento de limpieza y optimizara la dinámica para atravesar ciertas formaciones desafiantes, también mediante el cambio de los dos últimos factores. Estos se componen de tres parámetros que se pueden cambiar fácilmente para cualquier combinación de broca/formación. Son la velocidad de rotación, el peso sobre la broca “WOB”) y la hidráulica TFA. A menudo se necesita algo de experimentación para determinar la mejor combinación de estos valores, lo que se denomina prueba de perforación. La selección y utilización de la broca es simplemente una pequeña parte del proceso en la perforación, pero cualquier error en la selección de la broca puede conducir a un gran error, como un mayor tiempo de perforación, problemas en el pozo, etc. Estos factores, en última instancia, aumentarán el costo de la perforación (Marbun et al., 2019).

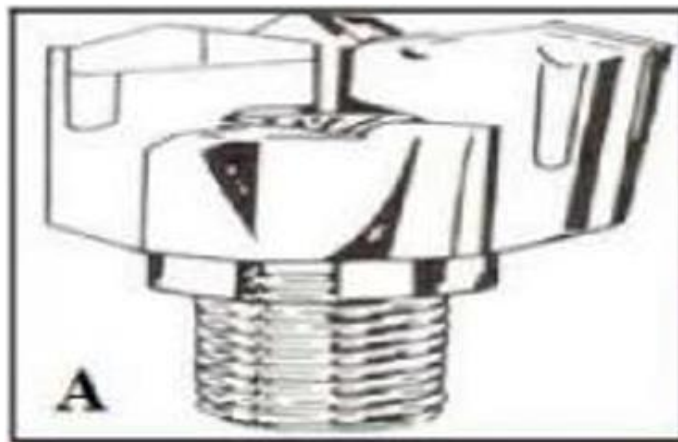
Yadav y Anirbido (2017), realizaron una revisión de las técnicas profundas para reservorios geotérmicos de alta entalpía, mencionan las siguientes brocas para perforación geotérmica, algunas de ellas usadas en la industria petrolera son:

1.1.1 Brocas de arrastre

Es una de las brocas rotatorias más antiguas, sus cuchillas de corte están hechas integralmente del cuerpo de la broca. Toda la unidad está unida y gira con la sarta de perforación. Este tipo de brocas se utiliza principalmente en formaciones blandas y gomosas. Como las brocas de arrastre no tienen partes móviles, obtienen ventajas en el caso de entornos geotérmicos. Esto restringe los problemas con los rodamientos, lubricantes y sellos de alta temperatura Figura 1.

Figura 1

Broca de arrastre



Nota. En la anterior figura se ve una representación gráfica de una broca de arrastre. Tomado de: Yadav y Anirbido (2017). Revisión de técnicas de perforación profunda para reservorios geotérmicos de alta entalpía.

1.1.2 Brocas de compactos de diamante policristalino (PDC)

En este tipo de brocas, los diamantes están incrustados en el cuerpo de la broca. En la técnica de broca de perforación PDC, la incrustación de diamante se realiza en la formación y luego se arrastra a través de la cara de la roca en condiciones de arado, las brocas de diamante siguen el mecanismo de falla por corte. Las brocas de PDC tienen un costo más alto, pero tienen la ventaja de una vida útil larga siendo económicamente viables.

Figura 2

Broca de compactos de diamante policristalino (PDC)



Nota. En la anterior figura se ve una representación gráfica de brocas PDC. Tomado de: Yadav y Anirbido (2017). Revisión de técnicas de perforación profunda para reservorios geotérmicos de alta entalpía.

1.1.3 Brocas de corte de rodillos (Tricónica)

Las brocas de cono de rodillos se utilizan desde la década de 1970. Los rodillos cónicos presentes en el fondo de estas brocas trituran y perforan la superficie de la roca, la broca gira y el cono rueda por el fondo del pozo. Hay principalmente dos tipos de dientes que se usan en los conos: (1) conos de acero fresado (usadas generalmente en formaciones más blandas) y (2) insertos de carburo de tungsteno (generalmente se usan para rocas más duras y una vida útil más prolongada) Figura 3.

Figura 3

Broca de corte de rodillos



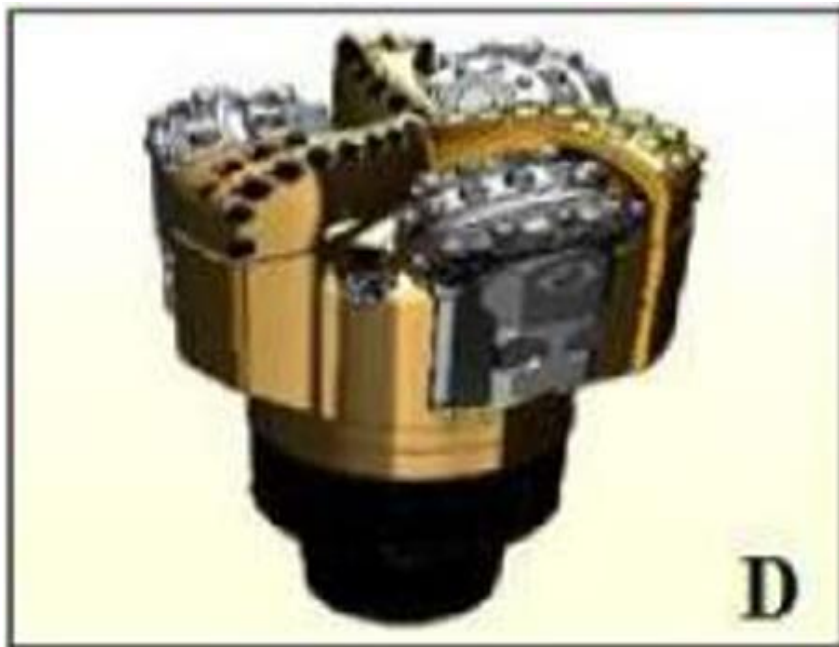
Nota. En la anterior figura se ve una representación gráfica de una broca Tricónica. Tomado de: Yadav y Anirbido (2017). Revisión de técnicas de perforación profunda para reservorios geotérmicos de alta entalpía.

1.1.4 Brocas híbrida

Este tipo de brocas utiliza los mecanismos combinados de PDC para cortar las formaciones rocosas y conos de rodillos para triturarlas (Pessier y Damschen, 2010). Este tipo de broca híbrida tiene una alta tasa de penetración que puede perforar lutitas y otras formaciones de comportamiento plástico de dos a cuatro veces más rápido que las brocas de cono rodante y PDC Figura 4.

Figura 4

Broca híbrida o combinada



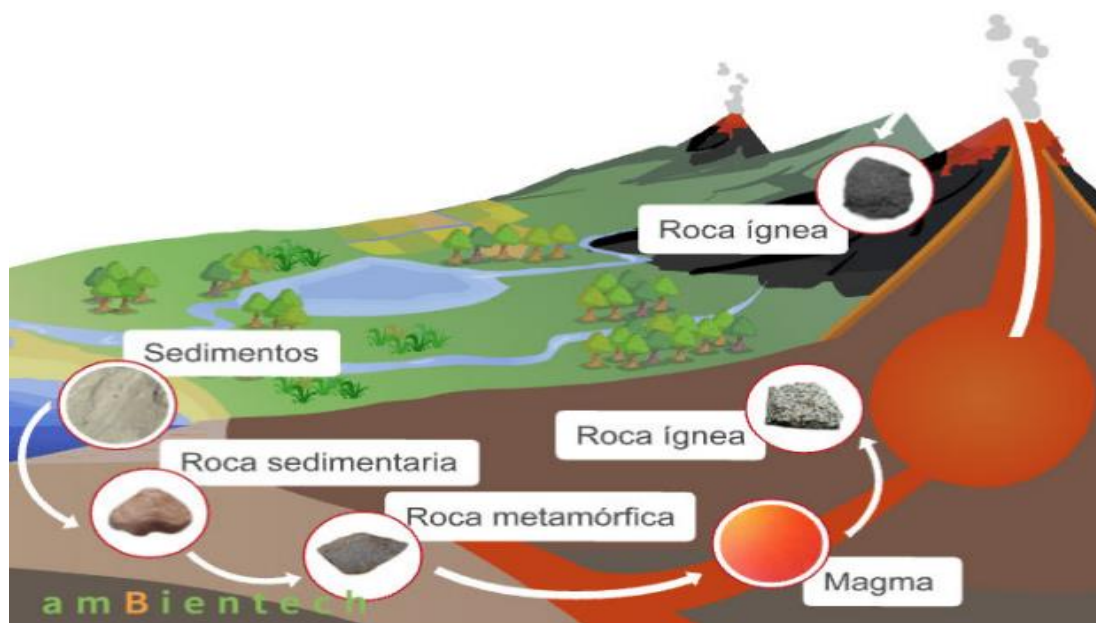
Nota. En la anterior imagen se ve gráficamente, cómo se puede ver una broca híbrida, compuesta por brocas PDC y Tricónicas. Tomado de: Yadav y Anirbido (2017). Revisión de técnicas de perforación profunda para reservorios geotérmicos de alta entalpía.

1.2 Tipos de roca

En la siguiente Tabla 1 se puede observar la clasificación de rocas en: Sedimentarias, Ígneas y Metamórficas como lo anteriormente mencionado presentan un ciclo Figura 5, que permite su presencia en la geología colombiana, siendo de gran interés para la industria de los hidrocarburos, ya que están presentes en los pozos de interés para la perforación de yacimientos geotérmicos.

Figura 5

Ciclos de rocas



Nota. En la anterior figura se ve el ciclo de las rocas y su cambio, en cada zona que se encuentre.

Tomado de (s,f) Ambientech.org.

Tabla 1*Clasificación de rocas*

	Rocas Sedimentarias	Rocas Metamórficas	Rocas Ígneas
Definición	Su origen es del resultado de la compactación de sedimentos, por alteración y transporte.	Su origen es del resultado de cambios químicos y físicos de rocas sedimentarias o ígneas.	Su origen es del enfriamiento de lava, después de un proceso de solidificación.
Proceso de formación	Compactación y cementación	Presión Temperatura Recristalización Foliación	Ascenso, Fundición, Solidificación de la lava y Enfriamiento.
Tipos	Clásticas (>50% de terrígenos)	Foliada	Intrusivas plutónicas
Dureza	Variable dependiendo del tipo de roca sedimentaria aproximadamente 10152.642 psi (Pizarra), a 36984.6 psi (Arenisca).	4351.1 psi (Serpentinas) a 58015.0 psi (Esquistos)	Intrusivas entre: 24656.4 psi (Diorita), a 50763.2 psi (Gabro y Granito). Extrusivas entre: 17404.5 psi (Riolita) a 58015.1 psi (Andesita).
Ejemplos	Conglomerados, Arenisca, Brecha, Lutita, Yeso, Caliza, Coquina, carbón de Huya	Esquisto verde, Serpentinita, Mármol, Gneis, Cuarcita, Epidosita, Silex, Pizarra, Feldespato	Escoria, Pumita, Obsidiana, Basalto, Pórfido, Granito, Andesita, Gabro, Granito, Peridotita, Andesita, Pomez , Riolita

Nota. En la anterior tabla se describen las principales características de las rocas presentes en la litología. Propia del autor.

En los yacimientos geotérmicos no hay la presencia de un fluido (Sólo hay una masa de roca con alta temperatura), por medio de técnicas de inyección de fluido y fracturación artificial se puede generar un circuito geotérmico mediante inyección de agua y obteniéndose vapor para generar electricidad (Sánchez et al., 2011).

1.2.1 Yacimientos geotérmicos en rocas incompletamente solidificadas

Para la mayoría de los casos, los proyectos se encuentran en zonas con actividad volcánica reciente, Las rocas suelen estar en estado de fusión o parcialmente solidificadas, lo que permite extraer su energía (Sánchez et al., 2011).

1.2.2 Yacimientos geotérmicos de roca caliente seca

En estos yacimientos no se encuentra la presencia de un fluido (Sólo hay una masa de roca con elevada temperatura), A través de técnicas de inyección de fluido y fracturación artificial se logra establecer un circuito geotérmico con inyección de agua y se extrae vapor para generar electricidad (Sánchez et al., 2011).

1.2.3 Yacimientos geotérmicos en condiciones hipercríticas.

Estos yacimientos cuentan con condiciones óptimas, ya que se encuentran por encima del punto crítico. Su valor radica en la viabilidad para futuros desarrollos en zonas elegidas del planeta,

sin embargo, la tecnología actual para su aprovechamiento es costosa y por esta razón a gran escala, aun no se ha comenzado la explotación de estos recursos (Sánchez et al., 2011).

1.2.4 Yacimientos geotérmicos geo-presurizados

A través de yacimientos de hidrocarburos, fue posible encontrar Geo-Presurizados en las cuencas sedimentarias, caracterizadas por tener un gradiente geotérmico normal, donde se presentan temperaturas que superan los 150° C del agua subterránea, la cual se encuentra a una profundidad de 19685 ft aproximadamente. Se caracterizan por tener un acuífero con presiones entre 40 a 90% mayores a la presión hidrostática, también presentan elevadas cantidades de metano disuelto, entregando tres tipos de energía: Térmica (agua caliente), sustancia química (metano) y fuerza mecánica (fluidos elevada presión) (Sánchez et al., 2011).

1.2.5 Yacimientos geotérmicos magmáticos

Este tipo de yacimientos se origina de rocas fundidas, relacionándose a zonas ya presentes en volcanes activos o que presentan debilidad en la zona cortical a gran profundidad. Se diferencian por sus elevadas temperaturas que superan los 800°C (Gutiérrez, 2011). Debido a la falta de tecnología resistente a la corrosión y las altas temperaturas para explotar estos yacimientos no se han podido aprovechar adecuadamente estos recursos, En el caso de contar con las herramientas óptima la extracción sería factible, obteniendo resultados aprovechables, debido a energía almacenada en estas cámaras magmáticas de los volcanes.

1.2.6 *Yacimientos geotérmicos marinos*

A profundidades marinas se encuentran presentes estas fuentes de calor con altas temperaturas por presencia de volcanes sumergidos. En la actualidad no existen registros de su explotación. Estudios determinaron qué en el Golfo de California (México), tras una inmersión de submarinos a una profundidad de 8530.184 ft hay chimeneas naturales que emiten chorros de agua a 350°C. El flujo de calor presente en algunos puntos del Golfo de California es muy alto, de 0.03159 W/ft², en comparación con un flujo de calor natural que se encuentra entre 0.00464515 W/ft² y 0.0092903 W/ft² (Sánchez et al., 2011).

1.3 Sistema geotérmico

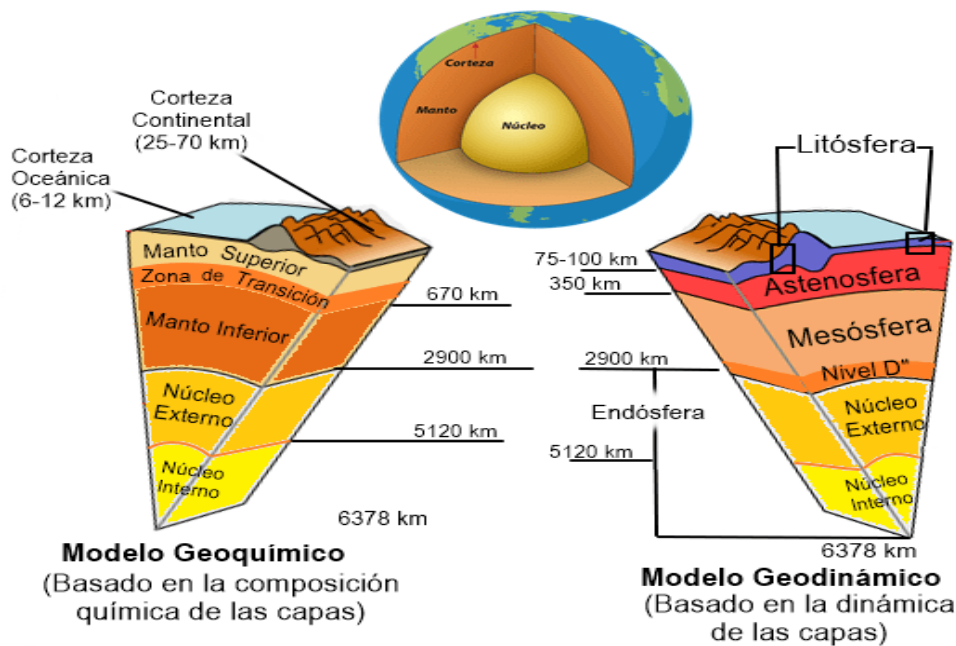
Las fuentes de calor que se encuentran a grandes profundidades, en la parte superior de la corteza terrestre además del contenido de fluido geotérmico, también se caracterizan por presencia de una fuente hídrica, con contenido de minerales disueltos que al calentarse su densidad disminuye. Los sistemas geotérmicos se dividen en dos categorías principales: los llamados Vapor (alta entalpía); el otro se llama sistema líquido o agua (baja entalpía) y también el sistema conocido por líquido, o agua (baja entalpía).

A profundidades de varios cientos de pies se presentan grandes cambios de presión por causa del peso de las rocas sobre yacentes, por lo tanto, los minerales que conforman la roca sufren alteraciones en su estructura, donde los átomos que las componen se acomodan en conjuntos más compactos para estos nuevos arreglos. La densidad aumenta significativamente y para poder llegar

a estos límites es necesario escoger una buena herramienta de perforación como lo son las brocas, en la Figura 6 se puede observar la composición química de la roca.

Figura 6

Composición Química de la Tierra



Nota. El gráfico representa la composición química de la tierra, con sus respectivas profundidades, Tomado de wikisabio.com, (2019).

1.3.1 Fuente de calor

Es un cuerpo caliente, que ha aumentado su temperatura, por estar en contacto con un volcán intrusivo; el cual genera gases calientes de origen magmático. Generalmente, este origen de calor posee temperaturas $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, se pueden encontrar, a profundidades, mayores a 6562 ft (Martínez, 2023).

1.3.2 *Reservorio geotérmico*

Estas son formación de rocas permeables, por las cuales se moviliza el fluido geotérmico, a profundidades que son rentables económicamente para explotar. Identificado también, como yacimiento geotérmico, también es importante considerar que para explotar el calor del subsuelo; existe la necesidad de un fluido transportador que al momento de perforar a “ x ” profundidad permita conseguir temperaturas óptimas; para la explotación; estos factores implican unos costos y necesidades técnicas lo cual genera un incremento de dinero (Martínez, 2023).

