



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i1.1756>

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de revisión

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

Hydrogeological analysis of the shallow strata of La Joya de los Sachas through drilling conditions in vertical well sections

Análise hidrogeológica dos estratos rasos de La Joya de los Sachas por meio de condições de perfuração em seções verticais de poços

Christian Orlando Camacho-López^I
christian.camacho@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4876-9583>

David Isaac Cuenca-Gualan^{II}
david.cuencag@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-5712-5256>

Gregory Guillermo Cuesta-Andrade^{III}
gregory.cuesta@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9308-0593>

George Manuel Ortega-Quezada^{IV}
george.ortega@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0893-7514>

Correspondencia: christian.camacho@esPOCH.edu.ec

***Recibido:** 20 de diciembre 2020 ***Aceptado:** 25 de enero de 2021 * **Publicado:** 25 de febrero del 2021

- I. Master of Science in Hydrogeological Engineering, Ingeniero en Biotecnología Ambiental, Formación de Formadores, Grupo de Investigación de Recursos Mineros e Ingeniería, Docente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Macas, Ecuador.
- II. Master Universitario en Cambio Global: Recursos Naturales y Sostenibilidad, Ingeniero en Geología y Minas, Universidad Técnica Particular de Loja, Grupo de Investigación de Recursos Mineros e Ingeniería, Macas, Ecuador.
- III. Magister en Mineralogía Aplicada a la Geometalurgia, Ingeniero en Petróleo, Formación de Formadores, Grupo de Investigación de Recursos Mineros e Ingeniería, Docente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Macas, Ecuador.
- IV. Estudiante de la Carrera de Minas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Macas, Ecuador.

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

Resumen

La Amazonía ecuatoriana, a lo largo de las formaciones Hollín, Napo y Tena, contiene areniscas de la edad cretácica que permiten la explotación de yacimientos petrolíferos, convirtiéndose en un componente central de la dinámica económica del Ecuador. Los principales pozos petroleros perforados, analizados en este estudio son de tipo vertical, debido a la simplicidad en el diseño de su sarta y sus amplias aplicaciones en la exploración, explotación y obtención de testigos. Además, durante las perforaciones, se analizan y manipulan sus condiciones de avance, entre ellas, razón de penetración, peso sobre la broca, revoluciones de la broca por minuto, características físicas del lodo y comportamiento del lodo de acuerdo con la velocidad. La presente investigación aprovecha la obtención de los parámetros de perforación para inferir posibles zonas permeables que contengan agua, conocidas como acuíferos, en el cantón de la Joya de los Sachas, una zona de interés económico, conocida por ser prolifera en hidrocarburos al ubicarse en la Cuenca Oriente. Se analizó una profundidad de 1000 pies (304.8m) en cada uno de los pozos de estudio, identificando distintos estratos que contienen agua o hidrocarburos, además se detectaron diferentes tipos de acuíferos, entre ellos, confinados y colgados. La litología analizada indica que los estratos impermeables que funcionan como sellantes se formaron debido a transgresiones marinas, los cuales permiten mantener el fluido encapsulado en zonas con potencial extraíble.

Palabras claves: Acuífero; estratigrafía; perforaciones; formación tena; formación napo.

Abstract

The Ecuadorian Amazon, along the Hollin, Napo and Tena formations, contains sandstones from the Cretaceous age that allow the exploitation of oil fields, becoming a central component of the economic dynamics of Ecuador. The main drilled oil wells analyzed in this study are of the vertical type, due to the simplicity in the design of their string and its wide applications in exploration, exploitation, and coring. In addition, during drilling, its advance conditions are analyzed and manipulated, among them, penetration rate, weight on the bit, revolutions of the bit per minute, physical characteristics of the mud and behavior of the mud according to the speed. This research takes advantage of obtaining the drilling parameters to infer possible permeable zones that contain water, known as aquifers, in the canton of La Joya de los Sachas, an area of economic interest, known for being prolific in hydrocarbons as it is located in the Oriente Basin. A depth of 1000 feet

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

(304.8m) was analyzed in each of the study wells, identifying different strata that contain water or hydrocarbons, in addition, different types of aquifers were detected, including confined and suspended ones. The lithology analyzed indicates that the impermeable layers that function as sealants were formed due to marine transgressions, which allow the encapsulated fluid to be kept in areas with extractable potential.