1.3.3 *Sistema de suministro de agua*

Este sistema puede involucrar fallas o diaclasas en rocas, las cuales facilitan la recarga en el reservorio geotérmico, mediante la infiltración del agua en el subsuelo. Este líquido sustituye fluidos, que salen del reservorio, ya sea en forma de manantiales termales; o aquellos que se extraen mediante pozos (Martínez, 2023).

1.3.4 *Capa sello*

Consiste en el estrato impermeable, universalmente compuesto por arcillas (esmética o montmorillonita), siendo el resultado de la transformación de las rocas; por elevada temperatura, que envuelven al reservorio, atrapándolo y evitando la pérdida de agua y vapor (Martínez, 2023).

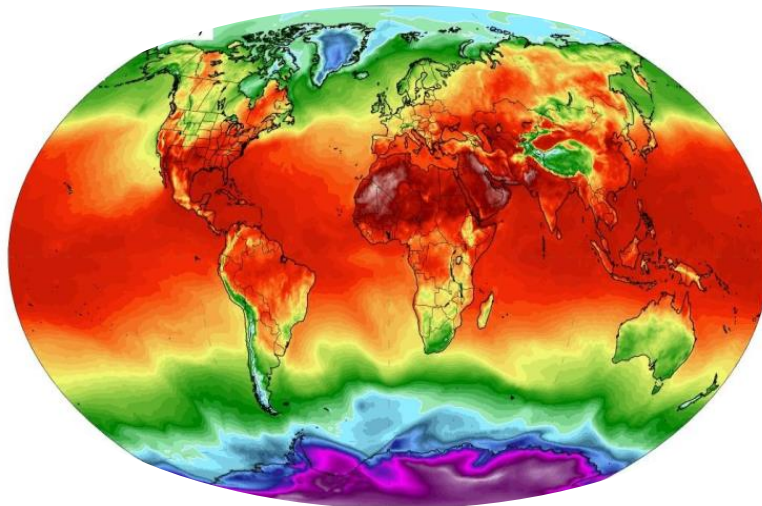
1.4 Tipos de yacimientos geotérmicos

Los yacimientos geotérmicos pueden variar dependiendo de sus condiciones, tipo de fase, temperatura y fluido, como se mencionó anteriormente; debido a que esto puede caracterizar el yacimiento en una zona del subsuelo que contiene calor aprovechable. Es de mencionar que la extracción de este producto necesita la presencia de un fluido que lo movilizó hacia la superficie para poder ser explotado con eficacia; los yacimientos se clasifican en cuatro tipos:

- Yacimiento de temperatura alta
- Yacimiento de temperatura media
- Yacimiento de temperatura baja
- Yacimiento de temperatura muy baja

Figura 7

Temperatura global de la superficie terrestre y oceánica



Nota. Tomado de Climate Change Institute - University of Maine, (2023).

1.4.1 *Yacimientos de temperatura alta*

Son los encargados de generar elevadas temperaturas capaces de generar el calor necesario para producir energía eléctrica por medio del vapor de agua; en el mayor de los casos se encuentran a más de 150 °C localizándose en zonas con insuficiente espesor litosférico o vulcanismo activo.

Se denomina "Roca seca caliente" a la categoría de yacimientos con elevadas temperaturas (HDR), se extraen mediante técnicas de estimulación de yacimientos geotérmicos" (EGS). "Con una forma muy sencilla, radican en una masa de roca profunda donde se estimula la circulación y fracturación de fluidos para hacer un yacimiento geotérmico que permite su explotación. Estos yacimientos se diferencian de los demás por requerir de un gradiente geotérmico elevado y un contexto geológico muy específico para construir un yacimiento geotérmico (El Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, 2011).

La geología de estos yacimientos involucra un basamento granítico profundo debajo de una cobertera sedimentaria donde la conductividad térmica favorece al gradiente geotérmico, se inyecta agua fría y se extrae muy caliente lo que provoca la generación de vapor de agua en conjunto con el segundo circuito para producir electricidad.

1.4.2 *Yacimientos de temperatura media*

Son yacimientos que, aunque tengan una temperatura inferior, contienen el calor necesario para generar energía eléctrica mediante un fluido volátil, se debe de saber que el rendimiento es menor al caso de los yacimientos con alta temperatura. Normalmente, el yacimiento puede alcanzar temperaturas entre 100 y 150 °C. Su geología y estructura es favorable y tiene un gradiente mayor

a la media. El beneficio también es directo en generación de calor y gracias a la presencia de un acuífero profundo con el cual se extrae agua caliente para intercambio de calor a sistemas de calefacción urbanos y en procesos industriales (El Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, 2011).

1.4.3 Yacimientos de temperatura baja

Normalmente estos yacimientos de baja temperatura alcanzan los 100 y 30 °C ubicándose en zonas geológicas con presencia de acuíferos profundos, su gradiente puede acercarse al gradiente medio. Su aprovechamiento parte de la extracción de agua caliente en el acuífero y reinyectarla fría. Su uso es para sistemas de calefacción urbanos y procesos industriales (El Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, 2011).

1.4.4 Yacimientos de temperatura muy baja

Se caracterizan por presentar temperaturas inferiores a los 30 °C , encontrándose en cualquier zona, ya que su gradiente geotérmico solo determina la eficiencia del sistema, se encuentran ubicados por debajo de la superficie el suelo 6,6 ft. Su calor se utiliza como intercambiador térmico en sistemas de climatización doméstica y agrícola mediante bomba de calor (El Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, 2011).

A continuación, en la Tabla 2, se puede observar las variaciones de entalpía con su respectiva temperatura y litología presente.

Tabla 2*Clasificación por entalpía*

Tipo de Yacimiento	Tipo de litología	Temperatura (T°)	Uso principal
Alta entalpía		>150° C	Electricidad
Media entalpía		100 °C < T <150 °C	Ciclos binarios
	Aguas termales	22 °C < T < 50 °C	Balnearios
Baja entalpía	Zonas volcánicas	< 100° C	Calor de Distrito
	Sedimento profundo		
Muy baja entalpía	Subsuelo con o sin agua	5 °C < T < 25 °C	Climatización
	Aguas subterráneas	10 °C < T < 22 °C	

Nota. Tomado de Vercelli (2012).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad de usar brocas diseñadas por la industria de perforación de pozos petroleros para ser usadas en la perforación de pozos geotérmicos en Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Ejecutar una revisión bibliográfica del tipo de formaciones presentes en Colombia para perforación de pozos geotérmicos.
- Realizar un análisis de las brocas presentes en el mercado “Oil & Gas” que puedan ser factibles para la perforación de estos yacimientos geotérmicos.
- Proponer con base a la teoría e información recolectada, un catálogo de brocas óptimas para la perforación de pozos geotérmicos en Colombia.

3. Geología de formaciones de alta entalpía en Colombia

Las áreas geotérmicas presentes en Colombia son aproximadamente 21, pueden ser de alta y baja entalpía, estas se ubican alrededor del territorio colombiano, divididas geográficamente, debido a su presencia de actividad volcánica, se convierten en zonas de interés por su geología y riqueza de manantiales termales los cuales son esenciales para proyectos de investigación y exploración por parte del SGC. “Hasta el momento, solamente se han realizado trabajos de exploración (geología, geofísica y geoquímica) en seis de estas áreas. Lo anterior quiere decir que dichas áreas pueden variar (en extensión) a medida que se conozca más acerca de ellas” (Alfaro et al., 2020, p.55). En la Cordillera se encuentran Paipa e Iza, otra parte se ubican en la Cordillera Central como lo son, Cerro Bravo, San Diego, Laguna de Otún , Nereidas Botero Londoño, Caldera Gabriel López, Santa Rosa, Villamaría – Termales, Hacienda Granates, Nevado del Tolima, Cerro Machín, caldera Paletará, volcanes de Sotará – Sucubún, volcán del Huila, volcanes Doña Juana-Las Ánimas, el volcán de Sibundoy y volcanes Galeras-Morasurco. Al límite del flanco occidental de la Codillera Central y por último en el flanco oriental de la Cordillera Occidental se encuentran Azufral, Cumbal y Chiles - Cerro Negro (Alfaro et al., 2020).

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) menciona que estas áreas se agrupan en bloques geotérmicos, facilitando la agrupación de datos, dependiendo de su ubicación geográfica como se ve en la Tabla 3.

3.1. Áreas y bloques geotérmicos de Colombia

Para estos bloques geotérmicos se hicieron ciertas consideraciones geológicas, mediante fichas geológicas que definen los parámetros presentes en las zonas de estudio con presencia de este recurso, se realiza una descripción de reservorio geotérmico, deducida por los cortes, con un mínimo de profundidad de 1640 ft y máximo de 9843 ft respectivamente. En los cálculos del potencial geotérmico no se consideró la litología específica presente en cada uno de los reservorios, ya que se emplearon valores iguales de las propiedades físicas presentes en las rocas de todas las áreas geotérmicas. Debido a la falta de información de perforaciones para identificar los recursos geotérmicos se utilizó el método volumétrico, basado en la Circular 790 de USGS (1978); Para refutar, se piensa que en la mayoría de los reservorios la permeabilidad estaría determinada por la presencia de porosidad secundaria en rocas metamórficas e ígneas (Alfaro et al., 2020).

Tabla 3

Áreas y bloques geotérmicos

Área geotérmica	Área (ft ²)	Bloque	Área (ft ²)
A.G. de Paipa	1.539e ⁺⁹	Paipa -Iza	5.813e ⁺⁹
A.G. de Iza	1.367e ⁺⁹		
A.G. de San Diego	5.328e ⁺⁹	San Diego	2.5349e ⁺¹⁰
A.G. del Volcán Cerro Bravo	1.432e ⁺⁹		
A.G. de Villamaría -Termales	4.919e ⁺⁹	Cerro Bravo- Cerro Machín	4.9934e ⁺¹⁰
A.G. de Nereidas-Botero Londoño	1.163e ⁺⁹		
A.G. de Hacienda Granates	3.907e ⁺⁹		
A.G. del Volcán de Santa Rosa	5.091e ⁺⁹		
A.G. de la Laguna de Otún	1.324e ⁺⁹		
A.G. del Volcán Nevado del Tolima	3.014e ⁺⁹	Huila -Sucubún	5.0795e ⁺¹⁰
A.G. del Volcán Cerro Machín	9.472e ⁺⁸		
A.G. del Volcán del Huila	3.972e ⁺⁹		

A.G. de la Caldera de Gabriel López	6.523e ⁺⁹		
A.G. de la Caldera del Paletará	7.976e ⁺⁹		
A.G. de los Volcanes de Sotará- Sucubún	2.648e ⁺⁹		
A.G. de los Volcanes Doña Juana- Las Ánimas	4.069e ⁺⁹		
A.G. de los Volcanes Galeras -Morasurco	4.101e ⁺⁹		
A.G. del Volcán Sibundoy	3.046e ⁺⁹	Las Ánimas- Chiles	7.8501e ⁺¹⁰
A.G. del Volcán Azufral	5.554e ⁺⁹		
A.G. del Volcán Cumbal	1.894e ⁺⁹		
A.G. Complejo Volcánico Chiles- Cerro Negro	2.185e ⁺⁹		

Nota. Modificado de Alfaro et al., (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

De las 21 áreas geotérmicas mostradas en la anterior tabla, Alfaro et al., (2020) menciona que estas fueron distribuidas en 80 clústeres, mediante las cuales se calcularon 1170.20 MWe con un calor acumulado de 138.60 EJ. A continuación, se mencionará geológicamente las zonas con mayores recursos ubicadas en el sector norte de la cordillera central, estas son: San Diego, Santa Rosa, Cerro Machín y Nereidas Botero Londoño con potenciales de 141.85, 137.24, 129.94 y 100.72 MWe. En el sur resaltan las zonas geotérmicas de la Caldera del Paletará con 117.96 MWe y Azufral con 81.9 MW (Alfaro et al., 2020).

3.1.1. Área geotérmica de Paipa

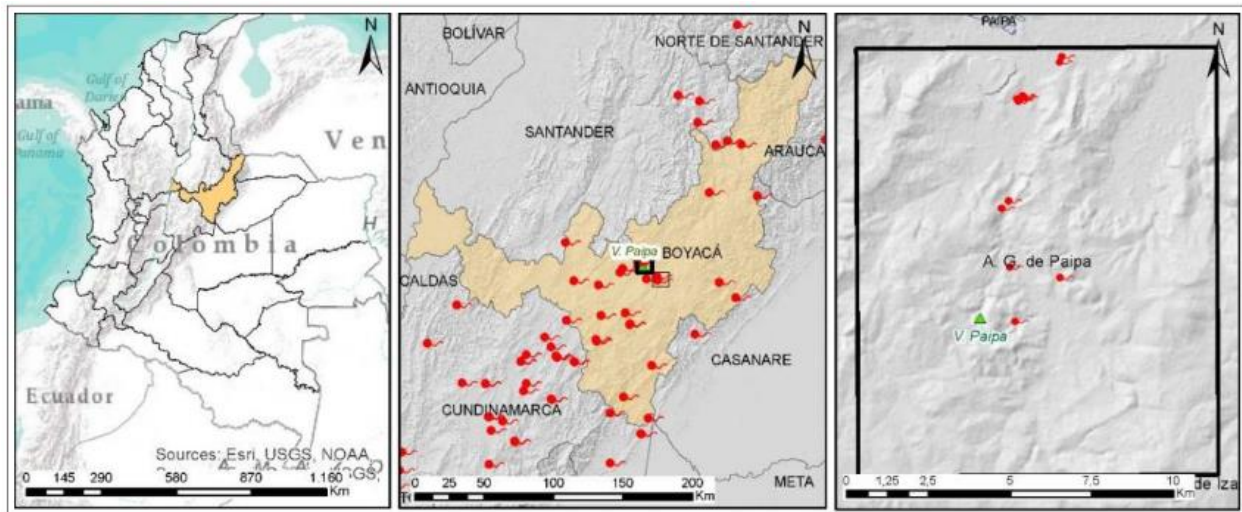
Ubicada en el departamento de Boyacá, con un área geotérmica de 1.539e⁺⁹ ft², presenta una zona de recarga al oriente y sur del área a unos 2800 – 2900 m.s.n.m., Cuenta con un reservorio de temperatura aproximadamente de 230°C, en el cual se presentan rocas del basamento y rocas sedimentarias de la formación Une; Contiene 14 manantiales termales, los cuales se agrupan en cuatro clústeres, debido a la presencia de cuerpos de agua, existen propiedades variables en el contenido de sales, de gases y conductividad eléctrica (Alfaro et al., 2020).

A cerca de la geología de la zona, se estima la presencia de rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas, de edades paleozoicas a Jurásicas en el basamento de esta área geotérmica. Las rocas sedimentarias desprenden de diferentes formaciones como lo son Los Pinos, Tibasosa, Une, Conejo, Plaeners, Labor y Tierna del Cretácico; Bogotá del Paleógeno, Guaduas del Cretácico-Paleógeno; Tilatá, y vulcanitas que se originan del volcán de Paipa del Neógeno. A demás existen depósitos aluviales y una brecha hidrotermal cuaternaria.

De acuerdo con los cortes geológicos A-A' y B-B' de la cartografía 1:25.000 , se han sugerido rocas que podrían ser reservorios geotérmicos (Velandia y Cepeda, 2004), comprenden al basamento presente en esta zona por rocas metamórfico e ígneas que incluyen areniscas y calizas de la Formación Tibasosa, areniscas de la Formación Une, también presenta niveles arenosos de las formaciones Tíbet y Cuche. Mediante una estimación de la densidad inferior en la zona a 2 g/cc ($2.9601e^{+7}$ ft²) y espesor asumido de 1312 ft, de arenitas para la formación Une, entre una profundidad de 2300 a 1900 m.s.n.m; se pudo generar un cálculo promedio del volumen en el reservorio de ($3.885e^{+10}$ ft³), (Alfaro et al., 2020).

Figura 8

Localización Del Área Geotérmica Paipa



Nota. Tomado de Alfaro et al. , (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

3.1.2 Área geotérmica de San Diego

Se ubicada entre dos municipios Samaná y Norcasia, en el departamento de Caldas y Antioquia, presenta una extensión de 5.328×10^9 ft². Esta área tiene un reservorio de mayor temperatura, ya que es el encargado de alimentar los manantiales de El Escondido, con una temperatura de 240°C (Rueda-Gutiérrez y Rodríguez, 2016).

En cuanto a su geología está conformado por el Complejo Cajamarca en la Cordillera Central, con presencia de afloramientos del basamento metamórfico paleozoico, su composición de facies está dada por el grupo cuarzoso, máfico, pelítico, calcáreo y rocas metamórficas de bajo grado.

El basamento presente en San Diego contiene rocas de diversas edades Mesozoico, Jurásico, Pérmico-Triásico y Cenozoico. Alfaro et al. (2020) afirman que “Se registran pórfidos andesíticos con firma adakítica y dacíticos de edades Mioceno, Plioceno, depósitos cuaternarios

aluviales y piroclásticos y una sola formación sedimentaria denominada Berlín, conformada por arcillolitas, lodolitas y areniscas, de edad Albiano ” (p. 67).