Keywords: Aquifer; stratigraphy; perforations; training had; napo training.

Resumo

A Amazônia equatoriana, ao longo das formações Hollin, Napo e Tena, contém arenitos do período Cretáceo que permitem a exploração de campos de petróleo, tornando-se um componente central da dinâmica econômica do Equador. Os principais poços de petróleo perfurados analisados neste estudo são do tipo vertical, devido à simplicidade no projeto de sua coluna e às suas amplas aplicações em exploração, aproveitamento e descaroçamento. Além disso, durante a perfuração, suas condições de avanço são analisadas e manipuladas, entre elas, taxa de penetração, peso na broca, rotações da broca por minuto, características físicas da lama e comportamento da lama em função da velocidade. Esta pesquisa aproveita a obtenção dos parâmetros de perfuração para inferir possíveis zonas permeáveis que contêm água, conhecidas como aquíferos, no cantão de La Joya de los Sachas, uma área de interesse econômico, conhecida por ser prolífica em hidrocarbonetos por estar localizada na Bacia do Oriente. Foi analisada uma profundidade de 1000 pés (304,8m) em cada um dos poços em estudo, identificando diferentes estratos que contêm água ou hidrocarbonetos, além disso, foram detectados diferentes tipos de aquíferos, incluindo confinados e suspensos. A litologia analisada indica que as camadas impermeáveis que funcionam como selantes foram formadas devido a transgressões marinhas, que permitem que o fluido encapsulado seja mantido em áreas com potencial extraível.

Palavras-chave: Aquifer; estratigrafia; perfurações; treinamento teve; treinamento napo.

Introducción

La Amazonía ecuatoriana tiene arenas saturadas de petróleo pesado y asfáltico, que afloran a lo largo de las riveras de los ríos Hollín, Jodachi y Napo. Los yacimientos petrolíferos de la Amazonía ecuatoriana son generalmente areniscas de la edad cretácica, pertenecientes a las formaciones

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

Hollín, Napo y Tena (Baby, Rivadeneira, & Barragán, 2004). La primera concesión realizada para estudiar este tipo de recursos fue desarrollada en 1921, por la Leonard Exploration Company, y desde 1972 se convirtió en el componente central de la dinámica económica de Ecuador, al generarse un auge en las exportaciones petroleras que permitieron ingresar al Ecuador a la Organización de Países Exportadores de Petróleo, OPEP. (EP Petroecuador, 2013)

Los principales pozos petroleros perforados en la Amazonía Ecuatoriana son de tipo vertical, debido a la simplicidad en el diseño de su sarta. Las aplicaciones de este tipo de pozos van desde su uso para perforaciones exploratorias hasta perforaciones extractivas y de avanzada. Los pozos verticales son los más utilizados para la toma de muestra y ejecución de análisis estratigráfico, mineral, y elemental. (Villalobos, 2017)

El cantón "La Joya de los Sachas" de la provincia de Orellana, alberga al campo Sacha, donde se han realizado una gran cantidad de pozos petroleros por su gran potencial hidrocarburífero, estos han variado desde pozos verticales hasta pozos horizontales; siendo estas secciones verticales propicias para el análisis de los estratos con alto contenido de fluido. Este campo también es destacado por tener una producción diaria aproximada de 70 000 barriles de petróleo (Bustelo, 2008), pero con reservas estimadas de más de 300 millones, las cuales son de gran interés para el Ecuador desde hace varias décadas.

Las condiciones o factores influyentes dentro de una perforación son variantes que se analizan de acuerdo con el contexto geológico del área de estudio, con la finalidad de plantear procedimientos o soluciones durante el desarrollo de la perforación. Los factores de perforación más importantes son: razón de penetración (ROP), peso sobre la broca (WOB), revoluciones de la broca por minuto (RPM), características físicas del lodo (reología) y comportamiento del lodo de acuerdo con la velocidad (caudal de lodo) (Pernía, 1987)

La tasa de penetración (Rate of penetration, ROP) se refiere a la velocidad con la que la perforación avanza de manera descendente, el peso sobre la broca (Weight of Bit, WOB) es la fuerza normal que se aplica en la broca de perforación de acuerdo a los estratos y su densidad característica, las revoluciones de la broca por minuto (Revolution per minute, RPM) es la velocidad angular de la sarta de perforación, la cual depende del material litológico del área de estudio, la reología del lodo hace referencia a las propiedades como densidad, viscosidad, punto de cedencia, peso

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

específico, entre otros, mientras que, el caudal de lodo determina las píldoras o bombeos necesarios para realizar la perforación en cada estrato (Blanco, 2018).

Este tipo de parámetros no solo permiten obtener muestras para fines petrolíferos, sino que durante su desarrollo generan datos que indirectamente pueden identificar potenciales zonas saturadas con agua dulce conocidas como acuíferos, que posibilitan la dotación de agua potable en comunidades alejadas de la Amazonía Ecuatoriana, pues las aguas subterráneas constituyen la principal reserva de agua dulce aprovechable en nuestro planeta considerándose un 97% de las aguas dulces líquidas de la Tierra. (Camacho & Astudillo, 202)

La adecuada gestión del agua permite el desarrollo de múltiples actividades como: producción de alimentos, ganadería e industria, sin embargo, la distribución de agua potable en el área rural solo alcanza la mitad de la población con el 51,4%, motivo por el cual el presente estudio analiza condiciones de perforación en secciones de pozos verticales petroleros con la finalidad de identificar secciones acuíferas que permitan obtener agua para consumo humano e industrial.

Metodología

- **Desarrollo de la perforación**

Las perforaciones se realizaron con taladros de alta capacidad de aproximadamente 50 metros de altura, y de profundidad y carga, generalmente utilizados para ejecutar operaciones de perforación y completación en el nororiente ecuatoriano, lo que permite perforar hasta alrededor de unos 20000 pies de profundidad.

- **Muestreo de ripios de perforación**

Para el muestreo, los taladros contaban con un sistema de control de sólidos, donde las zarandas vibratorias permitían la remoción de ripios, de donde se extraían las muestras en simultáneo durante la perforación de pozo. Posteriormente, se realizaron inspecciones visuales y análisis fisicoquímicos para la construcción de las columnas estratigráficas.

- **Condiciones de perforación**

Durante la perforación de pozo se obtuvieron los mud logging que detallan las condiciones de perforación, entre ellas: razón de penetración (ROP), peso sobre la broca (WOB), revoluciones de

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

la broca por minuto (RPM), características fisicoquímicas del lodo (reología) y comportamiento del lodo de acuerdo con la velocidad (caudal de lodo).

- **Identificación de probables formaciones acuíferas**

Se analizaron los parámetros obtenidos de los mud logging de perforación, siendo el peso sobre la broca (WOB), el parámetro más característico en las formaciones que presentan elevado contenido de fluidos hidrocarburíferos, gaseosos o hídricos.

El peso sobre la broca (WOB) posee un rango que va de 0 a 50 klbf, sin embargo, para identificar posibles estratos relacionados con acuíferos o trampas hidrocarburíferas, el peso sobre la broca debe superar los 15 klbf, lo que indica que el proceso de perforación debe emplear mayor peso en la broca, debido a que se presentan nuevas condiciones de resistencia, al existir un aumento en la presión del fondo fluyente (Pwf).

Otro parámetro importante durante el análisis fue la tasa de perforación (ROP), que posee un rango de 0 a 500 pies por hora, sin embargo, el promedio de la tasa en las perforaciones realizadas es de 102 pies por hora, así, cuando existe un descenso en estos valores medios significa una velocidad menor de penetración, y con ello se identificaron estratos que presentan nuevas resistencias a la penetración, considerados potenciales acuíferos.