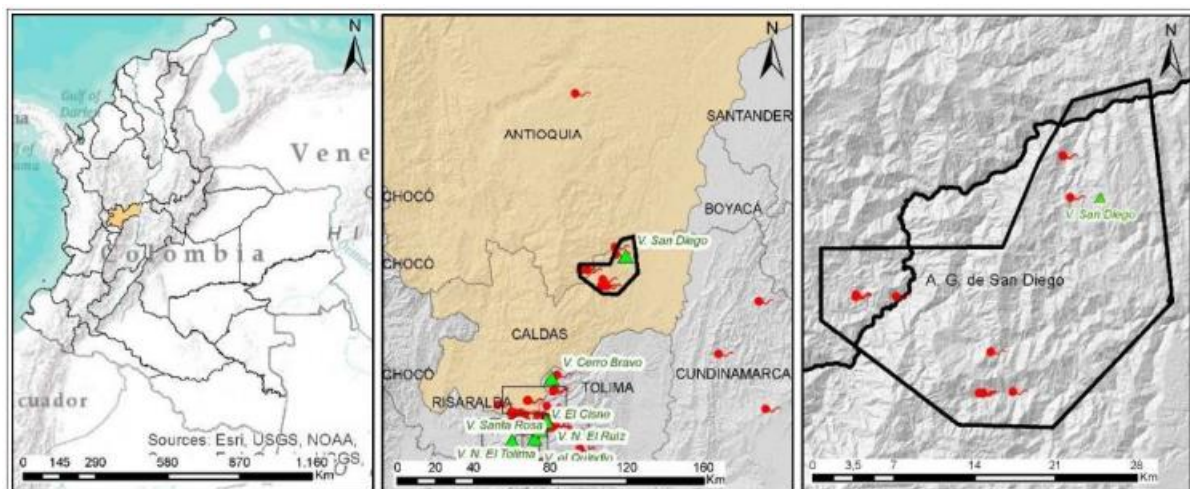
Recientemente la actividad magmática, desprende de los domos de volcanes, los posibles reservorios geotérmicos, con base a la cartografía geológica 1:25.000, concluye en que los tipos de rocas encontradas y formaciones corresponden a:

- Rocas ígneas: Batolito de Sonsón, Stock de Florencia
- Complejo Samaná
- Intrusivo Gnéisico
- Basamento metamórfico: Facies metamórficas

Debido a tratarse de rocas cristalinas, se piensa que, en el caso de existir reservorios de fluidos geotermales, se hospedarían en rocas con permeabilidad secundaria (Alfaro et al., 2020).

Figura 9

Localización del área geotérmica de San Diego



Nota. Tomado de Alfaro et al., (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

3.1.3 Área geotérmica del Volcán Paramillo De Santa Rosa

Se localiza al sureste del departamento de Risaralda, siendo dominada por depósitos volcánicos, ya que cuenta en sus alrededores con dos volcanes, uno de ellos es el Volcán Paramillo de Santa Rosa, y otro que se encuentra al este el Volcán Nevado El Ruíz, abarca una extensión $5.091 \times 10^9 \text{ ft}^2$. Esta área cuenta al oeste con 20 manantiales termales y en los valles de algunos ríos aledaños se presenta un tipo específico de agua; que pueden ser: sulfatada cálcica bicarbonatada sódica, clorurada sódica (Alfaro et al., 2020).

En la parte oriental, cercana de la cima del Volcán Santa Rosa se presenta la Formación La Sierra, con una composición de andesitas y andesitas basálticas tienen espesor de 656 ft. El grano de estas rocas puede ser grueso a medio-granular, ya que tiene variaciones texturales predominando una, textura porfirítica y alteración hidrotermal.

Hay afloramiento de lavas por la formación Tarapacá en norte y noroeste por presencia de andesitas masivas (Alfaro et al., 2020).

Si se ve la parte central y occidental hay depósitos volcanoclasticos primarios masivos que desembocan debido a la presencia de la unidad litoestratigráfica La Samaria, estos depósitos pueden presentar elevadas alteraciones, tener matriz soportadas, que se conforman por fragmentos de andesitas , el tamaño de la ceniza presente es fino, debido a la matriz vitreo-cristalina (Pulgarín et al., 2017).

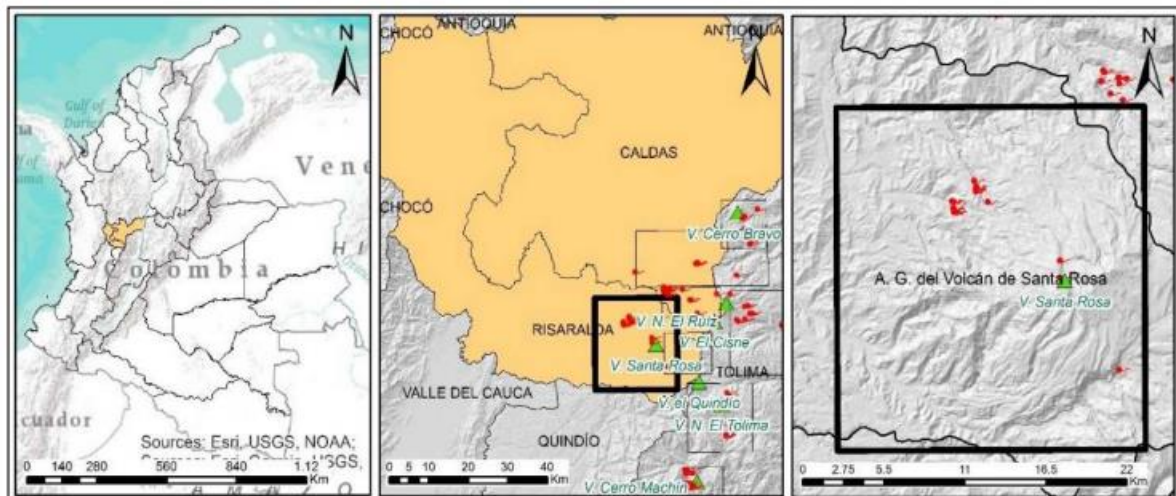
El complejo Quebradagrande desemboca al noroeste, la edad de este es del piso cretácico inferior Valanginiano-Albiano, compuesto por lutitas carbonosas, y algunas grauvacas, limolitas, arenitas liditas y feldespáticas (González, 2001).

En un estudio realizado por Pulgarín et al. (2017), se presentó una descripción de la geología de diversos reservorios de Colombia. Vale mencionar que en este estudio se tuvo como referencia una escala cartográfica 1:25.000. A continuación, se listan las formaciones y los tipos de rocas encontrados.

- Complejo Cajamarca: rocas metamórficas.
- Unidad Litoestratigráfica Samaria: depósitos volcanoclásticos
- Complejo Quebrada grande: presencia de miembro sedimentario
- Formación La Sierra o la Formación Tarapacá: rocas andesíticas (Alfaro et al. , 2020).

Figura 10

Localización geotérmica de Santa Rosa



Nota. Tomado de Alfaro et al., (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

3.1.4 Área geotérmica de Nereidas -Botero Londoño

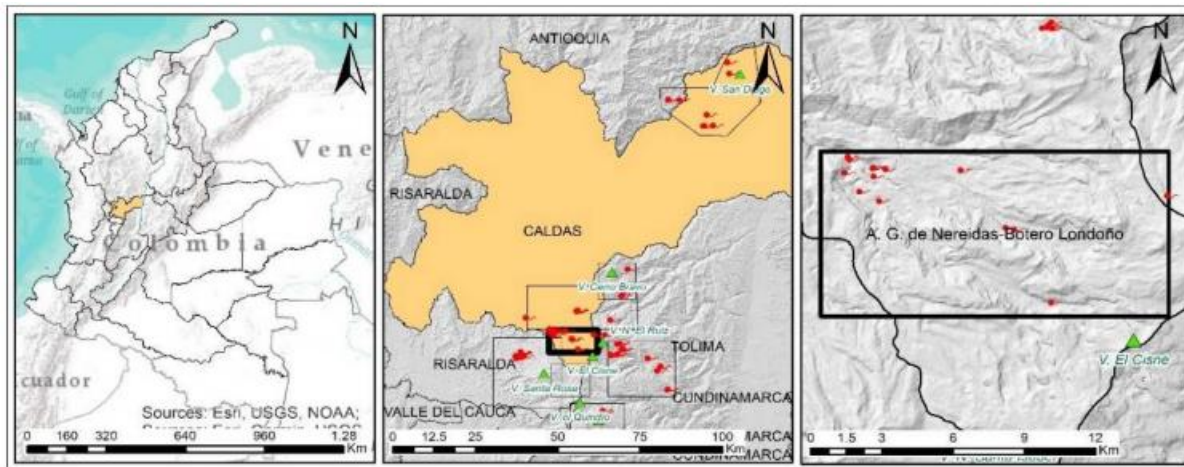
Su extensión 1.152×10^9 ft², ubicado al sur del departamento de Caldas; y al oeste del Volcán Nevado El Ruíz. Las temperaturas presentes en esta área son de 230-240 °C. Se identifica esta zona por sus grandes espesores de volcanes con elevadas temperaturas de (83 – 85 °C) y alta H₂/CH₄ (Alfaro et al., 2020).

Al oeste del volcán Nevado El Ruiz se albergan 14 manantiales termales los cuales se asocian a esquistos del Complejo Cajamarca y diferentes tipos de depósitos cuaternarios, en donde por la intersección de fallas del Nereidas y Río Claro con las fallas Termales y Laguna Baja, podrían estar relacionadas con manantiales como:

- 74 con flujo volcánico
- Depósitos de ignimbritas, flujos glaciares,
- Depósitos piroclásticos (Alfaro et al., 2020).

En un estudio realizado por Martínez et al. (2014) y escala 1:100.000 de González (2001), se presentó una descripción de los posibles reservorios con la presencia de rocas andesíticas o el complejo de Cajamarca con rocas metamórficas (Alfaro et al., 2020).

El pozo N1 (Nereidas-1), cuenta con una longitud de 4819.6 ft y una profundidad de 4448 ft, siendo actualmente el único pozo exploratorio con anomalías térmicas someras ubicadas en el Valle de las Nereidas Colombia, presentando temperatura de 200 °C y su basamento metamórfico (Complejo Cajamarca) a una profundidad de 2493 ft, en el cual hay presencia de “ Dacitas, andesitas anfibolíticas y andesitas de dos piroxenos ” (Alfaro et al., 2020).

Figura 11*Localización geotérmica Nereidas-Botero Londoño*

Nota. Tomado de Alfaro et al., (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

3.1.5 Área geotérmica Volcán Cerro Machín

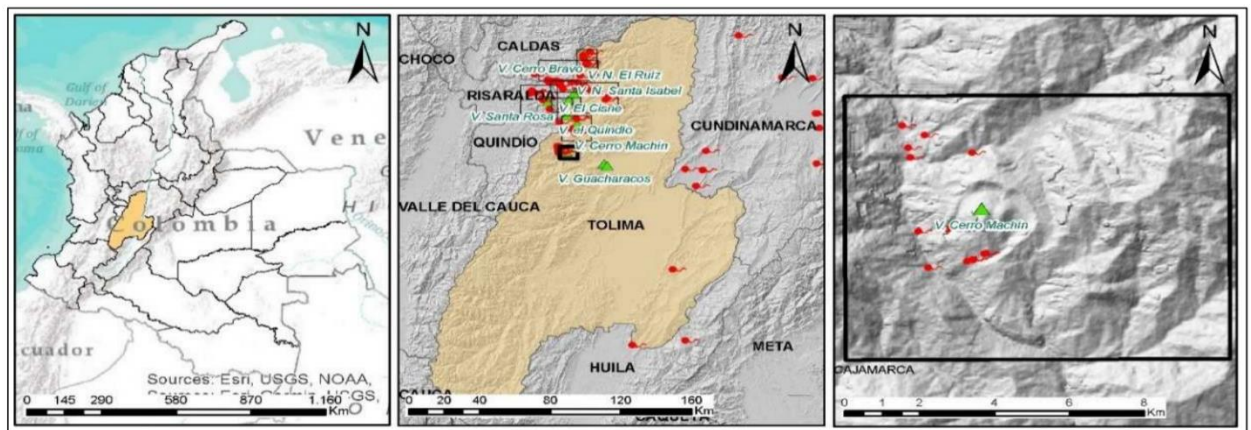
Se localiza en el departamento del Tolima, contiene 14 manantiales que se albergan en dos zonas, la primera es de aguas bicarbonatadas cálcicas y la segunda de aguas bicarbonatadas-cloruradas sódicas. Cuenta con una extensión de $9,357 \times 10^8 \text{ ft}^2$. Caracterizado por presentar fluido en el reservorio con 250°C , como las anteriores áreas tiene presencia del complejo de Cajamarca con la diferencia de contener esquistos verdes y sericíticos. Los autores Cepeda et al. (1995) mencionan que el flujo de ceniza es de edades entre 5100 y 1205 años A. P.

Se pueden considerar dos posibles escenarios del potencial reservorio, uno de ellos es con base en la cartografía 1:100.000 de Mosquera et al., (1982). En el primero, se podría inferir que el reservorio está en una de las estructuras más importantes en la falla Cajamarca, dirección NE del complejo Cajamarca a una profundidad de 3281 ft y 6562 ft. En el segundo escenario, estimado

por Geoconsul (1992), pueden considerarse como reservorio las capas volcánicas inferiores, ya que se cree que forman parte de una caldera volcánica colapsada (Alfaro et al., 2020).

Figura 12

Localización del área geotérmica del volcán Cerro Machín



Nota. Tomado de Alfaro et al., (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

3.1.6 Área geotérmica de La Caldera Del Paletará

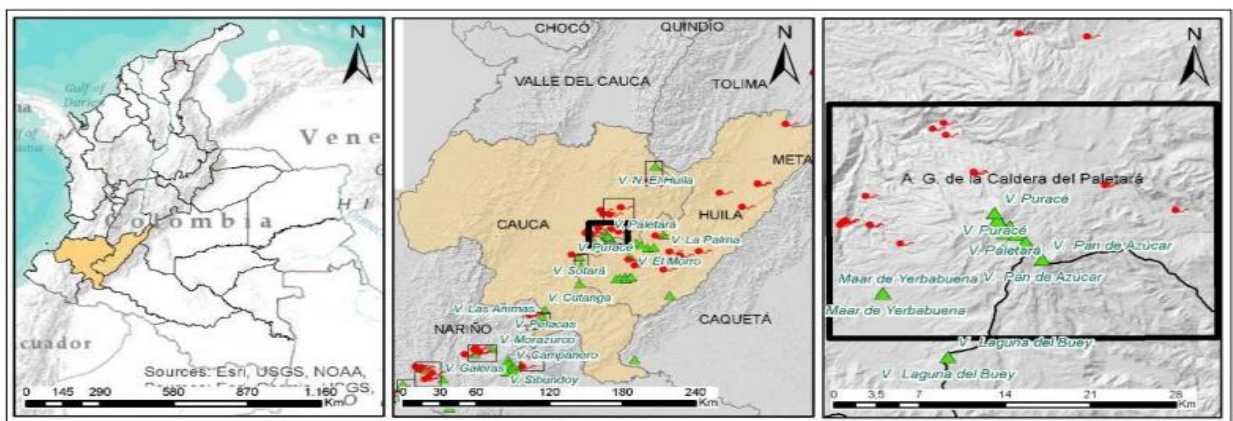
Localizada en medio del departamento del Cauca y departamento del Huila, sin embargo, no engloba en su totalidad la Caldera Del Paletará, pero si incluye en su geología a la cadena volcánica los Conocucos, también cuenta 21 termales y toda esta área geotérmica tiene una extensión de $7,974 \text{ e}^{+9} \text{ ft}^2$. El complejo presente es el metamórfico de Cajamarca compuesto por cuarzo-micáceos, filitas y esquistos negros o verdes (Alfaro et al., 2020).

La Calera se formó por la antigua caldera del Paletará, donde existen depósitos piroclásticos por la presencia de flujos de lava intercalados con menores espesores provenientes de la estructura de la caldera de Chagartón; que las lavas compuestas por andesíticas de las

Formaciones Popayán y sus miembros Polindara y Chagartón, con un espesor de 328.084 ft. Debido a la anterior información compartida por los autores se puede considerar que el reservorio este en el Complejo de Cajamarca y en caso de considerar el espesor, las lavas del grupo Popayán podrían contener el reservorio geotérmico (Alfaro et al., 2020).

Figura 13

Localización del área geotérmica de la Caldera del Paletará



Nota. Tomado de Alfaro et al., (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

3.1.7 Área geotérmica del Volcán Azufral

Localizada en el departamento de Nariño, existe la presencia de zonas de descarga por 8 manantiales y una fumarola que se encuentra al interior del cráter Azufrera. La extensión de esta área es de $5.382e^{+9} \text{ ft}^2$, ubicada a una profundidad de 6562 ft por hidrotermales fílica y argílica. Se estima que su temperatura es de 250°C (Alfaro et al., 2020).

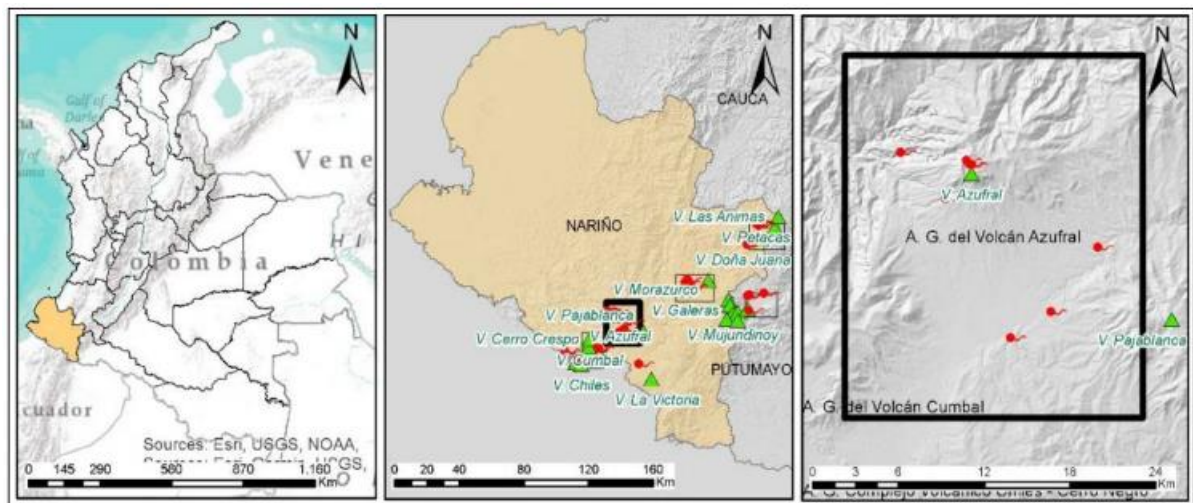
La fumarola la Azufrera; está conformada por rocas oceánicas volcánicas del grupo Diabásico, con algunas intercalaciones del grupo Dagua de metasedimentitas ya que conforman el

basamento de los volcanes nacientes con comportamiento efusivo. La fumarola presenta presiones bajas y una temperatura aproximadamente de 85 °C (Alfaro et al., 2020).

Con base a Olade (1982) se plantean como viables reservorios primero los depósitos vulcano-sedimentarios, ya que se podría alojar en rocas con permeabilidad secundaria de alteración propilítica o lavas andesíticas por ser una zona con ebullición dentro del cráter entre fallas locales y regionales por rocas piroclásticas (Alfaro et al., 2020).