- **Modelamiento hidrogeológico de la zona de estudio.**

La variación de los parámetros de perforación obtenidos en campo fue analizada de manera manual, clasificando la sección vertical en unidades permeables e impermeables que posteriormente se ingresaron al software GMS® para construir secciones transversales tridimensionales entre perforaciones utilizando el módulo “borehole module”, así la variación hidrogeológica del suelo entre los pozos de análisis se obtuvo mediante interpolación de las secciones presentes en cada perforación.

Resultados

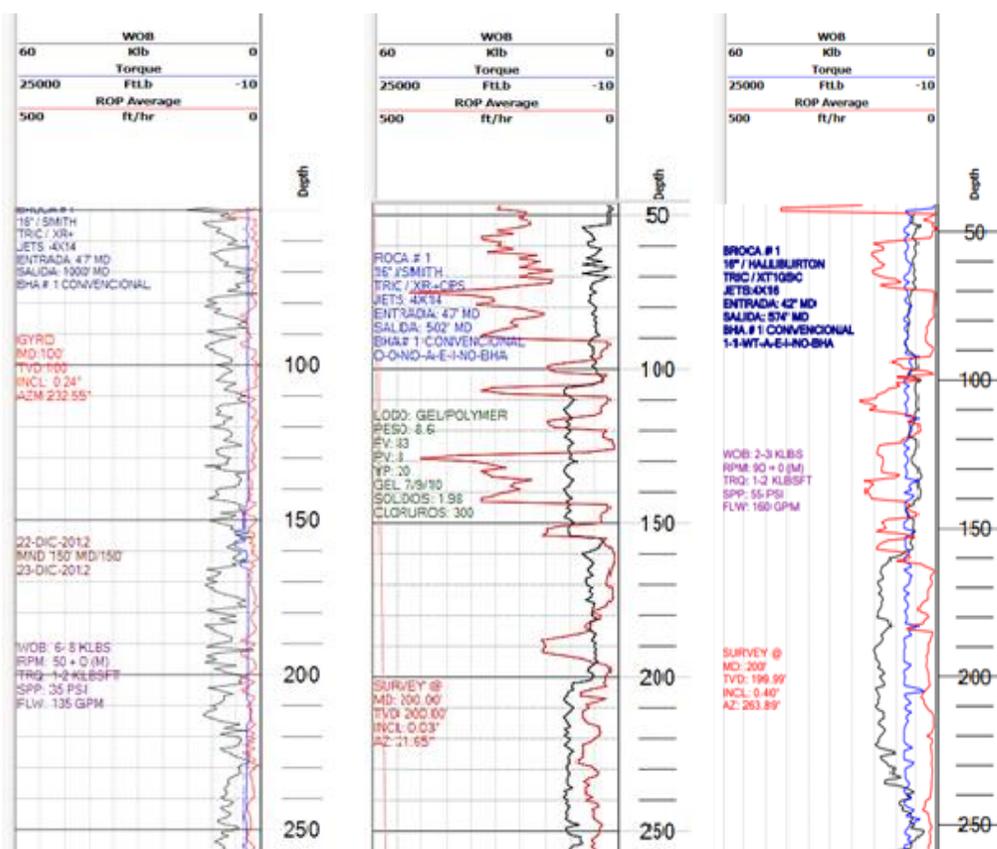
La sección vertical de los tres pozos permitió obtener sus mud logging, a través de los cuales se analizaron los parámetros de perforación WOB, ROP y RPM, para identificar posibles formaciones permeables, como se visualiza en la figura 1.