Figura 14

Localización geotérmica del Azufral



Nota. Tomado de Alfaro et al., (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

3.2 Litologías mundiales de yacimientos geotérmicos

A continuación, se mencionarán generalidades de los más grandes campos geotérmicos en el mundo, enfatizando en su capacidad y profundidad respectivamente.

3.2.1 Complejo Geotérmico The Geyser – Estados Unidos

Esta planta de energía es considerada la primera más grande a del mundo, debido a que está compuesta por 22 plantas de energía con una capacidad establecida de 1517 MW y producción de 900 MW; The Geysers es enorme campo de vapor seco, del cual se extrae principalmente vapor sobrecalentado de 350 pozos a una profundidad de 9843 ft con una temperatura de 180 °C en la superficie (José, 2016).

3.2.2 Central de energía geotérmica Cerro Prieto

Esta planta de energía es considerada la segunda más grande del mundo, con una capacidad de 820 MW de potencia instalada, ubicada al sur de Mexicali, en Baja California al norte de México, la central tiene cinco plantas, que constan de 15 unidades. Su efectividad en producción de energía geotérmica ha sido gracias a las formaciones geológicas que la rodean al estar situada en la llanura aluvial del Valle de Mexicali, formado por sedimentos cuaternarios depositados por las corrientes divagantes del Rio Colorado, siendo la única prominencia dentro del Valle, el volcán radiactivo de Cerro Prieto tiene sedimentos cenozoicos metaforizados que los cuales reposan discordantemente sobre el basamento granítico y meta sedimentario del Cretácico Superior (Puente Y Peña, (s,f.), p.17).

3.2.3 Complejo geotérmico Larderello – Italia

Esta planta de energía es considerada la tercera más grande, tiene 34 plantas con una capacidad total de 769 MW. Sus reservas se encuentran a profundidades que varían entre los 2297 ft a 13123 ft bajo la superficie; esta planta contribuye a un 10%, de toda la energía geotérmica, generada en el mundo y compensa un 26,5% de las necesidades energéticas regionales (Rojas, 2016).

3.2.4 Central de energía geotérmica Olkaria – Kenia

Esta planta de energía es considerada la cuarta más grande; presenta una capacidad instalada, de 540 MW distribuidas en cuatro fases, teniendo en cuentas que se espera un aporte de, 140 MW de la quinta fase en desarrollo, actualmente (Rojas, 2016).

3.2.5 Complejo geotérmico Makban – Filipinas

Esta planta de energía es considerada la quinta más grande del mundo, tiene una capacidad de producción de 458 MW, está conformada por 6 plantas de energía que contienen 10 unidades generadoras (Rojas, 2016).

3.2.6 Complejo geotérmico Salton Sea – Estados Unidos

Esta planta de energía es considerada la sexta más grande, se compone de 10 plantas de geotérmica en Calipatria con capacidad de generación combinada de 340 MW, actualmente se

desarrollan nuevos proyectos en la región, uno de los cuales es Black Rock Project, que incluye tres nuevas plantas geotérmicas de 50 MW (Rojas, 2016).

3.2.7 Complejo geotérmico Hellisheidi – Islandia

Esta planta de energía es considerada la séptima más grande a nivel mundial , al este de la capital, Reykjavik, su capacidad combinada, de producción de calor y electricidad (CHP), mediante el método de vapor flash, es de 303 MW, de energía eléctrica y 400 MW de energía térmica, la planta está ubicada en el monte Hengill, alrededor de los 65617 ft (Rojas, 2016).

3.2.8 Complejo geotérmico Tiwi – Filipinas

Esta planta de energía es considerada la octava más grande del mundo con 298 MW, se encuentra en la provincia de Albay; a 984252 ft, al sureste de Manila. Consta de tres plantas de energía; cada una equipada con dos unidades generadoras (Rojas, 2016).

3.2.9 Complejo geotérmico Darajat,

Esta planta de energía es considerada la octava más grande del mundo; con un volumen de abastecimiento de 259 MW y operada por Darajat GPP Amoseas Indonesia, una subsidiaria de Chevron Texaco (Rojas, 2016).

3.2.10 Complejo geotérmico Malitbog. 233 MW. Filipinas

Esta planta de energía es considerada la décima más grande con 233 MW; ubicada aproximadamente, a 82021 ft, al norte de la ciudad de Ormoc; en la isla de Leyte (Rojas, 2016).

4. Brocas de perforación y parámetros

En la industria de los hidrocarburos es indispensable el área de perforación, ya que con esta se puede definir la tipología de los pozos y llegar hasta la zona de interés mediante el “BHA” por sus siglas en inglés Bottom Hole Assembly, que es el ensamblaje de fondo usado para la perforación de pozos petroleros y de gas conformado por una broca, estabilizadores, herramientas direccionales, botellas DC (Drill Collars), tubería, etc. Es crucial seleccionar la broca adecuada según la formación geológica, las condiciones operativas y el diseño del pozo lo que ayudará a referir qué tipo de junta se debe hacer para ejecutar una buena perforación con ayuda de la broca indicada cumpliendo con el reto del pozo; En este caso los yacimientos geotérmicos al tener una mala elección de brocas puede llevar a una tasa de penetración baja, una velocidad de construcción por debajo del promedio, pegas en la sarta y un exceso de viajes, lo que aumenta los costos y tiempos no productivo “NPT”, sin importar cuál sea el desafío de perforación debo conocer qué otros parámetros pueden afectar la vida útil del diseño y tipo de broca para tomar decisiones asertivas lo que resultaría una mayor eficiencia en general.

4.1 Parámetros de perforación convencionales

En la perforación existen varios parámetros que vigilan el proceso y se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Relacionados con equipo, brocas, sarta de perforación y taladro.
- La que pueden ser intervenidas por el operario en el proceso de perforación como, por ejemplo: La velocidad de rotación, la presión sobre la broca, la velocidad de circulación y las características del fluido de perforación.
- La velocidad de penetración, torque y presión del fluido que pueden variar dependiendo de los parámetros geológicos presentes en la perforación.

Los anteriores parámetros se pueden registrar mediante mecanismos de tipo analógico o digital. Las herramientas digitales son más útiles, por su facilidad de uso en el trabajo ya que pueden registrar más parámetros con mayor precisión, y los resultados se pueden reflejar en forma digital, como lo son:

- Velocidad de rotación (RPM)
- Densidad del fluido (Ppg)
- Torque (τ)
- Peso sobre la broca (WOB)
- Tasa de penetración (ft/hr)
- Vibraciones en la sarta de perforación

Toda medida conseguida puede variar con el equipo de perforación, por esto es indispensable mantener la presión del fluido, la presión de la broca y la velocidad de rotación constantes para estandarizar el proceso de investigación en la perforación, ya que esto permite detectar cambios en la litología, la capacidad de la roca y la presencia de alguna anomalía como fracturas o cavidades al estudiar la velocidad de penetración.

La variación respectiva de los datos y resultados obtenidos son impactados por la geología presente, de manera que, en condiciones favorables, se puede realizar una descripción precisa del subsuelo e identificar cambios litológicos hasta una profundidad de 0.33 ft con un mínimo margen de error. “Para un análisis más detallado puede combinarse los valores obtenidos, en ecuaciones más complejas que proporcionan parámetros que pueden ser puramente empíricos o con un significado físico” (Galera y Olivenza, s.f, p. 3).

4.2 Parámetros de perforación para yacimientos geotérmicos

Se emplean estructuras de corte en su mayoría PDC, tricónicas e híbridas de las cuales dependen los límites técnicos establecidos para aumentar la dinámica de perforación en estas litologías:

- De forma general se deben mantener valores de WOB (pesos sobre la broca) constantes intentando así mantener el mayor tiempo posible anclada la estructura de corte a formación a fin de mitigar eventos de ambientes vibracionales y desgastes prematuros de la estructura de corte. Los valores de WOB varían entre 10-50 klbs de acuerdo con el diseño de broca y también a la profundidad y dinámica de fondo generada.

- Los ensamblajes rotarios y con RSS son los más comunes en estas aplicaciones (no se realiza mucho trabajo direccional en este tipo de estados mecánicos), razón por la cual el rango de RPM se encuentra entre 80-140 RPM.
- Los galones empleados obedecen a eficiencias hidráulicas y ir garantizan la buena limpieza del hueco y su calidad en general manteniendo valores entre 350-900 GPM dependiendo del diámetro perforado y tratando siempre de mantener valores de HSI óptimos por encima de 2 HP/sq-in.
- Se recomienda como en toda operación convencional el monitoreo constante de la presión del sistema y valores de torque asociados a fin de evitar cualquier tipo de eventualidad de origen operativo buscando siempre tener carreras largas y prolongadas, evitando el desgaste está bien prematuro de las brocas.
- En el desarrollo de este tipo de proyectos las brocas de estructura Híbrida Kymera han demostrado un rendimiento “outstanding” debido a su alta estabilidad y estabilidad en la generación de torque, y capacidad de corte lateral con nuevos materiales en el sistema sello cojinete que se adaptan a las altas temperaturas encontradas en este tipo de proyectos donde a su vez se optimiza en tecnología de cortadores y electos TCO buscando extender la confiabilidad de estas.

4.3 Variables de operación

Existen variables de operación muy importantes para el sistema, encargadas de generar eficiencia en el trabajo, los cuales dependen de factores externos como lo son, la dureza o resistencia de la roca, ya que puede existir una correlación entre la resistencia a la comprensión de la roca y la velocidad de penetración.

Tabla 4

Compresibilidad de la roca

TIPO DE ROCA	Sc (psi)
Muy blandas	< 5801.51
Blandas	5801.51-11603.02
Medianas	11603.01-17404.5
Duras	17404.5 > 29007.5
Nota. Tomado de Morales (2009)	

4.3.1 Parámetro τ

$$\tau_{hard} = N.WOB.\frac{D^2}{V.T} \quad (1)$$

Donde:

N = Velocidad de rotación (RPM)

WOB = Presión sobre la broca (Klbs)

D = Diámetro de perforación (in)

V = Velocidad de penetración (ft/h)

T = Torque (Klbs)

El parámetro τ considera la dificultad de perforación para un pozo, es decir, que tan retador será erosionar y remover arenas fuera de la broca de perforación, por ejemplo, en una zona con presencia de arcillosa será complicado perforar debido a la adherencia de la arcilla a la broca obstruyendo y reduciendo la eficiencia de la perforación. Sin embargo, en una zona arenosa, la de la broca podría ser sacada con mayor facilidad.

4.3.2 Energía mecánica específica (MSE)

Es la energía necesaria para extraer un volumen de roca. Siendo muy útil, para evaluar la eficiencia de perforación en un trabajo. La energía específica combina los parámetros registrados durante la perforación, expresándose de la siguiente manera:

$$SE = \frac{\text{Energía de entrada}}{ROP \text{ de salida}} \quad (2)$$

Teale derivó la ecuación para calcular MSE teniendo en cuenta el trabajo axial y torsional que se puede presentar en una broca cuando está removiendo un volumen unitario de roca en unidad de tiempo. Teale planteó calcular MSE apoyado en dos componentes “empuje” y “rotación” de la siguiente forma:

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 \cdot \pi \cdot RPM \cdot T}{A_B \cdot ROP} \quad (3)$$

Donde:

MSE = Energía mecánica específica (psi).

WOB = Peso sobre la broca (lbf).

A_B = Área de la broca (in^2)

RPM = Numeros de vueltas en un minuto (RPM)

T = Torque (ft- lbs).

ROP = Velocidad de penetración (ft/hr)

Con base a las observaciones de campo. Dupriest y Koedritz asumieron una eficiencia de perforación uniforme igual al 35% indiferentemente del tipo de broca o WOB presente (Armenta, 2008). Si se agrega esta eficiencia a la ecuación de Teale se tiene obtiene lo siguiente:

$$MSE = 0.35 \left(\frac{WOB}{A_B} + \frac{120 \cdot \pi \cdot RPM \cdot T}{A_B \cdot ROP} \right) \quad (4)$$

Teale concluye que en la perforación se logra alcanzar el máximo rendimiento en el momento que la energía específica se acerca al confinamiento por esfuerzos compresivos (CCS) de la roca que se va a perforar. Con esto, se puede afirmar que el concepto de CCS de la roca y el de energía específica son ampliamente utilizados para optimización de los parámetros de perforación y para evaluar el rendimiento de la broca.

4.3.3 Revoluciones por minuto (RPM)

Conceptualmente la RPM, es inversamente proporcional a la resistencia de comprensión de la roca, consiste en la velocidad de perforación y el número de rotaciones de la broca en la perforación, con el fin de llegar a grandes profundidades en tiempos óptimos, normalmente esta velocidad se representa en ft/h.

La rotación de la broca hace que los cortadores impregnados en el cuerpo de la broca rompan la roca y destrocen los recortes. Resumiendo, entre mayor sea la velocidad de rotación, mayor será la TDP. La velocidad de rotación también ayuda a desgastar la matriz y tiene como objetivo exponer nuevos catadores a una tasa constante.

4.3.4 Tasa de penetración (ROP)

La tasa de perforación consiste en la cantidad de ft perforados en un período de tiempo. generalmente se expresa en pph (ft/hr). Hay varios factores que pueden reducir la tasa de perforación, como lo son:

- Densidad del lodo.
- Reología del lodo.
- Tipos de formación.
- Diseño hidráulico
- Desgaste de la mecha.

Algunos factores mecánicos que pueden influir en la disminución de la eficiencia operativa son el peso sobre la broca y rpm, en el caso de los yacimientos geotérmicos, se debe seleccionar una buena herramienta para mejorar la ROP en las formaciones.

4.3.5 Presión diferencial

La presión diferencial facilita distinguir entre un valor y otro de referencia, la presión absoluta se considera como la presión diferencial en el vacío, mientras que la presión relativa se suele comparar con la presión atmosférica. Según SLB Energy Glossary (2024).

Para pozos de producción, la presión diferencial es la diferencia entre la presión promedio del yacimiento y la presión del fondo del pozo y, para los pozos de inyección, es la diferencia entre la presión de inyección y la presión promedio del yacimiento (p.).

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (5)$$

La presión diferencial, es un método de medición de presión, siendo la diferencia entre dos presiones aplicadas, normalmente denominada delta p como en el anterior ejemplo (Δp).

4.3.6 Presión hidrostática (HP)

La Presión Hidrostática es aquella presión ejercida por el peso de la columna vertical del fluido de perforación o lodo, a una determinada profundidad en escenarios estáticos. Esta presión se puede representar de la siguiente forma:

$$HP = 0.052.MW.TVD \quad (6)$$

Donde,

HP = Presión Hidrostática (psi).

MW= Peso o Densidad del lodo (ppg).

Diseño De Una Boquilla Con Diámetro Variable 20

TVD= Profundidad Vertical Verdadera (ft).

0.052 = Factor de Conversión, psi (ppg x ft).

4.3.7 Caudal o flujo (Q)

Es el caudal que se circula en un determinado tiempo, mediante un flujo laminar o turbulento en varios sistemas de circulación de las operaciones de perforación de un taladro, este se puede representar en galones por minuto (GPM).

La energía hidráulica en la broca puede aumentar por presencia de caudales altos y con ayuda de una velocidad mayor en el anular se logrará transportar los recortes y enviarlos a través del espacio anular a superficie, optimizando la limpieza del hueco y de la broca (Heydarshahy, Karekal y Petroleum Exploration and Development, 2017).

4.3.8 Peso sobre la broca (WOB)

Consiste en un método que permite controlar la vida útil de la broca y la tasa de penetración, realizando una buena selección de la broca, dependiendo del pozo que se vaya a perforar, si es

necesario una broca pesada, para un trabajo de perforación, es mejor seleccionar una de serie más alta, para evitar la desviación del pozo.

WOB se refiere a la cantidad de carga axial aplicada sobre la broca que se encuentra en el extremo de la sarta de perforación. Esta fuerza es crucial para la eficiencia del proceso de perforación, ya que ayuda a la broca a romper y penetrar las formaciones rocosas mientras avanza el pozo.

El WOB adecuado es vital para una operación de perforación exitosa. Si el WOB es demasiado bajo, la broca no podrá penetrar eficientemente la roca, lo que resulta en la mayoría de los casos en una ROP baja. Por otro lado, un WOB excesivo puede causar daños a la broca y a la sarta de perforación, así como aumentar el riesgo de atascamientos y otros problemas operativos. Por lo tanto, los operadores deben monitorear y ajustar cuidadosamente el WOB durante la perforación para optimizar la ROP y minimizar el desgaste de la broca.

- “Si el peso de la broca es demasiado bajo, tanto la tasa de penetración como el par de torsión disminuyen, lo que da como resultado una baja vida útil y menor productividad” (Paratodox, 2019, p.1).
- “Si el peso en la broca es demasiado alto, caracterizado por un aumento muy pequeño o nulo en la tasa de penetración en relación con el peso adicional, el resultado es un afilado cte un desgaste rápido” (Paratodox, 2019, p.1).

El peso sobre la broca se puede sacar de formas muy sencillas, mediante el método “Off bottom”

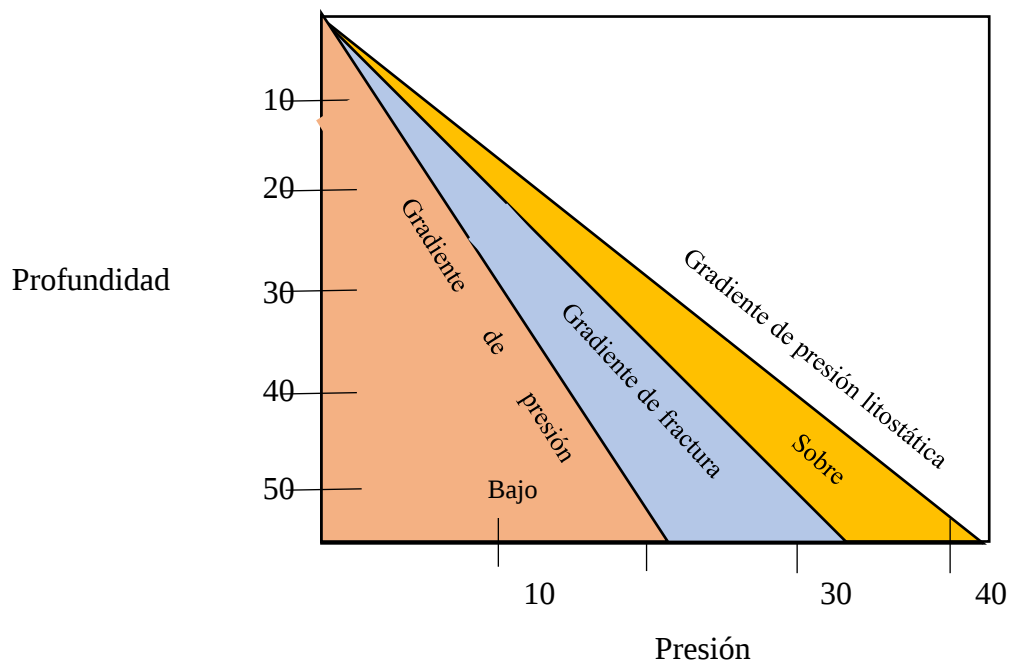
- Registrar el peso de la sarta suspendida con el sistema de levante en posición de descenso.
- Cuando se hace ensamble de otra tubería y se deja en cuñas colgada la tubería de fondo y se lee en el indicador el peso de la broca en fondo.