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

Como es visible en la Figura 1, el peso sobre la broca en las formaciones acuosas no posee valores superiores entre el rango de 15 a 50 klbf haciendo posible la identificación de los estratos relacionados con litofacies permeables. Estos valores corroboran que el proceso de perforación presenta nuevas resistencias, al existir una intrusión de fluidos o la presencia de la presión del fondo fluyente (Pwf). Un parámetro adicional también relevante es la tasa de perforación promedio que para este estudio resultó estar en los 100 ft/h, descendiendo ante la presencia de zonas saturadas de fluido.

a) b) c)

Figura 1: Mud logging de perforación: a) Sacha 362D, b) Sacha-400V, c) Sacha 473H

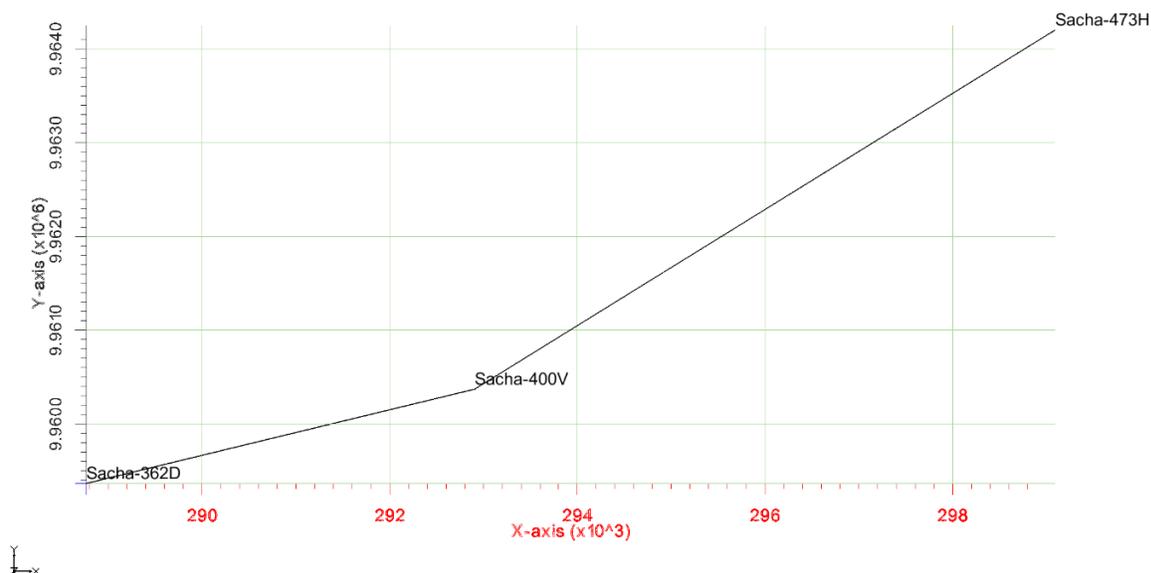


Además, es necesario considerar que se tiene por tendencia, un reacondicionamiento del lodo y un aumento de caudal cercanos a las formaciones acuíferas, por lo general se realizan estos reacondicionamientos con peso nulo sobre la broca o cuando no existe contacto de la broca con el fondo del pozo, esto, para asegurar el cambio o reacondicionamiento completo del lodo. Este tipo

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

de modificaciones se realiza ya que se necesita lodos de alto peso y con partículas de sellado para garantizar la impermeabilidad en esta zona e impedir intrusiones acuosas en el lodo, así como, alta contaminación a las formaciones con el lodo. Por lo cual, en ciertos casos los valores de WOD igual a cero no definen totalmente los tramos hidro saturados.

Figura 2: Vista planta de la ubicación de las perforaciones de estudio

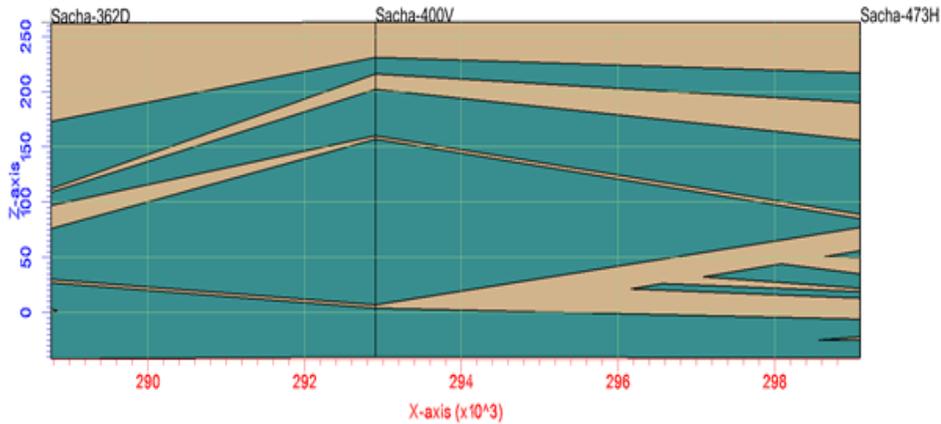


Las ubicaciones de las perforaciones de estudio permitieron obtener un análisis tridimensional de la variación hidrogeológica del lugar analizado considerando una extensión de 12km de longitud y 4km de latitud como se visualiza en la figura 2.

La figura 3 muestra como las formaciones tienen concordancia tanto en profundidades como en espesor, además se visualiza como los estratos acuosos empiezan a partir de los 32 metros de profundidad desde el pozo Sacha 400V y se expanden de manera descendente hacia los demás pozos analizados. Los pisos y techos se correlacionan con un posible buzamiento indicando que las formaciones pueden correlacionarse, tomando en cuenta la litología y las condiciones de perforación presentadas en cada metro de avance en profundidad.

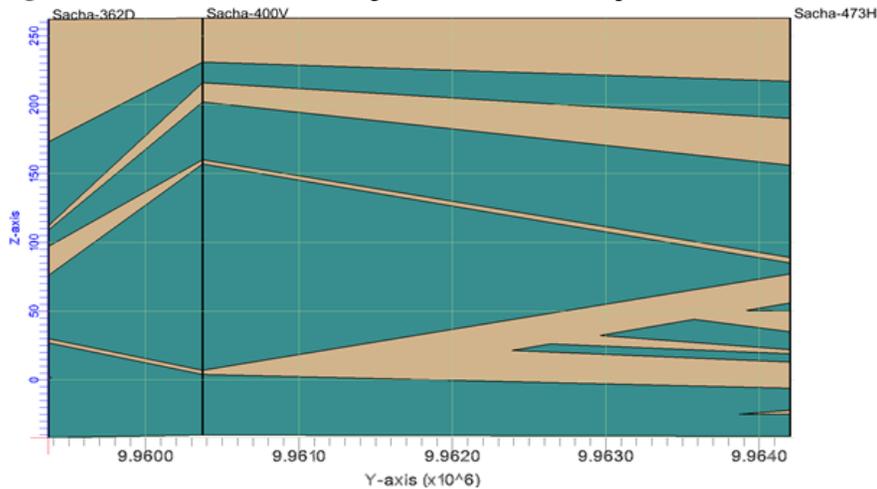
Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

Figura 3: Vista frontal de la estratigrafía del suelo con respecto a la longitud entre los pozos



La figura 4 presenta distintos estratos que son impermeables y sirven como trampa para la captación de fluidos, en este caso, agua y/o hidrocarburos. Estos estratos indican facies de sedimentación marino-somera debido a la litología compuesta por arenisca compacta y arcillolita. Además, se presentan indicios de transgresiones marinas que generan acuíferos colgados a profundidades mayores a 200 metros de profundidad en zonas cercanas al pozo Sacha 473H, mientras que en la sección Sacha 362D y Sacha400V se identifican zonas con gran potencial acuoso debido a la isotropía en su permeabilidad, así como, el gran espesor de la capa permeable que se identificarían como acuíferos confinados debido a las formaciones aledañas y su alta presión hidrostática.