4.3.9 Gradiente de presión

La variación de la presión generalmente se expresa en unidades de psi/pie o kPa/m. En áreas con presión normal el aumento de la presión suele darse con la profundidad. Por ejemplo, para el agua dulce el gradiente de presión hidrostático típico es aproximadamente de 0,433 psi/pie, o 9,792 kPa/m; para el agua con 100000 ppm de sólidos disueltos totales es de 0,465 psi/pie o 10,516 kPa/m (un agua típica de la Costa del Golfo). Las desviaciones se describen como presión alta o baja como se puede ver en (The Schlumberger Oilfield Glossary, 2021).

Figura 15

Profundidad vs presión



Nota. Adaptado de The Schlumberger Oilfield Glossary (2024).

4.3.10 Área de flujo total (TFA)

Su objetivo es calcular la suma del área de las boquillas presentes en la broca, medio por donde sale el fluido de perforación o lodo. El TFA, es esencial para determinar el número total de boquillas que se tienen en una broca (The Schlumberger Oilfield Glossary, 2024).

La ecuación:

$$P_b = \frac{\rho \cdot Q^2}{10858 \cdot (TFA^2)} \quad (7)$$

Donde:

Pb = Pérdidas de presión de la broca (psi).

ρ = Densidad del lodo en (ppg).

Q = Caudal (bblm).

TFA = Total fluido área (in²).

En términos de TFA (in²).

$$\Delta P_b = \rho \left(\frac{Q}{104.24 \cdot At} \right)^2 \quad (8)$$

At = Area total de flujo

Pb = Pérdidas de presión de la broca (psi).

ρ = Densidad del lodo en (ppg).

Q = Caudal (bblm).

4.3.11 Peso o densidad del lodo (MW)

Uno de los parámetros más importantes, en la perforación es el lodo, este debe contar con las condiciones óptimas de acuerdo con la zona que se vaya a atravesar, ya que el peso del lodo o densidad son los encargados de controlar la presión hidrostática en el pozo, evitando un flujo no deseado al interior del pozo (Industrias Morven, 2021). Otro de sus objetivos es evitar el colapso de la tubería de revestimiento y el hueco sin revestimiento, cabe mencionar que un peso de lodo excesivo podría generar pérdidas de circulación por la propagación, y posterior llenado, de fracturas en la roca. Afirma The Schlumberger Oilfield Glossary, (2024). Todo procedimiento de ensayo del peso (densidad) del lodo se ha normalizado y publicado por el API.

4.3.12 Cálculos de hidráulica de la broca (hhp_b)

Se utilizan varios cálculos hidráulicos adicionales para mejorar el rendimiento de la perforación, además de tener presente las pérdidas de presión en la broca que se puedan generar. Estos cálculos incluyen la potencia hidráulica, la velocidad del chorro y la fuerza de impacto. Generalmente la mayoría de las brocas necesitan entre 2,5 y 5,0 caballos de fuerza por pulgada cuadrada (HSI) de potencia hidráulica (hhp). Es importante tener en cuenta que la capacidad hidráulica de la broca no debería superar la capacidad hidráulica total de todo el sistema (Formulas y cálculos- Perforación, 2015).

$$hhpb = \frac{Q \cdot P_{broca}}{1740} \quad (9)$$

La potencia hidráulica por pulgada cuadrada del área de la broca está dada por la siguiente ecuación.

$$HSI = \frac{1,27 \cdot hhp_b}{\text{Tamaño de la broca}^2} \quad (10)$$

Velocidad de broca (ft/hr): Las velocidades de broca de 250 a 450 pies/seg son los más convenientes para la mayoría de las brocas. Las velocidades de broca mayores que 450 pies/seg generan riesgo de desgastar la estructura de corte de la broca, se puede calcular de la siguiente forma:

$$V_n \left(\frac{ft}{seg} \right) = \frac{417,2 \cdot Q}{D_{n1}^2 + D_{n2}^2 + D_{n3}^2 + \dots} \quad (11)$$

Finalmente se tiene la ecuación de Fuerza de impacto (IF) hidráulica.

$$IF \text{ (lb)} = \frac{V_n \cdot Qp}{1930} \quad (12)$$

En el momento que se busque mejorar el rendimiento hidráulico de la broca, se puede optimizar en el impacto hidráulico, la velocidad de la broca o la potencia hidráulica. Su objetivo principal es aprovechar entre el 50 a 65% de la presión máxima que puede circular hacia la broca. La optimización que se le realiza al sistema es para generar una fuerza de impacto cuando hay pérdidas de presión en la broca que alcanzan un aproximado del 50% de la presión de circulación.

Por esto se busca optimizar el sistema para obtener una potencia hidráulica óptima si estas pérdidas de presión alcanzan un 65% de la presión de circulación.

La broca puede ajustarse para el caudal y la fuerza de impacto en formaciones blandas. En el caso de que se perforan lutitas duras se optimiza la broca para la potencia hidráulica con una pérdida de presión máxima de circulación del 65%. (Formulas y cálculos-perforación, 2015).

4.3.12.1 Cálculo de caída de presión en la broca. En términos de boquillas de 1/32 de pulgadas.

$$\Delta P_b = \rho \left(\frac{12.51 Q}{N_1^2 + N_2^2 + N_3^2 \dots N_n^2} \right)^2 \quad (13)$$

Donde:

ΔP_b = Pérdida de presión en la broca en psi.

Q = Velocidad de bombeo en bblm.

Nn = Diámetro de las boquillas en 1/32 de pulgada.

P = Densidad del lodo en GPM.

4.4 Características de brocas de perforación

En la actualidad existen tres tipos de brocas, que pueden ser una opción para la perforación de yacimientos geotérmicos en Colombia. En la actualidad, se han generado algunas

modificaciones en las brocas, con el objetivo de perforar pozos con diferentes parámetros físicos y químicos a los convencionales.

4.4.1 Brocas PDC

Las brocas PDC, son óptimas para la perforación de pozos, que necesiten altas tasas de penetración en formaciones blandas, firmes y no abrasivas, medianamente duras, ya que al usarla en formaciones así, se podría dar un excesivo desgaste mecánico en los cortadores, que aumenta térmicamente por la fricción entre el cortador y la zona perforada que generan una capa de calor a la herramienta.

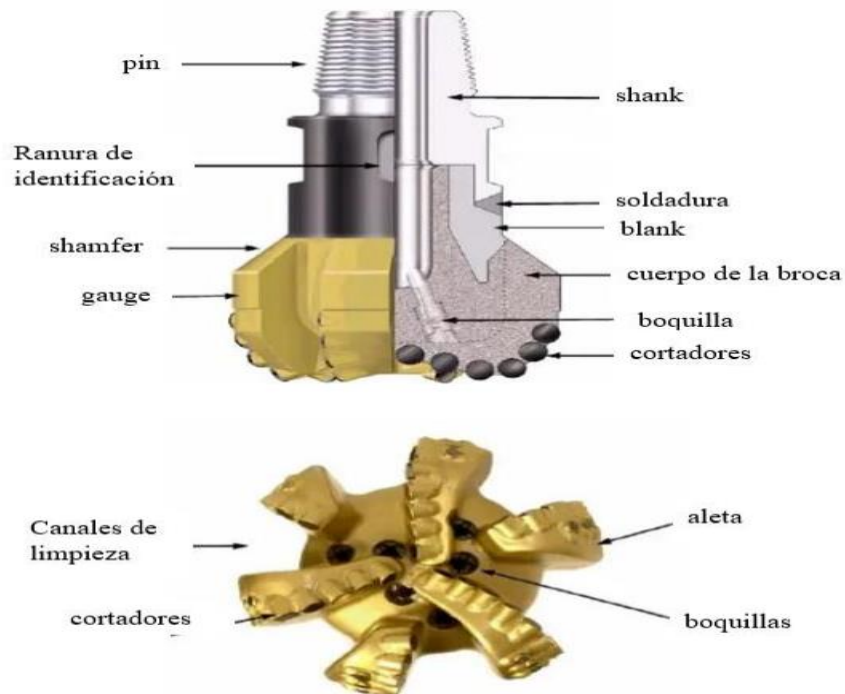
Las brocas de PDC pueden ser de cuerpo de acero y de cuerpo de matriz. Cada una de estas con características y especificaciones diferentes. Tienen varios beneficios que los hacen destacar.

La broca PDC con matriz es mejor que la de cuerpo de acero, debido a su buena adecuación para entornos con erosión corporal, ya que esto puede dañar las brocas a un gran nivel. Son ideales para las que tienen impregnados los diamantes.

Las brocas PDC con cuerpo de acero presentan un alto valor de resistencia, para esos trabajos complicados, facilita la construcción del pozo de manera más suave y simple, su ventaja es que se puede reconstruir simplemente reemplazando los cortadores desgastados ofreciendo rentabilidad para la empresa operadora (Equipo de perforación geológica de Wuxi Co., Ltd, 2020).

Figura 16

Partes de una broca PDC



Nota. Christensen (como se citó en Viera y León, 2021).

4.4.1.1 Características de las brocas. Estas brocas se caracterizan por tener diamantes policristalinos compactos, su parte cortante está constituida mediante un proceso de alta temperatura y presión, con un disco o capa de diamante policristalino sintético se une a un sustrato de carburo de tungsteno, actualmente son las más usadas en la industria de los hidrocarburos (Ramos, 2011).

Como anteriormente mostrado en la Figura 16 que se muestran las partes más relevantes de la broca, entre ellas están:

4.4.1.1.1 Corona o cuerpo de la broca. Existen dos tipos de brocas, pueden ser de acero o de carbono de tungsteno cada una tienen sus propias características y usos, las partes principales de esta son: aletas, cortadores, canales de limpieza y boquillas.

4.4.1.1.2 Aletas. Es la parte de la broca donde se ubican los cortadores, estos cortadores están fabricados con el mismo material que el cuerpo de la broca. El número de aletas que tenga una broca PDC se define de acuerdo con la litología del yacimiento y la profundidad a la que se quiere llegar

4.4.1.1.3 Espiga (Shank). Es la conexión que existe entre la broca y la sarta de perforación. Las brocas de matriz, soldan la espiga al “blank”, en cambio para las brocas de acero la soldan a la corona.

4.4.1.1.4 Boquillas. Es un orificio o conducto aproximadamente 0,25 pulgada de diámetro, por donde sale el fluido de perforación hacia el pozo. Estas boquillas son esenciales para enfriar o lubricar la broca, facilitando la limpieza dentro del pozo, la cantidad de boquillas se define por el tamaño de la broca y cantidad de aletas presentes.

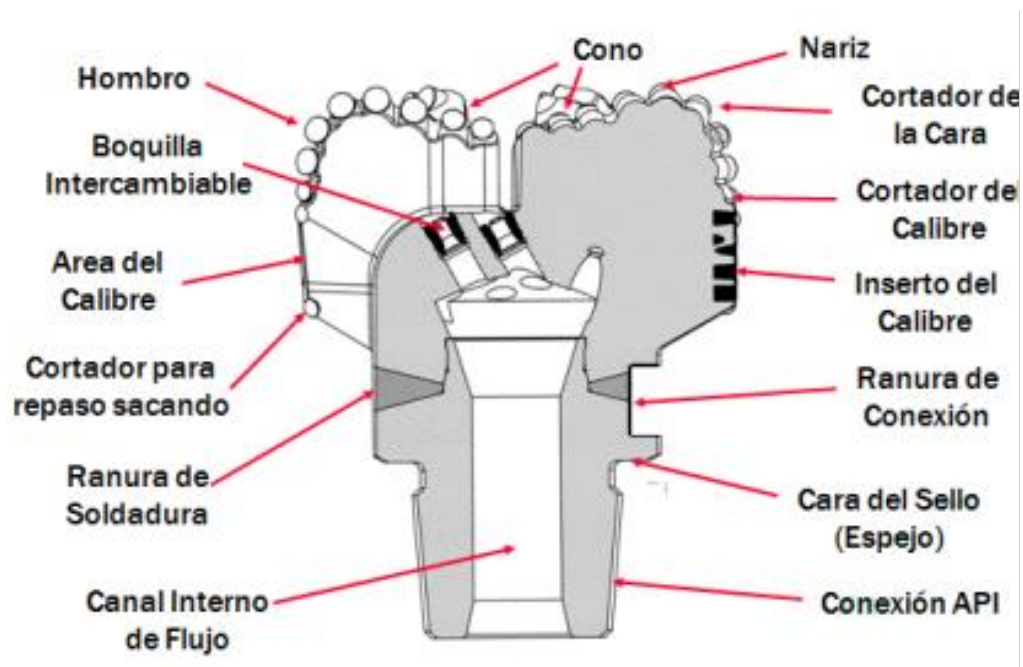
4.4.1.1.5 Blank. Estructura de soporte para las brocas PDC. La cual se expone a ciclos de alta temperatura; debido a esto el material de su composición está diseñado en acero por su ductilidad.

4.4.1.1.6 Canales de limpieza. Son componentes esenciales a través de los cuales se recircula el fluido de perforación para eliminar los ripios resultantes de la perforación.

4.4.1.1.7 Limpieza hidráulica. Es el proceso de hacer recircular el fluido a través de los orificios de la broca y a lo largo de canales presentes en la matriz de carbono de tungsteno, ya que este proceso permite mantener limpia el área de perforación.

Figura 17

Partes generales de una broca PDC



Nota. Grupo de Investigación Perforación (2011).

El número y tamaño de las incrustaciones de diamantes naturales o sintéticos es una característica muy importante que se debe considerar por el tipo de formación a contrarrestar, por

lo tanto, es mejor trabajar con una broca de mayor tamaño, pero con menores insertos si se está perforando una formación blanda y para el caso de usar una broca con varios insertos y de menor tamaño es para formación más duras, esto garantiza una penetración efectiva y una mayor resistencia del desgaste para adaptarse a las condiciones que puedan presentar (González y Rincón, 2021).

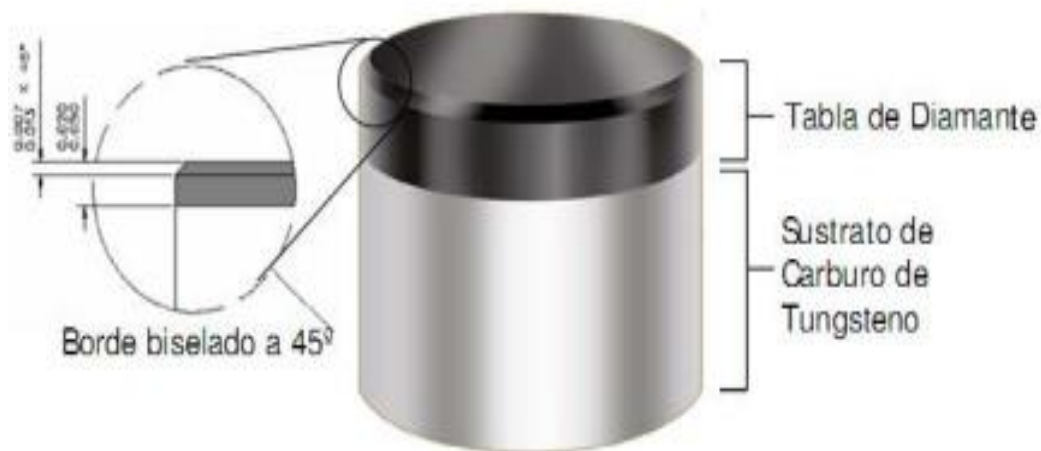
4.4.1.2 Diseño de brocas PDC. Estas brocas tienen ciertas características representativas en el momento de diseñarlas, ya que forman parte del grupo de brocas con un cuerpo sólido y cortadores fijos con diamantes sintéticos, su cuerpo puede ser sólido o de matriz. “Las características más importantes en el diseño de las brocas de diamantes naturales se observan en el perfil de la corona, el mecanismo de corte de la formación y el tamaño y número de diamantes” (Ramos, 2011, p.102).

4.4.1.2.1 Perfil de la corona. Dependiendo del uso de la broca, la forma de la corona de diamantes puede ser variable: Existen diferentes escenarios en la perforación, uno de ellos es cuando el pozo es vertical, para ese caso se usan brocas con ahusamiento largo (ahusada), ya que permiten aplicar mayor peso debido a la mayor cantidad de diamantes incrustados. Otro caso es para ahusamiento corto de perfil parabólico, ya que la energía hidráulica puede concentrarse en una menor área superficial. La perforación direccional es útil para aumentar el ángulo de desviación con base a la cara de la broca, si es más cóncava permite que la fuerza se concentre en una superficie más pequeña (Ramos, 2011).

4.4.1.2.2 Cortadores fijos. Para una broca los cortadores son piezas indispensables para el proceso de diseño y fabricación de una broca PDC. Estos cortadores están compuestos en un 95% de diamantes sintéticos unidos a un sustrato de carbono, tienen una configuración de disco, con caras perpendiculares entre sí y un bisel de 45 grados en el borde, el cual genera una mayor durabilidad y resistencia de los cortadores, como se ve en la Figura 18 (Christensen, 2008).

Figura 18

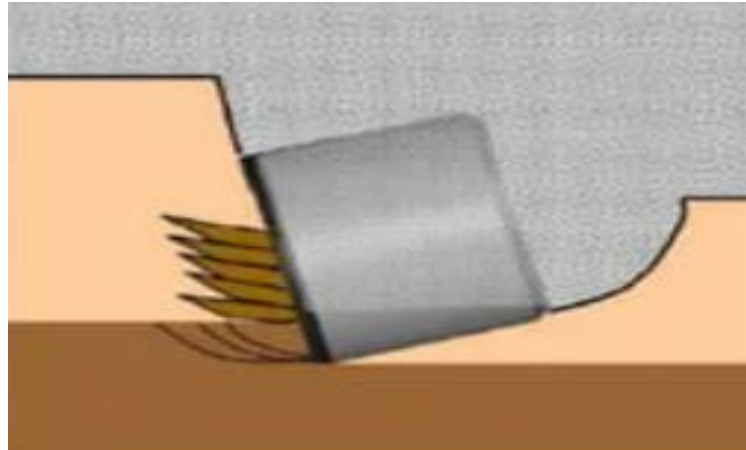
Geometría del cortador fijo



Nota. González y Rincón (2021).

Es de considerar que, en el momento de definir el número de cortadores, también se debe pensar que estos afectan directamente la tasa de penetración, con más cortadores en la aleta tendré una tasa de penetración menor, aumentando la vida útil de la broca, entre mayor sea la presencia de aletas, mayor será la cantidad de cortadores.

El mecanismo de corte de estas brocas es por cizallamiento, el cual consiste en penetrar, cortar y eliminar por capa, como se ve a continuación en la Figura 19.

Figura 19*Mecanismo de corte en las brocas PDC*

Nota. Tomado de González et al. (2010).

Tabla 5*Características de los cortadores*

Tipo de Formación	Cantidad de aletas	Tamaño del cortador	Características
Duras	> a 7	0.315 (in)	Los diseños son más flexibles de las brocas con dm reducidos
Moderadas	5 a 7	0.511 – 0.63 (in)	Aplicado a grande rango de brocas
Blandas	< a 4	0.75 (in)	Su diamante es más grande y los recortes son más grandes

Nota. La anterior tabla describe que características pueden tener los cortadores. Tomado de Baker Hughes Tomado de Baker Hughes (como se citó en Viera y León, 2021) con modificaciones.

Tabla 6*Ángulo de ataque de la broca PDC*

Back rake (ángulo de ataque)	Tipo de formación	Características
5 o 10	Formaciones muy suaves	Generan mayor ROP y mayor tamaño de corte
15	Formaciones blandas	Mejora el corte y la durabilidad del cortador.
20	Todas las formaciones	Funciona mejor en formaciones que son abrasiva
30	Formaciones duras	Los cortadores se ubican en el calibre

Nota. La anterior tabla describe como es el ángulo en el que son colocados los cortadores en la broca al momento de perforar. Tomado de Baker Hughes (como se citó en Viera y León, 2021) con modificaciones.

4.4.1.2.3 Conos. Es la parte donde se encuentra la mayor densidad de cortadores, ubicándose entre el centro de la broca y el radio de la nariz, generando la estabilidad necesaria a la broca, para evitar su desviación. El ángulo del cono, que determina la forma de punta, generalmente oscila entre 20° y 25° (Monzón, 2010).

4.4.1.2.4 Nariz. Esta entre el cono y el hombro de la broca, es la parte donde se tienen la mayor concentración de cortadores, es directamente proporcional con el radio de la nariz, ya que la cantidad de cortadores aumentara debido a esto (Monzón, 2010).

4.4.1.2.5 Hombro. Es el encargado de disminuir el desgaste de los cortadores, ya que se ubica en el radio exterior de la broca entre el radio de la nariz y el calibre (Monzón, 2010).

4.4.1.2.6 Boquilla. Existen dos tipos de boquillas en las brocas puede con rosca o con anillo/pin dependiendo del fabricante, comúnmente en las brocas PDC el sistema de ajuste de la boquilla es con rosca.

Figura 20

Boquillas de rosca



Nota. Made-In-China (2024).

4.4.1.2.7 Protección de calibre. Es la sección exterior de la pierna de la broca, es una parte importante de la broca, ya que es la única parte del cuerpo que hace contacto con la formación, enfrentándose a un desgaste mayor.

Las brocas PDC se caracterizan por presentar diamantes naturales o sintéticos, según sea la necesidad de perforación, bajo el anterior análisis de su diseño y partes, se identificó que presentan conductividad térmica en el diamante y alta dureza, haciéndolo un material de alta resistencia para perforar todo tipo de formación, gracias a esto puede suplir la perforación en ciertas zonas superficiales del pozo geotérmico que se quiera hacer, ya que por estado mecánico de las secciones que se vayan a perforar, puede ser de gran utilidad, contando con las características necesarias en zonas someras, pero en el caso de otras secciones más profundas, ya se debe considerar otro tipo de broca que logre soportar la perforación.

A continuación, se define una tabla resumida de las características por el IADC para las brocas PDC.

Tabla 7

Código IADC para brocas PDC

Primer Carácter		Segundo Carácter					Tercer Carácter			Cuarto Carácter				
Tipo de cortador	Material del cuerpo	Perfil del Cuerpo						Diseño Hidráulico			Tamaño y Densidad De Los Cortadores			
		Altura del flanco	Altura del Cono			Distribución de Cortadores	Tipo de Orificio			Tamaño	Densidad			
			Alta	Media	Baja		Toberas	Orificio Fijo	Salida abierta		Alta	Media	Baja	
D	Diamante Natural	Matriz	Alto	1	2	3	En aletas	1	2	3	Grande	1	2	3
M	PDC	Matriz	Medio	4	5	6	En Costillas	4	5	6	Mediano	4	5	6
S	PDC	Acero	Bajo	7	8	9	No agrupados	7	8	9	Pequeño	7	8	9
T	TSP	Matriz	0					R- Flujo radial X- Flujo cruzado			0: Impregnado			

Nota. Tomado de González y Rincón (2021).

4.4.1.3 Caso estudio. SLB lanzó una línea nueva de broca llamada ThermoBlade, la cual se compone de diamante resistente a elevadas temperaturas y con una larga vida útil. Este tipo de broca se probó en el proyecto Utah FORGE, ganando un concurso de todas las tecnologías de brocas óptimas para perforar granito. Presentando un margen significativo, tuvo una buena vida útil larga a pesar de todos los pozos probados en las pruebas realizadas por el proyecto FORGE. Es por ello que SLB, también es una empresa que apunta a la búsqueda de nuevas tecnologías para perforar formaciones duras (Llamosa, 2023).

4.4.2 Brocas Tricónicas

Las brocas tricónicas, se componen por tres conos cortadores, girando sobre su propio eje, estos pueden variar de acuerdo con la estructura de corte, suelen tener insertos de carburo de tungsteno o dientes de acero fresado y cambiar su sistema de rodamiento, estas brocas cuentan de tres componentes.

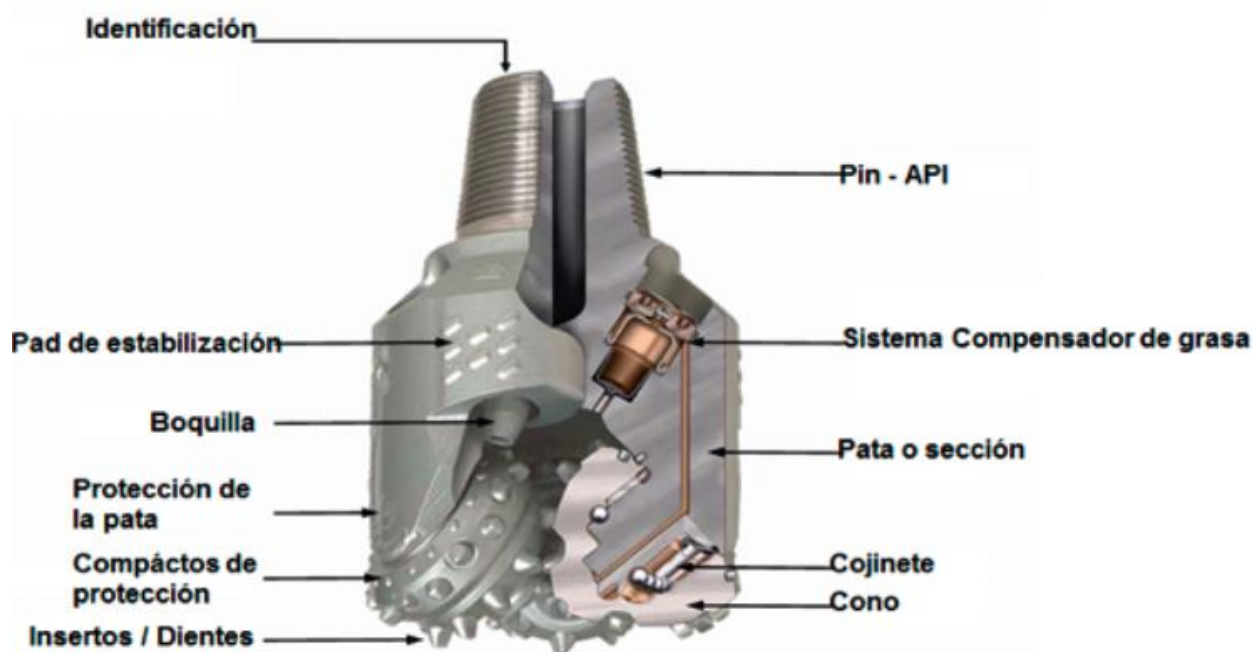
- Cojinetes
- Estructura de corte o conos
- Cuerpo de la broca

Su diseño se basa para una variada cantidad de aplicaciones, perforando desde formaciones muy duras, abrasivas, plásticas, blandas, pegajosas o de cualquier combinación, su forma rotativa de perforar la formación se da utilizando principalmente dos principios; Ngugi (2008), menciona que estos dos principios son: “1. remoción de roca al exceder su resistencia al corte y; 2. eliminación al exceder la resistencia a la compresión” (p.3).

Estas brocas son sin duda las más usadas en la industria de los hidrocarburos, generando una facilidad en la perforación de pozos, adecuándose al escenario, ya que con el paso de los años puede variar el material de su composición según la necesidad.

Figura 21

Partes de una broca Tricónica



Nota. Grupo de Investigación Perforación (2011).

4.4.2.1 Diseño de brocas Tricónicas. El cuerpo de la broca esta forjada y soldada, compuesta inicialmente con tres piezas, llamadas patas, donde se ubican boquillas, generalmente para este tipo de brocas su ajuste en la boquilla es tipo pin Ngugi (2008), menciona que:

Con pasadores de rodamiento en el extremo inferior de cada pata. Cada pata también tiene un saliente de boquilla y una tercera pieza circular en forma de arco en la parte superior.

Después de soldar y girar, estas tres piezas en forma de arco forman la conexión de pasador roscado API (p.3).

4.4.2.1.1 Tipos de cortadores. Otro aspecto importante para la perforación con estas brocas es el tamaño de los dientes como se vio anteriormente en la Tabla 5 Para el caso de enfrentarse a una formación blanda se utilizan dientes largos y descentralizados, y en formaciones duras, se usan dientes pequeños con menor descentralización.

Tabla 8
Estructura de corte

Diamantes de acero	Insertos de carburo de tungsteno
Económico	Resistencia
Formaciones blandas, medias, suaves	Formaciones blandas, y muy duras
	

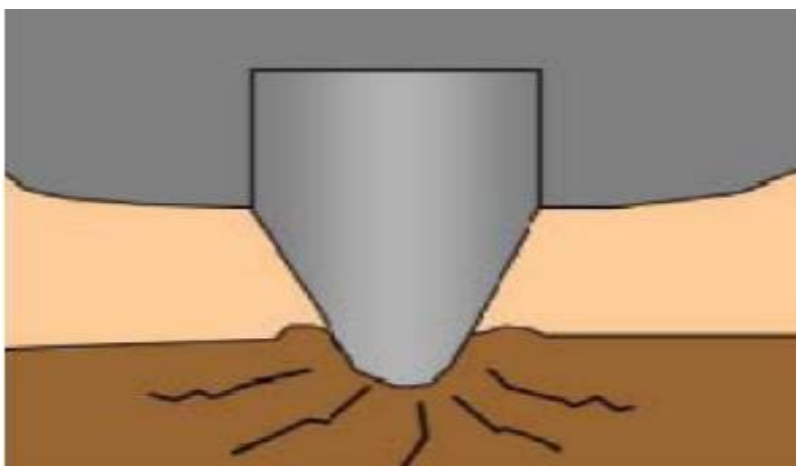
Nota. Adaptación propia del autor (Ramos, 2011).

4.4.2.1.2 Mecanismo de corte. Perfora la roca por compresión, ejerciendo una carga perpendicular a la roca, en la fracturación se propaga radialmente hacia el radio del hueco desde el punto de contacto, ampliando su área de acción ya que se puede usar en una variedad de formaciones desde blandas a duras, donde las boquillas son fundamentales para la ROP.

Para estas brocas existe una mayor exigencia en la aplicación de WOB que se aplica, debido a su mayor resistencia, es fundamental prestar atención a las especificaciones del fabricante para garantizar un rango de peso optimo.

Figura 22

Mecanismos de corte en broca Tricónica



Nota. González et al. (2010).

4.4.2.1.3 Cojinetes. Su diseño esta principalmente pensado en tener un desplazamiento del centro geométrico de la broca, ya que, debido al desplazamiento, los conos se suelen arrastrar a través de la superficie de la formación, lo que facilita el deslizamiento, corte, ranurado por parte de los dientes en la parte inferior, lo que elimina las virutas de manera eficaz (Ngugi, 2008).

A medida que se perforan rocas más duras, el grado de compensación de las brocas disminuye debido a la falla por compresión convirtiéndose en el principal mecanismo de perforación en lugar del corte, entre menos desplazamiento haya se provoca que la broca se desgaste más rápido en formaciones duras (Ngugi, 2008).

Tabla 9

Tipos de cojinetes

Rodillos	Journal
RPM	WOB
Mayores diámetros	Menores diámetros
Soporta carga radial	Soporta carga radial

Nota. Propia del autor.

4.4.2.1.4 Sistemas de rodamiento no sellados. No tienen en su diseño ningún tipo de sello entre el cono y la sección, Por eso el lodo actúa como lubricador de la broca mediante la circulación, sus rodillos son de acero inoxidable como componente de rodamiento y la retención se da por bolillas de acero. Normalmente se usan para la perforación de formaciones blandas no consolidadas, como arcillas, conglomerados, etc (Ramos, 2011).

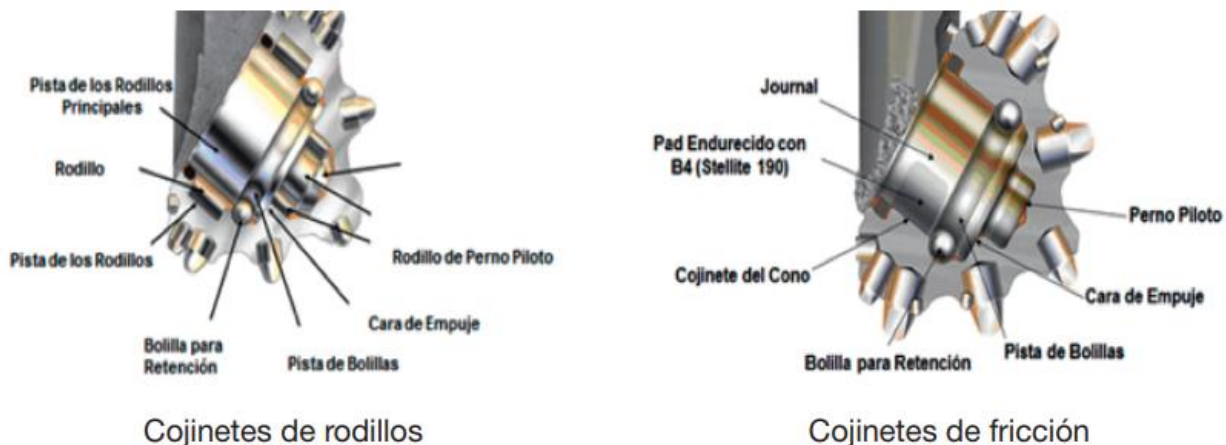
4.4.2.1.5 Sistemas de rodamiento de cojinetes sellados. En su diseño cuenta con auto lubricación incorporándose sellos entre los conos y la sección. Los sellos pueden ser de nitrilo altamente saturado o sello metal-metal, impidiendo el ingreso de fluido al sistema sin dejar de

mantener la grasa en condiciones óptimas, para este caso se tiene dos diseños cojinetes: (Ramos, 2011).

- **Cojinetes de rodillos:** Su diseño fue pensado en reemplazar a los cojinetes de fricción rudimentarios. Los cojinetes de rodillo cuentan con una o más filas de rodillos. Los de dos líneas por lo general se emplean en brocas mayores que 12¼” y menores que 20” y los de tres filas en brocas de 20” o mayores. Su ubicación se de acuerdo con el soporte de la carga radial, resistiendo altos pesos (PSM) y menores RPM, ya que las cargas se reparten de manera puntual en los rodillos (Ramos, 2011).
- **Cojinetes de fricción:** “Su diseño está enfocado en soportar altas RPM y bajos pesos (WOB), debido a que las cargas se distribuyen de manera uniforme en la superficie del cojinete” Ramos (2011).

Figura 23

Estructura de un cojinete sellado



Nota. Tomado de Gordon, 2011. Seminario de brocas de perforación. Nivel básico.

4.4.2.1.5 Cuerpo de la broca. El objetivo del cuerpo de la broca es dirigir el fluido de perforación, haciendo un buen barrido de los recortes en el pozo, estas son de tipo chorro apuntándolo al fondo del pozo.

Sus componentes son:

- Una conexión roscada, uniendo la broca con toda la sarta de perforación
- Ejes para los cojinetes, en donde se ubican los conos
- Depósitos de lubricante, para los cojinetes
- Orificios para el fluido de perforación, limpiando el pozo.

Las brocas triconicas, son una de las más usadas en la industria geotérmica, sin embargo, para su uso se debe considerar ciertas especificaciones; Entre ellas los cojinetes, fluido lubricante y los sellos, que se deben de adecuar para soportar altas temperaturas. Las brocas triconicas son una de las más usadas para la perforación de estos pozos por presentar alta durabilidad en las rocas fracturadas y duras, que se puede ver con mayor seguridad en estos yacimientos.

A continuación, se presentará en la Tabla 10, el IADC correspondiente para la identificación del tipo de broca que se vaya a usar.

IADC de brocas Tricónicas

Parámetros	Primer	Segundo	Tercer dígito								
	Sistema de corte	Dureza	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dientes de acero	1	Dientes de	1	Suave							
		acero para	2	Media suave							
		formación	3	Media Dura							
		blanda	4	Dura							
	2	Dientes de	1	Suave							
		acero para	2	Media suave							
		formación	3	Media Dura							
		media	4	Dura							
	3	Dientes de	1	Suave							
		acero para	2	Media suave							
		formación	3	Media Dura							
		dura	4	Dura							
4	Dientes de	1	Suave								
	acero para	2	Media suave								
	muy	3	Media Dura								
	blanda	4	Dura								
5	Dientes de	1	Suave								
	acero para	2	Media suave								
	formación	3	Media Dura								
	dura	4	Dura								
6	Dientes de	1	Suave								
	acero para	2	Media suave								
	formación	3	Media Dura								
	media	4	Dura								
7	Dientes de	1	Suave								
	acero para	2	Media suave								
	formación	3	Media Dura								
	dura	4	Dura								
8	Dientes de	1	Suave								
	acero para	2	Media suave								
	formación	3	Media Dura								
	extradura	4	Dura								

Nota. En la anterior imagen se ve reflejada la clasificación IADC, para una broca tricónica González y Rincón (2021) con modificaciones.

4.4.3 Brocas Híbridas

El diseño de las brocas híbridas consiste en una combinación entre la perforación rápida de las PDC y el bajo torque generado por la broca tricónica, estas brocas buscan mejorar la ROP, en formaciones duras o intercaladas, en donde por causa de las fluctuaciones de torque, se puedan presentar fallas.

Algunas ventajas que ofrecen las brocas tricónicas es que pueden mejor control direccional para pozos desviados, disminuyen el torque total entre tres y cuatro veces, así como las fluctuaciones de este y reducir vibraciones laterales, torsionales y hasta axiales. Suelen agilizar la perforación y aumentar la vida útil de la broca que puede afectarse por las formaciones más abrasivas, así como en zonas de transición litológica.

4.4.3.1 Ventajas de las brocas Híbridas

- Los cortadores centrales de la broca presentan un menor % de daño
- En la cara de la broca hay menos desgaste, generando una duración efectiva
- Existe una mayor efectividad en los cortadores
- Su rendimiento en las formaciones duras es más notorio
- Regímenes de penetración más altos
- Protección de los cortadores PDC por la abrasión

- Está compuesta por menos cortadores PDC, para perforar formaciones duras o consolidadas

4.4.3.2 Híbridas Kymera. Es una broca que combina elementos de corte de la Tricónica y PDC, actualmente su nombre comercial está dado por parte de Baker Hughes, que tiene como objetivo combinar la trituración por parte de los conos y cizallamiento por parte del peso de la broca, haciendo un barrido con la PDC de los recortes, ya que puedo tener ambientes intercalados y con esta doble acción de corte evita hacer el cambio de broca por cada sección a lo largo de la perforación. En caso del desgaste se usan las dos brocas por separadas para evitar dos viajes y usar menos brocas.

Estas brocas son las encargadas de incrementar la tasa de penetración, previniendo el daño de la broca y aumentar su vida útil, reduce los tiempos perdidos e incrementa la fuerza de perforación.

4.5 Línea de brocas para yacimientos geotérmicos

En el mundo se está impulsando a la búsqueda de nuevas tecnologías para perforar yacimientos geotérmicos, que se encuentran a grandes profundidades, elevadas temperaturas y con formaciones rocosas cristalinas. Para llegar a estos yacimientos es necesario contar con conocimientos y pruebas de herramientas que puedan optar por alcanzar cada reto a nivel global, En un documento de Geotermia Online (2017) menciona que el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos, para superar estos retos con la ayuda de Baker Hughes y la Oficina de

Tecnologías Geotérmicas (GTO), han desarrollado y mostrado su interés en avanzar para los recursos geotérmicos con herramientas nuevas e innovadoras.

En la actualidad se destaca una línea de brocas para yacimientos geotérmicos; las llamadas Brocas Vulcanix abordando formaciones de difícil acceso y de altas temperaturas. Esta línea ofrece brocas geotermiales, PDC, Tricónicas e Híbridas (Kymera) y Brocas Xplorer y Thermoblade de SLB.

Ya existen algunos lugares en donde han experimentado este tipo de brocas Vulcanix, como es Indonesia, para este caso se usó una broca Kymera, perforando litología ígnea y otro caso de estudio como fue el proyecto de Utah en el departamento de energía estadounidense con una broca PDC, la cual favoreció el proyecto por su alta tasa de penetración.

4.5.1 Brocas Xplorer

En busca de una herramienta óptima para yacimientos geotérmicos, se creó una iniciativa enfocada en mejorar el cono de rodillo de la broca tricónica convencional, Este proyecto se logró tras diferentes variaciones de temperatura y presión en el fondo del pozo. Ingenieros conocedores del área trabajaron para generar un compuesto de sellado de fluorocarbono técnico y una fórmula de grasa patentada que soportara altas temperaturas. Después del éxito de esta investigación se desarrolla un nuevo sello que contenga compuestos reforzados con tela que suministran una excelente estabilidad térmica y resistencia al desgaste. Así mismo se desarrolló un compuesto de grasa para altas temperaturas con una mezcla precisa de lubricantes sintéticos, litio y varios aditivos para agrandar la capacidad de carga a altas temperaturas, esta nueva grasa puede mantener una capacidad de carga constante de hasta 260 °C.

El operador Enel Italia probó recientemente en campo las brocas Kaldera RC en un pozo de producción geotérmica de Larderello con resultados sobresalientes. Se utilizaron tres brocas Kaldera de 8 1/2 pulgadas para perforar formaciones metamórficas de granito duras y abrasivas con una temperatura promedio de 160 a 177 °C con puntas de hasta 299 °C (SLB, 2024).

Figura 24

Broca cónica de rodillo premium xplorer



Nota. Tomado de SLB, 2024.

4.5.1.1 Brocas Thermoblade. SLB tiene una broca PDC modificada llamada ThermoBlade la cual cuenta con un elemento de corte patentado de una mesa de diamantes grueso-resistentes al calor. La interfaz ofrece un corte resistente, ya que la durabilidad de sus elementos de corte también tiene una nueva estabilidad térmica a 1.000 grados y con sus fuerzas de corte concentradas en la punta. Esta broca disminuye la degradación térmica y mejora las características en la ROP y su capacidad para perforar a intervalos de profundidad total (TD) en menos corridas, mejorando el rendimiento general de la broca (SLB, 2024).

Figura 25*Broca Thermoblade*

Nota. SLB, 2024.

4.5.2 PDC geotérmica

Diseñadas para perforar formaciones más calientes y profundas que las PDC convencionales, alcanzando en el proyecto de Utah ROP=142 ft/hr (Baker Hughes, 2024).

4.5.3 Híbrida Kymera geotérmica

Su diseño es combinado con PDC y Tricónico geotermiales, permitiéndoles perforar en ambientes más agresivos, alcanzando una alta eficiencia, una corrida de esta broca en promedio puede alcanzar 3280 ft aproximadamente, en un caso estudio alcanzó a perforar una sola broca, 4921 ft usando 15,8 ROP (Baker Hughes, 2024).

4.5.4 Tricónica geotérmica

Está diseñada para formaciones más volcánicas, Un caso estudio desarrollado con esta broca fue en Finlandia, donde perforó una formación de granito con 85 Kpsi USC dureza de la roca, sus componentes de alta temperatura permiten que la broca funcione en largas corridas e incluso si existe temperaturas por encima de los 204 °C, para el caso estudio se dio un 13% en ROP promedio. (Baker Hughes, 2024).

4.6 Ejemplos de pozos perforados con brocas PDC, Híbrida Y Tricónica

Mundialmente se ha trabajado en algunos campos geotérmicos, como caso estudio y otros han tenido éxito, sin embargo, el reto de hacer una buena perforación siempre estará presente, ya que se puede presentar algunas complicaciones. Algunos ejemplos de estos casos estudio se verán a continuación.

4.6.1 Venelle-2 - broca especial PDC

En el campo geotérmico Lardarello al sur de Toscana, está el pozo Venelle-2 un pozo exploratorio direccional reperforado desde uno de los pozos secos ya presentes, a una profundidad total de 7218 (ft) y alcanzando temperaturas aproximadas de 350 °C,

Su principal objetivo era perforar el 'Korizonte K' (Marcador sísmico que se descubrió cerca del área por otras empresas de perforación profunda) a 9843 ft, para alcanzar recursos geotérmicos supercríticos. Este pozo presentó muchos retos en la perforación, entre ellos altas presiones antes de llegar a la zona de interés, provocaron estallidos y erupción de brechas de turmalina-cuarzo y fragmentos de veta.

En la perforación de Venelle-2, se usó una broca especial PDC sin piezas de elastómero, con una composición "Totalmente metálicas", ya que puede funcionar a condiciones de temperaturas extremas, esta tecnología de brocas logró obtener buenos resultados en términos de avance de perforación y durabilidad (Bertani et al., 2018).

4.6.1 IDDP-2 – PDC e Híbridas

El pozo IDDP-2 se reperforó de un pozo que se encontraba en producción geotérmica vertical, el RN-15 de 8202 ft ubicado en el campo geotérmico de Reykjanes al suroeste de Islandia. Hasta el momento este pozo IDDP-2 tiene el revestimiento cementado más profundo de todos los pozos geotérmicos de Islandia. Se intentaron 13 corridas de núcleos con una recuperación de núcleos bastante pobre se usó una broca de diamante de 8½” impregnada y una recuperación de núcleo perfecta de casi el 100 % con una broca de núcleo PDC de 6” debajo del tubo de revestimiento (Kruszewsk y Wittig, 2018).

Con una mala recuperación del núcleo, el pozo se perforó hasta 4659 ft con éxito de las condiciones supercríticas presentes de las salmueras geotérmicas en el sistema geotérmico de Reykjanes con 427 °C y 4931 psi de presión, las principales zonas de alimentación del pozo IDDP-2 se estimaron a profundidades de 11024 ft , 13780 ft, 14337 ft y 14928 ft (Kruszewsk y Wittig, 2018).

Para la perforación de este pozo, se usó brocas rotativas tricónicas para elevadas temperaturas y una broca híbrida especial para temperaturas de circulación del fluido de perforación de hasta 300 °C con una grasa para alta temperatura especialmente diseñada y sellos de metal con metal para operaciones. En cuanto a la eficiencia de las brocas se demostró que ambas

trabajaron sin ningún problema proporcionando buenas tasas de penetración y una excelente vida útil (Kruszewsk y Wittig, 2018 como se citó en Stefánsson et al., 2018).

Para este pozo se desarrolló junto con brocas resistentes a la temperatura, un modelo de sistema de perforación direccional sin elastómeros con sellos de metal a metal, para la aplicación de Sistemas geotérmicos mejorados (EGS) en un ambiente con fluido agresivo y condiciones de fondo de pozo de alta temperatura 300 °C (Chatterjee et al., 2015). La conclusión obtenida después de corridas seguidas de broca con el mencionado sistema de perforación direccional metal sobre metal, demostró que se se desgasta estator y rotor de la broca; no obstante, la sección de potencia aún se encontraba operativa y proporcionaba valores de par de acuerdo con las especificaciones del fabricante (Stefánsson et al., 2018). A resumidas cuentas, el prototipo de este sistema direccional para pozos geotérmicos de hasta 300 °C demostró funcionar con éxito durante las operaciones de perforación IDDP-2 (Kruszewsk y Wittig, 2018 como se citó en Friðleifsson y Elders 2017).

5. Catálogo

Existe un análisis previo para la selección adecuada de brocas de perforación, la cual consiste en un análisis Offset, que abarca condiciones y limitaciones de anteriores operaciones en la zona de interés. Para el caso de yacimientos geotérmicos de alta entalpía en Colombia, debido a la falta de información y casos de estudio, se ha buscado investigar sobre brocas usadas en la industria de los hidrocarburos, que puedan ser óptimas para la perforación de éste tipo de yacimientos donde se debe tener en cuenta factores como son el peso sobre la broca, los cambios de litología, abrasividad, temperatura y espesor de la formación, densidad del lodo, tasa de perforación, deformación y esfuerzos de la broca que deberá presentar para poder superar todos

los factores, ya que dependiendo de estos análisis se escoge las mejores características de diseño indicado.

Existen unas características principales para selección de broca en donde el TFA y HSI, son parámetros muy importantes, para el cuerpo de la broca, tipo de cortadores, cantidad y distribución de las boquillas, protección en el gauge, recubrimiento de metal, tamaño del gauge, resistencia al impacto, cantidad de aletas.

En el anterior capítulo se mencionó las brocas más relevantes para este tipo de trabajos, como son las PDC, Tricónicas, Híbridas y Vulcanix. Con base a la información recolectada, no se puede hablar de un diseño general o específico de broca, ya que depende de la compañía fabricante.

Para la elaboración de este catálogo se han contemplado algunas de las soluciones actuales en el mercado Tabla 11 y Tabla 12, con las cuales se logró generar un diseño de pozo tipo para yacimientos geotérmicos en Colombia que se puede ver a continuación en :

Tabla 11

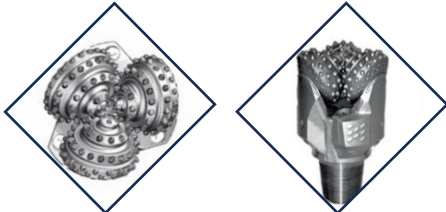
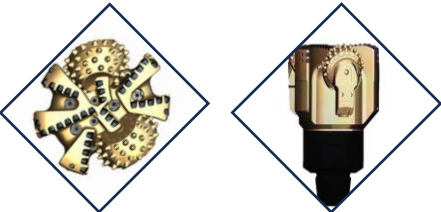
Diseño de pozo tipo para yacimientos geotérmicos en Colombia

Broca	Tamaño (in)	IADC	Características	Aletas	Cortadores (in)	Conos
Tricónicas	26"	115-117		-		3
Híbrida Kymera	17.5"	HYB	Tecnología Vulcanix K633X	3	0.748031	-
PDC	12.25"	M223	Tecnología Vulcanix	6	0.511811-0.629921	-
PDC	8.5"	M223	Tecnología Vulcanix	6	0.511811	-
PDC	6.5"	M233	Tecnología Vulcanix	6	0.511811	-

Nota. Propia del autor.

Tabla 12

Catálogo de brocas para yacimientos geotérmicos

Broca Tricónica (26 in)		
	Parámetro	Descripción
	IADC	115-117
	Hidráulicos	6
	Cojinetes	Triple rodillo
	Tipo de empaque	Shrouded O-ring
	Inserto de calibre	6 SP
	Tipo de conexión	Api
	Torque máximo	Según fabricante
	Inner row (fila interna)	-
	Heel row (fila de talón)	-
	OD protección	-
	Shipping weight (WOB)	-
	Velocidad de rotación	30-55 RPM
	Tasa de flujo hidráulico	CJ GST J JF
	Peso sobre la broca	32500-85000
Broca Híbrida Kymera (17.5 in)		
	Parámetro	Descripción
	IADC	HYB
	Cantidad de aletas	3
	Diámetro de cortadores	0.75 (in) 35/5/15
	Cantidad de cortadores	(Face/Backup/Gauge)
	Boquillas	9 SP
	Rango de TFA	2.7594 (in ²)
	Junk slot area	95.993 (in ²)
	Gauge	7.75 (in)
	Makeup	20.648 (in)
	Diámetro de acople	11.5 (in)
	Tipo de conexión	7 5/8 REG pin
		8.875 in. Bit sub
		9.000 in. Bit sub
	Torque máximo	
		9.250 in. Bit sub

Broca PDC (12.25 in)	
Parámetro	Descripción
IADC	M233
Cantidad de aletas	6
Diámetro de cortadores	0.625 (in)
Cantidad de cortadores	56/18/24 (Face/Backup/Gauge)
Boquillas	6 SP
Rango de TFA	2.2272 (in ²)
Junk slot area	34.18 (in ²)
Gauge	3 (in)
Makeup	15.502 (in)
Diámetro de acople	8 (in)
Tipo de conexión	-
Torque máximo	-
Broca PDC (8.5 in)	
Parámetro	Descripción
IADC	M223
Cantidad de aletas	6
Diámetro de cortadores	0.629 (in)
Cantidad de cortadores	32/13/6 (Face/Backup/Gauge)
Boquillas	6 MSP
Rango de TFA	2.23 (in ²)
Junk slot area	14.015 (in ²)
Gauge	4 (in)
Makeup	17.55 (in)
Diámetro de acople	
Tipo de conexión	
Torque máximo	

Nota. Adaptación de Baker Hughes, 2024.

Broca PDC (6.5 in)			
		Parámetro	Descripción
		IADC	M233
		Cantidad de aletas	6
Ventajas Ofrecen estabilidad rigidez y una larga vida útil en condiciones complejas inclusive si existen cambios litológicos en la zona con posibles variaciones de temperatura. Permite una perforación más profunda y rápida conservando unas condiciones óptimas en la broca.		Diámetro de cortadores	0.529 (in)
		Cantidad de cortadores	33/5/12 (Face/Backup/Gauge)
		Boquillas	6 MSP
		Rango de TFA	1.1778 (in ²)
		Junk slot area	8.134 (in ²)
		Gauge	3 (in)
		Makeup	9.14 (in)
		Diámetro de acople	4.75 (in)
		Tipo de conexión	3 1/2 REG pin
			4.250 in. Bit sub
		Torque máximo	4.375 in. Bit sub
			4.500 in. Bit sub

Nota. Adaptación de Baker Hughes, 2024.

Para el diseño de las brocas, se debe considerar las siguientes características se pueden ver en Tabla 13 y Tabla 14, estas son algunas generalidades para la elección a adecuada de la broca.

Tabla 13

Características de brocas PDC

Parámetros		PDC
Cuerpo		Acero Matriz
	Diamantes naturales	Diamantes policristalinos
	• Para matriz de carburo de tungsteno • Ideal para formaciones duras y abrasivas • Contacto con el fondo del pozo • Tienen canales de limpieza • Mediante el perfil se ve (Mecanismo de corte, tamaño y # de diamantes)	• Diamante adherido a un sustrato de carburo de tungsteno • Soporta elevadas P y T ° • Presenta un desgaste mayor por la fricción con la formación.
Perfil de Corona	• Brocas con ahusamiento largo: Perforan Vertical, permitiendo >WOB y más diamantes • Brocas con ahusamiento corto (Parabólico): Para concentraciones de menor área superficial • Brocas con ahusamiento más cóncavo: Para perforación direccional y aumentar ángulo de desviación.	• Perfil de cono simple • Perfil doble • Perfil de fondo plano
Mecanismo de corte	• Mediante fricción • Abrasión mecánica	• Por cizallamiento • Ideales para aumentar la tasa de penetración
Formaciones	Para formaciones duras y abrasivas	Para uso en formaciones blandas, duras, medianas y firmas.
Tamaño y # de diamantes	• Para formaciones duras, muchas piedras pequeñas • Para formaciones blandas, pocas piedras pequeñas • Diamantes resistentes al calor	Para escoger esto se debe tener ciertas consideraciones, como lo es la formación o litología para perforar.

Nota. Elaboración propia del autor.

Tabla 14*Características de brocas tricónicas*

Parámetros		Tricónicas
Cuerpo		Acero Matriz
Conos	• Giran alrededor de sus ejes. • Sus conos se encuentran descentralizados para una mejor perforación • Tienen dos tipos de ángulos, pueden ser de 4° para formaciones blandas y de 0° para formaciones duras.	
Tipos de cortadores	Formaciones blandas • la forma del diente es larga • Dientes de acero, tienen un corte agresivo • Alto ROP • La forma del diente es de cincel.	Formaciones duras • la forma del diente es corta y debe estar descentralizado. • Insertos de carburo Tungsteno • La forma del diente es semiesférica
Mecanismo de corte	• Por cizallamiento • Aumenta la tasa de penetración	
Formaciones	Usado en formaciones duras con rocas de tipo ígneo e intrusivo.	
Tipo de Cojinetes	Sellados	
	Con cojinetes de rodillo • Para soportar altos pesos y menos RPM • Para brocas >12 ¼ • Desarrollar nuevos materiales de sellado y grasa lubricante que mejoren la durabilidad de los rodamientos de brocas en ambientes de alta temperatura.	
Tipo de Cojinetes	No sellados	
	Para formaciones blandas no consolidadas (Arcillas, conglomerados) Con cojinetes de fricción • Para soportar más peso sobre la broca	

Nota. Elaboración propia del autor.

6. Conclusiones

Mediante la investigación presentada en el desarrollo de este trabajo se determinó que:

Se pudo realizar una revisión de la información presente en el SGC, sin embargo, no se cuenta con datos específicos de las condiciones geológicas que puedan existir después de los 9843 ft aproximadamente, ya que no se ha logrado llegar hasta esas profundidades, donde existe el reservorio de energía geotérmica. Dentro de las generalidades contempladas por el SGC, se ha podido determinar que en Colombia existen 21 potenciales zonas de aprovechamiento, entre las que se destacan San Diego, Santa Rosa, Cerro Machín, Nereidas - Botero Londoño, la Caldera del Paletará y Azufral presentando temperaturas entre 200-250 °C. La mayoría de estas áreas geotérmicas desembocan de depósitos volcánicos principalmente con presencia de rocas metamórficas, también se pudo determinar qué el reservorio está alojado en el complejo de Cajamarca, por ello se llega a la conclusión de que si es viable desarrollar proyectos piloto en estas regiones.

Referente a la tecnología existente en la industria de los hidrocarburos, se encontró que hay diferentes tipos de brocas, en las cuales destacan PDC, Tricónicas e Híbridas, por ser las más adecuadas a condiciones de T°, presión y cambios litológicos, sin embargo, no son lo suficientemente resistentes para perforación de yacimientos geotérmicos, es por esto que se deben realizar modificaciones en su diseño como materiales y parámetros, haciéndose necesaria la apertura de una línea de brocas geotérmicas para los fabricantes de estas.

El proceso de catalogación de brocas óptimas para la perforación de pozos geotérmicos en Colombia está limitado por la inaccesibilidad de información por parte de las empresas fabricantes de esta nueva tecnología, por ello el catálogo presentado contempla datos aportados por una sola compañía y el diseño de un pozo tipo para yacimientos geotérmicos en Colombia. Dentro de las empresas fabricantes para esta área en Colombia se destacan Baker Hughes con su línea Vulcanix PDC, Tricónica e Híbrida Kymera y SLB con sus Broca ThermoBlade y Xplorer.

Teniendo en cuenta todos los aspectos analizados, se puede afirmar que el diseño de una broca geotérmica es indispensable a la hora de enfrentarse a la perforación de formaciones tan abrasivas con cambios litológicos que se puedan presentar en Colombia, ya que, al tener presencia de depósitos volcánicos y fallas, se puede afectar la vida útil de la broca si no se realizan las modificaciones adecuadas.

7. Recomendaciones

Debido a que la mayoría de información relacionada con este campo no se encuentra disponible, es imperativo hacer una vinculación con empresas relacionadas a la perforación de yacimientos geotérmicos, para obtener información de los pozos ya desarrollados.

Para permitir una afinidad con resultados y diseños de brocas, se debe tener una investigación preliminar de todas estas características especiales para la fabricación de una broca con larga vida útil.

El proceso de selección y diseño de una broca se puede optimizar haciendo uso de simulaciones computarizadas, las cuales puedan generar un escenario aproximado de lo que se quiere perforar y con esto ofrecer al cliente o la industria colombiana una opción óptima para la ejecución de nuevos proyectos enfocado en el aprovechamiento de yacimientos geotérmicos.

Para la elaboración de nuevos trabajos se recomienda tener en cuenta los criterios de selección listados en este documento, ya que se han recopilado mediante una exhaustiva investigación técnica de la industria, acompañada del análisis de diferentes casos de estudio alrededor del mundo referentes a la perforación de yacimientos geotérmicos.

Referencias Bibliográficas

- Alfaro, C. M., Rueda Gutiérrez, J. B., Casallas Y. P., Rodríguez G. Z., y Malo J. E. (2020). Estimación Preliminar del Potencial Geotérmico de Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/742_2021EstiPrePotGeotColombia/Documento/Pdf/EstiPrePotenGeoterColom.pdf
- ANH(2009). <https://recordcenter.sgc.gov.co/B19/23008050024780/documento/pdf/2105247801101000.pdf>
- Baker Hughes. (2023). Vulcanix PDC bit drills farther and faster than conventional bits in abrasive geothermal formation [Image]., Utah, Estados Unidos. <https://dam.bakerhughes.com/m/7b4865070157cacb/original/Vulcanix-pdc-faster-farther-geothermal-Utah-cs.pdf>
- Capítulo 1 Fundamentos Teóricos. (s.f.). <https://pygconsultoresve.com/wp-content/uploads/2019/01/DISE%C3%91O-DEL-PROGRAMA-DE-BROCAS.pdf>
- Calderon, E. (2019). Exploración de recursos geotérmicos mediante perforación petrolera en el área Quetena del departamento de Potosí (proyecto de grado). Universidad Mayor De San Andrés, La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/32105/PG-7048.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Curso Perforación de Rocas. (2014). Slideshare. Clasificación de las rocas. <https://es.slideshare.net/rgaldamesa/perforacin-de-rocas>
- Drill bits. (2024). Baker Hughes. <https://www.bakerhughes.com/drilling/drill-bits>
- Diferenciador. (2018-2024). Tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

<https://www.diferenciador.com/tipos-de-rocas/>

Energy Glossary. (2024). SLB. <https://glossary.slb.com/es/>

Energía Geotérmica. (s.f). Potencial geotérmico.

Feijoo, E y Padron, J. (2020). La Resistividad De Rocas Y Su Relación Con La Resistencia A Compresión Simple En Mina. Universidad, Ciencia Y Tecnología, 24 (99), 61-67.

Galera, J y Jiménez, G. (s.f.). Correlación Entre Los Parámetros De Perforación Y Las Propiedades Geomecánicas Del Terreno. <https://subterra-ing.com/wp-content/uploads/2020/04/2006.-Correlaci%C3%B3n-par%C3%A1metros-de-perforaci%C3%B3n-y-propiedades-geomec%C3%A1nicas-del-terreno.pdf>

García, C. (2008). Los Recursos Geotérmicos. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 16.3, 239-247.

Geothermal Drill Bit Solutions. (2024). Baker Hughes.

<https://www.bakerhughes.com/drilling/drill-bits/geothermal-drill-bit-solutions>

Geotermiaonline.com. (2017). Nuevas técnicas de perforación impulsarán la energía geotérmica en Estados Unidos. <https://geotermiaonline.com/7338/geotermia-10/>

González, D y Rincón, D. (2021). Diseño de una Boquilla con Diámetro Variable para ser usada en una Broca de Perforación (tesis de grado). Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/2fd43c3e-f577-4f47-9d49-0f6b8d7f2804/content>

González et al. (2010). Diseño del programa de brocas requeridas para perforar el pozo direccional XD (trabajo de grado). Escuela Superior Politécnica Del Litoral. <https://es.slideshare.net/julio1967/tesis-diseo-del-programa-de-brocas>

Gualteros, D. (2016). SlideShare de Scribd. Generalidades de brocas de perforación.

<https://es.slideshare.net/DavidGualteros/brocas-de-perforacion>

Grupo de investigación xué. (2020). Geotermia en la región central Semillero de investigación barión. Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

Haro, W. (2013). Metodología para la selección de brocas para el campo Cuyabeno-VHR (trabajo de grado). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Quito.

Imaizumi, H et al. (2029). Rendimiento de perforación de brocas de PDC para el desarrollo de pozos geotérmicos en experimentos de campo. Universidad de Stanford, Stanford, California.

ICGC. (s.f.). ¿Qué es un yacimiento geotérmico? Tipos de yacimientos geotérmicos.

<https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/Que-es-un-yacimiento-geotermico-Tipos-de-yacimientos-geotermicos#:~:text=un%20yacimiento%20geot%C3%A9rmico%3F-.Tipos%20de%20yacimientos%20geot%C3%A9rmicos,aprovechar%20de%20forma%20econ%C3%B3micamente%20rentable.>

ICAEN. (s.f.). Tipos de energía geotérmica. <https://icaen.gencat.cat/es/energia/renovables/geotermica/tipus/index.html>

Imaizumi. (2019). Drilling Performance of PDC bits for Geothermal Well Development in Field Experiments. Stanford University, Stanford, California.

Jiménez, K. (2019). Análisis del efecto de una modificación en el ángulo de boquillas para una broca PDC aplicando Dinámica de Fluidos Computacional (trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander, Colombia, Bucaramanga.

Jorquera, C. (2021). Comienzan las pruebas de tecnología de perforación geotérmica

potencialmente disruptiva. Piensa en geotermia.

<https://www.piensageotermia.com/comienzan-las-pruebas-de-tecnologia-de-perforacion-geotermica-potencialmente-disruptiva/>

Kruszewski, M y Wittig, V. (2028). Revisión de modos de falla en proyectos de perforación geotérmica supercrítica. Energía geotérmica 6,28. <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0113-4>

Llamosa, A. (2023). Entrevista – El impacto de GeothermEx en la industria geotérmica en los últimos 50 años | PiensaGeotermia - Noticias de energía geotérmica. Think GeoEnergy - Geothermal Energy News. <https://www.piensageotermia.com/entrevista-el-impacto-de-geothermex-en-la-industria-geotermica-en-los-ultimos-50-anos/>

Lagos, S. (s.f.). Estudio De Factibilidad Para La Instalación De Una Central Geotérmica En Chile (trabajo de grado). Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú, Catalunya, España. Universidad del Bío-Bío, Chile. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/105653/Resumen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Macias, J y Roacha, V. (2013). Evolución Vulcanológica del Volcán Cerro Prieto, B.C. Geotermia, 26, (1), 29-31. <https://biblat.unam.mx/hevila/Geotermia/2013/vol26/no1/3.pdf>

Made-In-China (2024).

Marbun et al. (2019). Casing failure identification of long-abandoned geothermal wells in Field Dieng, Indonesia. Geotherm Energy. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0146-3>

Marzolf, N. (2013). Emprendimiento de la Energía Geotérmica en Colombia. ISAGEN.

https://www.researchgate.net/publication/283328511_Emprendimiento_de_la_Energia_Geotermica_en_Colombia

Moreno, J y Duran, C. (2018). Efecto de las altas velocidades en la salida del fluido a través de las boquillas sobre la ROP durante la perforación en formaciones duras (trabajo de grado).

Universidad Industrial de Santander, Colombia, Bucaramanga.

Ngugi, P. (2008). Perforación De Pozos Geotérmicos. KenGen, 1-23.

Plan estratégico del conocimiento geológico del territorio colombiano. (2023 Geociencias

Básicas. <https://www2.sgc.gov.co/ControlYRendicion/planes-presupuesto-gestion/Indicadores/2015-Plan-Estrategico-del-Conocimiento-Geologico-2014-2023.pdf>

Pastor, J. (2023). Xataka. La energía geotérmica quiere tener su oportunidad.

<https://www.xataka.com/energia/solucion-al-problema-energetico-esta-nuestros-pies-alguien-va-a-cavar-pozo-20-km-para-demostrarlo-1>

Puente, C y Peña, L. (s.f.). Geología Del Campo Geotérmico De Cerro Prieto. Comision Federal de Electricidad Coordinadora. Ejecutiva de Cerro Prieto Mexicali, Baja California, Mexico,

1-24. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/DOE-CFE/1978/Puente.pdf>

Ramos, J. (2011). Estado del Arte de Brocas de Perforación (grupo de investigación de

Perforación) Universidad America. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/500.11839/784/1/1034302975-2011-2-IP.pdf>

Raymond. (2012). Las brocas PDC superan a las brocas convencionales en Proyecto de Perforación Geotérmica

Review of failure modes in supercritical geothermal drilling projects. Geothermal Energy (2018).

doi.org/10.1186/s40517-018-0113-4

Revistel. (2024). Plantas Geotérmicas (Primera Parte). <https://revistel.pe/plantas-geotermicas-primeraparte/#:~:text=Complejo%20Geot%C3%A9rmico%20Makban%20%E2%80%93%20Filipinas%3A&text=Es%20la%20cuarta%20mayor%20instalaci%C3%B3n,subsidiaria%20propiedad%20de%20Aboitiz%20Power>

Rincon, M. (2023). SlideShare de Scribd. Tasa de perforación. <https://es.slideshare.net/MariluzRincon2/tasa-de-perforacion-3ppt>

Roca, A. (2016). Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo. El periódico de la energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

Santamarias, J. (2025). Método computacional para el cálculo de la eficiencia de perforación de pozos petrolíferos mediante el método de los elementos finitos (grupo de investigación). Fundación Universidad de América, 111-121.

ShockWave shaped cutter. (2024). Baker Hughes. <https://www.bakerhughes.com/drilling/drill-bits/shapedcutter-technology/shockwave-shaped-cutter>

SLB. (2024). ThermoBlade [Image], <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/drilling/bottomhole-assemblies/drill-bits/blade-family-bits/thermoblade-bit>

SLB. (2024). Xplorer Kaldera, <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/drilling/bottomhole-assemblies/drill-bits/roller-cone-bits/xplorer-premium-roller-cone-drill-bit/xplorer-kaldera-seal>

SLB. (2024). Xplorer [Image], <https://www.slb.com/zh-cn/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/drilling/bottomhole-assemblies/drill-bits/roller-cone-bits/xplorer-premium-roller-cone-drill-bit>

Soberano, M. (2023). Uso de la energía mecánica específica. Universidad Juárez Autónoma De Tabasco, Universidad Federal De Rio De Janeiro. [https://es.slideshare.net/moy092/uso-](https://es.slideshare.net/moy092/uso-de-la-energa-mecnica-especifica)

[de-la-energa-mecnica-especifica](https://es.slideshare.net/moy092/uso-de-la-energa-mecnica-especifica)

Técnicos de Perforación diamantina en América. (2020). [Imagen adjunta]. Facebook.

<https://www.facebook.com/photo/?fbid=147092556997000&set=pcb.147092613663661>

Variables de operación. (s.f.). Capítulo 3 – Análisis de perforación, 1-50.

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8568/01.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Vercelli, A. (2012). ¿Qué es la energía geotérmica? Energías como bienes comunes.

<http://www.energias.bienescomunes.org/2012/06/26/que-es-la-energia-geotermica/>

Viera, A y León, K. (2021). Análisis para pruebas de nueva tecnología de cortadores en brocas PDC utilizadas en un campo colombiano del valle Magdalena medio (trabajo de grado).

Universidad Industrial de Santander, Colombia, Bucaramanga.

<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/05295421-dc71-4138-bca4-1b328a82e212/content>

Vulcanix geothermal PDC drill bit. (2024). Baker Hughes.

<https://www.bakerhughes.com/drilling/drill-bits/geothermal-drill-bit-solutions/vulcanix-geothermal-pdc-drill-bit>

Vulcanix geothermal Kymera hybrid drill bit. (2024). Baker Hughes.

<https://www.bakerhughes.com/drilling/drill-bits/geothermal-drill-bit-solutions/vulcanix-geothermal-kymera-hybrid-drill-bit>

WikiSabio. (2019). Composición química de la tierra [Imagen]. Geología.

<https://wikisabio.com/composicion-quimica-de-la-tierra/>

Yadav, K y Anírbibo, S. (2017). Revisión De Técnicas De Perforación Profunda Para Yacimientos

- Geotérmicos De Alta Entalpia. International Journal of Advanced Research, 5(6), 2359-2370. https://www.researchgate.net/publication/318318184_REVIEW_OF_DEEP_DRILLING_TECHNIQUES_FOR_HIGH_ENTHALPY_GEOTHERMAL_RESERVOIRS
- Yadav & Anirbido. (2017). Review of deep drilling techniques for high enthalpy geothermal reservoirs. Revista Internacional de Investigación Avanzada.
- Zuleta, G y Valdemar, J. (2022). Evaluación de yacimientos prospectos para la producción de energía geotérmica (tesis de pregrado). Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Colombia. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/a075caf4-0cac-412d-8ee0-3d581f5cb27c/content>