Figura 4: Vista lateral de la estratigrafía del suelo con respecto a la latitud entre los pozos



Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

Los acuíferos de la zona de estudio conformados generalmente por areniscas con rango de conductividad hidráulica entre 10^{-4} y 1 que contienen una porosidad primaria saturada posiblemente por aguas congénitas, que quedaron atrapadas en los sedimentos durante los procesos de formación de las rocas sedimentarias, al considerarse la existencia transgresiones marinas y la presión geodinámica del área de estudio.

Conclusiones

- La identificación de estratos no solo se puede realizar a partir de los testigos tomados en una perforación, sino también analizando el comportamiento de los lodos de perforación, como la velocidad de avance y la fuerza que se le aplica a la broca, detectando a su vez cuerpos contenedores de fluidos, esto analizando sus parámetros en cada segmento de avance. Las variables más relevantes junto con los valores específicos considerados para la identificación en las secciones verticales de estos pozos son: El peso sobre la broca de 15 a 50 klbf relacionados a la presencia de la presión del fondo fluyente (P_{wf}); y el decaimiento de la tasa de perforación promedio que está en alrededor de los 100 ft/h, caídas de ratas asociadas a la presencia de fluido en las formaciones. Recomienda un estudio exclusivo y más detallado de todos los parámetros de perforación para definir puntualmente los valores representativos de estas variables.
- Para lograr un avance óptimo en la perforación y a la vez no dañar el pozo, debemos asegurarnos de que las características del lodo de perforación sean las idóneas en cada tramo perforado, en especial si tenemos estratos con saturación de fluidos. En el caso de tener formaciones con saturación de agua, el cambio de la reología del lodo es vital para operaciones efectivas. De manera general una reología más densa es esencial para evitar que los cortes de aguas disminuyan la presión hidrostática (P_h) y no incurrir en peligrosas arremetidas, los polímeros en el lodo fortalecen el revoque o costra de lodo lo que nos ayuda a la creación de una pared que impermeabiliza el espacio interno del pozo con respecto a las formaciones, disminuyendo la contaminación del lodo o a su vez provocando una mínima invasión en las formaciones.
- La Joya de los Sachas al ubicarse en la Cuenca Oriente posee características litológicas y físicas que permiten el desarrollo de zonas potencialmente prolíferas en fluidos como

Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales

hidrocarburos y agua, debido a la formación de buzamientos y formaciones trampa que permiten depositar fluidos de interés económico y social. Los acuíferos colgados de la zona de estudio se generan debido a una erosión de los estratos que originalmente los contenían por transgresiones marinas y la compresión andina lo que indica una edad relativa entre los ciclos Turoniano-Santoniano y Campaniano-Maastrichtiano.

- Se recomienda realizar un análisis hidrogeológico-geotécnico de los testigos de perforación, con la finalidad de establecer adecuadamente la conductividad hidráulica y porosidad de los estratos para identificar los posibles caudales de explotación de agua.

Referencias

1. Bustelo, P. (2008). El petróleo y el gas en la geoestrategia mundial. Ediciones Akal. <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/49561>
2. Baby, P; Rivadeneira, M; & Barragán, R. (2004). La cuenca oriente: Geología y Petróleo. Travaux del 'Institut Francais d'Études Andines
3. Blanco Ybañez, A. J. (2018). Manual de operaciones y diseño para fractura hidráulica de pozos de gas y petróleo. Jorge Sarmiento Editor - Universitas. <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/172320>
4. Camacho, C; & Astudillo, V. (2020). Evaluación del aprovechamiento empírico del agua subterránea somera del cantón Morona-Ecuador. Dominio de las Ciencias. Vol. 6, núm. 2, pp. 460-473
5. EP Petroecuador. (2013) El petróleo en el Ecuador. La nueva era petrolera. Quito, Ecuador. Manthra Comunicación integral y Producción Editorial.
6. Pernía Llera, J. M. (1987). Manual de perforación y voladura de rocas. Instituto Geológico y Minero de España. <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/101798>
7. Villalobos, J. (2017). Evaluación de Yacimientos. Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño.