

**ANÁLISIS DE LA ESTRATIGRAFÍA Y LAS
CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS
DE LOS ESTRATOS PROFUNDOS QUE
CONFORMAN EL SUBSUELO DE LA CUENCA
DE MÉXICO A PARTIR DE LA PERFORACIÓN
A 2000 M DEL POZO PROFUNDO
DENOMINADO "SANTA CATARINA 3A"**



Informe final por:

Eric Morales Casique

José Luis Arce Saldaña

José Luis Lezama Campos

Oscar A. Escolero Fuentes

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

RECTOR

Dr. Enrique Graue Wiechers

SECRETARIO GENERAL

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas

SECRETARIO ADMINISTRATIVO

Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez

SECRETARIO DE DESARROLLO INSTITUCIONAL

Dr. Alberto Ken Oyama Nakagawa

SECRETARIO DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD

M. en C. Mireya A. Ímaz Gispert

ABOGADA GENERAL

Lic. Mónica González Contró

COORDINADOR DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Dr. William Henry Lee Alardín

INSTITUTO DE GEOLOGÍA
CIUDAD UNIVERSITARIA
ALCALDÍA DE COYOACÁN
04510 CDMX

DIRECTOR

Dr. Ricardo Barragán Manzo

EDITORA EN JEFE

Dra. Ana Bertha Villaseñor Martínez

EDITORA TÉCNICA

Mtra. Sandra Ramos Amézquita

FORMADORA

Mtra. Alejandra Judith Vieyra Ramírez

FOTOGRAFÍA

M. en C. José Luis Lezama Campos

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

El procesamiento editorial se realizó en la Unidad Editorial del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México bajo la coordinación de la editora técnica Mtra. Sandra Ramos Amézquita con apoyo de las colaboradoras Mtra. Alejandra Judith Vieyra Ramírez y M. en C. Elizabeth Chávez García.

DR©2019 Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000,
Colonia Copilco Universidad, Alcaldía de Coyoacán, 04510 CDMX, México
ISSN 0185-5530
Hecho en México.

Esta monografía se realizó con base en el Informe Técnico Final del Convenio entre el Instituto de Geología de la UNAM y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), contrato número 0446-1O-ED-DT-1-17-1928, con número de registro UNAM 49664-2480-26-IX-17, con el objeto de “Analizar la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos que conforman el subsuelo de la Cuenca de México a partir de la perforación a 2000 metros del pozo profundo denominado Santa Catarina 3A.”

AGRADECIMIENTOS

Por el SACMEX

Ing. Ramón Aguirre Díaz

DIRECTOR GENERAL

Ing. Fernando Alonzo Avila Luna

DIRECCIÓN EJECUTIVA DE CONSTRUCCIÓN

Ing. Alejandro Escobedo Ramírez

U. D. DE GEOHIDROLOGÍA

Por PEMEX

Ing. Carlos Rangel Hernández

SUBDIRECTOR DE OPERACIONES EN INTERVENCIONES A POZOS

Ing. Víctor M. Hernández Prieto

GERENTE DE PERFORACIÓN Y REPARACIÓN DE POZOS TERRESTRE

Ing. Juan Saldaña Martínez

JEFE DE LA UNIDAD DE PERFORACIÓN POZA RICA-ALTAMIRA

Ing. Santiago Avelino Zumaya

COORDINADOR DE PERFORACIÓN

TRIPULACION DEL EQUIPO PM-1282

Por la supervisión del SACMEX

Ing. Marco Alfonso González Castañeda

JEFE SUPERVISOR

Por la Facultad de Ingeniería

M.I. Héctor Ricardo Castrejón Pineda

Apoyo editorial del Instituto de Geología

Mtra. Sandra Ramos Amézquita

JEFATURA DE LA UNIDAD EDITORIAL

Los interesados en adquirir las publicaciones del Boletín del Instituto de Geología de la UNAM podrán adquirirlas en:

<http://www.geologia.unam.mx:8080/igl/index.php/difusion-y-divulgacion/publicaciones/boletin-del-instituto-de-geologia>

PARTICIPANTES

Dr. Eric Morales Casique¹
 Dr. José Luis Arce Saldaña¹
 M.C. José Luis Lezama Campos¹
 Dr. Oscar A. Escolero Fuentes¹

APOYO TÉCNICO

Aida López Barrera
 Daniel Cruz González
 Gessel Montoya Santiago
 Nina Adhara Elena Avila Ortiz
 Pablo García Manuel
 Teresa Pi Puig
 Zaida Martínez Casas
 Isaac Bautista Pueyo
 Alexandra Uribe Hernández

TABLA DE CONTENIDO

Resumen Ejecutivo.....1

1. Introducción.....5

2. Objetivos.....6

3. Generalidades.....6

4. Seguimiento *in situ* de la perforación.....7

4.1. Diciembre.....9

4.2. Enero.....9

4.3. Febrero.....10

4.4. Marzo..... 10

4.5. Abril10

4.6. Mayo11

4.7. Junio.....12

4.8. Julio.....12

5. Análisis e interpretación de muestras de perforación.....13

5.1. Análisis macroscópico de las muestras de canal.....13

5.1.1. Muestreo y limpieza.....14

5.1.2. Descripción de muestras de canal.....14

5.2. Tamizado de muestras seleccionadas.....16

5.2.1. Resultados del tamizado.....16

5.3. Análisis microscópico de las muestras de canal.....22

6. Análisis e interpretación de núcleos.....25

6.1. Limpieza.....26

6.2. Descripción.....26

7. Pruebas de laboratorio a muestras y núcleos.....29

7.1. Geoquímica.....29

7.2. Roca total y tipo de arcilla por Difracción de Rayos X.....31

7.2.1. Muestreo.....31

7.2.2. Metodología.....31

7.2.3. Resultados.....32

7.3. Pruebas petrofísicas y termofísicas.....33

7.3.1. Muestreo.....35

7.3.2. Metodología.....35

7.3.3. Resultados.....36

8. Interpretación del registro geofísico de pozo proporcionado por PEMEX.....38

8.1. Sección 1 (510.84 - 1009.49 md).....39

8.2. Sección 2 (1074 - 1700 md).....42

9. Resultados del seguimiento *in situ* de los trabajos de limpieza, desarrollo y aforo del pozo Santa Catarina 3a.....46

9.1. Seguimiento y resultados del primer periodo de bombeo (julio).....47

9.2. Seguimiento y resultados del segundo periodo de bombeo (julio-agosto).....53

9.3. Seguimiento y resultados del tercer periodo de bombeo (agosto).....55

¹ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Investigación Científica, Copilco Universidad, Alcaldía de Coyoacán, 04360 CDMX, México.
 Dr. Eric Morales Casique
 ericmc@geologia.unam.mx

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

9.4. Seguimiento y resultados del cuarto periodo de bombeo (septiembre).....	56
9.5. Resultados de las pruebas de laboratorio a las muestras de agua.....	57
9.5.1. Elementos mayores	57
9.5.2. Elementos traza.....	62
9.5.3. Isótopos estables.....	62
9.5.4. Fechamiento.....	63
Conclusiones	67
Referencias	69
Apéndice 1 (A1) Quinta etapa de desarrollo del pozo Santa Catarina 3a.....	70

RESUMEN EJECUTIVO

El pozo Santa Catarina 3a es el cuarto pozo del programa de exploración hidrogeológica profunda en la Ciudad de México realizado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. El pozo se localiza en el sur de la Ciudad de México (UTM 14Q 491372.62 E, 2133589.67 N), en la alcaldía Xochimilco. Se perforó de diciembre de 2016 a julio de 2017, de manera direccional tipo “J”, con un azimut aproximado de 270°. El Desplazamiento horizontal fue de 520 m y alcanzó los 2026 m desarrollados (md), equivalentes a una profundidad vertical verdadera de 1912 m respecto al nivel del terreno. El inicio de la desviación se situó a los 567 md y alcanzó una inclinación de 26.9°.

Los resultados de los estudios realizados durante la perforación del pozo Santa Catarina 3A fueron reportados en un informe técnico al SACMEX (Morales Casique *et al.*, 2017). Debido al valor de la información contenida en ese informe, el SACMEX autorizó al Instituto de Geología la publicación de ese informe, lo cual es concretado en este número del Boletín del Instituto de Geología de la UNAM (Morales Casique *et al.*, 2018). Esta es la segunda publicación que proporciona acceso amplio a la información técnica generada durante la perforación de pozos muy profundos. La primera fue el Boletín del Instituto de Geología número 121 (Morales Casique *et al.*, 2018), que está basado en el informe técnico de los pozos Agrícola Oriental 2B y 2C (Morales Casique *et al.*, 2016).

La información que se analizó e interpretó en este estudio consistió de lo siguiente. Petróleos Mexicanos realizó tres ensayos de adquisición de registros geofísicos de pozo. Se obtuvieron dos registros completos: R2-SC3 de 510.84 a 1009.49 m y R3-SC3 de 1060.09 a 1773.47 m. Estos dos registros incluyeron: Registro Inductivo, Geometría del pozo y Espectroscopia de Rayos Gama con Potencial Espontáneo. El registro incompleto (R1-SC3) sólo incluyó la Geometría del pozo y Rayos Gama.

Se obtuvieron tres núcleos: Núcleo 1 (N1-SCT3a), entre 966 y 969 md; Núcleo 2 (N2-SCT3a), entre 1550 y 1559 md y el Núcleo 3 (N3-SCT3a), entre 1900 y 1909 md. Adicionalmente se nos proporcionaron muestras de canal en intervalos de 20 md desde los 547 hasta los 1008 md, donde no fue posible continuar con el muestreo debido a pérdida total de circulación.

El estudio incluyó la descripción macroscópica de muestras y la descripción petrográfica mediante 3 láminas delgadas de muestras de canal de las profundidades 640, 700 y 760 m. No se consideraron más muestras debido al grado de alteración que la mayoría de ellas presentaba.

Adicionalmente se realizaron 6 análisis químicos de roca total de muestras de canal mediante el método de Fluorescencia de Rayos X, en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Instituto de Geología, de la Universidad Nacional Autónoma de México. De las 6 muestras, 4 corresponden a lavas entre 547 a 760 md y las 2 restantes a arcilla gris (960 m) y roja (1000 m). Químicamente las muestras de lava se clasifican como andesitas, con muy poca variación en sílice (60 - 61 % en peso).

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Cuatro muestras, dos de la ceniza alterada a arcilla (núcleo N1-SCT3a, 966 - 967 m) y dos de la arcilla roja (testigo recuperado entre 980 a 1080 m), fueron analizadas para química de roca total y tipo de arcilla por Difracción de Rayos X. Al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias se enviaron 3 segmentos de cada núcleo recuperado para pruebas petrofísicas y termofísicas. La muestra del núcleo N1-SCT3a (correspondiente a la ceniza arcillosa) no pudo ser analizada porque al secarse se vuelve deleznable. Las muestras correspondientes a los núcleos N2-SCT3a y N3-SCT3a pudieron ser analizadas y se obtuvieron valores de permeabilidad, porosidad, densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica.

A partir del análisis e integración de la información y datos colectados durante la perforación, la interpretación estratigráfica del pozo Santa Catarina 3a es la siguiente:

- 510 a 789 md. Andesitas, probablemente fracturadas, alteradas en la cima y más competentes; menos alteradas hacia la base. No hubo pérdidas de circulación considerables en este intervalo.

- 789 a 887 md. Ignimbrita de color rosado. El registro geofísico sugiere que en esta zona existe menor *enjarre* y probablemente menor permeabilidad en la formación.

- 887 a 919 md. Flujo tipo lahar, principalmente cenizas. Esta clasificación se apoya en el primer núcleo (N1-SCT3a, 966 - 969 m) donde la ceniza se encuentra muy alterada hacia arcilla. Los valores de resistividad disminuyen hasta 1 a 3 Ohm-m, los valores API del registro de rayos gama aumentan y se observa una menor concentración de los elementos del registro de espectroscopia.

- 919 a 1141 md. Lahar color rojizo, alterado con matriz arcillosa y fragmentos de roca redondeados de tamaño entre 2 y 35 mm. Este intervalo pudo clasificarse gracias a las muestras de canal y a muestras obtenidas *in situ*, junto con los análisis de Difracción de Rayos X. Elevada socavación en el agujero y pérdida total de circulación observada durante la perforación. Debido a la pérdida total de circulación, a partir de los 1008 md fue imposible coleccionar muestras de canal. Adicionalmente, el registro geofísico solo llegó hasta los 1700 md. De 1700 a 2026 md solo se contó con la bitácora de perforación y el núcleo N3-SCT3a alteración. Por lo tanto, las secciones siguientes fueron interpretadas a partir de los registros geofísicos de pozo, dos núcleos y la correlación con el pozo Tulyehualco-1.

- 1141 a 1347 md. Flujo piroclástico poco alterado y permeable, con base en el registro geofísico y en lo observado en el pozo Tulyehualco a esta profundidad. En el registro se observa una secuencia relativamente homogénea, más competente (por la poca socavación del agujero) y donde los valores de resistividad para la curva de mayor profundidad de investigación (AT90) son relativamente constantes, entre los 10 y 50 Ohm-m.

- 1347 a 1647 md. Depósitos de lahar heterogéneos, con diferentes condiciones de depósito o diferentes fuentes. En las zonas de contacto entre eventos se observa alteración, lo que genera un contacto gradual y perturbado producto de la interacción mineralógica entre ambos depósitos (puede apreciarse en la profundidad 1554 md del N3-SCT3a), probablemente por flujo de agua. La parte más competente y más resistiva concuerda con un depósito de

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

lahar de color rojizo, endurecido, mientras que los intervalos donde se observa mayor socavación, menor resistividad y formación de *enjarre* corresponde a las secuencias más alteradas y posiblemente arcillosas. En este segmento se observan intervalos cortos con rasgos similares a la facie permeable superior, por lo que no se descarta que estos intervalos cortos también aporten a la producción del pozo.

- 1647 a 2026 md. Depósitos de lahar. La formación es competente y con características similares a lo visto en el núcleo N3-SCT3a.

La interpretación hidrogeológica de esta columna estratigráfica es la siguiente. El acuífero superior, actualmente en explotación, probablemente se extienda hasta los 780 md. La base de este acuífero podría extenderse 90 m más para incluir la ignimbrita rosa, que pudiera tener permeabilidad secundaria por fracturamiento. Sin embargo, el registro geofísico sugiere que en esta zona existe menor *enjarre* y probablemente menor permeabilidad en la formación por lo que el funcionamiento de esta unidad hidrogeológica aún es ambiguo.

Subyaciendo este acuífero hay dos segmentos que podrían comportarse como acuitardos (de muy baja permeabilidad). El primer segmento es el flujo tipo lahar, principalmente cenizas alteradas a arcilla (~32 md de espesor). El segundo segmento es el lahar color rojizo, alterado con matriz arcillosa (~220 md de espesor), aunque este segmento no es homogéneo y es interrumpido por un segmento de alta permeabilidad a los 1008 md (donde se presentó la pérdida total de circulación). Debido a que a esta profundidad finalizó el primer registro geofísico y el otro registro inició a los 1060 md, el segmento de alta permeabilidad no fue observado en los registros.

Respecto a estos acuitardos, hacen falta pruebas hidráulicas para determinar su permeabilidad. Los aforos que rutinariamente se realizan no permiten estimar los parámetros de los acuitardos. Adicionalmente, otros asesores del Sistema de Aguas de la Ciudad de México han propuesto que los acuitardos arcillosos, denominados informalmente formación Taxhimay, tienen un origen lacustre (sedimentario). Los resultados de las pruebas de Difracción de Rayos X a las arcillas de los segmentos arcillosos sugieren que el origen no es lacustre. Las cuatro muestras se componen de una arcilla de la familia de las esmectitas. En ninguna de las muestras analizadas la esmectita se encuentra interestratificada (por ejemplo, con illita o clorita). La estratificación es común en rocas sedimentarias y, de ser de origen lacustre, debiera observarse. La ausencia de estratificación sugiere que estas arcillas pudieron originarse por alteración hidrotermal de rocas ácidas o de depósitos de ceniza volcánica.

Subyaciendo estos acuitardos se localiza un estrato de ~206 md de espesor de flujos piroclásticos, con respuesta geofísica relativamente homogénea y de buena permeabilidad. La buena permeabilidad de este segmento de más de 200 md de espesor se infiere de las siguientes evidencias: (a) la separación entre las curvas resistivas, (b) la caída significativa de temperatura registrada por el sensor de la barrena durante la perforación de este segmento, y (c) el ascenso de nivel de lodos hasta a los 32 m de profundidad durante esta etapa, a pesar de la pérdida de circulación. Es probable que este segmento sea el principal aportador al caudal que se extrae de este pozo. El hecho de que la temperatura a la descarga del pozo sea menor o igual a 50 °C es consistente con esta evaluación.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Posteriormente se encuentran ~300 md de depósitos de lahar heterogéneos, alternando segmentos de buena permeabilidad con segmentos de baja permeabilidad. Finalmente, se encuentran flujos piroclásticos de ~400 md de espesor, consolidados y que podrían ser permeables por fracturamiento.

Finalmente, se tomaron muestras de agua durante varios aforos y se hizo la interpretación hidráulica de estas pruebas. Puesto que el ademe ranurado se extiende a los tres segmentos que probablemente aportan el agua extraída del pozo, no es posible hacer un análisis para obtener valores de conductividad hidráulica para cada uno de ellos.

Se reportan los resultados de los análisis químicos del agua (iones mayores y elementos traza). Los isótopos estables son congruentes con un origen meteórico del agua. Para estimar la edad, dos muestras de agua se analizaron para contenido de Carbono 14 (^{14}C). La primera muestra dio un alto contenido de carbono moderno por lo que suponemos que aún estaba contaminada con agua ajena a la formación introducida durante la perforación. La segunda muestra dio una edad de más de 5413 años. Sin embargo, existen dudas de la integridad de esta última muestra porque fue tomada posterior a un problema que originó una rotura en el ademe ciego a ~200 md de profundidad, y en el cual seguramente hubo ingreso de agua somera.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

1. INTRODUCCIÓN

Como apoyo al manejo del recurso hídrico, el Gobierno de la Ciudad de México a través del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) llevó a cabo la perforación del pozo San Lorenzo Tezonco (SLT) que alcanzó 2008 m de profundidad. El pozo SLT aportó información nueva sobre la geología y la hidrogeología de la Cuenca de México (Arce *et al.*, 2013; Morales-Casique *et al.*, 2014, 2015; Arce *et al.*, 2015; Lezama-Campos *et al.*, 2016). Adicionalmente, los resultados obtenidos en el pozo SLT, en términos de su productividad y de la calidad del agua, motivaron el desarrollo de un programa de exploración profunda, ahora en convenio entre el SACMEX, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Petróleos Mexicanos (PEMEX).

La primera parte de este programa de perforación/exploración/estudio comprendió la perforación de dos pozos: Agrícola Oriental 2B (AO2B) y Agrícola Oriental 2C (AO2C), con profundidades programadas de 2000 y 1570 m, respectivamente (Morales Casique *et al.*, 2016, 2018). Ambos pozos se localizan a 2.5 km al norponiente del pozo SLT en las coordenadas UTM 14Q 490922.00 E, 2144563.00 N y 14Q 490929.00 E 2144574.00 N.

El pozo AO2B tuvo como objetivo particular atravesar las formaciones calcáreas que no fueron observadas en el pozo SLT y que se estimaba se encontraban a 1600 m de profundidad, mientras que el objetivo del pozo AO2C fue alcanzar las formaciones volcánicas de mayor edad antes del contacto con las calizas, que se estimaba estaban fracturadas y podían ser indicativo de permeabilidad y por lo tanto se podría extraer agua de ellas. Aunque estas dos perforaciones se encuentran completamente terminadas, actualmente se encuentran en proceso de apertura, debido a que han presentado obstáculos en sus pruebas de desarrollo y aforo al observarse altas presiones a causa de la presencia de gas (principalmente CO₂).

Para continuar con la campaña de exploración, durante el año 2017 se perforó el pozo profundo Santa Catarina 3a, al sur de la Ciudad, entre las delegaciones Xochimilco e Iztapalapa, en las coordenadas UTM 14Q 491372.62 E, 2133589.67 N (Figura 1). El objetivo fue alcanzar únicamente las formaciones volcánicas profundas, sin hacer contacto con las formaciones calcáreas, que se presume, son las formaciones contenedoras del gas observado en los pozos AO2B y AO2C (Morales-Casique *et al.*, 2018). Los resultados de los estudios realizados durante la perforación

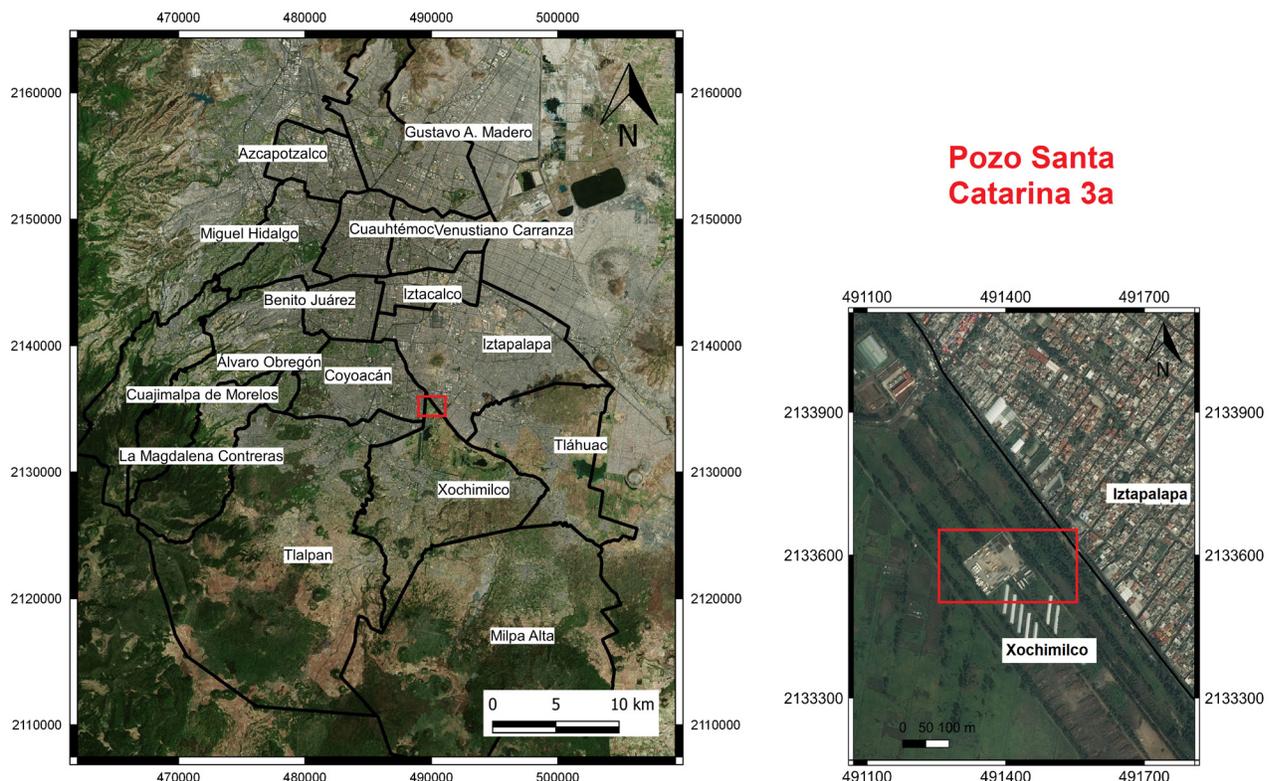


Figura 1. Localización del pozo Santa Catarina 3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

de los pozos Agrícola Oriental 2B y 2C fueron reportados en un informe técnico al SACMEX (Morales Casique *et al.*, 2016). Debido al valor de la información contenida en ese informe, el SACMEX autorizó al Instituto de Geología la publicación de ese informe, lo cual fue concretado en el número 121 del Boletín del Instituto de Geología de la UNAM (Morales Casique *et al.*, 2018). De esta manera, el acceso a la información técnica se facilita pues el acceso a esta publicación es gratuito. Continuando con esta estrategia, el presente número del Boletín está dedicado al informe técnico del pozo Santa Catarina 3A (Morales Casique *et al.*, 2017). Para el análisis e interpretación de la información generada durante y después de la perforación del pozo Santa Catarina 3a, el SACMEX estableció un convenio con el Instituto de Geología (IGL) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) cuyos objetivos se presentan a continuación.

2. OBJETIVOS

Los objetivos planteados en el convenio son:

- Conocer la estratigrafía de la Cuenca de México.
- Determinar un modelo hidrogeológico de las rocas carbonatadas y de las rocas volcánicas a profundidades entre 500 y 2000 m.
- Realizar estudios petrográficos de las muestras de canal y núcleos.
- Determinar los potenciales de los probables acuíferos que se llegasen a encontrar en la Cuenca de México.
- Identificar y caracterizar las rocas formadoras de acuíferos (cuerpos litológicos de interés de alta permeabilidad) y acuitardos (formaciones de baja permeabilidad que posiblemente retrasen el efecto del bombeo hacia el acuífero superior el cual se encuentra actualmente en explotación).

Con base en estos objetivos, las actividades planteadas en el convenio fueron:

- Seguimiento *in situ* de la perforación.
- Análisis e interpretación de muestras de perforación y núcleos.
- Interpretación del registro geofísico del pozo proporcionado por PEMEX.
- Integración de la información.

En este documento se reportan los resultados del convenio. La presentación sigue la secuencia de las actividades planteadas.

3. GENERALIDADES

La perforación de este pozo estuvo a cargo de PEMEX y la supervisión a cargo del SACMEX con el apoyo técnico del Instituto de Geología. El pozo Santa Catarina 3a (SCT3a) se perforó de manera direccional tipo "J" (Figura 2a), con un azimut aproximado de 270° (Figura 2b). El Desplazamiento horizontal (Dh) fue de 520 m y alcanzó los 2026 m desarrollados (md) equivalentes a una profundidad vertical verdadera (TVD) de 1912 m respecto al nivel del terreno. El inicio de la desviación (KOP) se situó a los 567 md y alcanzó una inclinación de 26.9° (Figura 2c).

El primer objetivo de realizar la perforación direccional fue evitar el contacto con las calizas que se estimó, se encontraban a 1800 m de profundidad por debajo de la

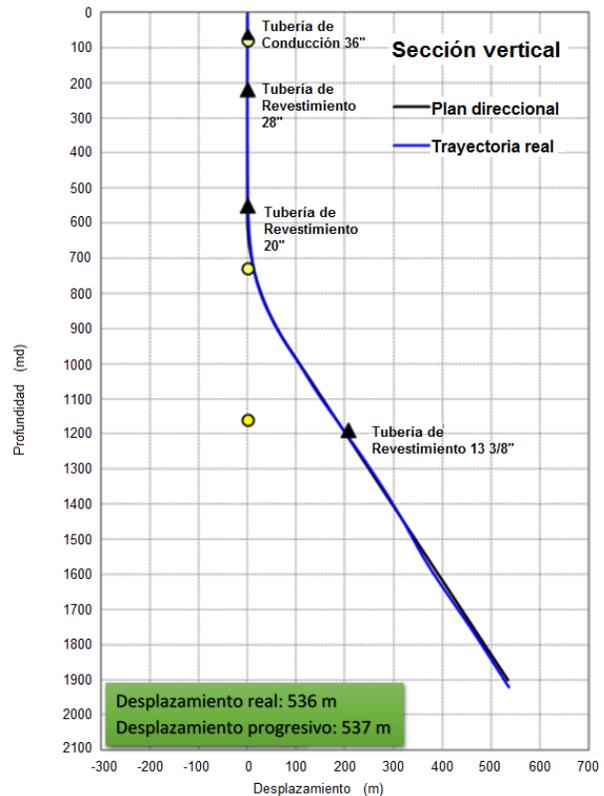


Figura 2a. Sección vertical de la trayectoria direccional del pozo SCT3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

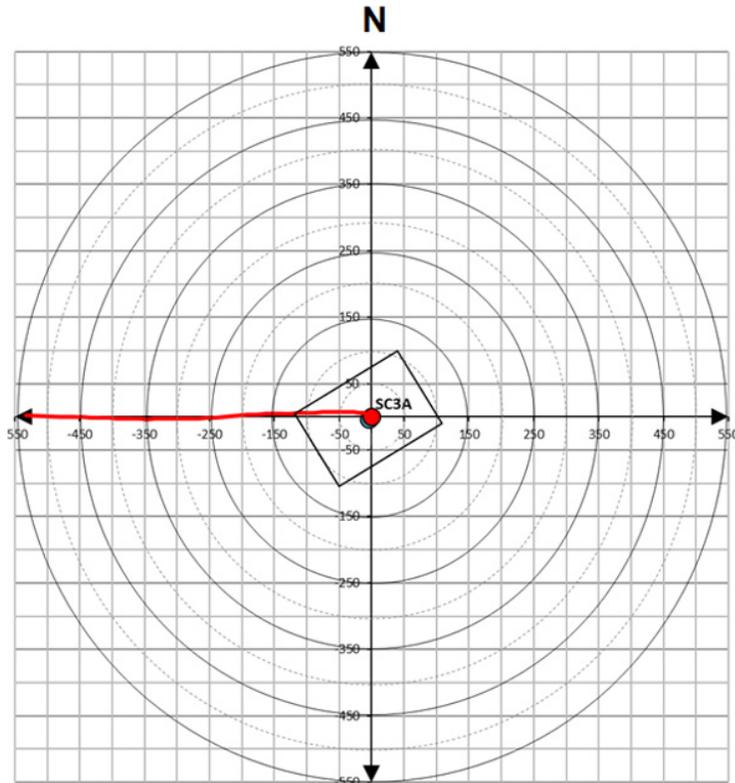


Figura 2b. Azimut del pozo.

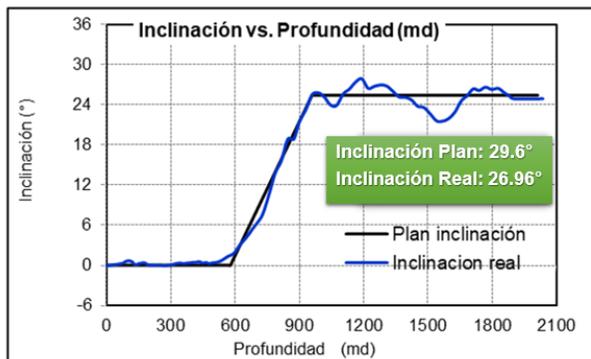


Figura 2c. Inclinación del pozo. Imágenes cortesía de PEMEX.

localización inicial del pozo. Además, se interpretó que las calizas se hallaban desplazadas hacia el Oeste debido a un sistema de fallas estructurales de tipo normal, que se sugiere es el inicio de una fosa, donde las formaciones volcánicas tienen mayor espesor. El desplazamiento direccional del pozo de 500 m en dirección Oeste evitaría dicho contacto y adentraría la perforación hacia la fosa, evitando el contacto con las formaciones calcáreas.

Como segundo objetivo, el pozo debía atravesar el mayor número de fallas y fracturas asociadas al movimiento de caída de las calizas y que permitirían a las formaciones profundas ser más permeables y en consecuencia aportar mayor cantidad de agua. En la Figura 3 se presenta el diseño

final del pozo Santa Catarina 3a, los espesores de la barrena y de la TR en cada etapa, así como la profundidad en md del final de cada una.

A continuación, se describe el avance en la perforación mes a mes resultado del seguimiento *in situ*, así como sus incidencias.

4. SEGUIMIENTO *IN SITU* DE LA PERFORACIÓN

Junto con la perforación, se realizó la adquisición de los registros geofísicos de pozo, toma de núcleos y recolección de diversas muestras de recortes, producto

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

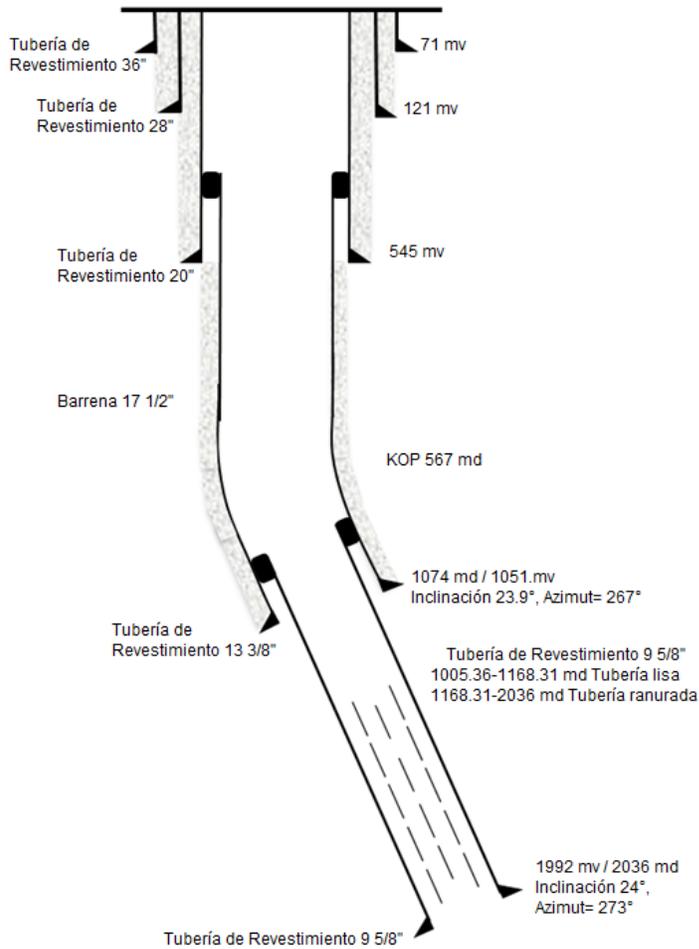


Figura 3. Diseño final del pozo Santa Catarina 3a. Cortesía de PEMEX.

de la perforación (muestras de canal) para apoyar la caracterización geológica de las formaciones.

Los registros geofísicos de pozo fueron adquiridos con el equipo y personal de PEMEX durante las diferentes etapas de perforación. Se realizaron tres ensayos de adquisición, en donde se obtuvieron dos registros completos: (R2-SC3) de 510.84 a 1009.49 m y (R3-SC3) de 1060.09 a 1773.47 m. Estos dos registros incluyeron: Registro Inductivo (AIT), Geometría del pozo (BGL) y Espectroscopía de Rayos Gama con Potencial Espontáneo (NGR y SP). El registro incompleto

(R1-SC3) únicamente incluyó la Geometría del Pozo (BGL) y Rayos Gamma (GR). Ver Tabla 1.

Se obtuvieron tres núcleos (Figura 4 y Tabla 2) a diferentes profundidades: Núcleo 1 (N1-SCT3a), entre 966 y 969 md; Núcleo 2 (N2-SCT3a), entre 1550 y 1559 md y el Núcleo 3 (N3-SCT3a), entre 1900 y 1909 md.

Por otra parte, la supervisión del SACMEX realizó un muestreo *in situ* de los recortes de perforación, dichos recortes fueron proporcionados al Instituto de Geología para su análisis e interpretación. Los recortes se tomaron

Tabla 1. Resumen de los registros geofísicos adquiridos en el pozo Santa Catarina 3a.

Registros	Profundidad Desarrollada [md]	Herramienta
R1-SC3	95-330	BGL+ GR
R2-SC3	510.84-1009.49	AIT+SP+GR+BGL +NGR
R3-SC3	1060.09-1773.47	AIT+SP+GR+BGL +NGR

Tabla 2. Ubicación de los núcleos recuperados en el pozo Santa Catarina 3A

Núcleos	Profundidad Desarrollada [md]	Profundidad Vertical Aproximada [m]
N1-SCT3	966-969	951-954
N2-SCT3	1550-1559	1481-1488
N3-SCT3	1900-1909	1788-1795

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

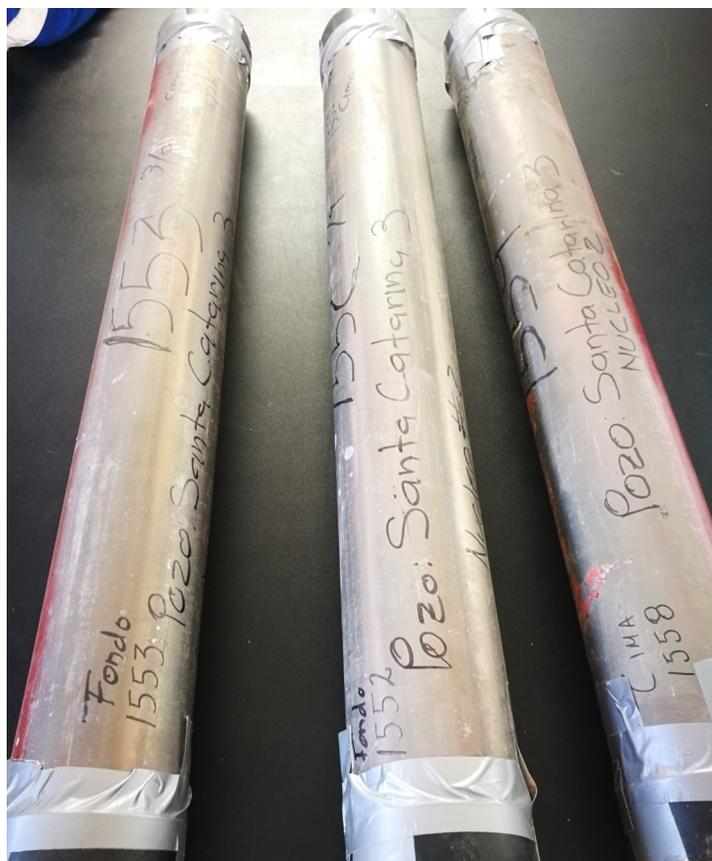


Figura 4. Ejemplo del estado de los núcleos entregados por PEMEX y la supervisión al Instituto de Geología.

Tabla 3. Resumen de los registros geofísicos adquiridos en el pozo Santa Catarina 3a.

Tipo de muestras	Profundidad desarrollada [md]	Número
Recorte	547-1080	32
Hombros de Barrena	950~1080	7

desde los 547 md (profundidad donde la circulación del lodo permitió iniciar el muestreo), en intervalos de 20 md, hasta los 1008 md donde la pérdida de lodo y la falta de circulación en el pozo impidió continuar con el muestreo (Tabla 3). Aproximadamente a 950 md se pudo obtener una muestra significativa del material a esta profundidad, ya que sus características físicas permitieron que esta muestra pudiera sujetarse a la tubería de perforación (TP) y salir junto con los estabilizadores y la barrena.

4.1. DICIEMBRE

En este mes se finalizó la preparación del terreno y se realizaron los movimientos finales del equipo de

perforación. La perforación del pozo Santa Catarina 3 (primer nombre del pozo que posteriormente debería ser sustituido) inició la última semana del mes. Se alcanzó una profundidad de 140 m con una barrena de 40”.

4.2. ENERO

Durante la primera semana de enero se continuó con los trabajos de perforación con barrena de 40” hasta una profundidad de 300 m y se colocó la primera tubería de revestimiento (TR) de 36”. El equipo se preparó para utilizar la barrena de 32” y poder iniciar con la segunda etapa de perforación. Sin embargo, se presentaron problemas de resistencia, ausencia de rotación en la barrena y pérdida de circulación a los 57.7 m, probablemente por un desplazamiento de la TR a esta profundidad. Se solicitó un estudio técnico para comprobar un posible desplazamiento de la TR, teoría que fue confirmada por lo que se tomó la decisión de abandonar el pozo y proceder con la construcción de un contrapozo, el cual se ubicaría a 5 m, al Norte del punto original. Este contrapozo llevaría el nombre final de Pozo Santa Catarina 3a.



Figura 5. Grietas cercanas al equipo de perforación.



La perforación continuó hasta una profundidad de 35 m, tiempo en el que se observaron grietas y una pequeña oquedad cerca del equipo de perforación (Figura 5).

Con barrena de 40'' se finalizó la primera etapa en 72 m y se cementó la TR de 36''. La oquedad observada anteriormente se relleno con grava y cemento y se le dio seguimiento a las fracturas. Durante la última semana del mes, con barrena de 36'', se perforó hasta los 120 m y se cementó la segunda sección de TR con 28'' (Figura 4).

4.3. FEBRERO

Durante este mes se perforó con una barrena de 26'' hasta una profundidad de 145 m, con pérdidas de circulación a los 139.5 y 145 m. A esta última profundidad se presentó también un atasco en la sarta del equipo. Al intentar reanudar los trabajos de perforación se dio un colapso del terreno, localizado en la base del equipo (Figura 6), por lo que más de la mitad del mes los trabajos de perforación se mantuvieron detenidos por protocolos de seguridad.

Se realizaron las maniobras para rellenar las oquedades utilizando grava y cemento. Adicionalmente, como medida de seguridad se tomó la decisión de realizar estudios de mecánica de suelos. Los estudios se iniciaron el día 20 con un sondeo de cono eléctrico y para fin de mes se había avanzado hasta los 83 m.

4.4. MARZO

A inicios de mes se concluyó el primer sondeo, el cual llegó hasta una profundidad de 90.6 m. Posteriormente, fue necesario mover el equipo y realizar un segundo sondeo, el cual concluyó a mitad de mes con profundidad máxima de 90.6 m. Durante la realización de los estudios de mecánica de suelos se continuaron con los trabajos de relleno de las oquedades utilizando grava y cemento (Figura 7).

Una vez terminados los trabajos de relleno de oquedades, así como los estudios de mecánica de suelos, se procedió a reinstalar los componentes del equipo de perforación, para así continuar con la misma. A finales de mes, la perforación alcanzó una profundidad aproximada de 547 m con barrena de 26''. Desafortunadamente durante esta etapa se trabajó con pérdida total de circulación, haciendo imposible la recuperación de muestras de recorte.

4.5. ABRIL

Se realizaron operaciones para bajar la TR de 20'' y cementar esta etapa. Sin embargo, se observó resistencia a los 122 m en un primer intento y a los 349 y 362 m en un segundo, por lo cual fue necesario repasar con barrena de 26''. Se realizó el primer registro geofísico únicamente con la herramienta BGL para conocer su estado físico (geometría,

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a



Figura 6. Oquedad por debajo de la plataforma del equipo de perforación.



Figura 7. Oquedad principal rellenada con grava y cemento.

rumbo e inclinación). Se intentó bajar nuevamente la TR de 20", pero continuó presentándose resistencia a los 330 y 336 m. Fue necesario volver a reparar con barrena de 26" y se realizó un segundo registro de geometría para esta etapa. Finalmente se bajó la TR de 20" exitosamente y se procedió a realizar el proceso de cementación. Se colocaron los anillos de cemento entre las TR de 28 y 20" (504 md) ya que en la siguiente etapa, la TR quedaría sujeta en esta sección (Figura 4). Se inició la siguiente etapa de perforación con barrena de 17 1/2".

Durante este mes, a los 567 m de profundidad inició la inclinación del pozo (KOP) y se alcanzaron los 647 md.

4.6. MAYO

Durante la primera semana del mes se tuvo buen avance en los tiempos de perforación y el 8 de mayo se cortó el primer núcleo (N1-SCT3a) entre 966 y 970.5 md después de observar que se alcanzó una formación arcillosa (Figura 8) que se correlacionó con la formación Taxhimay.

Durante la mitad del mes se llegó a una profundidad aproximada de 1095 md. Así mismo se intentó tomar el segundo registro geofísico, donde la herramienta sólo logro profundizar hasta los 983 md. En esta profundidad (980 - 1095 md) se observó una formación de color rojizo,

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

con matriz arcillosa y con clastos de tamaño grava (mayores de 2 mm). Se pudieron obtener diferentes muestras gracias a que sus características físicas ayudaron a que diversos fragmentos se adhirieran a los estabilizadores de la TP (Figura 9).

En la última semana se realizaron trabajos para sacar la TP. Sin embargo, al hacerlo se desprendieron 8 tramos de TR, por lo que se realizó una operación para recuperarla. Dicha operación consistió en bajar TR de 13 3/8" con extremo de campana, para poder conectarse a la zona de desprendimiento. Dicha operación fue realizada con éxito, por lo que se realizaron los trabajos de cementación.

Debido a la falta de circulación durante la perforación, esta etapa se finalizó a 1074 md (el diseño original estimaba terminar a 1200 md). Se corrió exitosamente el segundo registro entre los 510.84 y 1009.49 md y se colocó la TR de 13 3/8. La nueva etapa de perforación dio inicio con barrena de 12 1/4".

4.7. JUNIO

Durante la primera semana se alcanzaron los 1230 md. Sin embargo, se perforó con pérdida total de circulación desde

los 1083 md hasta dicha profundidad. Adicionalmente, se observó una caída importante de temperatura en el pozo (Figura 10) y el nivel de lodos se colocó hasta los 31 m de profundidad. Estos acontecimientos fueron indicativos de que este intervalo podría ser productor por lo que se hicieron las recomendaciones pertinentes para catalogarlo como tal. Se continuaron con los trabajos de perforación con las mismas condiciones (pérdida total de circulación y nivel de lodos entre los 22 y 31 m) hasta los 1500 md. Se intentó correr el tercer registro geofísico sin éxito y únicamente se cortó el núcleo programado entre los 1550 y 1559 md. Debido a la falta de circulación, se agregaron más de 2000 m³ de lodo bentónico a la formación.

La perforación continuó hasta los 1900 md donde se cortó el tercer núcleo y posteriormente se perforó hasta la profundidad final de 2036 md.

4.8. JULIO

Durante este mes se intentó tomar el tercer registro el cual sólo pudo adquirirse hasta los 1773 md al no bajar la herramienta de registros. Posteriormente, se bajó con éxito la tubería ranurada de 9 5/8" y se dio inicio al lavado



Figura 8. Material arcilloso observado en las *temblorinas* del equipo de perforación correlacionada con la formación Taxhimay.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a



Figura 9. Muestra obtenida de los estabilizadores y hombros de la barrena correlacionada a una profundidad de 980 md.



Figura 10. Muestras colectadas en los hombros de la barrena y estabilizadores seleccionados para su clasificación por tamizado.

del pozo el 5 de julio, con una última lectura del nivel de lodos de 78 m (nivel mesa rotaria). Con esta operación finalizó el seguimiento a la perforación.

El seguimiento a las pruebas de aforo, pruebas y resultados son motivo de capítulos posteriores.

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE MUESTRAS DE PERFORACIÓN

Durante y después de la perforación del pozo SCT3a, el personal del Instituto de Geología realizó el análisis minucioso de todos los datos y elementos generados. El trabajo se llevó a cabo de manera continua, principalmente en las instalaciones y laboratorios del Instituto. En una primera instancia se realizó un análisis macroscópico, con

base a las características físicas de las muestras de mano (recortes), núcleos y registros, para dar una interpretación preliminar que ayudara al proceso de perforación y las incidencias presentadas. Posteriormente se realizó un análisis detallado de cada elemento.

A continuación, se sintetiza el proceso al que fueron sometidos las muestras de canal y los núcleos, su interpretación macroscópica y cualitativa.

5.1. ANÁLISIS MACROSCÓPICO DE LAS MUESTRAS DE CANAL

Uno de los elementos más importantes con los que se contó fueron las muestras de recorte derivadas de la perforación, las cuales daban valiosa información acerca de las características de las formaciones y permitían una primera interpretación cualitativa de la columna geológica

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

del sitio. Debido a las condiciones de perforación del pozo, solo se colectaron muestras de canal entre los 547 - 1080 md con un espaciado de 20 m entre cada muestreo.

5.1.1. Muestreo y limpieza

Las muestras de canal fueron entregadas por la supervisión del SACMEX al Instituto de Geología sin limpieza (tal como fueron colectadas) y sin ningún otro agregado. Estas muestras fueron proporcionadas durante las diferentes etapas de perforación en contenedores plásticos. Las muestras fueron sometidas a un proceso de limpieza específico dentro de los laboratorios del Instituto, debido a que contenían agua, lodo de perforación y obturante (principalmente fragmentos de cascarilla de nuez). Es importante mencionar que, debido al uso de cascarilla de nuez, la coloración de algunas muestras se vio alterada y debía ser considerada en la descripción macroscópica.

5.1.2. Descripción de muestras de canal, pozo Santa Catarina 3a

Para facilitar su descripción, las muestras de recorte fueron dispuestas en canaletas divididas en secciones de acuerdo con su profundidad. La primera descripción se hizo de manera cualitativa, buscando cambios de coloración o de minerales constituyentes de los recortes y posteriormente analizadas con más detalle dentro de las instalaciones del Instituto de Geología.

A continuación, se muestra el resultado de la descripción de las muestras de recorte del pozo SCT3a desde el inicio del muestreo (560 m) hasta los 1080 md donde desafortunadamente, como se mencionó, la pérdida total de la circulación del lodo impidió la recolección de muestras.

SC-03 547M. Fragmentos subangulosos de color gris claro, de 3 mm de diámetro, con textura porfídica, con fenocristales de plagioclasas y biotita. Clasificación: lava alterada de composición dacítica.

SC-03 500M. Fragmentos subangulosos de color ocre, de 3 mm de diámetro, con textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíboles alterados. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 555M. Fragmentos subangulosos de color ocre, de 3 mm de diámetro, con textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, biotita y anfíbol alterado, muy similar a la muestra anterior. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 560M. Fragmentos subangulosos de color gris claro, con dimensiones de 5 mm, con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa, anfíbol y piroxeno. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 575M. Fragmentos subangulosos de color gris medio, con fragmentos de 5 mm de diámetro, con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa y anfíbol. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 580M. Fragmentos subangulosos de color gris claro, con textura porfídica, de grano grueso, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 600M. Fragmentos subangulosos de color gris claro, con textura porfídica, de grano grueso, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol, muy similar a la muestra anterior. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 619M. Fragmentos subredondeados de color rojizo, con fenocristales de piroxeno, con una matriz arcillosa, con fragmentos de calcedonia de color blanco opaco, formando parte de la matriz y de color amarillo, con algunos líticos de color gris y tamaño de la ceniza gruesa. Con base en estas características y apoyados en un núcleo en donde se observaron estas mismas características, se clasificó a esta muestra como parte de un depósito de lahar (probablemente un depósito de flujo hiperconcentrado).

SC-03 620M. Fragmentos redondeados de color rojizo, con fenocristales de piroxeno, con una matriz arcillosa y fragmentos subangulosos de color gris claro, con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa y piroxeno, de tamaño de arena gruesa. Clasificación: contacto entre el depósito de lahar descrito en la muestra anterior y una lava andesítica.

SC-03 640M. Fragmentos angulosos de color gris claro, con fragmentos de 5 mm de diámetro, con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa, anfíbol y piroxeno, con una ligera alteración de color verdoso. Clasificación: lava de composición andesítica alterada por hidrotermalismo.

SC-03 660M. Fragmentos angulosos de color gris claro, de grano muy grueso, con una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y anfíbol, con alteración verdosa similar a la muestra anterior. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 680M. Fragmentos angulosos de color gris claro, con fragmentos de 1 cm de diámetro, de textura porfídica, con fenocristales de piroxeno, anfíbol y plagioclasa. Algunos

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

piroxenos presentan oxidación. Presenta menos alteración verdosa que la muestra anterior. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 700M. Fragmentos angulosos de color gris claro, con dimensiones de 1 cm de diámetro, de textura porfídica, con fenocristales de piroxeno oxidados, anfíbol, plagioclasa. Con casi nula alteración verdosa. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 720M. Fragmentos angulosos de color gris claro, con fragmentos de 1 - 2 cm de diámetro, de textura porfídica, con fenocristales de piroxeno, anfíbol y plagioclasa, con marcas de alteración. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 740M. Fragmentos angulosos de color gris oscuro, conformado de fragmentos de 1 cm de diámetro, de textura porfídica, con fenocristales de piroxeno, plagioclasa y anfíbol, algunos se encuentran oxidados, presentan marcas de alteración. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 760M. Fragmentos angulosos de color gris oscuro, constituidos por fragmentos de 5 mm de diámetro, de textura porfídica, con fenocristales de piroxeno y plagioclasa. El piroxeno presenta oxidación. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 780M. Fragmentos angulosos de color gris oscuro, de grano grueso, con una textura porfídica y fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno. No presenta alteración. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 800M. Fragmentos angulosos de color gris oscuro, de grano grueso, con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Clasificación: lava de composición andesítica.

SC-03 820M. Muestra de color gris claro, constituida por líticos diversos, vidrio, cristales sueltos de plagioclasa y piroxenos, pómez blanca subredondeados, fibrosa con fenocristales de piroxeno. Clasificación: depósito de caída de ceniza de composición ácida (probablemente dacítica).

SC-03 840M. Muestra de color gris claro, con líticos diversos, vidrio, con cristales sueltos de plagioclasa y piroxenos, pómez blanca subredondeados, fibrosa con fenocristales de piroxeno, similar a la muestra anterior. Clasificación: depósito de caída de ceniza.

SC-03 860M. Muestra de color gris claro, con líticos diversos, vidrio, cristales sueltos de plagioclasa y piroxenos, pómez blanca subredondeados, fibrosa con fenocristales de piroxeno. Clasificación: depósito de caída de ceniza.

SC-03 880M. Muestra de color rosada, constituida por fragmentos subredondeados, microcristalinos de color rosa, de grano grueso, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno, anfíbol y con algunos líticos subredondeados. Clasificación: la mayoría de los fragmentos corresponde a una ignimbrita de color rosa. Cabe destacar que de esta muestra se separaron cristales de circón para fechamiento radiométrico.

SC-03 900M. Muestra de color rosado, con fragmentos subredondeados, microcristalinos, de color rosa claro, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol, con algunos líticos redondeados en una matriz de ceniza fina, muy similar a la muestra anterior. Clasificación: ignimbrita rosa.

SC-03 920M. Muestra de color rosado, con fragmentos subredondeados, microcristalinos, de color rosa claro, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol, con algunos líticos redondeados en una matriz de ceniza fina. Clasificación: ignimbrita rosa.

SC-03 940M. Muestra de color rosado, con fragmentos subredondeados, microcristalinos, de color rosa claro, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol, con algunos líticos redondeados en una matriz de ceniza fina. Clasificación: parte de la ignimbrita rosa.

SC-03 960M. Muestra de color claro, con fragmentos subredondeados, microcristalinos, de color rosa claro, con fenocristales de plagioclasa y anfíbol, algunos de éstos se encuentran oxidados, con una matriz de ceniza fina. Clasificación: ignimbrita rosa.

SC-03 966M. Muestra de color claro, con fragmentos subredondeados, microcristalinos, de color rosado, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol en una matriz de ceniza fina. Clasificación: ignimbrita rosa.

SC-03 980M. Muestra de color gris claro-verdoso, con fragmentos subredondeados a redondeados, de color verdoso, con fenocristales de plagioclasa y algunos líticos finos de color gris con textura porfídica. Se aprecia una matriz fina. Clasificación: depósito de lahar.

SC-03 988M. Muestra de color rojizo, con fragmentos subredondeados color rojizo, tamaño grueso, con presencia de alteración verdosa y costras de oxidación. Se presentan algunos poros rellenos de calcedonia. Clasificación: Con base en la comparación con algunos núcleos se llegó a la conclusión de que se trata de un depósito de lahar.

SC-03 1000M. Muestra de color rojizo, con fragmentos subredondeados color rojizo, tamaño grueso, con presencia



Figura 11. Muestras colectadas en los hombros de la barrena y estabilizadores seleccionados para su clasificación por tamizado.

de líticas finas, fenocristales oxidados, se presenta calcedonia y una matriz arcillosa, similar a la muestra anterior. Clasificación: depósito de lahar.

SC-03 1020M. Muestra de color rojizo, con fragmentos subredondeados de color rojizo-oscuro, con presencia de líticas finas de color verdoso, se presenta calcedonia y una matriz arcillosa. Clasificación: depósito de lahar.

SC-03 1040M. Muestra de color gris-verdoso, con fragmentos angulosos, con tonalidades verdes y rojizas, con cristales de epidota, con piroxeno oxidados. Clasificación: lava alterada de composición andesítica.

SC-03 1050M. Muestra de color gris-verdoso, con fragmentos angulosos, de color verdoso, con textura porfídica, alterada y oxidada, se observan algunos fenocristales de piroxeno y la presencia de epidota. Clasificación: lava alterada andesítica.

SC-03 1080M. Muestra de color rojizo, con fragmentos angulosos de color rojizo, con presencia de líticas finas de color gris oscuro, con textura porfídica, con calcedonia en una matriz de arcillosa. Clasificación: depósito de lahar.

5.2. TAMIZADO DE MUESTRAS SELECCIONADAS

Se realizó un tamizado de las muestras obtenidas a una profundidad de 980 a 1080 md que fueron colectadas en

los hombros de la barrena y estabilizadores, razón por la cual no se conoce la profundidad con exactitud. La finalidad de realizar el tamizado fue tratar de clasificar estas muestras e intentar identificar el tipo de depósito observado a esta profundidad. En la Tabla 4 se muestra una relación de las muestras seleccionadas y su registro fotográfico en las Figuras 10 y 11.

5.2.1. Resultados del tamizado

La variedad en el tamaño de las partículas de suelos es casi ilimitada. Por definición, los granos mayores son los que se pueden mover con la mano, mientras que los más finos

Tabla 4. Muestras recolectadas de la barrena de perforación para tamizado. Profundidad 980-1080 md.

Consecutivo	Clave
1	SC03 – T1
2	SC03 – T2
3	SC03 – T3
4	SC03 – T4
5	SC03 – T5
6	SC03 – T6
7	SC03 – T7
8	SC03 – T8

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 5. Pesos correspondientes al tamizado de las muestras del pozo.

Clave	Peso inicial (g)	Retenido tamiz 10 (g)	Retenido tamiz 40 (g)	Retenido tamiz 60 (g)	Retenido tamiz 100 (g)	Retenido en la charola (g)
SC03-T1	3320	455	1335	475	365	685
SC03-T2	2040	148	930	293	223	438
SC03-T4	1720	733	623	108	73	178
SC03-T6	2100	322	903	284	204	381
SC03-T7	2165	298	1058	257	205	342
SC03-T7L	3420	403	1461	552	395	598
SC03-T8	3055	644	1289	324	289	504

Tabla 6. Resultados del tamizado de la muestra SC03-T1.

Malla no.	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (g)	Suelo retenido (%)	Suelo retenido acumulado (%)	Suelo que pasa (%)
10	2	455	13.7	13.7	86.295
40	0.42	1335	40.21	53.92	46.084
60	0.25	475	14.31	68.22	31.777
100	0.149	365	10.99	79.22	20.783
Charola	/	685	20.63	99.85	

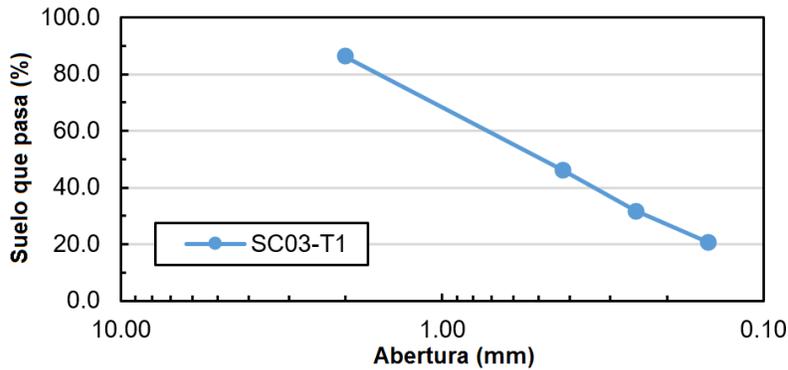


Figura 12. Gráfico de la granulometría de la muestra SC03-T1.

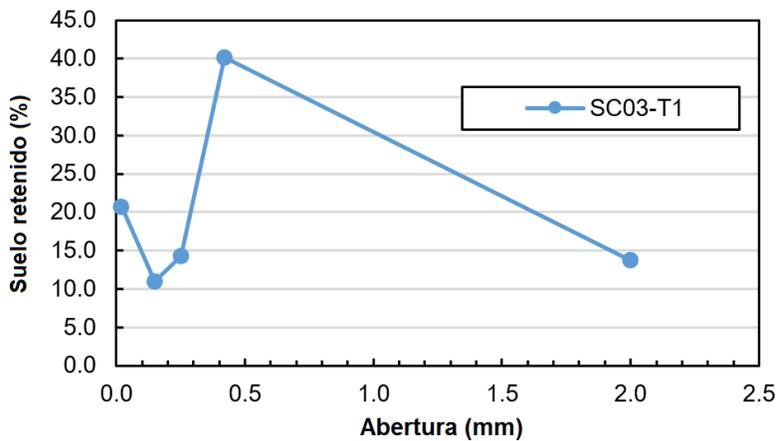


Figura 13. Gráfico de la abundancia de materia en la muestra SC03-T1.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 7. Resultados del tamizado de la muestra SC03-T2.

Malla no.	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (g)	Suelo retenido (%)	Suelo retenido acumulado (%)	Suelo que pasa (%)
10	2	148	7.255	7.25	92.745
40	0.42	930	45.588	52.84	47.157
60	0.25	293	14.363	67.21	32.794
100	0.149	223	10.931	78.14	21.863
Charola	/	438	21.471	99.61	

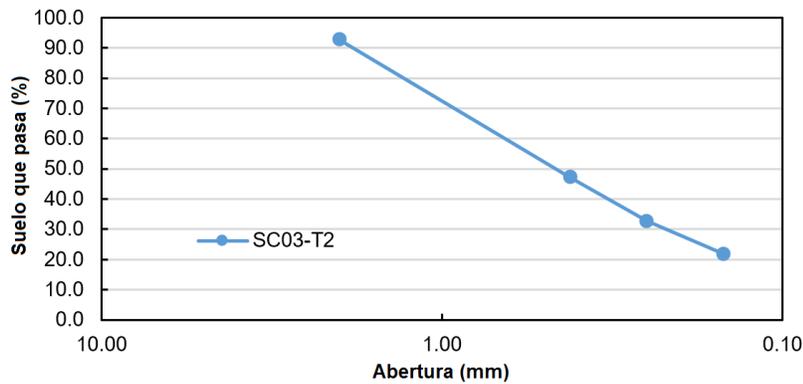


Figura 14. Gráfico de la granulometría de la muestra SC03-T2.

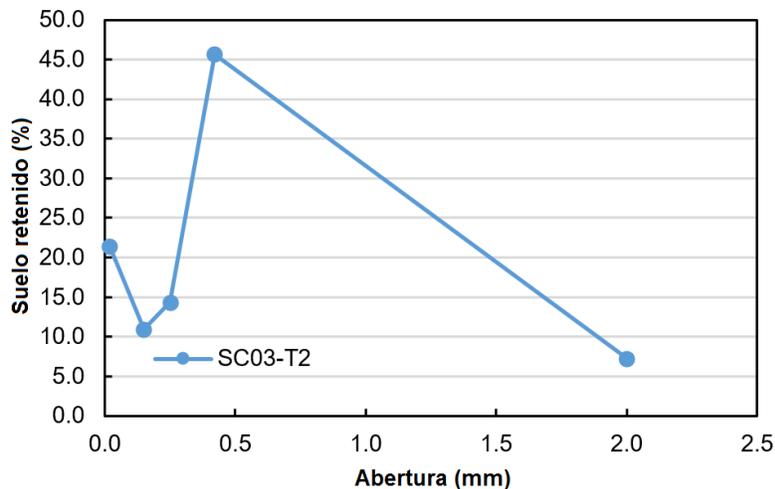


Figura 15. Gráfico de la abundancia de materia en la muestra SC03-T2.

son tan pequeños que no se pueden apreciar a simple vista. Debido a ello es que se realiza el Análisis Granulométrico que tiene por objeto determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo y fijar, en porcentaje de su peso total, la cantidad de granos de distinto tamaño que el mismo contiene. Un resumen de los resultados del tamizado se muestra en la Tabla 5.

La muestra SC03-T1 arroja como resultado un coeficiente de uniformidad (C_u)= 3.65 y un coeficiente de concavidad de (C_c)= 0.96. De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) corresponde a un material arenoso medio, mal gradado y moderadamente seleccionado (SP-SM) con contenido de finos mayores al 12 %, predominan materiales correspondientes a la malla número 40. Debido

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 8. Resultados del tamizado de la muestra SC03-T4.

Malla no.	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (g)	Suelo retenido (%)	Suelo retenido acumulado (%)	Suelo que pasa (%)
10	2	733	42.616	42.62	57.384
40	0.42	623	36.221	78.84	21.163
60	0.25	108	6.279	85.12	14.884
100	0.149	73	4.244	89.36	10.64
Charola	/	178	10.349	99.71	

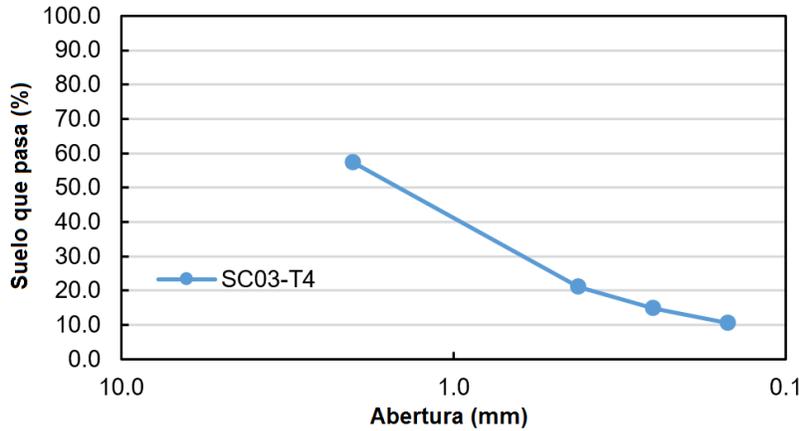


Figura 16. Gráfico de la granulometría de la muestra SC03-T4.

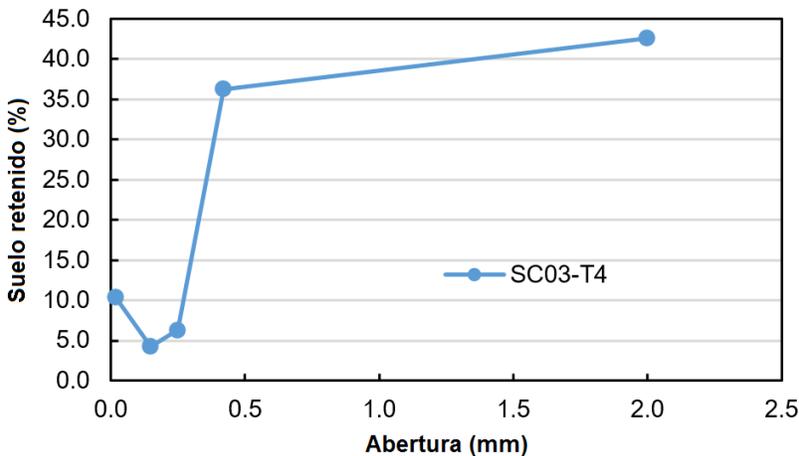


Figura 17. Gráfico de la abundancia de materia en la muestra SC03-T4.

a su origen volcánico y por la abundancia de material se puede clasificar como un depósito de lahar. Los resultados se encuentran en la Tabla 6 y Figuras 12 y 13.

La muestra SC03-T2 arroja como resultado un $C_u = 4.17$ y un $C_c = 1.12$. De acuerdo al SUCS corresponde a un material arenoso medio, mal gradado y moderadamente seleccionado con contenido de finos mayores al 12% (SP-SM) pues predominan materiales correspondientes a la malla número 40. Debido a su origen volcánico y

por la abundancia de material se puede clasificar como un depósito de lahar. Los datos que aseveran esto se encuentran en la Tabla 7 y Figuras 14 y 15.

La muestra SC03-T4 arroja como resultado un $C_u = 4.11$ y un $C_c = 2.97$. De acuerdo al SUCS corresponde a un material arenoso medio, mal gradado y mal seleccionado con contenido de finos de entre 5 y 12% (SP-GC) pues predominan materiales correspondientes a la malla número 10. Debido a su origen volcánico y por la

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 9. Resultados del tamizado de la muestra SC03-T6.

Malla no.	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (g)	Suelo retenido (%)	Suelo retenido acumulado (%)	Suelo que pasa (%)
10	2	322	15.333	15.33	84.667
40	0.42	903	43	58.33	41.667
60	0.25	284	13.524	71.86	28.143
100	0.149	204	9.714	81.57	18.429
Charola	/	381	18.143	99.71	

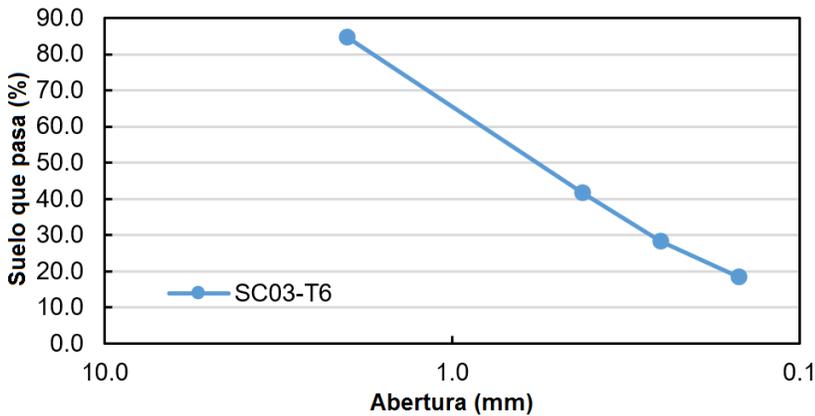


Figura 18. Gráfico de la granulometría de la muestra SC03-T6.

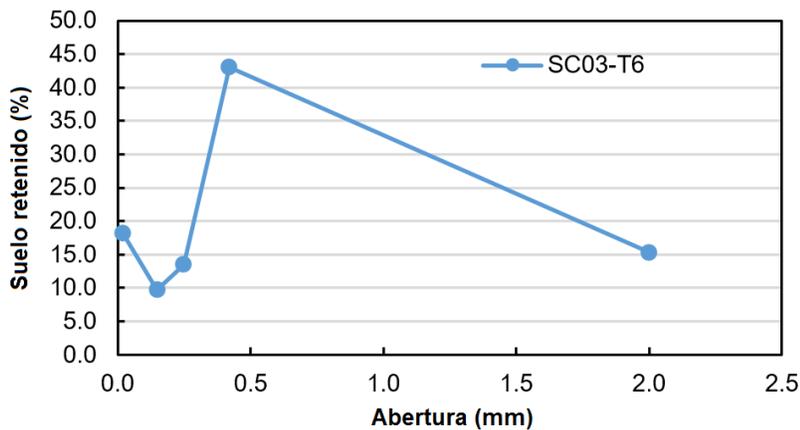


Figura 19. Gráfico de la abundancia de materia en la muestra SC03-T6.

abundancia de material se puede clasificar como un depósito de lahar. Los datos que aseveran esto se encuentran en la Tabla 8 y Figuras 16 y 17.

La muestra SC03-T6 arroja como resultado un $C_u = 4.42$ y un $C_c = 0.78$. De acuerdo al SUCS corresponde a un material arenoso medio, mal gradado y moderadamente seleccionado con contenido de finos mayor al 12% (SP-SM) pues predominan materiales correspondientes a la malla

número 10. Debido a su origen volcánico se puede clasificar como un depósito de lahar. Los datos que aseveran esto se encuentran en la Tabla 9 y Figuras 18 y 19.

La muestra SC03-T7L arroja como resultado un $C_u = 3.69$ y un $C_c = 0.61$. De acuerdo al SUCS corresponde a un material arenoso medio, mal gradado y moderadamente seleccionado con contenido de finos mayor al 12% (SP-SM) pues predominan materiales correspondientes a la

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 10. Resultados del tamizado de la muestra SC03-T7L.

Malla no.	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (g)	Suelo retenido (%)	Suelo retenido acumulado (%)	Suelo que pasa (%)
10	2	403	11.784	11.78	88.216
40	0.42	1461	42.719	54.5	45.497
60	0.25	552	16.14	70.64	29.357
100	0.149	395	11.55	82.19	17.807
Charola	/	598	17.485	99.68	

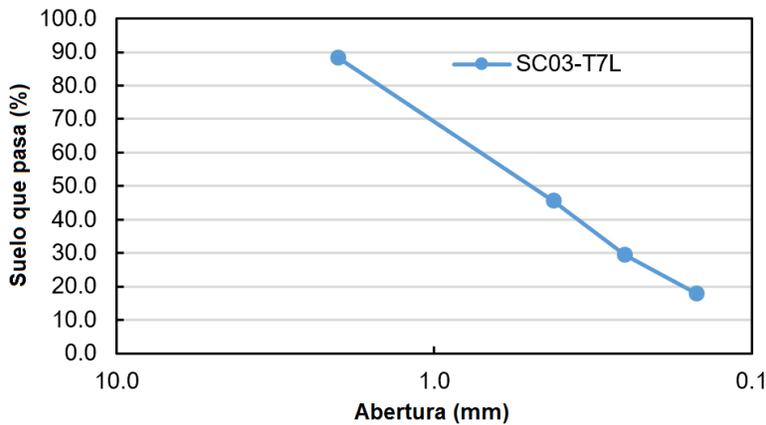


Figura 20. Gráfico de la granulometría de la muestra SC03-T7L.

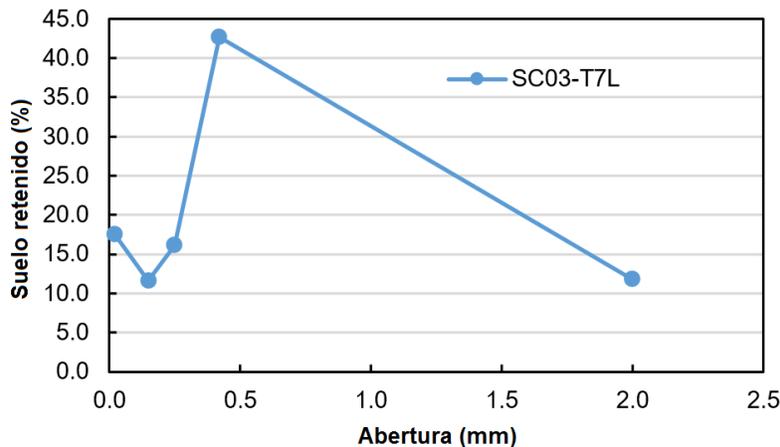


Figura 21. Gráfico de la abundancia de materia en la muestra SC03-T7L.

malla número 10. Debido a su origen volcánico y por la abundancia de material se puede clasificar como un depósito de lahar. Los datos que aseveran esto se encuentran en la Tabla 10 y Figuras 20 y 21.

La muestra SC03-T7 arroja como resultado un $C_u = 5.1$ y un $C_c = 0.53$. De acuerdo al SUCS corresponde a un material arenoso medio, mal gradado y moderadamente seleccionado con contenido de finos mayor al 12% (SP-

SM) pues predominan materiales correspondientes a la malla número 10. Debido a su origen volcánico y por la abundancia de material se puede clasificar como un depósito de lahar. Los datos que aseveran esto se encuentran en la Tabla 11 y Figuras 22 y 23.

La muestra SC03-T8 arroja como resultado que el suelo tiene un $C_u = 4.46$ y un $C_c = 1.11$. De acuerdo al SUCS corresponde a un material arenoso medio, mal gradado

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 11. Resultados del tamizado de la muestra SC03-T7L.

Malla no.	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (g)	Suelo retenido (%)	Suelo retenido acumulado (%)	Suelo que pasa (%)
10	2	322	15.333	15.33	84.667
40	0.42	903	43	58.33	41.667
60	0.25	284	13.524	71.86	28.143
100	0.149	204	9.714	81.57	18.429
Charola	/	381	18.143	99.71	

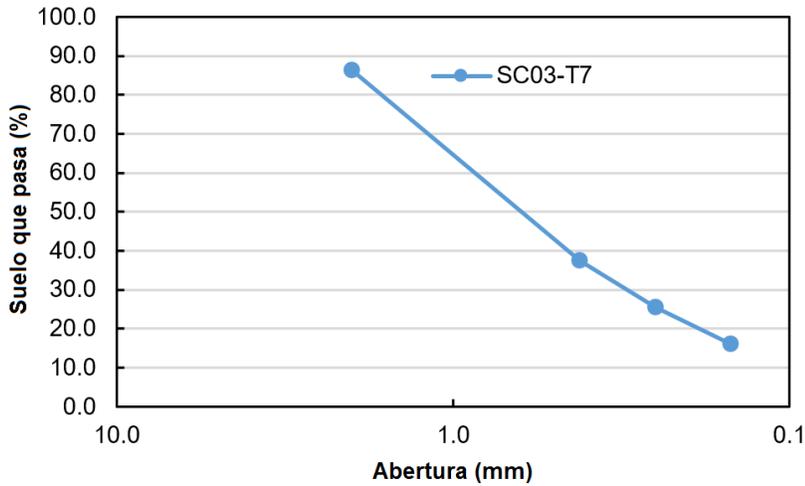


Figura 22. Gráfico de la granulometría de la muestra SC03-T7.

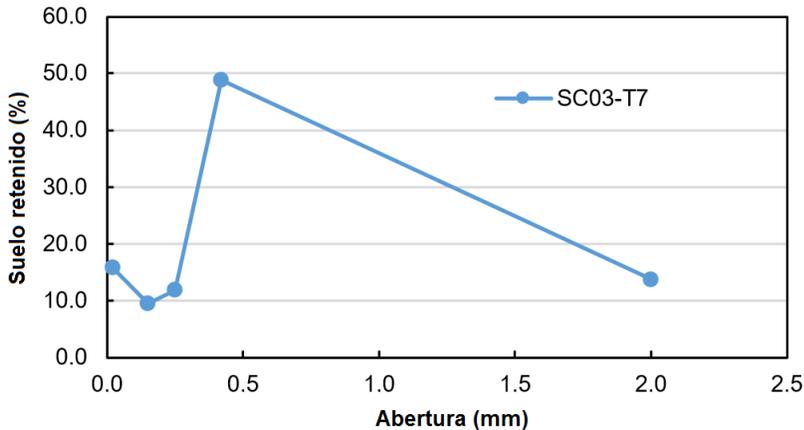


Figura 23. Gráfico de la abundancia de materia en la muestra SC03-T7.

y moderadamente seleccionado con contenido de finos mayor al 12% (SP-SM) pues predominan materiales correspondientes a la malla número 10. Debido a su origen volcánico, se puede clasificar como un depósito de lahar., Los datos que aseveran esto se encuentran en la Tabla 12 y en las Figuras 24 y 25.

5.3. ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE LAS MUESTRAS DE CANAL

Para la descripción petrográfica se elaboraron solamente 3 láminas delgadas de muestras de canal debido al grado de alteración que presentaba la mayoría de las muestras. A continuación, se describe cada una de ellas.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 12. Resultados del tamizado de la muestra SC03-T8.

Malla no.	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (g)	Suelo retenido (%)	Suelo retenido acumulado (%)	Suelo que pasa (%)
10	2	644	21.08	21.08	78.92
40	0.42	1289	42.193	63.27	36.727
60	0.25	324	10.606	73.88	26.121
100	0.149	289	9.46	83.34	16.661
Charola	/	504	16.498	99.84	

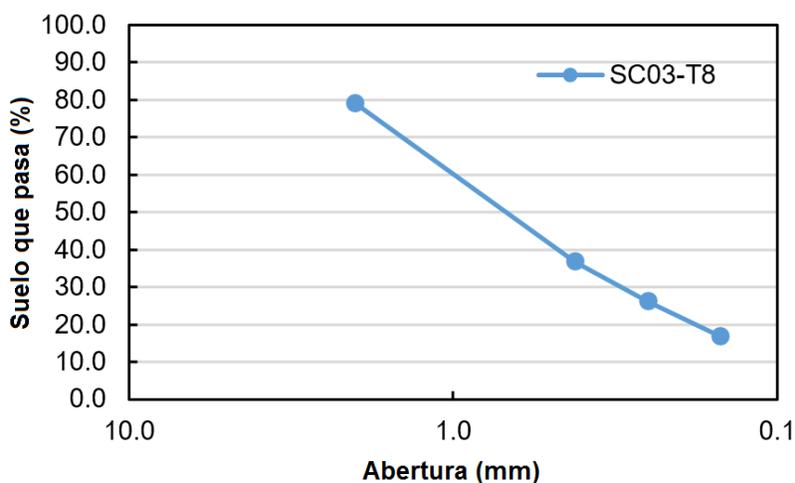


Figura 24. Gráfico de la granulometría de la muestra SC03-T8.

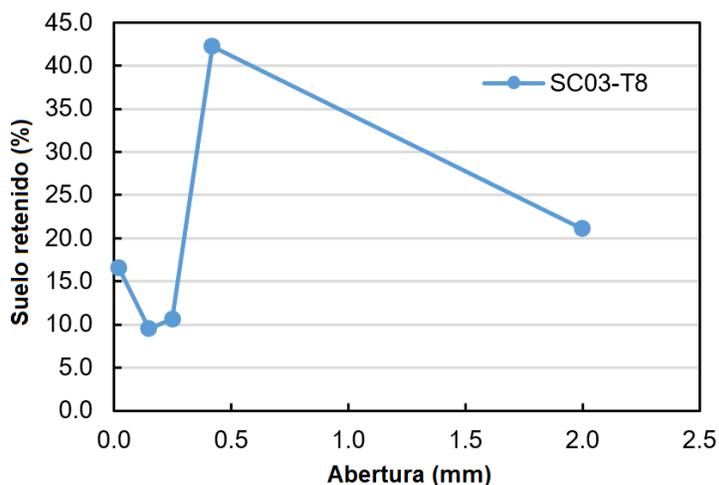


Figura 25. Gráfico de la abundancia de materia en la muestra SC03-T8.

El número posterior a la clave corresponde a la profundidad de la muestra en metros desarrollados.

Muestra SC-A3 640. La muestra presenta una textura porfídica, holocristalina e inequigranular (Figura 26), con fenocristales (60% en volumen) de 0.1 a 2 mm, constituidos por plagioclasa (25%), piroxeno (20%) y anfíbol (15%), así como escasos cristales de óxidos de Fe-

Ti. Estos fenocristales se encuentran en una matriz vítrea y microlítica que representan el 60% en volumen.

La forma de los fenocristales varía de euhedral a subhedral. La plagioclasa presenta bordes y centros corroídos. Los piroxenos llegan a presentar coronas de reacción. De acuerdo con la asociación mineralógica presente, la muestra se clasifica como una andesita.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

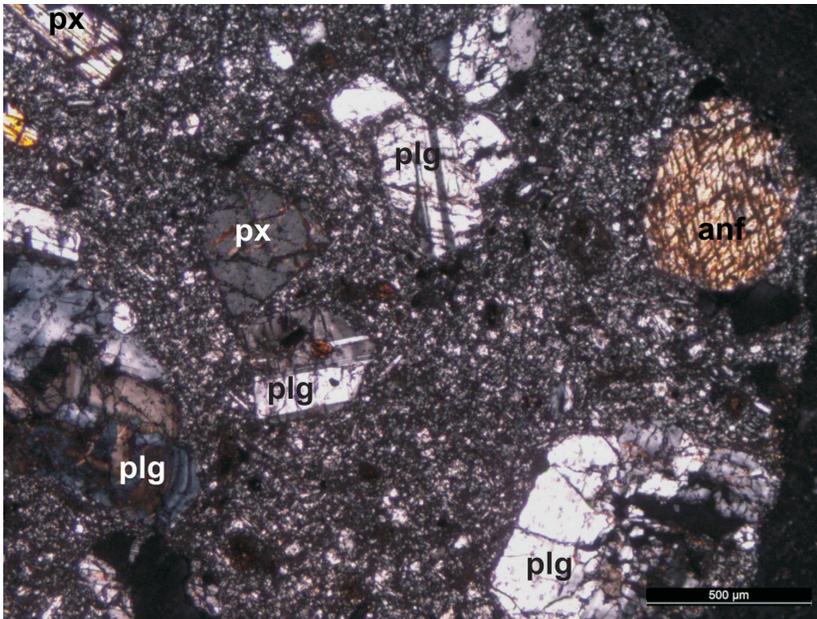


Figura 26. Microfotografía en nícoles cruzados de la muestra ubicada a 640 m de profundidad. Se aprecia la textura porfídica con fenocristales de plagioclasa (plg), piroxeno (px) y anfíbol (anf).

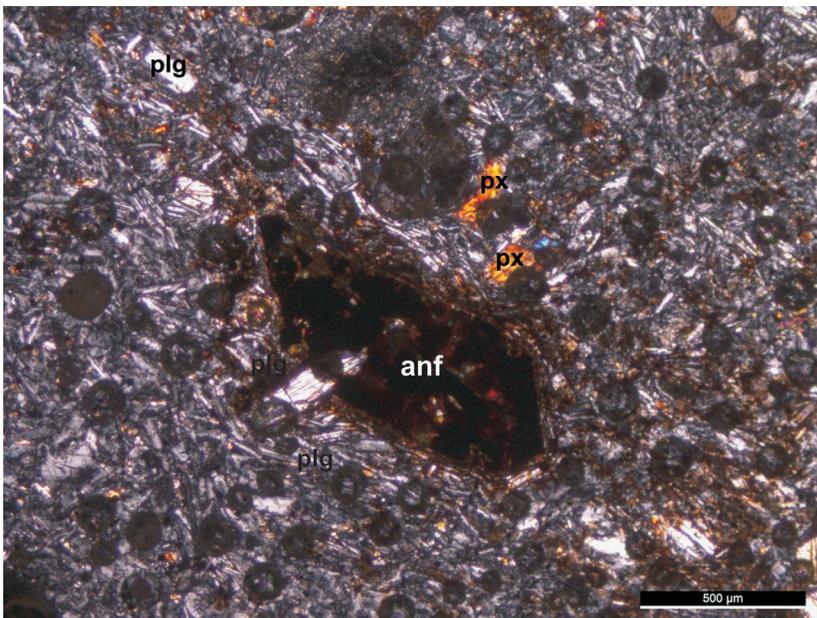


Figura 27. Microfotografía en nícoles cruzados de la muestra correspondiente a 700 m de profundidad del pozo Santa Catarina 3a. Se aprecia la textura porfídica con micro fenocristales de plagioclasa (plg) y un fenocristal de anfíbol oxidado (anf).

Muestra SC-A3 700. Esta muestra presenta una textura porfídica, holocristalina e inequigranular, constituida por fenocristales que varían de 0.5 a 0.02 mm, de plagioclasa, piroxeno y anfíbol, así como escasos óxidos de Fe-Ti. Cabe destacar la presencia de zonas oxidadas (Figura 27) probablemente debido al grado de alteración de la roca. Los fenocristales están inmersos en una matriz vítrea y microlítica.

Los fenocristales varían en su forma de subhedral a anhedral. Se observan cristales de anfíboles con coronas

de oxidación. La muestra contiene alrededor de 70% matriz y 30% fenocristales. Del 30% de fenocristales, el 15% corresponde a plagioclasa, 10% a piroxenos y el restante 5% a anfíboles. Por su asociación mineralógica la muestra se clasifica como una andesita.

Muestra SC-A3 760. Esta muestra presenta una textura porfídica, holocristalina e inequigranular, también con presencia de zonas oxidadas, pero en menor grado que la muestra anterior (SC-A3 700). Está conformada por fenocristales que varían de 0.1 a 0.6 mm, de plagioclasa

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

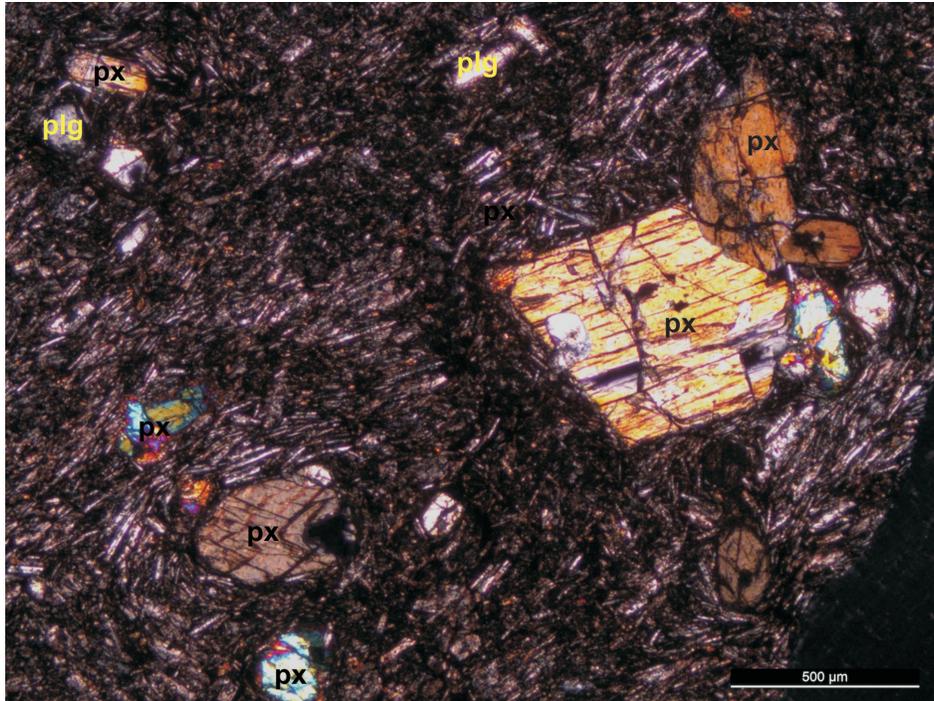


Figura 28. Microfotografía de la muestra correspondiente a la profundidad de 760 m. En ella se aprecia la textura porfídica (microlitos y vidrio) y microfenocristales de plagioclasa (plg), así como fenocristales de piroxeno (px).

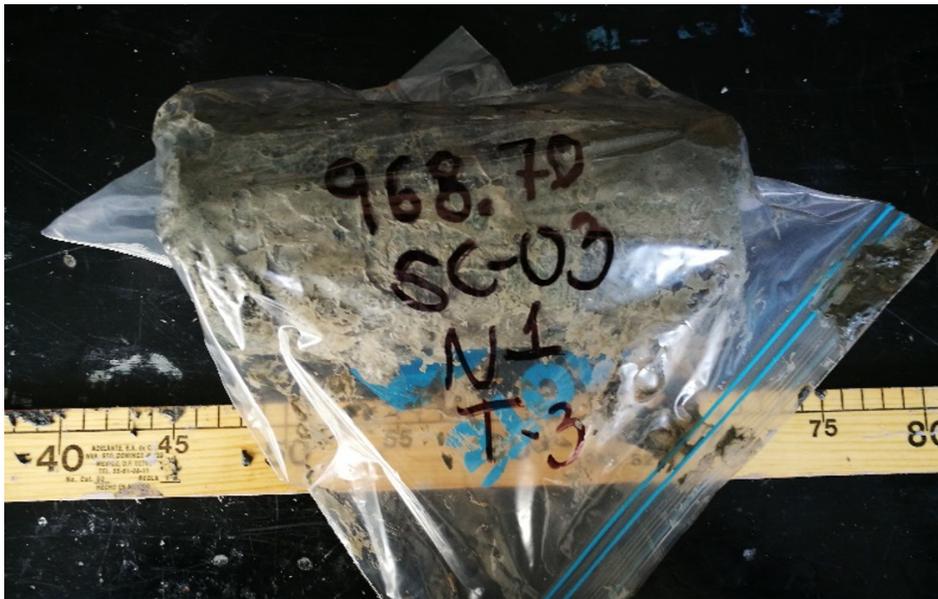


Figura 29. Segmentos del N1-SCT3a que se resguardó sin alteraciones para su análisis en laboratorio.

y piroxeno, dentro de una matriz vítrea y microlítica. La forma de los mismos varía entre subhedral y anhedral. Contiene 75% de matriz y el 25% restante de fenocristales; del cual un 15% corresponde a piroxenos y el 10% a plagioclasa. De acuerdo al ensamble mineralógico se clasifica como una andesita.

6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE NÚCLEOS

Los núcleos fueron un elemento vital para la construcción de la columna geológica, ya que su estado inalterado por el proceso de perforación generó una caracterización precisa de las formaciones a las que pertenecían.

NÚCLEO 1
PROFUNDIDAD 966 m - 969 m
POZO SANTA CATARINA 3a.

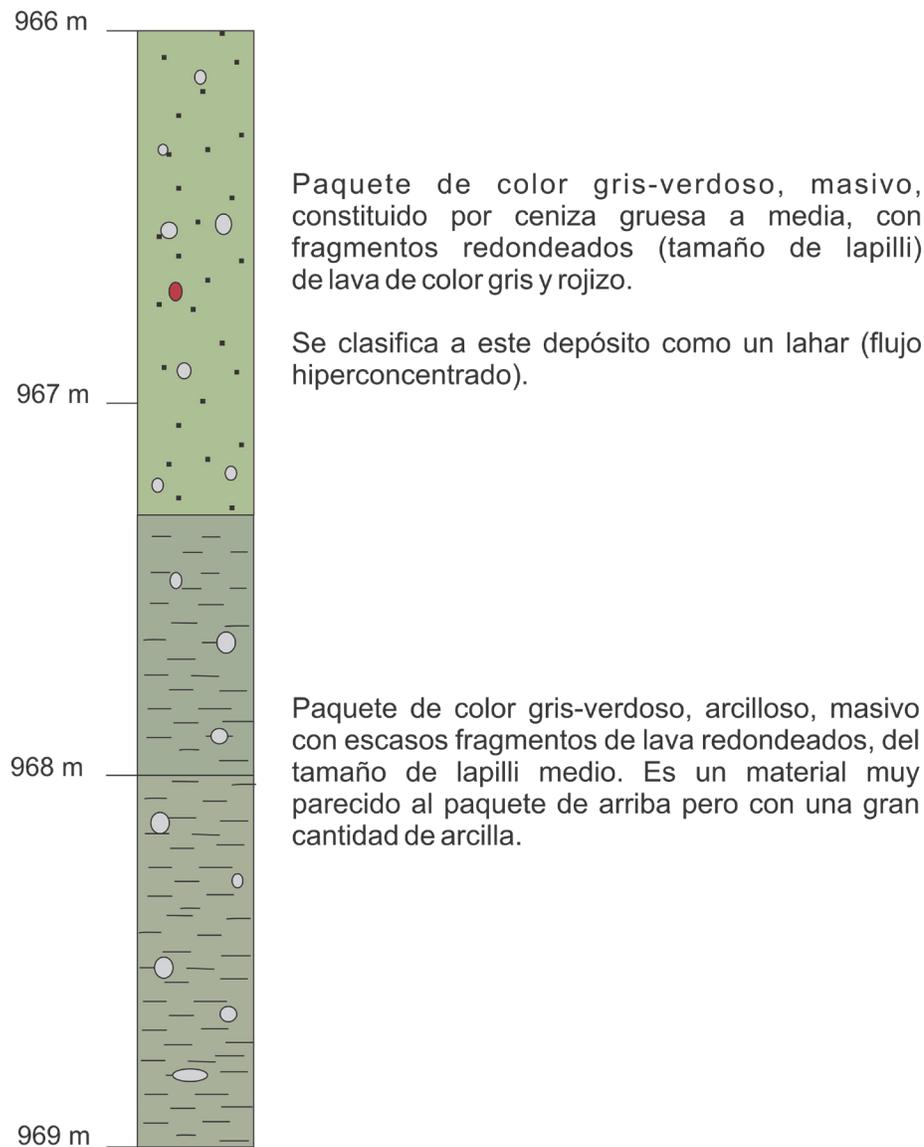


Figura 30. Descripción macroscópica del Núcleo N1-SCT3a.

6.1. LIMPIEZA

Cada uno de los núcleos fue extraído de sus contenedores y sometido a un proceso de limpieza dentro de las instalaciones del Instituto de Geología. Debido a las condiciones de algunos, principalmente el primer núcleo, no fue posible someterlo a limpieza, ya que las características del núcleo no lo permitían sin sufrir afectaciones. Algunas secciones de este núcleo se mantuvieron intactas (Figura 29) para ser analizadas de esta manera en el laboratorio.

Los núcleos que fueron lavados fueron colocados en contenedores de PVC para su análisis. Actualmente se encuentran en resguardo dentro del Instituto de Geología.

6.2. DESCRIPCIÓN

La descripción de cada núcleo se hizo tramo por tramo, y se registraron sus características macroscópicas principales. Se hizo una clasificación de acuerdo con los minerales que se observan en muestra de mano y

NÚCLEO 2
PROFUNDIDAD 1550m - 1559m
POZO SANTA CATARINA 3a

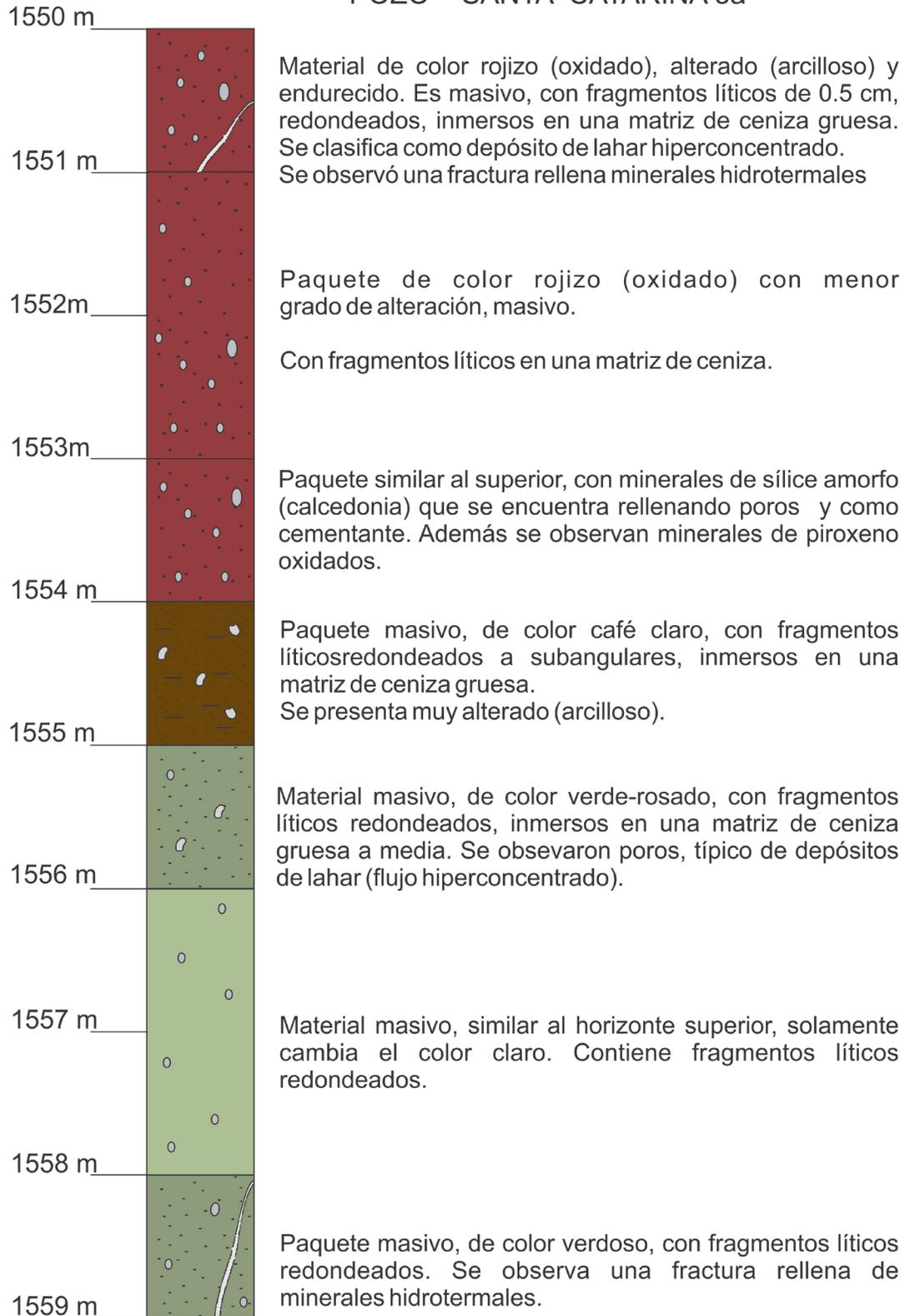


Figura 31. Descripción macroscópica del Núcleo N2-SCT3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

NÚCLEO 3
PROFUNDIDAD 1900m - 1909m
POZO SANTA CATARINA 3a.

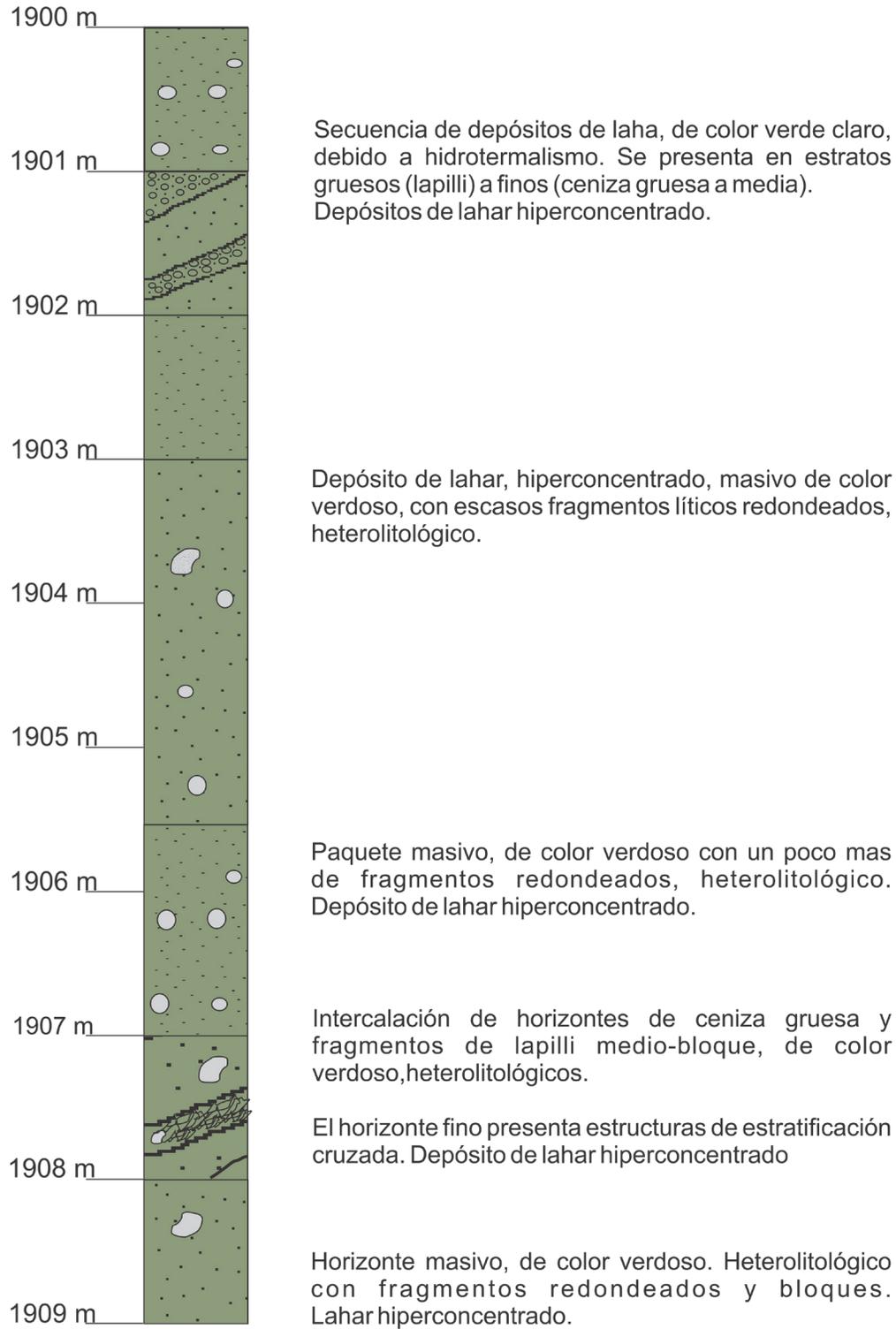


Figura 32. Descripción macroscópica del Núcleo N3-SCT3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

de acuerdo con sus principales características físicas observadas cualitativamente, las cuales son descritas a continuación. Ver Figuras 30, 31 y 32.

7. PRUEBAS DE LABORATORIO A MUESTRAS Y NÚCLEOS

7.1. GEOQUÍMICA

Se llevaron a cabo 6 análisis químicos de roca total de muestras de canal del pozo Santa Catarina 3a, mediante el método de Fluorescencia de Rayos X, en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Instituto de Geología, UNAM. Para estos análisis, las muestras fueron lavadas con agua destilada y secadas en un horno a 80°C por 24 horas. Una vez secas, se procedió a seleccionar los fragmentos más sanos y después de esto se pulverizó cada muestra. Los polvos resultantes se enviaron al laboratorio de Fluorescencia de Rayos X (FRX) para el análisis.

Químicamente las muestras de lava se clasifican como andesitas (Figura 33), con muy poca variación en sílice (60 - 61% en peso). Una de las lavas resultó estar fuertemente alterada (muestra SC-3a 547), tanto que no aparece en la

gráfica de clasificación química de sílice vs. álcalis (Figura 33; Le Bas *et al.*, 1986). Sin embargo, esta muestra se clasificó en muestra de mano como una andesita (Tabla 13). Por otro lado, las dos arcillas analizadas son de composiciones distintas, una cae dentro del campo de los basaltos (arcilla roja, 960 md) y la otra en el campo de la dacita (arcilla gris, 1000 md), esto probablemente es el resultado del material parental original, es decir que probablemente se formaron a partir de la alteración de materiales volcánicos basálticos y dacíticos respectivamente.

Por otro lado, las concentraciones de los otros elementos mayores presentan poca variación en todas las muestras (Figura. 34), al menos para el Mg, Al, Na, Ca y K, pero no para el Fe, el cual presenta una correlación negativa. Resalta la muestra de andesita basáltica alterada (Tabla 13), la cual se aleja de todas las demás, con valores muy bajos en Na, K, Mg, Al y una concentración muy alta en Ca (49% en peso). Este valor anómalo puede deberse a fluidos hidrotermales que transportaron Ca desde fuentes profundas y precipitaron en esta roca. Sin embargo, no es posible definir la fuente de este elemento, ya que en los 2000 m perforados en ningún momento se atravesaron rocas calcáreas.

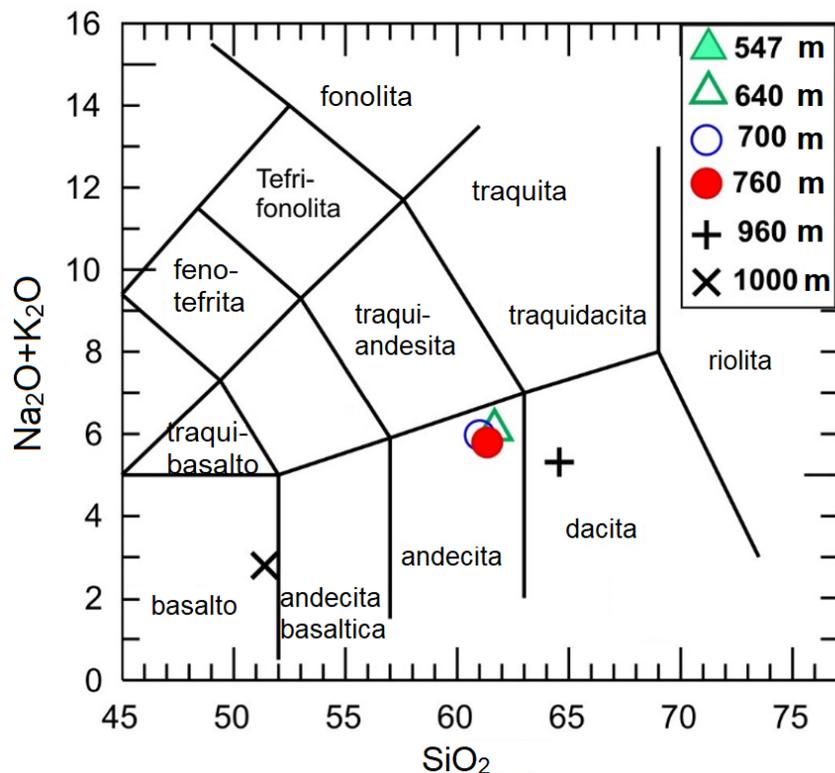


Figura 33. Diagrama de clasificación química sílice vs. álcalis de Le Bas *et al.* (1986) para las muestras analizadas del pozo Santa Catarina 3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 13. Resultados de análisis químicos de roca total de las muestras del pozo Santa Catarina 3a por FRX.

Muestra	Roca	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PxC	Total
SC-3A 547	Lava gris alterada	20.56	0.16	4.13	4.14	0.04	1.7	49.3	0.18	0.06	0.08	19.61	99.96
SC-3A 640	Lava verdosa	61.12	0.89	16.27	5.82	0.08	3.48	5.19	4.33	1.71	0.23	0.96	100.07
SC-3A 700	Andesita gris	60.5	0.92	16	6.48	0.08	3.79	5.24	4.29	1.64	0.24	0.88	100.04
SC-3A 760	Lava negra	60.75	0.92	15.88	5.76	0.1	4.38	5.29	3.93	1.81	0.24	0.99	100.04
SCO3-960	Arcilla gris	64.57	0.73	17.02	3.91	0.06	1.49	3.86	3.7	1.61	0.12	2.94	100.01
SCO3-1000	Arcilla roja	51.39	0.98	18.75	9.48	0.14	3.51	5.13	1.07	1.72	0.19	7.7	100.05

El número de la muestra corresponde a la profundidad. Los análisis se llevaron a cabo en muestras de canal. Fe total se reporta como Fe₂O₃; PxC, pérdida por calcinación a 1100°C.

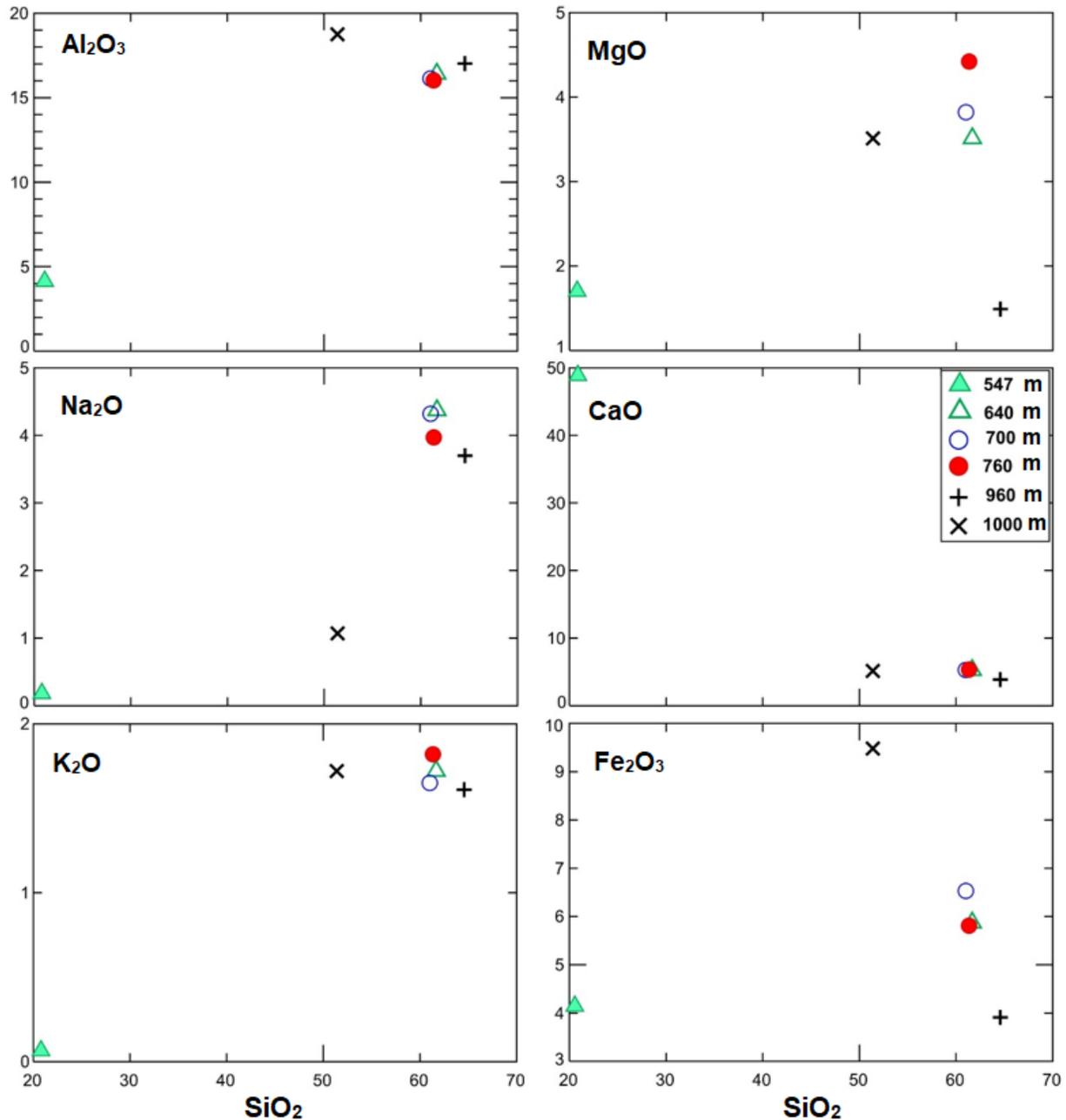


Figura 34. Diagramas de contenido de elementos mayores.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Como se muestra en la Tabla de resultados, se analizaron tanto fragmentos de lava como muestras de arcillas. Cabe resaltar que se obtuvieron muy pocas muestras durante toda la perforación del pozo.

7.2. ROCA TOTAL Y TIPO DE ARCILLA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Las muestras del pozo que se analizaron para tipo de arcillas y roca total por Difracción de Rayos X (DRX) corresponden al primer núcleo (N1-SCT3a), debido a que este núcleo pertenece a una formación arcillosa cuyo origen y forma de depósito aún no se determina con exactitud. Se analizaron también las muestras obtenidas durante la perforación a una profundidad de entre 980 a 1080 md (no se conoce con exactitud la profundidad debido a que se obtuvieron en los hombros de la barrena y estabilizadores durante la perforación).

7.2.1. Muestreo

El análisis de arcillas se realizó en cuatro muestras, dos pertenecientes al núcleo N1-SCT3a y dos del intervalo 980 - 1080 md. Para roca total se tomaron muestras en

los mismos intervalos que para análisis de arcillas. Un resumen, junto con la profundidad de cada muestra, se presenta en la Tabla 14. En la Figura 35 se observa un ejemplo de las muestras enviadas para DRX, en particular los 4 g necesarios para hacer la prueba para tipo de arcilla y el correspondiente testigo.

7.2.2. Metodología

La DRX es un método que permite identificar los minerales por su estructura cristalina. La utilidad de este método ha crecido y su campo se ha extendido con la introducción del difractómetro de rayos X. Lo anterior es posible gracias a que los minerales son cristalinos y la distribución regular en el espacio de sus componentes se describe por medio de las redes cristalinas, que manifiestan la repetición periódica de la celda del mineral. En este estudio los difractogramas se obtuvieron en un Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D.

Roca Total

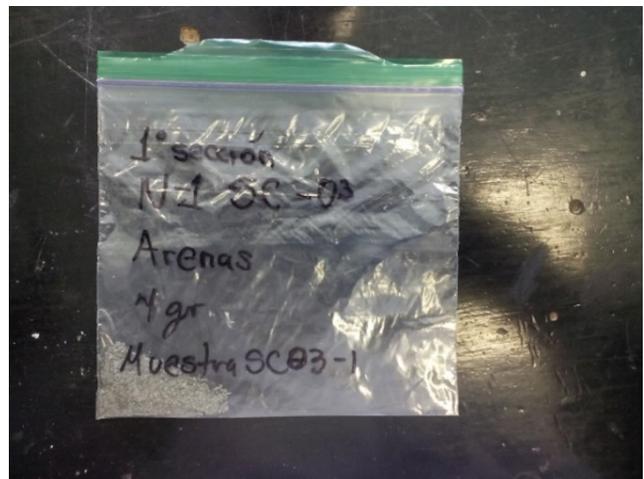
Las muestras se molturaron y homogeneizaron mediante un mortero de ágata y se midieron utilizando un porta muestras de aluminio (fracciones no orientadas) de doble

Tabla 14. Relación de muestras colectadas a partir del núcleo N1-SCT3a.

Clave	Profundidad (md)	Tipo de análisis
SC03-1	966	Tipo de arcilla y Roca total
SC03-2	967.7	Tipo de arcilla y Roca total
SC03-3	Aprox. 980 - 1080	Tipo de arcilla y Roca total
SC03-4	Aprox. 980 - 1080	Tipo de arcilla y Roca total



a)



b)

Figura 35. Muestra a 966 md perteneciente al núcleo N1-SCT3a. a) Testigo de la muestra. b) Muestra seleccionada para análisis.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

carga. La medición se realizó en el intervalo angular 2θ de 5 a 70° en escaneo por pasos con un step scan de 0.003° (2θ) y un tiempo de integración de 40 s por paso.

Tipo de arcilla

- Cada muestra (previamente disgregada y tamizada a 1 mm) se dispersó en agua destilada durante 24 h.
- Se decantó la fracción fina.
- Se centrifugó la fracción fina a 6000 rpm.
- Se recuperó la fracción fina.
- Se prepararon tres agregados orientados en porta muestras de vidrio.
- Se dejaron secar a temperatura ambiente (24 h aprox.).
- Se comprobó por pesada que los agregados orientados tenían el espesor necesario para medición ($> 2.5 \text{ mg/cm}^2$).

A cada muestra se le dio el siguiente tratamiento:

- Un agregado orientado de la muestra se analizó sin tratamiento de 4 a 70° (2θ).
- El segundo agregado se trató con etilenglicol a 70°C durante 24h y se midió de 4 a 50° (2θ).
- El tercer agregado se calentó a 450 y 550°C .

7.2.3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados para los dos tipos de análisis.

Roca total

El resultado de análisis de Roca Total fue similar para las cuatro muestras. La fase principal es de feldespato tipo plagioclasas con presencia de cuarzo y tridimita. Sin embargo, para las muestras de mayor profundidad (980 -

Tabla 15. Resultados de DRX para Roca Total.

Muestra	Fases identificadas	RIR	Observaciones
DRX1	Feldespato tipo plagioclasa intermedia	71	Para la determinación de filosilicatos ($< 2 \mu$) revisar Tabla 16.
SCO2-1	Cuarzo: SiO_2	10	Se detectó la presencia de una pequeña proporción de material amorfo.
966 [md]	Tridimita: SiO_2	7	
	Filosilicatos a $\approx 14\text{\AA}$ (pbb esmectita)	12	
DRX2	Feldespato tipo plagioclasa intermedia	62	Para la determinación de filosilicatos ($< 2 \mu$) revisar Tabla 16.
SCO2-2	Cuarzo: SiO_2	13	Se detectó la presencia de una pequeña proporción de material amorfo.
967.7 [md]	Tridimita: SiO_2	12	
	Filosilicatos a $\approx 14 \text{\AA}$ (ppb esmectita)	13	
DRX3	Feldespato tipo plagioclasa intermedia	69	Para la determinación de filosilicatos ($< 2 \mu$) revisar Tabla 16.
SCO3-3	Cuarzo: SiO_2	6	Se detectó la presencia de una pequeña proporción de material amorfo.
980 a 1080 [md]	Tridimita: SiO_2	5	
	Cristobalita: SiO_2	4	
	Hematita: Fe_2O_3	5	
	Filosilicatos a $\approx 14 \text{\AA}$ (ppb esmectita)	11	
DRX4	Feldespato tipo plagioclasa intermedia	63	Para la determinación precisa de filosilicatos ($< 2 \mu$), revisar Tabla 16.
SCO3-4	Cuarzo: SiO_2	9	Se detectó la presencia de una pequeña proporción
980 a 1080 [md]	Tridimita: SiO_2	16	
	Hematita: Fe_2O_3	2	
	Filosilicatos a $\approx 14\text{\AA}$ (pbb esmectita)	10	

RIR. Proporción Relativa de la Intensidad

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 16. Resultados de DRX para tipo de arcilla.

Muestra	Picos sin tratamiento	Picos con Etilenglicol	Picos a 550°C	Fases identificadas	Observaciones
DRX1	≈14 Å	≈17 Å	≈10 Å	Esmectita pura sin interestratificados	Arcilla totalmente expansible
SC03-1 orientada					Presencia de plagioclasa en la fracción arcilla.
DRX2	≈14 Å	≈17 Å	≈10 Å	Esmectita pura sin interestratificados	Arcilla totalmente expansible
Arcillas					
SC03-2 orientada					
DRX3	≈ 14 Å	≈ 17 Å	≈ 10 Å	Esmectita pura sin interestratificados	Arcilla totalmente expansible
Arcillas					Presencia de plagioclasa en la fracción arcilla.
SC03-3 orientada					
DRX4	≈ 14 Å	≈ 17 Å	≈ 10 Å	Esmectita pura sin interestratificados	Arcilla totalmente expansible
Arcillas					Presencia de plagioclasa en la fracción arcilla.
SC03-4 orientada					

1080 md) existe la presencia de cristobalita, que es estable a una temperatura mayor que la tridimita. Por otra parte, la presencia de hematita sugiere alteración hidrotermal que se confirmaría con los análisis por tipo de arcilla. La arcilla presente de acuerdo a este análisis fue del tipo filosilicato para las cuatro muestras. Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 15.

Tipo de arcilla

El resultado del tipo de acilla fue el mismo en los cuatro casos: arcilla de la familia de las esmectitas. La esmectita en este caso no se encuentra interestratificada (por ejemplo, con ilita o clorita) que no es común en rocas sedimentarias, por tal motivo el origen de estas arcillas pudo ser causa de circulación de fluidos, o un producto de alteración hidrotermal de rocas ácidas o una alteración a depósitos de ceniza volcánica, hecho que concuerda con los análisis de geoquímica.

Las esmectitas tienen una gran capacidad para absorber el agua, cambiando de volumen paulatinamente con la ganancia o pérdida de la humedad. Finalmente, debido a que no se encuentra interestratificada le da una cualidad expandible. Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 16.

7.3. PRUEBAS PETROFÍSICAS Y TERMOFÍSICAS

Las actividades consistieron en determinar las propiedades petrofísicas y termofísicas de 2 muestras en el laboratorio de yacimientos del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), enviadas por parte del Instituto de Geología. Para cada una de las muestras se obtuvieron tres propiedades petrofísicas: densidad, porosidad y permeabilidad al gas con nitrógeno. Además de tres propiedades termofísicas: la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a



Figura 36. Muestra SCN1-1 entregada al INEEL sin rectificar.

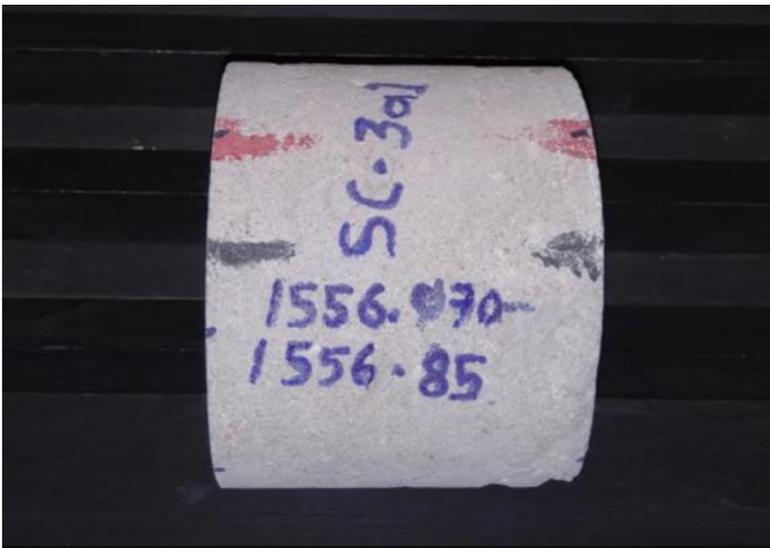


Figura 37. Muestra SCN3-1a entregada al INEEL rectificada.

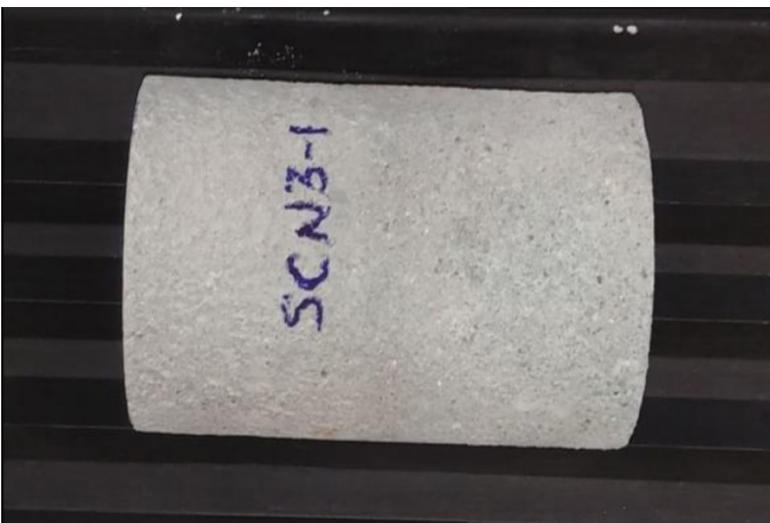


Figura 38. Muestra SCN3-1 entregada al INEEL rectificada.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

7.3.1. Muestreo

En la Gerencia de Geotermia del INEEL se entregaron 3 muestras de roca (Figuras 36, 37 y 38) pertenecientes a los núcleos tomados en el pozo Santa Catarina 3a, con aproximadamente 4" de diámetro (10 cm) con longitudes variables. Las muestras tuvieron que pasar a un proceso de rectificado en las caras transversales de sección circular, debido a las irregularidades ocasionadas por el corte

Tabla 17. Relación de muestras entregadas al INEEL.

Muestra	Núcleo	Profundidad [md]
SCN1-1	N1-SCT3a	968.40-968.70
SCN3-1a	N3-SCT3a	1556.7-1553.85
SCN3-1	N3-SCT3a	1908.75-1909

original de los fragmentos. En la Tabla 17 se muestra la relación de las muestras entregadas al INEEL con las profundidades respectivas de cada una. La muestra SCN1-1 no pudo ser tratada en el laboratorio debido a las fracturas naturales y poca cementación.

7.3.2. Metodología

A continuación, se sintetizan los principales procedimientos para cada una de las pruebas hechas en el laboratorio.

Propiedades termofísicas

El proceso de calibración y medición de propiedades termofísicas se basa en el arreglo experimental, representado en la Figura 39. En esta Figura se ilustra el desarrollo de una prueba en tiempo real para medir las propiedades térmicas del cuarzo. Los componentes principales del sistema de medición son: i) una computadora; ii) un adquisidor de datos marca Keysight, modelo 34972A; iii) una fuente de corriente constante marca BK Precisión, modelo 9184; iv) una muestra cilíndrica de cuarzo con un calentador marca Omega de 155.8 Ohms; y v) dos termopares tipo K alojados en el interior de la muestra de cuarzo.

La muestra de cuarzo se utiliza para calibrar el equipo y comparar las lecturas con una muestra de propiedades conocidas. Esto se logra perforando la muestra a lo largo de su eje longitudinal, con una barrena de 1/8" de diámetro por 3" de profundidad; donde se resguarda el calentador de resistencia constante. Por ser la muestra de calibración, se realiza una segunda perforación de 1/16" de diámetro, de forma paralela a la primera, donde se alojó un termopar a una distancia de 1.27 cm del calentador. Este termopar, denominado termopar de medición, tiene la función de registrar la temperatura durante el proceso de lectura de datos. Se instaló el segundo termopar en la periferia de la muestra con el objetivo de determinar el instante en el que el frente de calor llega al final de la muestra cilíndrica en la dirección radial. A este termopar se le denomina termopar de observación.

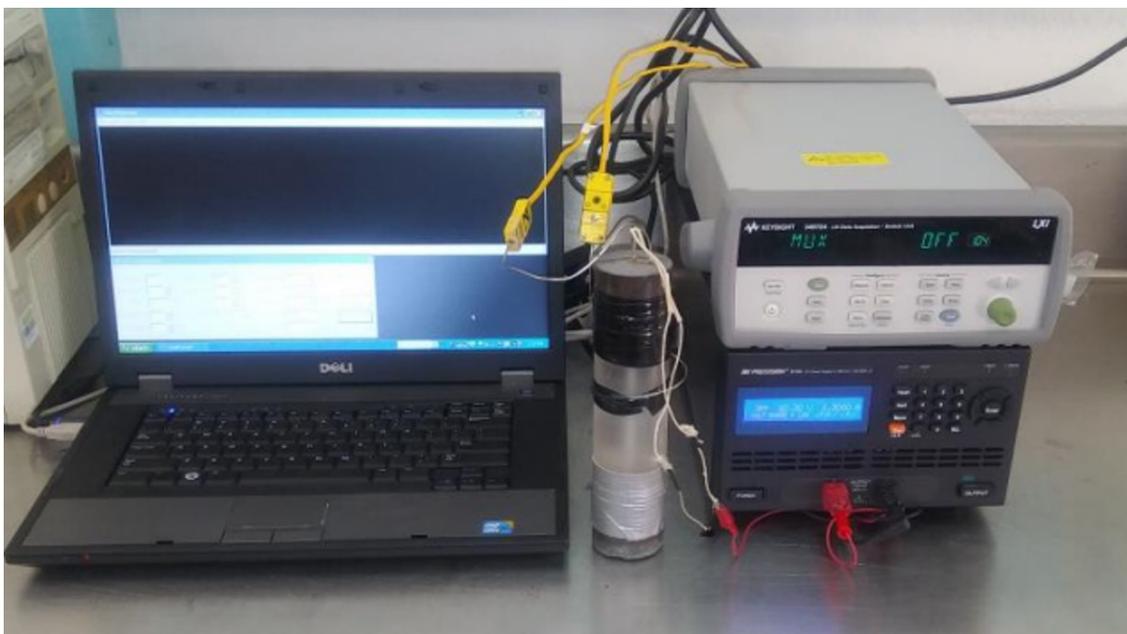


Figura 39. Arreglo experimental para la determinación de propiedades termofísicas.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Cuando se tienen conectados los elementos se procede a encender el adquisidor de datos y la computadora. Dentro del programa de adquisición de datos instalado en la computadora, se selecciona el tiempo de muestreo de una lectura por segundo, que es suficiente para las muestras a evaluar. Se ejecuta el programa de adquisición de datos mediante el uso del software del adquisidor de datos marca KeySight.

Al ejecutar el programa, se enciende la fuente de corriente constante, en este instante se tiene que registrar el momento del encendido de la fuente para utilizar esta información durante la reducción de datos. De acuerdo a la litología de la muestra, se puede inferir el tiempo de adquisición de datos después de haber iniciado el calentamiento. Para el cuarzo, 5 min son suficientes para alcanzar un incremento de temperatura de más de 4°C, en la posición del termopar de medición.

La configuración final para la calibración y para medir cualquier material es la misma, con la única diferencia de que la muestra a evaluar sustituye la muestra de calibración del cuarzo. Además, se conectan posteriormente las terminales de los termopares de medición y de observación que han sido previamente colocados en la muestra de cuarzo.

Propiedades petrofísicas

Las mediciones se efectuaron mediante la técnica de estado estable, empleando nitrógeno como fluido de trabajo. Esta técnica consiste en aplicar un cierto diferencial de la presión del gas a través de la muestra y monitorear la magnitud del flujo volumétrico del gas resultante a través de la muestra, hasta que éste alcanza un valor que no varía con el tiempo. A partir de este experimento, la permeabilidad absoluta al gas se determina en función de la caída de presión a través de la muestra, de la magnitud del flujo de gas en régimen estabilizado, y del diámetro y de la longitud de la muestra.

Las mediciones de la permeabilidad absoluta al gas se realizaron a la temperatura ambiente del laboratorio, mediante la técnica de estado estable con gradiente de presión constante, usando nitrógeno como fluido de trabajo. Se utilizó un permeámetro de gas desarrollado en el INEEL, el cual está provisto con un sistema de contrapresión. Este sistema permite efectuar mediciones de permeabilidad al gas a valores elevados de presión absoluta media (hasta 20 kg/cm²). También permite mantener la caída de presión a través de la muestra a valores bajos, para evitar así la ocurrencia de flujo en régimen turbulento cuando se desea

realizar mediciones a valores elevados de presión absoluta media del gas. Puesto que el flujo en régimen turbulento no es descrito por la ley de Darcy, es necesario evitarlo a fin de que sus efectos no se mezclen con los del fenómeno de deslizamiento, el cual es el causante de la variación de la permeabilidad al gas con la presión absoluta media cuando el flujo ocurre en régimen laminar.

La presión de confinamiento para evaluar la permeabilidad absoluta fue de 35 kg/cm². Para cada uno de los eventos de medición de la permeabilidad absoluta al gas, se registraron datos experimentales primarios de las siguientes variables: presión atmosférica local, temperatura ambiente, presión del gas a la entrada de la muestra, presión del gas a la salida de la muestra, caída de presión a través de la muestra, y el gasto del gas a través de la muestra.

La porosidad efectiva se determinó dividiendo el volumen de los poros efectivos de cada muestra entre su correspondiente volumen total. El volumen total se determinó de manera geométrica, debido a la imposibilidad de garantizar la integridad de las muestras utilizando otros métodos. El volumen de los poros efectivos se determinó como la diferencia entre el volumen total y el volumen de grano aparente. El volumen de grano aparente es la suma del volumen de grano real (o sea el volumen del material sólido propiamente dicho) y el volumen de los poros aislados. El volumen de grano aparente se midió con un porosímetro de gas de diseño propio del INEEL, mediante la aplicación de una técnica de volumetría de gas que se basa en la expansión de una masa dada de gas helio en una cámara hermética previamente evacuada que contiene a la muestra. Las estimaciones de la incertidumbre asociadas al equipo experimental, mediante la medición de porosidad en muestras patrón certificadas, arrojaron valores de $\pm 0.1\%$.

La densidad de la roca seca se determinó como el cociente entre la masa y el volumen geométrico de la muestra. La masa del material pulverizado se determinó con una exactitud de ± 0.01 g por medio de una balanza electrónica marca Ohaus Modelo Explorer Pro. La incertidumbre en las mediciones de la densidad de la roca seca fue de ± 0.01 g/cm³.

7.3.3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados en forma individual por cada muestra. En las Figuras 40 y 41 se presentan las muestras, así como un compendio de sus

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

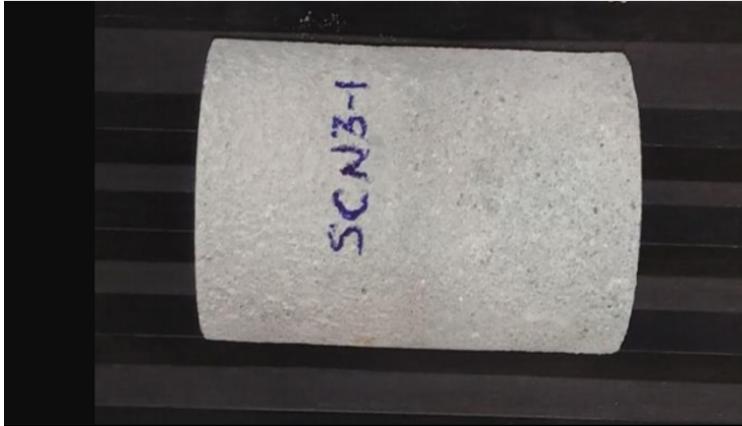


Figura 40. Compendio de las propiedades termofísicas y petrofísicas de la muestra SC-N3-1.

RESULTADOS DE LA MUESTRA SCN3-1	
Diámetro (cm) = 10.083	Longitud (cm) = 15.199
Porosidad (%) = 18.9	
Permeabilidad (mildarcy) = 0.293	
Difusividad térmica (m ² /s) = 4.8E-07	
Conductividad térmica (Watt/m°C) = 1.1	
Densidad de la muestra (g/cm ³) = 2.150	
Calor específico (Joule/Kg°C) = 1058	

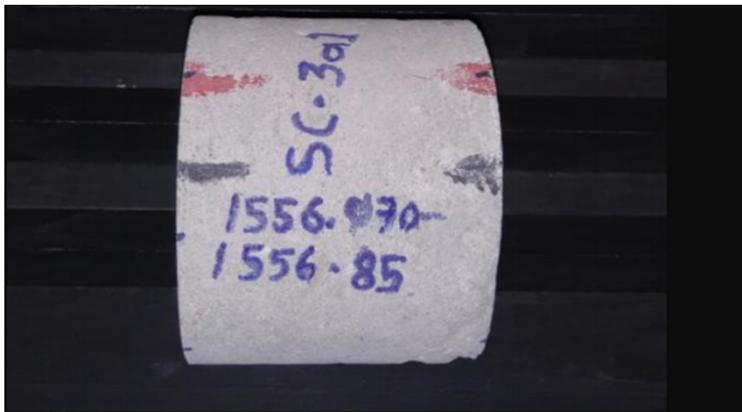


Figura 41. Compendio de las propiedades termofísicas y petrofísicas de la muestra SC-3a1.

RESULTADOS DE LA MUESTRA SC-3a1	
Diámetro (cm) = 9.815	Longitud (cm) = 8.078
Porosidad (%) = 20.6	
Permeabilidad (mildarcy) = 1.290	
Difusividad térmica (m ² /s) = 5.2E-07	
Conductividad térmica (Watt/m°C) = 1.4	
Densidad de la muestra (g/cm ³) = 2.074	
Calor específico (Joule/Kg°C) = 1269	

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

propiedades termofísicas, petrofísicas y sus características geométricas. Así mismo, para consulta rápida se muestran los resultados de todas las mediciones de las propiedades

termofísicas en las siguientes Tablas, aunque la densidad una propiedad reconocida como termofísica, se agrega porque tiene relación con las otras tres variables.

Tabla 18. Resultados de las mediciones de las propiedades termofísicas.

Muestra	Densidad [g/cm ³]	Difusividad [m ² /s]	Conductividad [w/m°C]	c _p [joule/kg°C]
SC-N3-1	2.15	4.8x10 ⁻⁷	1.1	1058
SC-3a1	2.074	5.2 x10 ⁻⁷	1.4	1269

Tabla 19. Resultados de las mediciones de las propiedades petrofísicas.

Muestra	Densidad [g/cm ³]	Porosidad %	Permeabilidad milidarcy
SC-N3-1	2.15	18.9	0.293
SC-31a	2.074	20.6	1.9

8. INTERPRETACIÓN DEL REGISTRO GEOFÍSICO DE POZO PROPORCIONADO POR PEMEX

La interpretación del registro se hace en las dos secciones en donde se lograron realizar los registros con la mayor confiabilidad y con el mayor número de herramientas (Tabla 1). Para ambos casos, se utilizan las curvas de Rayos Gama (GR), Potencial Natural (SP), Espectroscopia contenido de Uranio (HURA), Torio (HTHO) y Potasio (HFK) y la información del diámetro del pozo (HDAR).

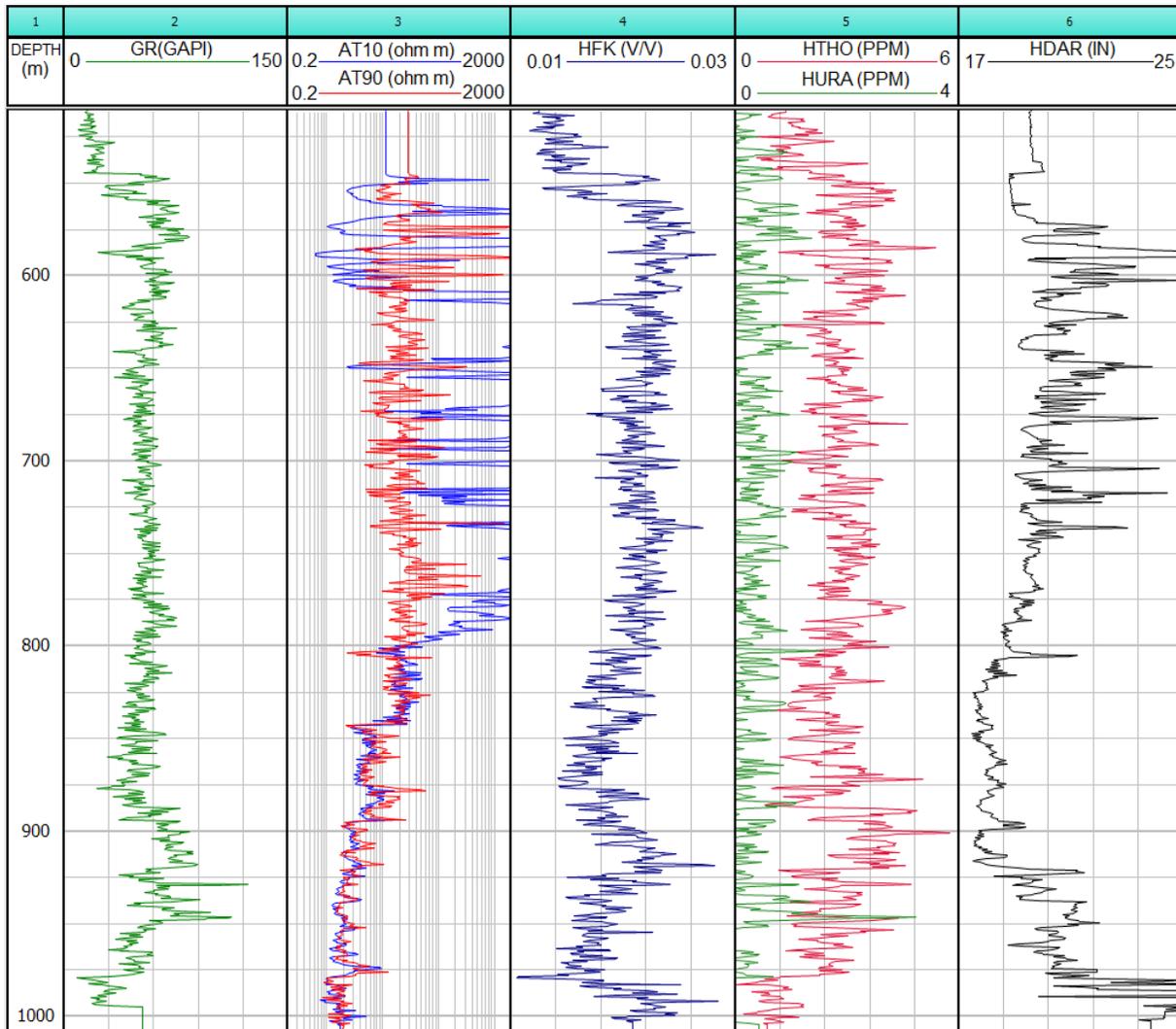


Figura 42. Registros disponibles para la sección 1. Resistivo corto (AT10), Resistivo largo (AT90), contenido de potasio (HFK), contenido de torio (HTHO), contenido de uranio (HURA) y diámetro del pozo (HDAR).

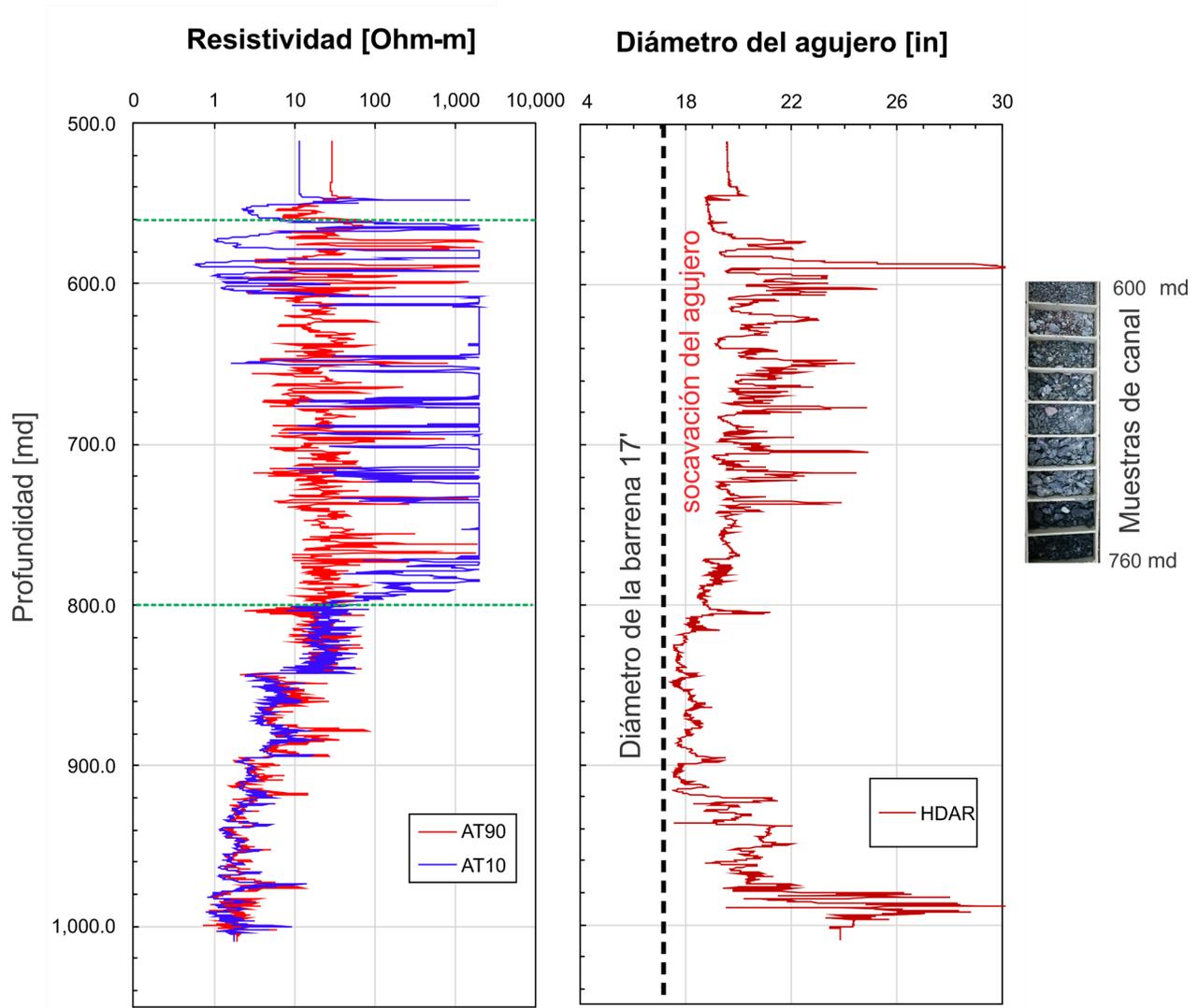


Figura 43. Resistivo corto (AT10), Resistivo largo (AT90), y Diámetro de pozo (HDAR) para la primera sección junto con las muestras de canal en el intervalo interpretado como andesitas.

8.1 SECCIÓN 1 (510.84 - 1009.49)

Para la primera sección, el registro que aporta más información fue el registro eléctrico, ya que este registro resaltó los cambios litológicos más fácilmente y su identificación fue más sencilla. La primera parte del registro (desde su inicio, a los 510 y hasta los 803 md), se caracteriza por la heterogeneidad en el registro de resistividad, que oscila entre los 2 Ohm-m hasta los 150 Ohm (Curva AT90) con una media de 35 Ohm-m. Las curvas en la zona lavada (AT10 y AT 30) presentan valores altos de resistividad (mayores a 20000 Ohm-m), que rebasaron la escala gráfica. Para los registros de rayos gama y espectroscopia se mantienen en un rango

determinado hasta los 890 md con excepción de la curva del contenido de potasio cuya respuesta disminuye al tiempo que la resistividad también baja (Figura 42).

Los saltos en las curvas inductivas y resistivas de baja profundidad de investigación se debieron principalmente a la sinuosidad, socavación del agujero y posiblemente a la falta de formación de enjarre en las paredes del pozo, que se confirmó al observar el registro caliper para esta profundidad (Figura 43). Este intervalo se interpretó como un intervalo de andesitas, gracias a las muestras de canal (Figuras 26, 27 y 28) y el reporte de avance de perforación. Estas andesitas muy probablemente se encuentren fracturadas y alteradas en la cima y más competentes y menos alteradas hacia la base (se interpreta

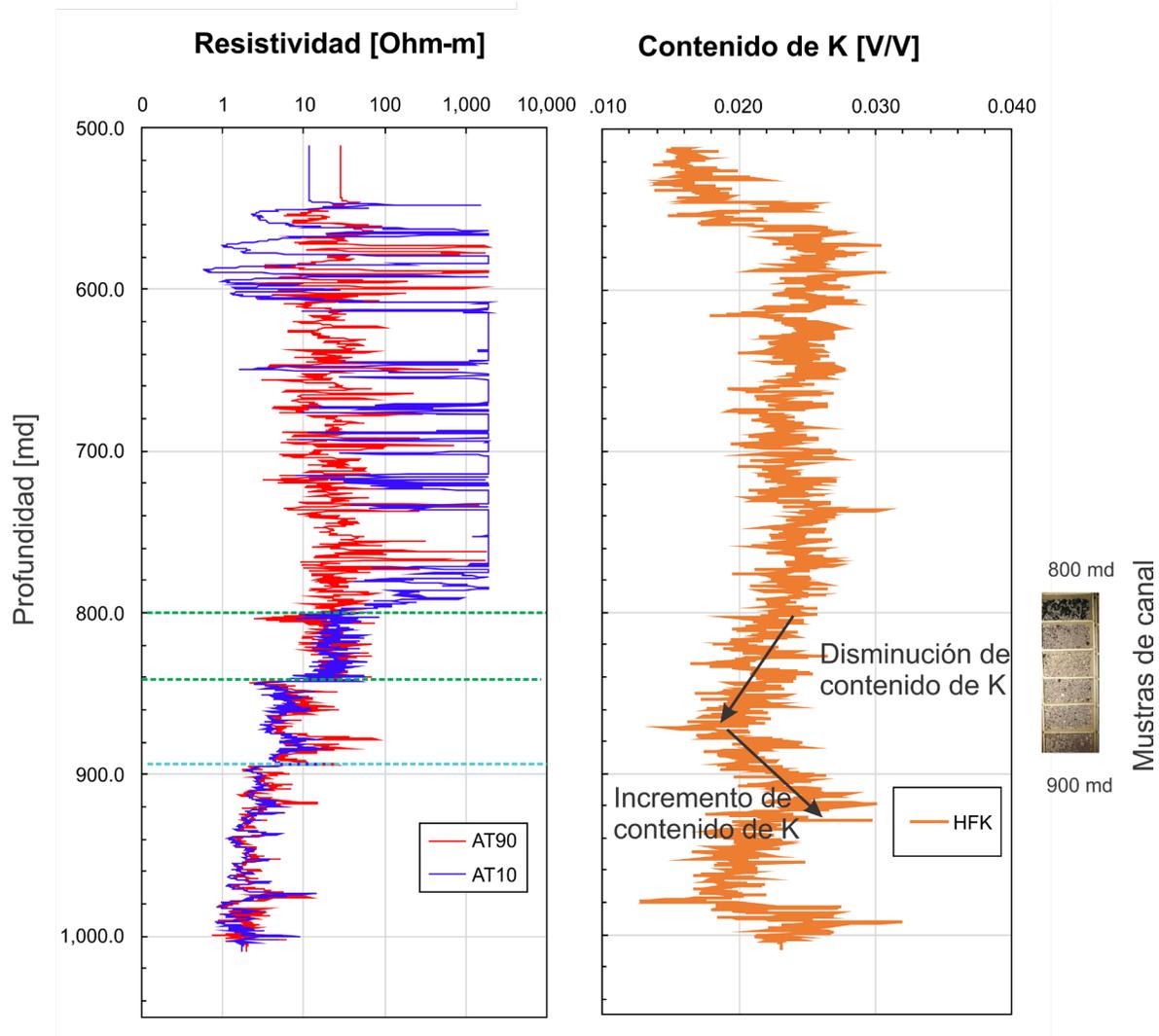


Figura 44. Resistivo corto (AT10), resistivo largo (AT90), y contenido de potasio (HFK) para la primera sección junto con las muestras de canal en el intervalo interpretado como ignimbrita y flujos piroclásticos.

a partir de la herramienta caliper, las láminas delgadas y el estado de las muestras de canal). No hubo pérdidas de circulación considerables en este intervalo.

A los 803 md se observa un cambio en el comportamiento del registro de resistividad, donde la respuesta de la herramienta es más homogénea, con valores de entre los 30 y 20 Ohm-m y las curvas con distintas profundidades de investigación (AT10, AT30, AT60 y AT90) con una respuesta semejante, lo que es indicativo de menor *enjarre* y probablemente menor permeabilidad en la formación. Para la curva que representa el contenido de potasio, ésta parece disminuir en dicho intervalo mientras que el resto de las curvas de espectroscopia se mantienen en el mismo margen de valores (RG, THO y URA). Gracias a las muestras de canal este intervalo pudo clasificarse como

ignimbrita color rosado con un espesor aproximado de 40 md en contacto con un flujo piroclástico que continua hasta los 890 md, donde se observa un pequeño cambio en los valores de resistividad, bajando hasta los 5 y 10 Ohm-m. Probablemente el cambio en dichos valores y lo observado en el registro de espectroscopia se debe a un grado mayor de alteración en el mismo tipo de depósito (Figura 44).

A partir de los 890 md se observa otra disminución en los valores de resistividad, oscilando entre los 1 y 3 Ohm-m. Puede observarse un aumento en los valores API del registro de Rayos Gama y una menor concentración de los elementos del registro de espectroscopia. Este intervalo se interpretó como un flujo tipo lahar, principalmente cenizas. Esta clasificación fue hecha gracias al primer núcleo (N1-SCT3a) donde se pudo observar que la

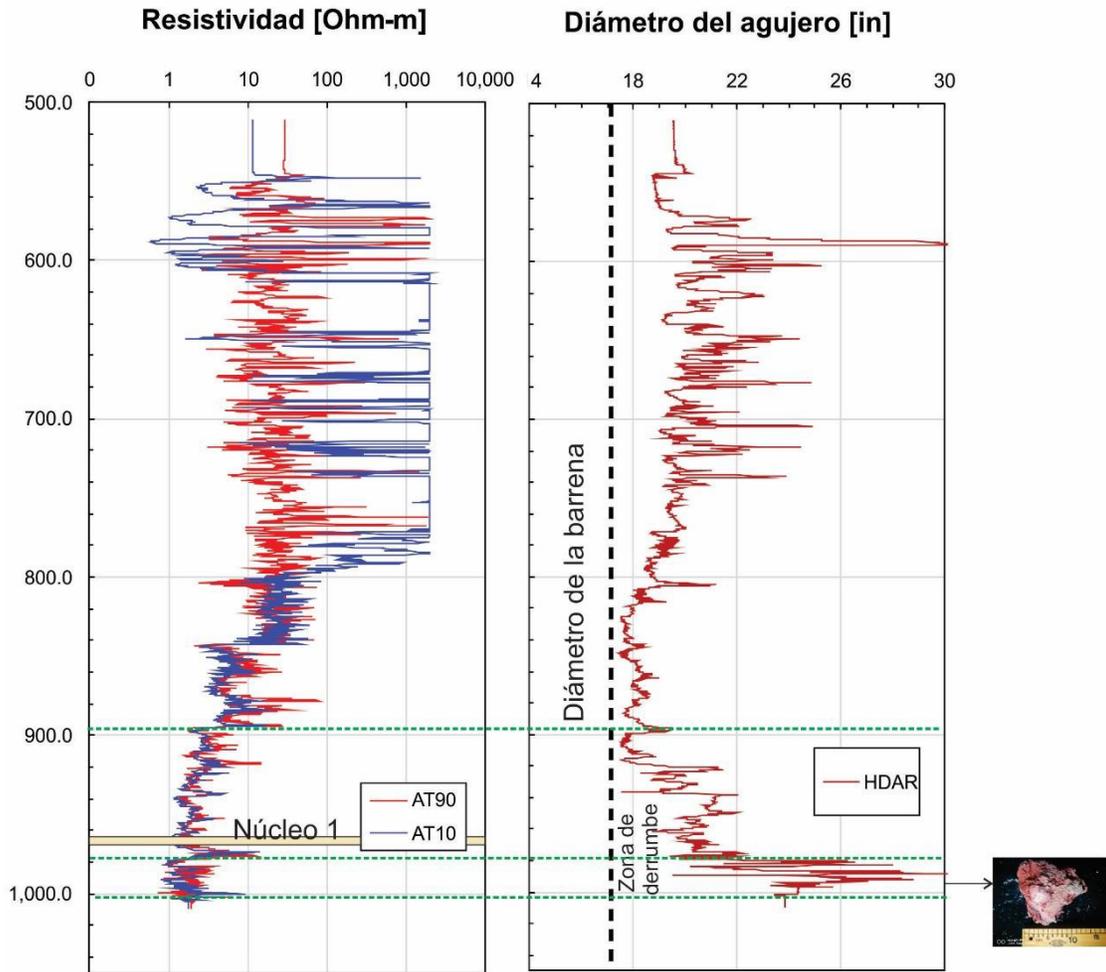


Figura 45. Resistivo corto (AT10), resistivo largo (AT90) y Diámetro de pozo (HDAR) para la primera sección junto con la localización del primer núcleo y la localización de muestras de un depósito aluvial.

ceniza se encuentra más alterada a profundidad, supuesto que se puede comprobar con la socavación observada en el registro de BGL (Figura 45).

Finalmente, a los 990 md se observa un pequeño cambio que no es muy evidente en el registro resistivo, pero que coincide con una elevada socavación en el agujero que también es coincidente con una pérdida total de circulación observada durante la perforación. Esta secuencia continuaría hasta los 1100 m y se caracterizó como un lahar color rojizo, alterado con matriz arcillosa y fragmentos de roca redondeados de tamaño desde los 2 hasta los 35 mm. Este intervalo pudo clasificarse gracias a las muestras de canal y a muestras obtenidas *in situ*, junto con los análisis de laboratorio previamente descritos (Figura 44).

Para agrupar cuantitativamente el tipo de litologías descritas anteriormente se utilizó software especializado.

A través del uso de estadística multivariada, el programa agrupó las unidades con características similares de acuerdo a las propiedades físicas adquiridas por cada herramienta de los registros. Con esto se obtuvo un conjunto de rocas con propiedades y características mineralógicas similares llamadas facies (aunque el término es propio para rocas sedimentarias) que se interpretan con las descripciones hechas con las muestras de canal y los núcleos.

Para esta sección se utilizaron las curvas del registro de espectroscopia junto con el registro resistivo y la curva de BGL que indica el diámetro del agujero (Figura 46).

Como resultado se observó que el grupo de andesitas va desde el inicio del registro hasta los 789 md. A partir de los 789 md se encuentra la formación que se identificó como una ignimbrita rosa, sobreyacida por el depósito de flujo piroclástico. Posteriormente, se ve el intervalo de la región más arcillosa (observada en el núcleo N1-SCT3a)

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

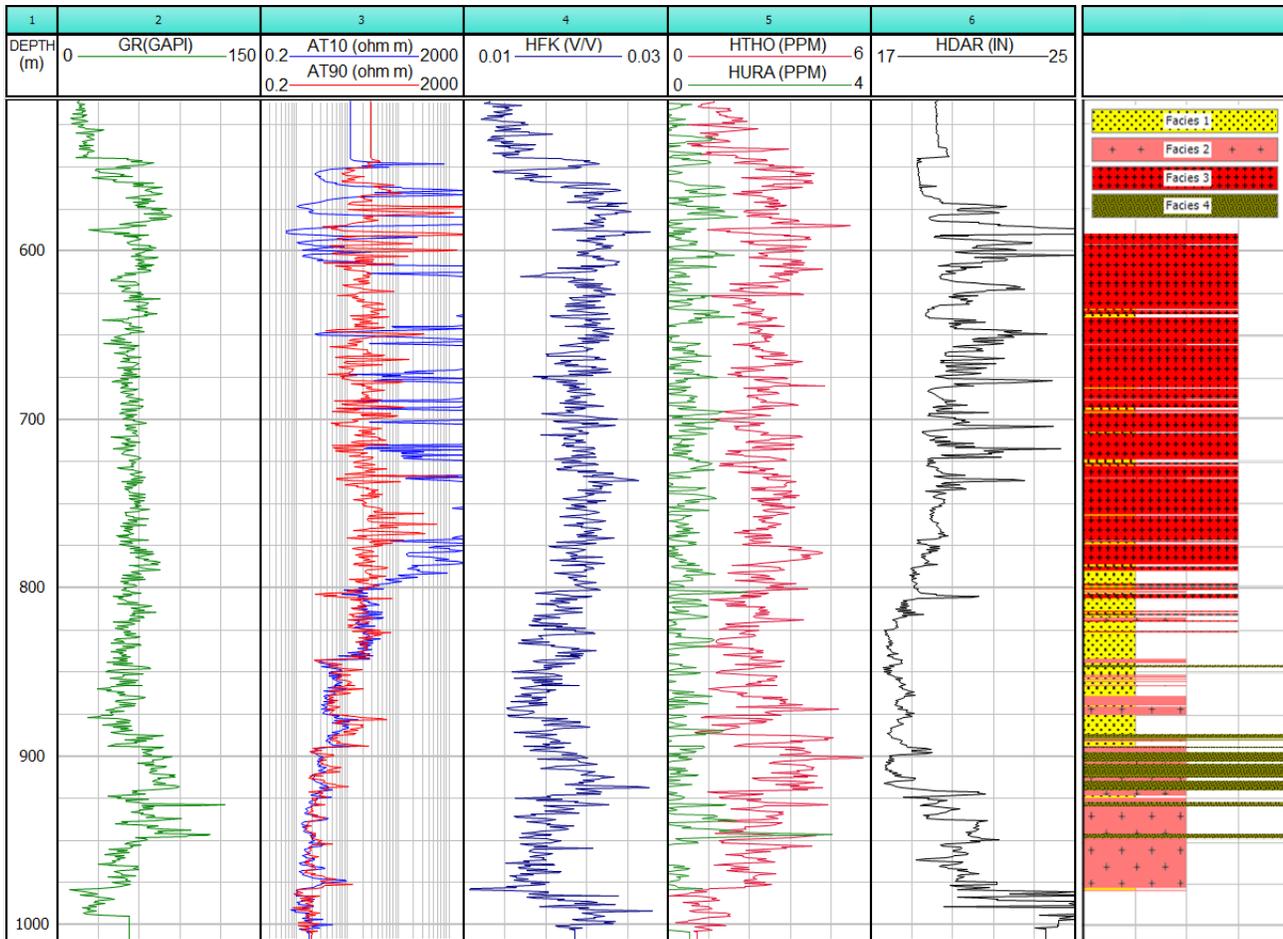


Figura 46. Resultado de utilizar estadística multivariada para agrupar en facies la primera sección del registro. Resistivo corto (AT10), Resistivo largo (AT90), contenido de potasio (HFK), contenido de torio (HTHO), contenido de uranio (HURA) y Diámetro del pozo (HDAR).

que va desde los 887 hasta 919 md. La parte profunda del registro, es el inicio del depósito de lahar de color rojizo descrito anteriormente, iniciando desde los 919 md y terminando en el registro de la siguiente sección a una profundidad de 1141 md. El detalle de la columna obtenida se observa en la Figura 47.

8.2. SECCIÓN 2 (1074 - 1700 MD)

Para la segunda sección (Figura 46), la mayoría de los registros respondieron bien a los cambios en la litología o de condiciones de alteración, lo que ayudó a identificar de mejor manera diferentes horizontes. Lamentablemente por trabajar a fondo perdido (pérdida total de circulación) no hubo recuperación de muestras de canal en esta sección y solo se contó con el núcleo N2-SCT3a.

La sección comienza con el final de la secuencia lacustre de color rojizo identificada anteriormente, esto se interpreta por lo socavación del agujero entre los 1074 y

1141 md (columna 6, Figura 48). Posteriormente entre los 1141 y 1350 md en el registro se observa una secuencia más homogénea, aparentemente más competente por la poca socavación del agujero. Los valores de resistividad para la curva de mayor profundidad de investigación (AT90) son relativamente constantes, entre los 10 y 50 Ohm-m (columna 3, Figura 48). Debido a la falta de muestras recuperadas, no fue posible clasificarla de manera certera. Sin embargo, por el tipo de depósito que se ha observado en el pozo Tulyehualco a esta profundidad, se clasificó como un flujo piroclástico poco alterado y permeable. Esta última característica se interpreta debido a la separación entre cada una de las curvas resistivas, la caída en la temperatura observada durante la perforación y el nivel de lodos que se presentó a los 32 m de profundidad, lo que indica que la presión ejercida por la formación fue suficiente para elevar el nivel de lodos hasta esa altura, respecto a los 1074 md que es donde se esperaba el nivel (profundidad donde se encontraba la TR durante esa etapa).

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Los valores en el registro de espectroscopia también son constantes para este intervalo, con excepción del inicio y final de la secuencia donde se observan valores bajos (20 API) marcados en el registro de GR y HFK que concuerda con una posible alteración en la mineralogía en la zona de contacto debido al paso de fluido entre las secuencias encajonantes y esta secuencia (Figura 49).

Posteriormente entre los 1350 y 1700 md se observa una intercalación de materiales de baja resistividad (3 - 10 Ohm-m) con materiales de alta resistividad (100 - 250 Ohm-m). Estas intercalaciones se observan en el resto de los registros, principalmente en RG, HFK y HDAR. En este último registro, se observa que los intervalos con menor resistividad coinciden con zonas de mayor socavación lo

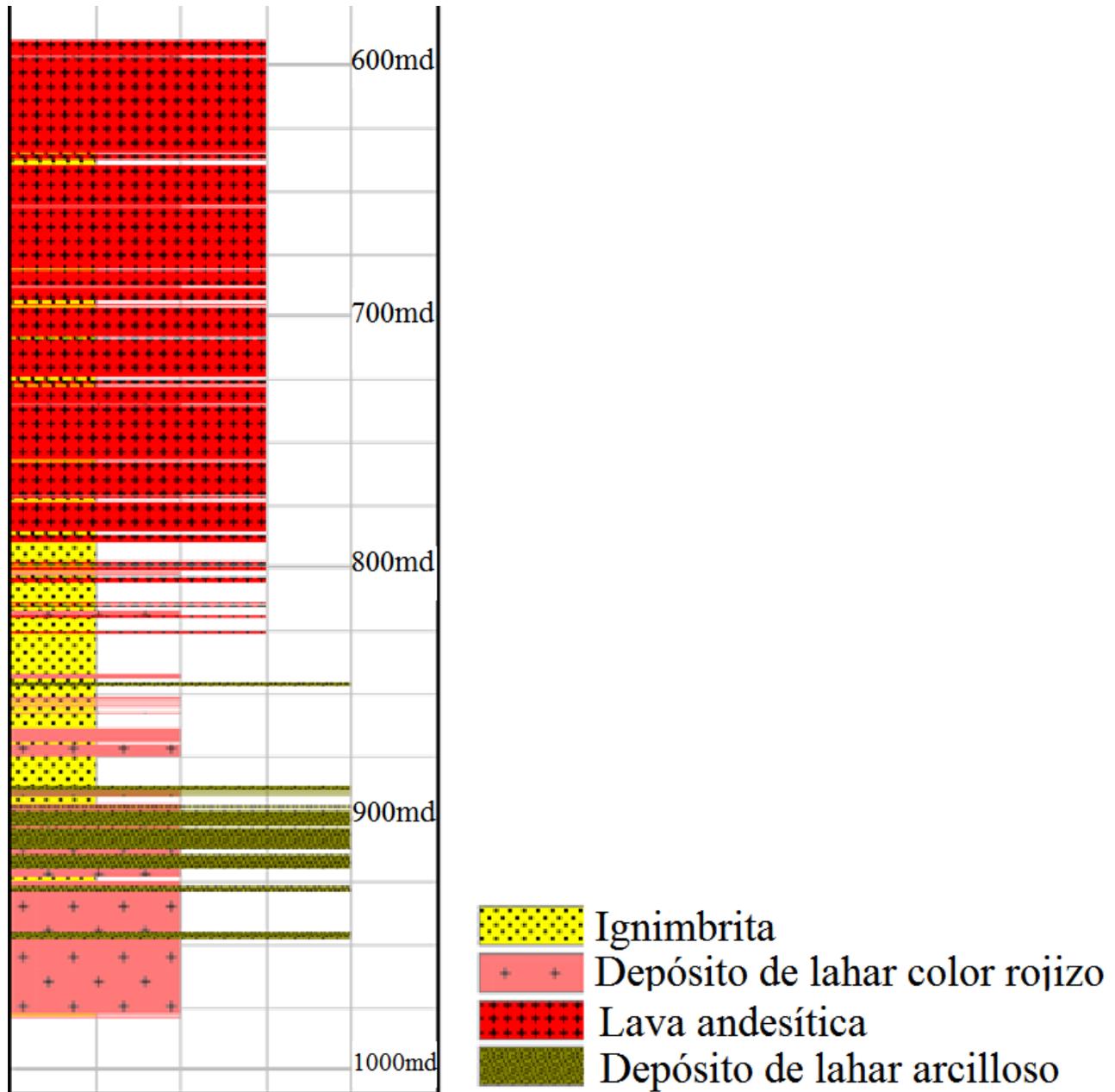


Figura 47. Columna generada a partir de los registros geofísicos para la primera sección.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

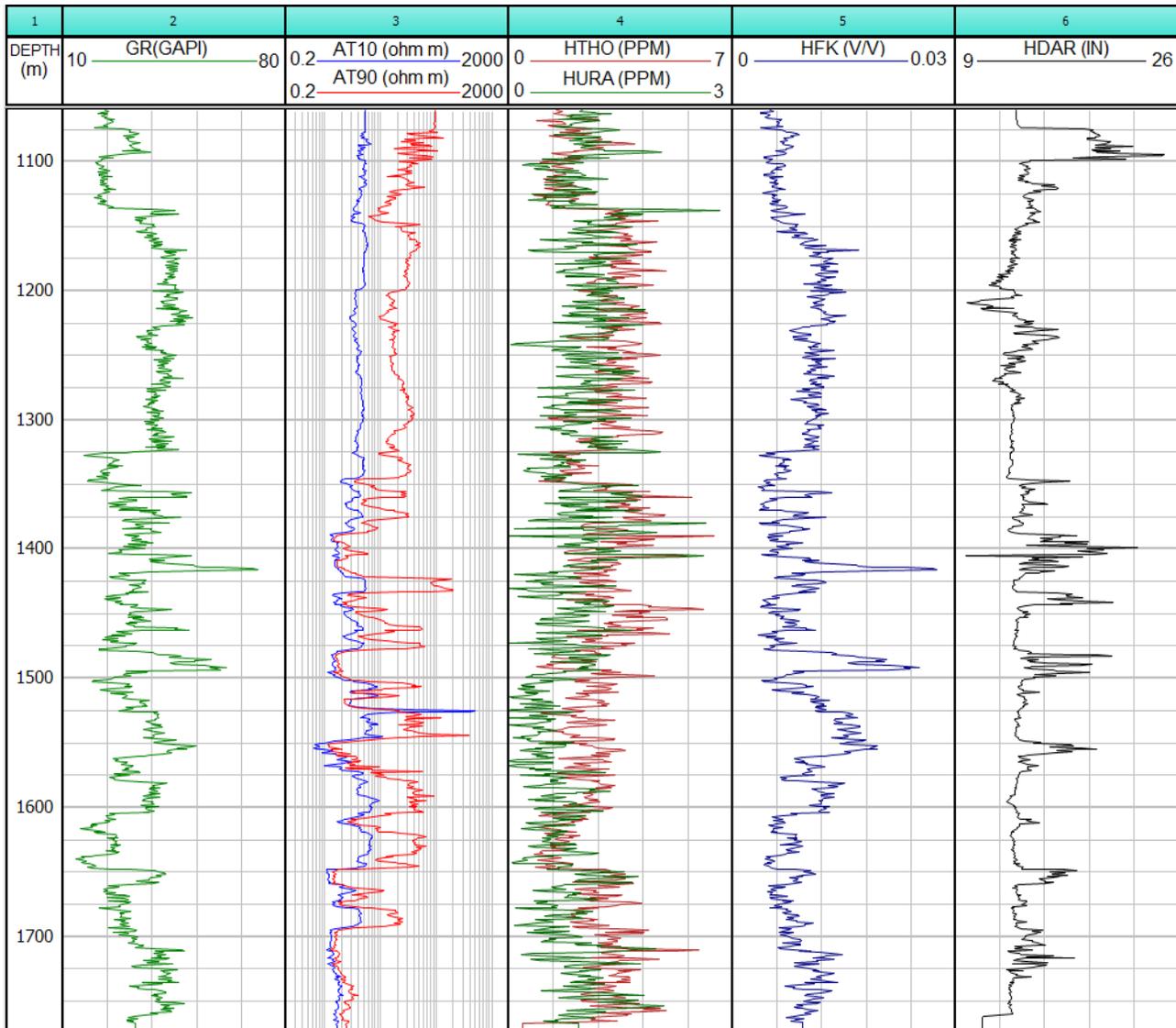


Figura 48. Registros disponibles para la sección 2. Resistivo corto (AT10), Resistivo largo (AT90), contenido de potasio (HFK), contenido de torio (HTHO), contenido de uranio (HURA) y diámetro del pozo (HDAR).

que se interpreta como regiones con mayor alteración o con características arcillosas. Esto pudo comprobarse a través del núcleo N3-SCT3a donde se logró obtener muestra de ambos materiales. La parte más competente y más resistiva concuerda con un depósito de lahar de color rojizo y endurecido (Figura 50), mientras que los intervalos donde se observa mayor socavación y formación de enjarre corresponde a las secuencias más alteradas. Al clasificarse se observó que ambas muestras se tratan de depósitos de lahar, pero con diferentes condiciones de depósito o diferentes fuentes. Es importante mencionar

que en las zonas de contacto entre ambos materiales se observa alteración, lo que genera un contacto gradual y perturbado producto de la interacción mineralógica entre ambos depósitos (puede apreciarse en el md 1554 del N3-SCT3a), probablemente por flujo de agua.

Los últimos metros de los que se tiene registro corresponden a una secuencia más homogénea, con valores bajos de resistividad (5-10 Ohm-m), aparentemente competente. Esto se interpreta a partir del seguimiento in situ donde se observó buenos tiempos de perforación y operación sin problemas. No fue posible adquirir el

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

registro entre los 1700 y 2032 md. Sin embargo, es posible que esta secuencia continúe hasta el fondo del pozo donde se recuperó el núcleo N3-SCT3a.

Al igual que la sección anterior, para determinar y agrupar de manera cuantitativa el tipo de litología observada, se recurrió a utilizar software que utiliza estadística multivariada para agrupar el número de facies. Se utilizaron las curvas disponibles del registro de espectroscopia y de resistividad, junto con la curva de BGL (Figura 51). La primera parte muestra el final de la última facie de la sección anterior, donde se observa que esta

termina a los 1141 md. La siguiente facie se caracteriza por ser más homogénea en sus propiedades y características petrofísicas. Este intervalo se interpreta como el mayor intervalo productor y se extiende desde 1141 hasta 1323 md, dando un espesor total de 182 md. Esta facie termina con un intervalo con características similares al lahar que lo sobreyace, como ya se había interpretado.

A continuación, a los 1347 md inicia una secuencia heterogénea de diversas facies con características contrastantes, que inicialmente se habían interpretado únicamente como dos formaciones intercaladas. Las

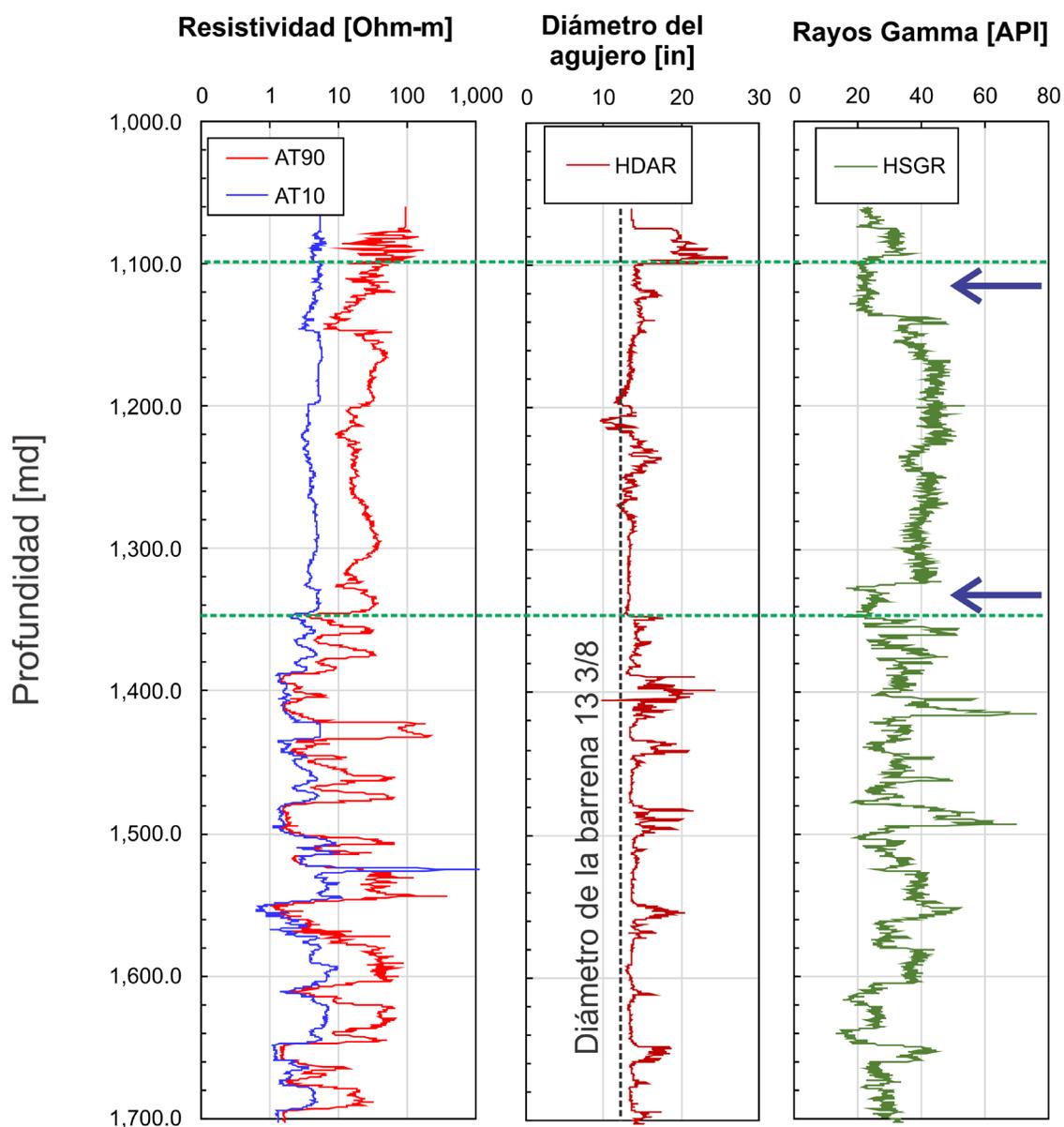


Figura 49. Registro Eléctrico (AT10 y AT90), Diámetro de pozo (HDAR) y Rayos Gama (HSGR) para la segunda sección de un intervalo probablemente productor de agua. Las flechas indican zona de alteración producto probablemente de flujo de agua entre las formaciones.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

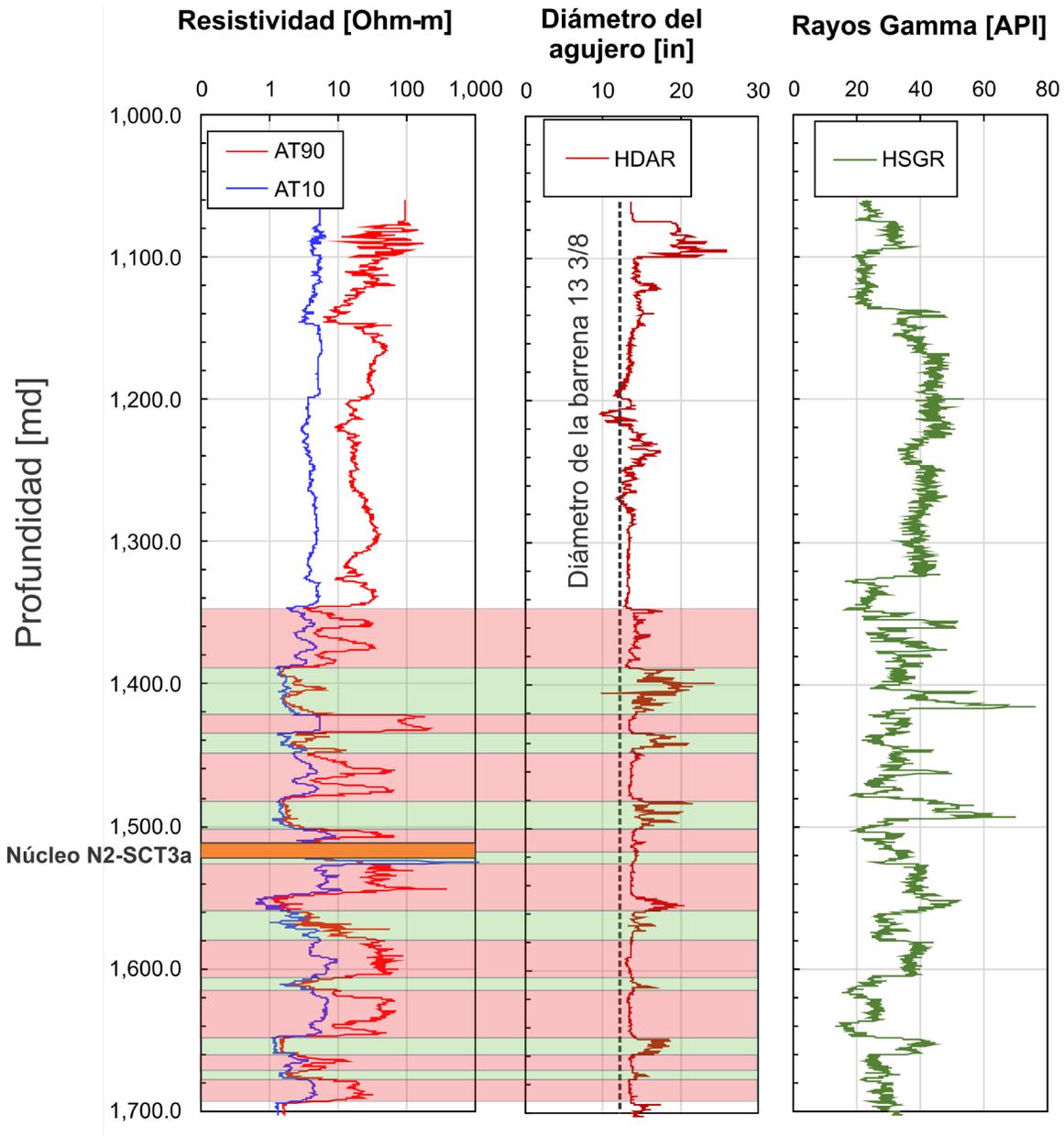


Figura 50. Registro Eléctrico (AT10 y AT90), Diámetro de pozo (HDAR) y Rayos Gama (HSGR) para la segunda sección donde se observa la intercalación de distintos depósitos de lahar y la ubicación del N2-SCT3a.

diferentes facies pueden deberse a los diversos grados de alteración y diferentes orígenes de los depósitos característico de los lahares. Puede observarse también que existen intervalos con rasgos similares a la facie productora superior, por lo que no se descarta que estos intervalos también aporten a la producción del pozo.

Finalmente, desde los 1647 md se observa la formación que probablemente continúe hasta el final del pozo, una formación más competente y con características similares a lo visto en el núcleo N3-SCT3a. El detalle de la columna obtenida se observa en la Figura 47.

9. RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO *IN SITU* DE LOS TRABAJOS DE LIMPIEZA, DESARROLLO Y AFORO DEL POZO SANTA CATARINA 3A

Las etapas de desarrollo y aforo del pozo Santa Catarina 3a se realizaron entre julio y septiembre. Durante esas fechas el personal del Instituto de Geología dio seguimiento a las operaciones realizadas en el pozo, se instalaron sensores para la lectura sistemática de presión, conductividad eléctrica y temperatura dentro del pozo y a la descarga. Junto con los datos de los sensores se realizó

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

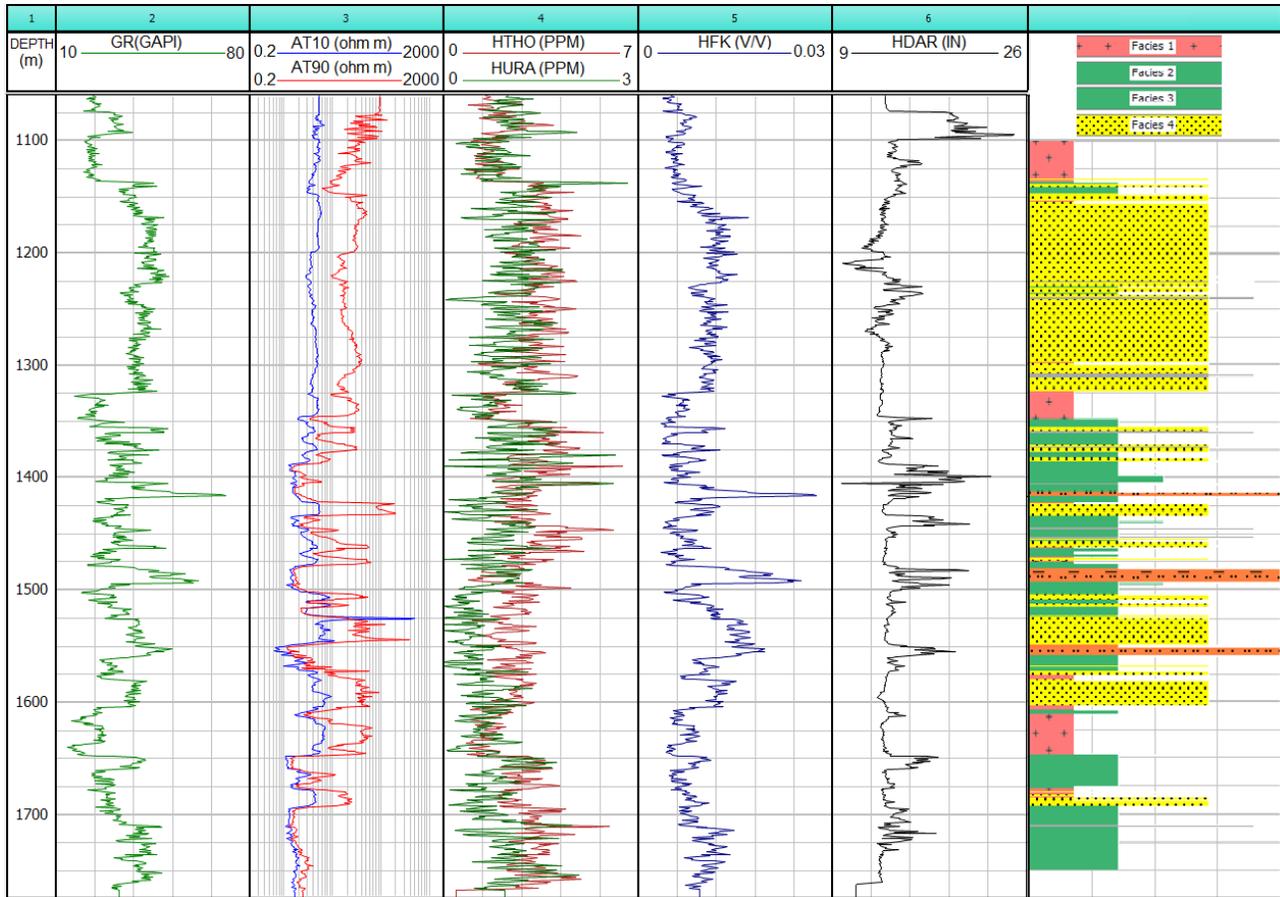


Figura 51. Resultado de utilizar estadística multivariada para agrupar en facies la primera sección del registro.

un seguimiento manual durante las principales etapas de bombeo, con la finalidad de dar confiabilidad a las lecturas de cada uno de los sensores.

Por otra parte, durante cada una de las etapas de desarrollo y aforo se tomaron muestras de agua para monitorear la limpieza del pozo y la calidad del agua.

A continuación, se presentan las etapas de seguimiento en cada uno de los meses en que se realizaron las pruebas junto con los datos adquiridos durante el seguimiento. Además, se presentan los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras de agua en cada etapa.

9.1. SEGUIMIENTO Y RESULTADOS DEL PRIMER PERIODO DE BOMBEO (JULIO)

Después de terminado el proceso de perforación del pozo, el 13 de julio se completó la instalación del equipo y la bomba que realizaría el desarrollo y aforo del pozo.

Las operaciones en el pozo quedaron a cargo de la compañía Hidrogama, con supervisión del SACMEX, el apoyo operativo y de seguridad por parte de PEMEX y apoyo técnico del Instituto de Geología.

Como parte de las actividades de monitoreo del Instituto de Geología, se instaló un sensor CTD-DIVER modelo 11.11.59.03 (vanHessen Instruments) con capacidad para resistir tirantes de agua de 100 m. Este dispositivo cuenta con memoria interna para registrar y almacenar los datos medidos, el cual se instaló a un costado de la tubería de bombeo (Figura 53a). Una vez terminadas las maniobras de introducción de la columna de bombeo, el sensor quedó a 76 m de profundidad, al cual se le colocó una protección de PVC (Figura 53b) poder ubicar su posición con mayor facilidad. Este sensor registró la presión debida a columna de agua que, después de corregir por variaciones de presión atmosférica y por la posición del sensor, permite obtener los cambios en el nivel dinámico dentro

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a



Figura 52. Columna generada a partir de los registros geofísicos para la segunda sección.

del pozo. La frecuencia de medición fue programada cada 5 minutos. Adicionalmente, el sensor registró conductividad eléctrica y temperatura del agua. Asimismo, se colocaría un sensor a la descarga (Levellogger LTC M30, Solinst). Este dispositivo cuenta con capacidad para resistir tirantes de agua de 30 m y registrar también conductividad eléctrica y temperatura. Otro sensor fue colocado a los alrededores de la plataforma para medir la presión barométrica (Barologger M1.5, Solinst).

El primer periodo de bombeo inicio el 13 de julio por la noche (20:00) y se prolongó hasta el 26 del mismo mes con diversas interrupciones, debido a mantenimiento de la bomba, cambio de revoluciones y revisiones mecánicas. Durante este primer bombeo se obtuvieron las primeras muestras de agua que servirían como referencia para

monitorear los cambios y la limpieza del pozo. La primera muestra se observó turbia y con sedimentos (Figura 54), mientras que el agua en la zona de descarga presentó una temperatura aproximada de 50°C y sedimentos. El nivel estático (n.e.) medido se registró a una profundidad de 78.17 m y el dinámico presentó variaciones de acuerdo con el número de revoluciones aplicadas a la bomba.

Durante los siguientes días, el Instituto de Geología realizó un muestreo de agua sistemático, tomando una muestra de agua cada día hasta el 21 de julio, donde se detuvo la operación por mantenimiento del equipo de bombeo. Los detalles de las muestras obtenidas durante este mes se observan en la Tabla 20.

Las operaciones de bombeo se retomaron los días 24, 25 y 26 de julio donde se realizó un nuevo muestreo de

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a



Figura 53. Instalación del DataLogger a un costado de la tubería de bombeo. a) Proceso de instalación con el apoyo técnico de PEMEX.



Figura 53. Instalación del DataLogger a un costado de la tubería de bombeo. b) Sensor instalado dentro de un tubo de protección a un costado de la tubería.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a



Figura 54. Primera muestra de agua tomada durante las primeras horas de bombeo del pozo STC3a el 14 de julio.

Tabla 20. Detalles de las muestras obtenidas durante el primer periodo de bombeo de julio.

Muestra	Fecha	Hora	Tiempo de bombeo acumulado* [horas]
SCT 3a-1	14/07/2017	11:51	16
SCT 3a-2	17/07/2017	14:08	64
SCT 3a-3	18/07/2017	14:52	88
SCT 3a-4	19/07/2017	13:10	112
SCT 3a-5	20/07/2017	9:10	132
SCT 3a-6	21/07/2017	9:42	156
SCT 3a-7	25/07/2017	12:14	253
Tláhuac	25/07/2017	12:23	NA

* El tiempo de bombeo es aproximado por las interrupciones durante el mismo.



Figura 55. Comparativo con una muestra del pozo Santa Catarina 3a con la muestra de agua de un pozo aledaño.

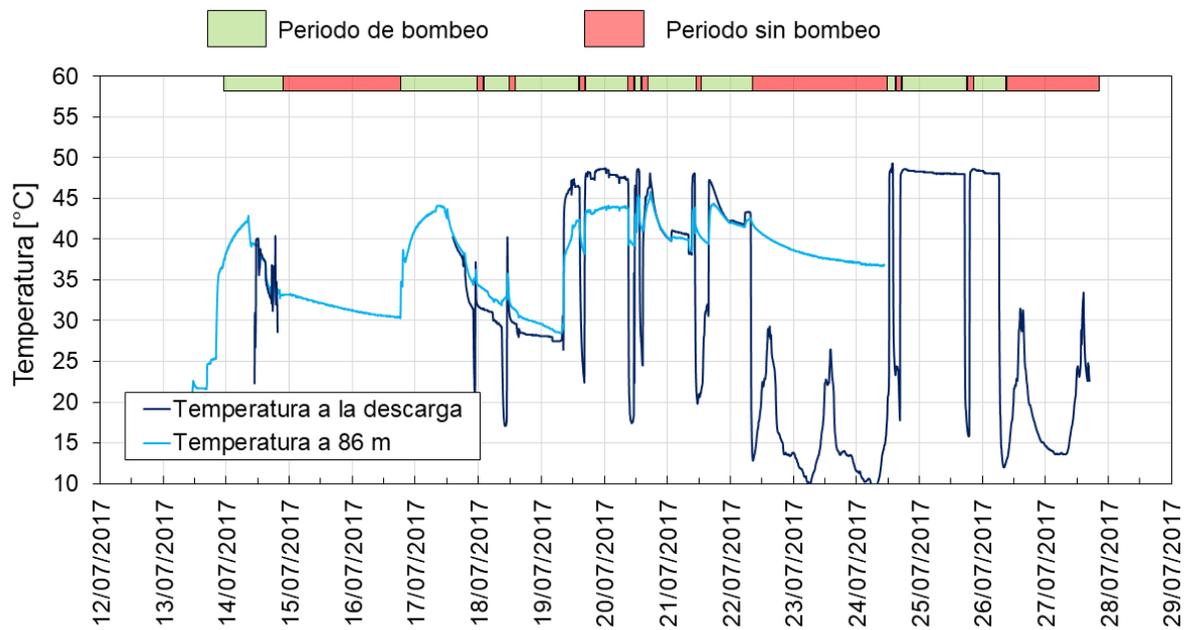


Figura 56. Datos de temperatura medidos por los sensores en la descarga y dentro del pozo.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

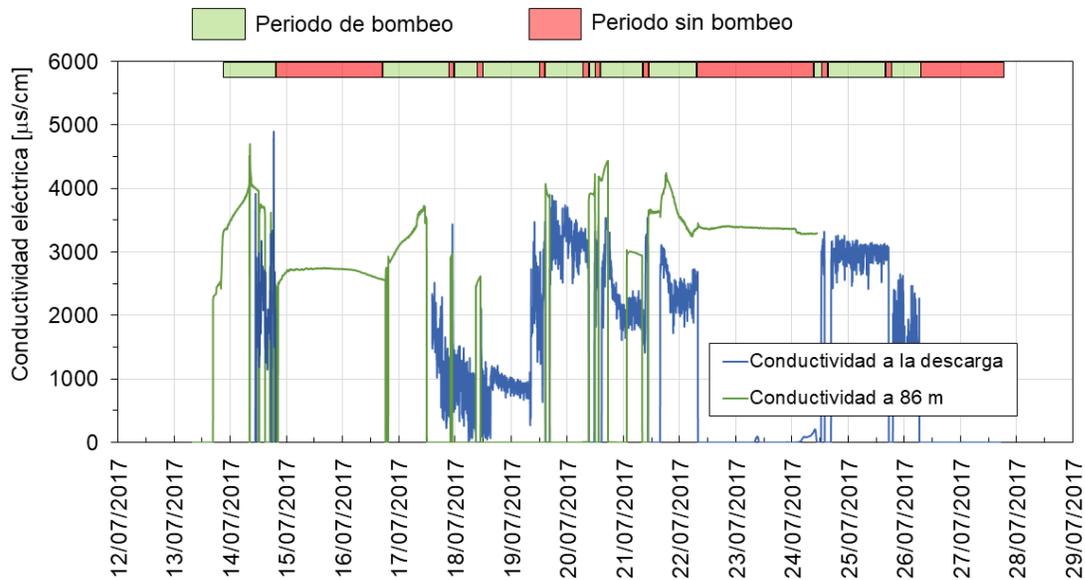


Figura 57. Datos de conductividad eléctrica medidos por los sensores en la descarga y dentro del pozo.



Figura 58. Datos sobre el nivel dinámico en el sensor dentro del pozo.

agua. Se observó mejoría en la calidad de agua de manera cualitativa y se realizó un comparativo con una muestra de un pozo aledaño (Figura 55) donde se observó que la claridad del agua del pozo del pozo SCT3a era mejor.

Este periodo terminó el 27 de julio con el retiro la tubería de bombeo para instalar la bomba a mayor profundidad y dar mantenimiento al motor.

En la Figura 56 y 57 se presentan los datos de temperatura y de conductividad eléctrica registrados

por los sensores dentro del pozo como en la descarga. Los sensores registraron datos cada cinco minutos. Puede apreciarse el cambio en cada una de las propiedades debido a los periodos sin bombeo.

En la Figura 58 se muestran los datos del nivel dinámico obtenidos por el sensor dentro del pozo. Los datos fueron tomados con un intervalo constante de cinco minutos. En general puede apreciarse que, durante los periodos sin bombeo, el nivel se recuperó hasta una profundidad

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

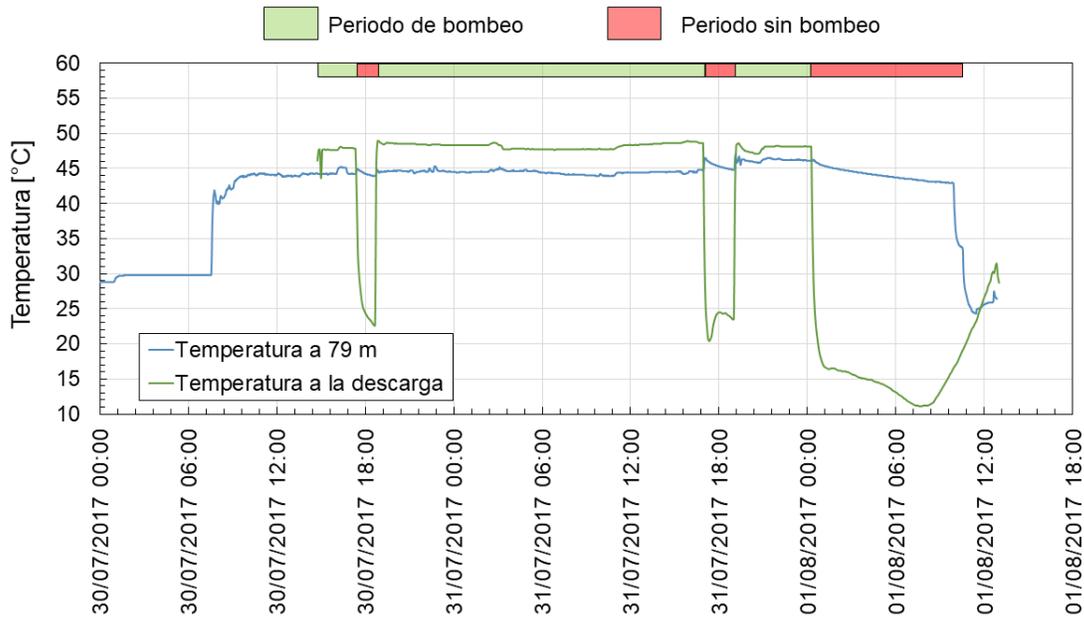


Figura 59. Datos de temperatura medidos por los sensores en la descarga y dentro del pozo para el segundo periodo de bombeo.

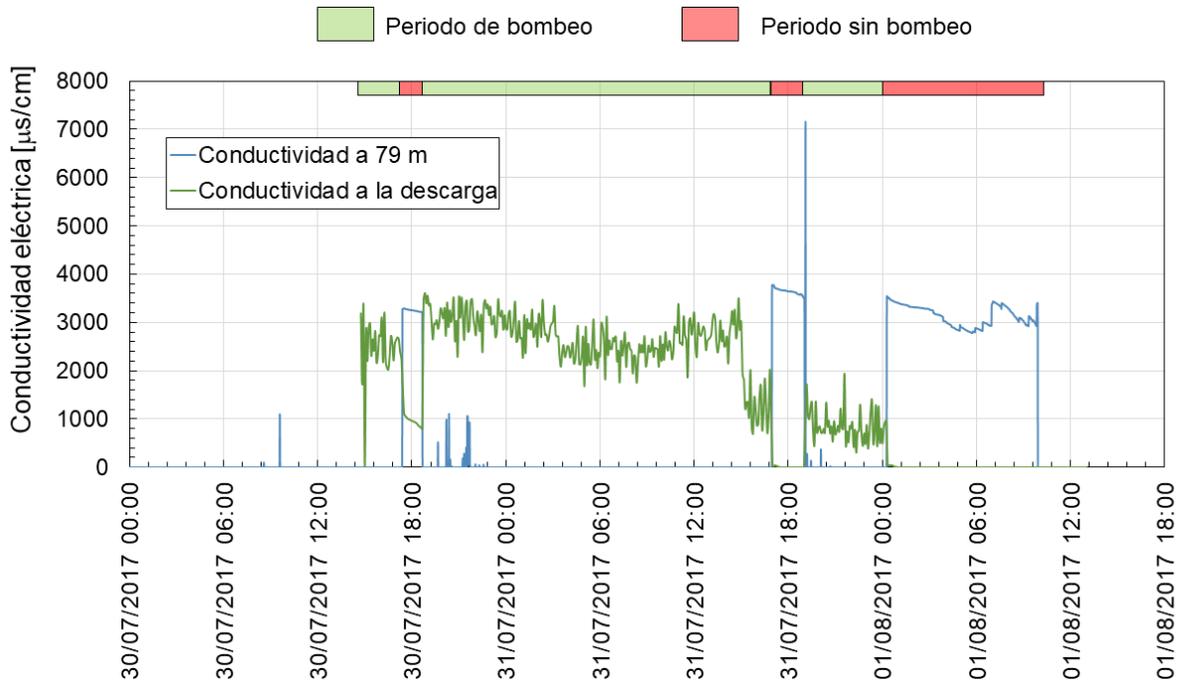


Figura 60. Datos de conductividad eléctrica medidos por los sensores en la descarga y dentro del pozo durante el segundo periodo de bombeo.

entre 67.5 y 68 m, mientras que el máximo abatimiento del pozo fue mayor a la profundidad a la que se colocó el sensor (76 m) por lo que el sensor quedó seco en esos casos. Cabe aclarar que cuando el sensor queda seco no mide la conductividad eléctrica y la temperatura que registra es la temperatura del aire.

9.2. SEGUIMIENTO Y RESULTADOS DEL SEGUNDO PERIODO DE BOMBEO (JULIO - AGOSTO)

Después de un periodo de mantenimiento, se instaló otro equipo de bombeo, por lo que se fijó una vez más el sensor a la columna de bombeo. Aun cuando en esta ocasión

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

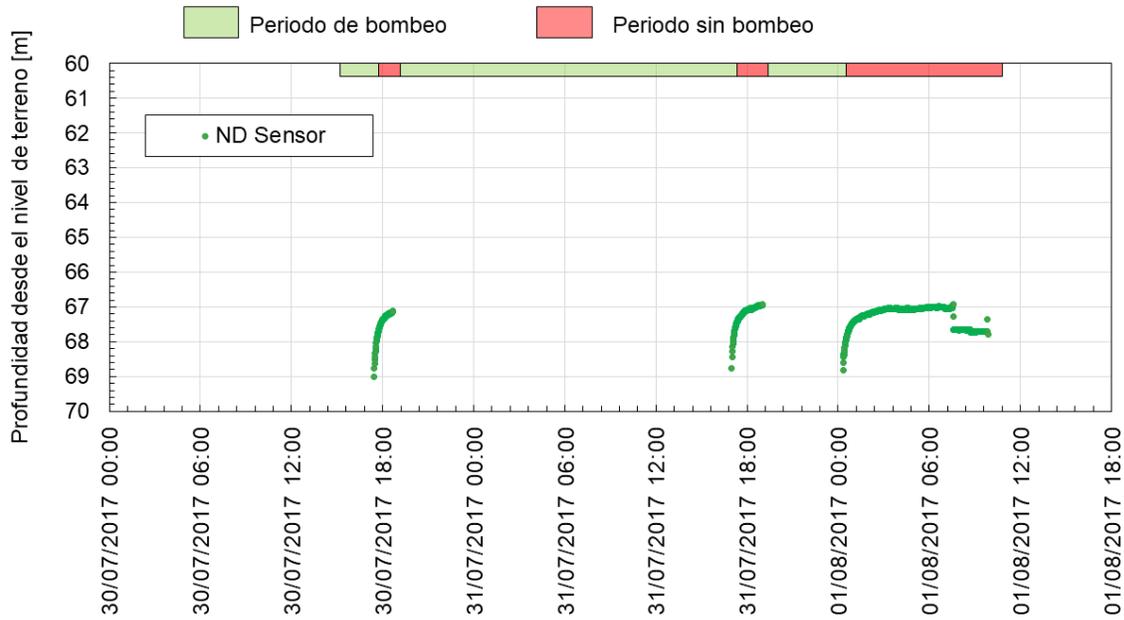


Figura 61. Datos sobre el Nivel dinámico en el sensor dentro del pozo.

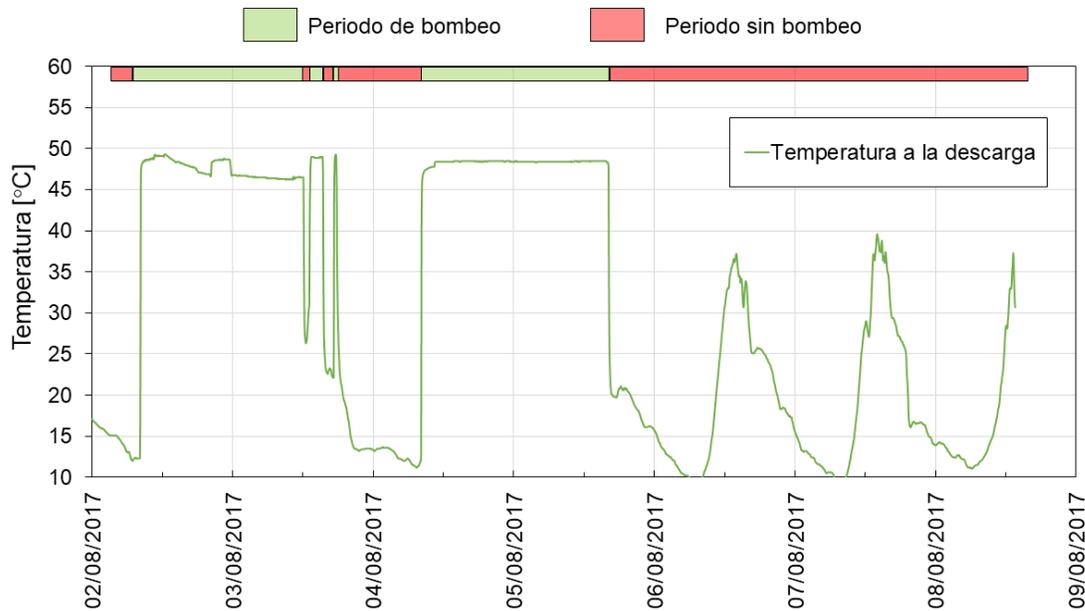


Figura 62. Datos de temperatura medidos por el sensor en la descarga para el tercer periodo de bombeo.

se deseaba instalar el sensor a una mayor profundidad, debido a problemas de logística y de tubería, la compañía no instaló todos los segmentos de columna que se tenían programados, y el sensor quedó a menor profundidad que en el aforo anterior (79 m). Durante los días 30 y 31 de julio y 1° de agosto se llevó a cabo el segundo periodo de bombeo donde se realizaron pruebas con diferentes revoluciones en el motor de la bomba.

Se presentaron pequeñas variaciones en la temperatura en la descarga (entre 46.5 a 49.5 °C) y una disminución en

los valores de salinidad de agua medidos en la descarga (Figuras 8 y 9). Puesto que el sensor únicamente tuvo 14 m de *sumergencia*, el sensor no registró más que algunas porciones de la recuperación durante las pruebas de desarrollo (Figura 59).

Junto con el monitoreo del nivel, se recuperaron 2 muestras más de agua durante el 30 de julio en dos diferentes tiempos (el detalle se muestra en la Tabla 21). Estas muestras, al observarse ya con una mejor calidad, serían enviadas a distintos laboratorios para ser analizadas.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Este periodo de bombeo se dio por terminado el 1º de agosto con el retiro de tubería para dar paso a un cambio de equipo (tubería y bomba) para intentar obtener un mayor gasto bombeando a mayor profundidad y con una mayor cantidad de revoluciones.

9.3. SEGUIMIENTO Y RESULTADOS DEL TERCER PERIODO DE BOMBEO (AGOSTO)

El 1º de agosto se instaló de nueva cuenta la tubería con la bomba sumergida a mayor profundidad. Esta vez, el sensor dentro del pozo se colocó a una profundidad de 108 m para evitar que el abatimiento sobrepasara la instalación del sensor y poder registrar el nivel dinámico con continuidad. Los datos adquiridos por este sensor no pudieron ser

recuperados por eventualidades que se comentarán más adelante. En las Figuras 62 y 63 se presentan los resultados obtenidos por los sensores en la descarga, como de temperatura y conductividad eléctrica. Para continuar con el monitoreo de la calidad de agua se tomaron dos nuevas muestras durante estos ensayos (Tabla 22).

Después de diversas reuniones realizadas durante estos ensayos (primeros días de agosto) y observando los resultados de los ensayos de bombeo, la supervisión del SACMEX decidió cambiar el equipo de bombeo para aumentar el caudal observado durante las pruebas de desarrollo. Durante la pausa para el cambio del equipo, se instaló un vertedero (Figura 64) en la zona de descarga del pozo por recomendación del Instituto de Geología, con la finalidad de poder monitorear de manera continua el caudal

Tabla 21. Detalles de las muestras obtenidas durante el segundo periodo de julio.

Muestra	Fecha	Hora	Tiempo de bombeo acumulado* [horas]
SCT 3a-8	30/07/2017	13:20	1
SCT 3a-9	30/07/2017	16:05	4

* El tiempo de bombeo es aproximado por las interrupciones durante el mismo

Tabla 22. Detalles de las muestras obtenidas durante el tercer periodo de bombeo.

Muestra	Fecha	Hora	Tiempo de bombeo acumulado* [horas]
SCT 3a-10	2/8/2017	13:00	5
SCT 3a-11	4/8/2017	13:20	32

* El tiempo de bombeo es aproximado por las interrupciones durante el mismo

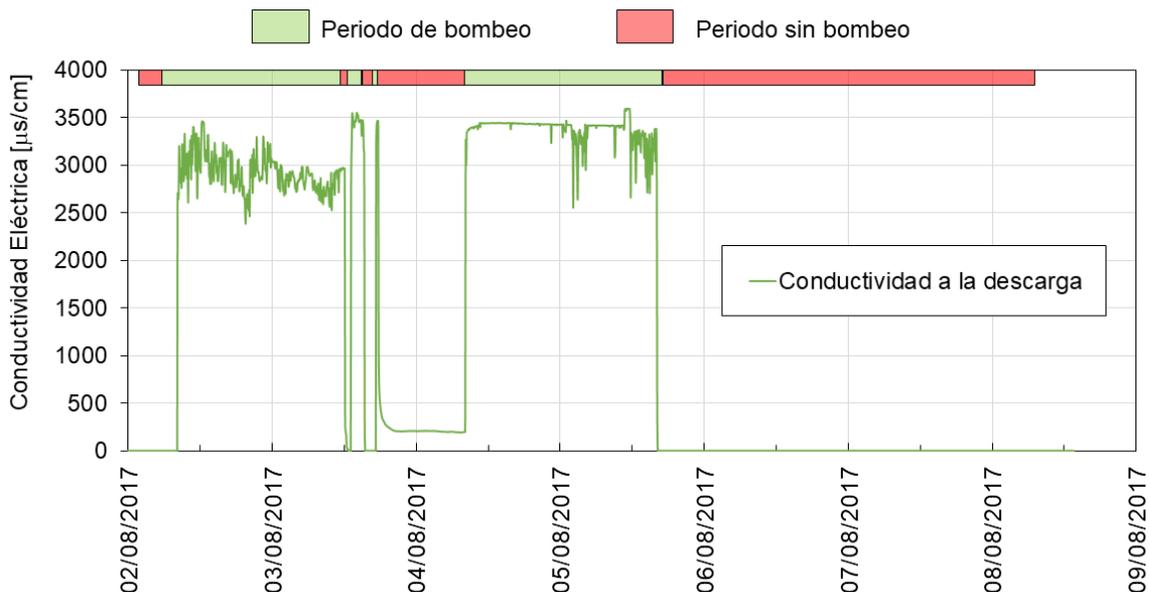


Figura 63. Datos de conductividad eléctrica medidos por el sensor en la descarga para el tercer periodo de bombeo.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

generado por el pozo, que presenta variaciones debido a fluctuaciones de potencia del motor de combustión interna. El vertedero también fue monitoreado a través de la instalación de un sensor DataLogger.

El 12 de agosto se instaló una nueva bomba sin retirar la tubería, por tal motivo el sensor instalado en la tubería se mantuvo a 108 m de profundidad. Lamentablemente durante las primeras pruebas hechas entre el 19 y 20 de agosto se presentaron diversas fallas técnicas y mecánicas en la operación del equipo motor-bomba, lo que ocasionó que la columna de bombeo se moviera bruscamente y se tuvo que suspender la operación. El sensor instalado en la tubería durante esta etapa fue destruido por ese movimiento en la columna (por lo cual no se recuperaron datos de la tercera etapa dentro del pozo) debido al golpeo entre la tubería y la TR. Este movimiento fue



Figura 64. Imagen del vertedero instalado a la descarga.

provocado por un arranque intempestivo de la bomba a revoluciones superiores a 1900 rpm durante la realización de los ensayos de bombeo (Figura 65). La notificación de los problemas con la bomba y la recuperación del sensor destruido fueron hechos hasta el 21 de agosto.

9.4. SEGUIMIENTO Y RESULTADOS DEL CUARTO PERIODO DE BOMBEO (SEPTIEMBRE)

Para finales de mes, hubo un nuevo cambio de equipo y tubería, se instalaron nuevos sensores el 24 de agosto (Figura 66). Entre los días 1 y 4 de septiembre se realizó la prueba de aforo, en donde se tomaron diversas muestras de agua (Tabla 23), mediciones continuas del nivel dinámico con el sensor y en el sitio con sonda, así como mediciones en la descarga (Figuras 67 y 68), vertedero y el piezómetro instalado cerca de la toma de salida.

A continuación, se presenta un resumen del ensayo de bombeo:

- Etapa 1: inició a las 21:10 h del 1º de septiembre y terminó a las 9:10 h del 2 de septiembre, con una duración de 12 horas. En esta etapa se bombeó a 1300 rpm.
- Ensayo de recuperación 1: inició a las 9:10 h del 2 de septiembre y terminó a las 11:57 h del mismo día, con una duración de casi 3 horas.
- Etapa 2: inició a las 12:01 h y terminó a las 18:01 h del 2 de septiembre, con una duración de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1400 rpm.
- Etapa 3: inició a las 18:02 h del 2 de septiembre y terminó a las 00:02 h del 3 de septiembre, con una duración de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1500 rpm.
- Etapa 4: inició a las 00:07 h del 3 de septiembre y terminó repentinamente a la 1:47 h del mismo día debido a fallas técnicas. En esta etapa se bombeó a 1600 rpm.
- Ensayo de recuperación 2: inició a las 2:08 h del 3 de septiembre y terminó a las 4:08 h, con una duración de 2 horas.
- Etapa 4 (repetición): una vez solucionados los problemas técnicos se inició esta etapa a las 19:30 h del 3 de septiembre y terminó a la 1:55 h del 4 de septiembre, con una duración aproximada de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1600 rpm.
- Etapa 5: inició a las 2:00 h y terminó a las 8:00 h del 4 de septiembre, con una duración de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1700 rpm.
- Etapa 6: inició a las 8:15 h y terminó a las 12:15 h del 4 de septiembre, con una duración de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1800 rpm.



Figura 65. Imágenes del sensor destruido dentro del pozo por golpeteo entre la tubería de bombeo y la TR.

- Etapa 7: inició a las 12:15 h y terminó a las 12:25 h del 4 de septiembre, con una duración de 10 minutos. En esta etapa se bombeó a 1900 rpm.

- Etapa 8: inició a las 12:25 h y terminó a las 12:28 h del 4 de septiembre debido a fallas técnicas, con una duración de 3 minutos. En esta etapa se bombeó a 1900 rpm.

9.5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO A LAS MUESTRAS DE AGUA

El agua puede contemplarse y caracterizarse desde diferentes puntos de vista. El primero, de tipo cualitativo, nos indica las características físicas principales a simple vista como color, la claridad, el olor etc. En el de tipo cuantitativo es posible medir propiedades químicas, bacteriológicas, isotópicas, etc. Para cumplir con los objetivos principales

del seguimiento y el estudio de los pozos profundos en la Cuenca de México, se reporta: i) la composición química del agua, para conocer la viabilidad de explotar un posible acuífero y ii) la composición de isótopos estables y radiocarbono, para analizar su origen, su edad y otras propiedades que nos permitan caracterizar el sistema acuífero profundo.

Los análisis hechos por el Instituto de Geología para tal efecto consistieron en pruebas de laboratorio de elementos mayores (aniones y cationes), elementos traza, isótopos estables y fechamientos por ^{14}C a muestras seleccionadas

9.5.1. Elementos mayores

Las muestras para las pruebas geoquímicas de elementos mayores fueron las adquiridas a partir de la muestra SCT-3a-6 del primer periodo de bombeo. Las primeras muestras

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a



Figura 66. Instalación del sensor en la tubería de la bomba previa las pruebas de aforo.

Tabla 23. Muestreo de agua hecho por el Instituto de Geología en septiembre.

Muestra	Fecha	Hora	Tiempo de bombeo acumulado*
SC3-MA-01	1/9/2017	23:21	2
SC3-MA-02	2/9/2017	8:38	11
SC3-MA-03	2/9/2017	17:20	16
SC3-MA-04	2/9/2017	23:20	21
SC3-MA-05	4/9/2017	2:00	50
SC3-MA-06	4/9/2017	7:53	56
SC3-MA-07	4/9/2017	12:00	60

* El tiempo de bombeo es aproximado por las interrupciones durante el mismo.

no fueron consideradas debido a su turbidez y a que se consideró que aún estaban alteradas por contener gran cantidad de fluido de perforación producto del trabajo realizado (el agua utilizada en la perforación provino de un pozo que capta el acuífero superior).

Del primer y segundo periodos de bombeo fueron seleccionadas las muestras SCT-3a-6, SCT-3a-7 y SCT-3a-9. Adicionalmente, como referencia, se tomó una muestra del pozo cercano (denominado pozo Tláhuac) que proporcionó el agua para preparar el fluido de perforación.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

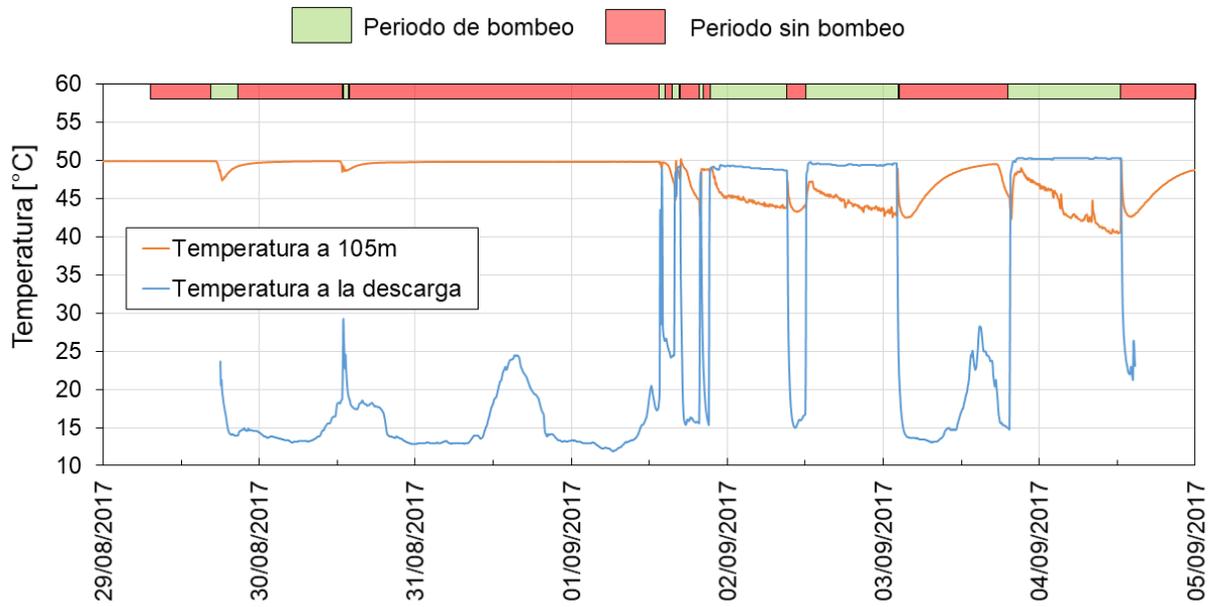


Figura 67. Datos de temperatura medidos por el sensor en la descarga para el cuarto periodo de bombeo.

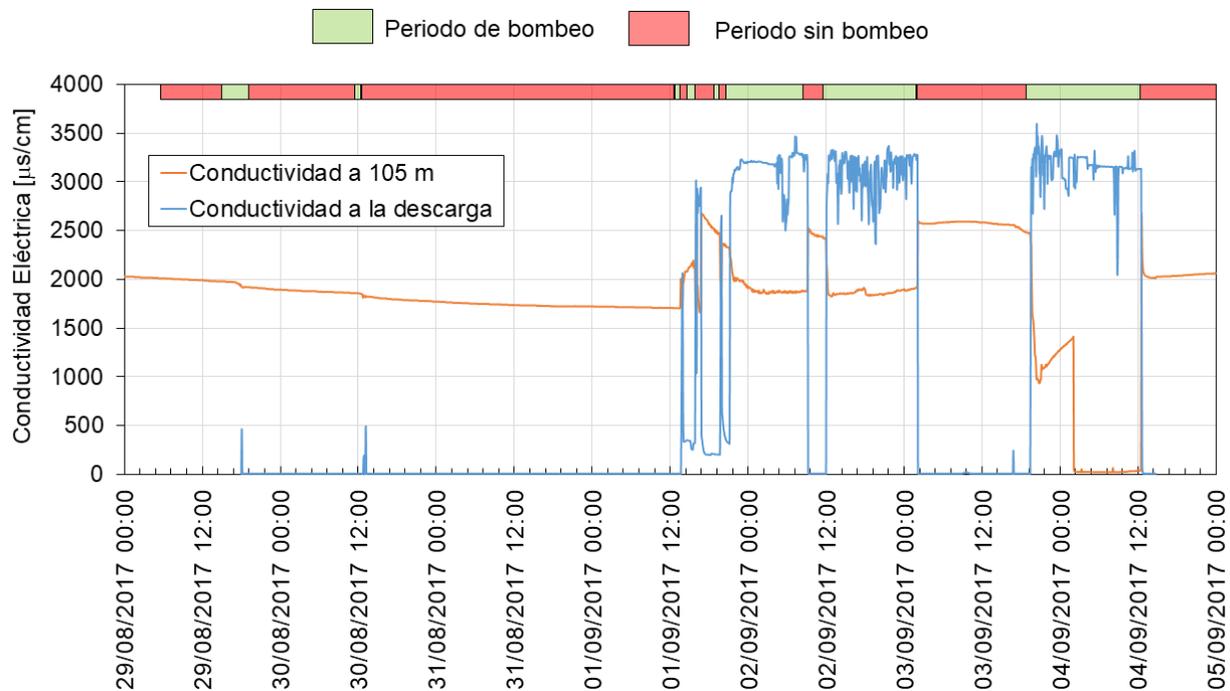


Figura 68. Datos de conductividad eléctrica medidos por el sensor en la descarga para el cuarto periodo de bombeo.

Los resultados de estas muestras se muestran en la Tabla 24. La muestra SCT-3a-8 se seleccionó para otros estudios que se presentarán más adelante.

Del tercer periodo de bombeo, aunque se tomaron dos muestras (SCT 3a-10 y SCT 3a-11), éstas no fueron seleccionadas para su análisis debido a su turbidez y mala calidad en sus características cualitativas, que se asocian a la corta duración de las etapas de bombeo.

De la cuarta etapa se seleccionaron todas las muestras obtenidas para poder dar un seguimiento más detallado de la variación de los elementos y su respuesta a la estimulación y cambio de revoluciones que se efectuaron durante esta etapa. En la Tabla 25 se muestran los resultados de dichas pruebas.

En la Figura 70 se muestra la evolución en el tiempo de cada uno de los iones mayores a través de los cuatro

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

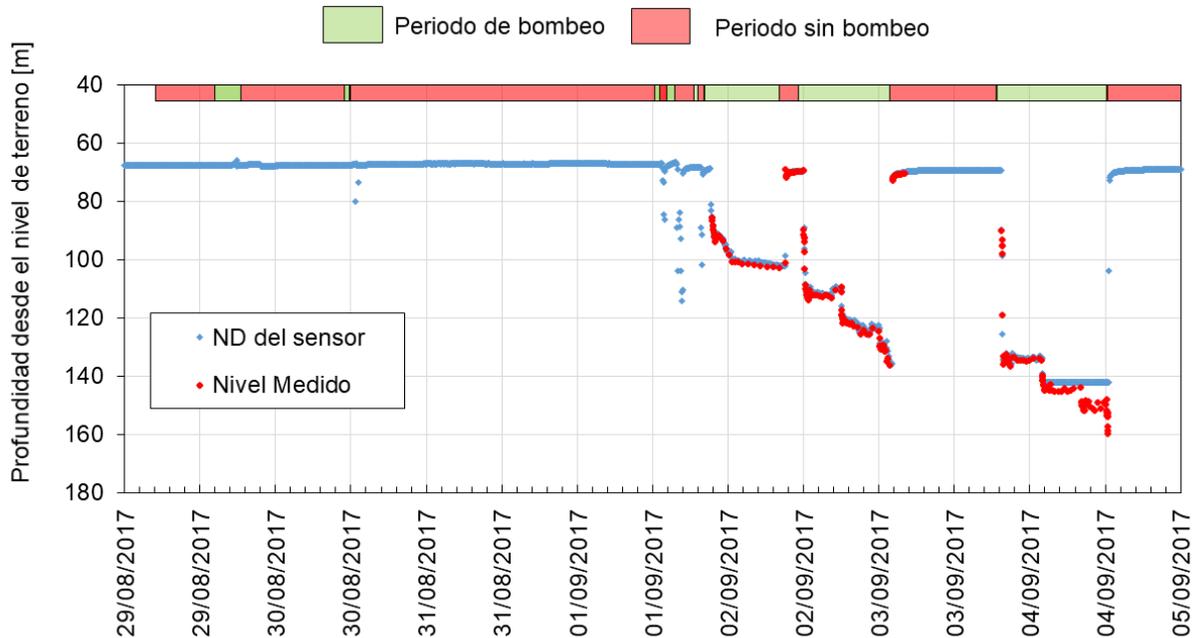


Figura 69. Datos sobre el Nivel dinámico en el sensor dentro del pozo (ND del sensor) y con sonda (Nivel Medido) por personal del Instituto de Geología durante el ensayo de bombeo.

Tabla 24. Resultados de concentración de elementos mayores para el primer y segundo periodos de bombeo.

Muestra	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Error %
	Concentración (mg/L)												
SCT 3a-6	398.8	ND	61.6	67.1	46.8	ND	240	788.2	ND	3.1	ND	4.7	0.42
SCT 3a-7	379.8	ND	55.9	62.2	43.2	ND	234.5	757.3	ND	4.2	ND	4.9	1.58
SCT 3a-9	357.2	ND	51.7	58.4	42.3	ND	219.2	706.1	ND	3.3	ND	7	1.01
Tláhuac	82.68	ND	9.05	19.7	27.8	ND	233.3	91.8	ND	3.2	ND	2	4.29

ND: No Detectado

Tabla 25. Resultados de concentración de elementos mayores para el cuarto periodo de bombeo.

Muestra	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Error %
	Concentración (mg/L)												
SC3-MA-01	347.9	ND	52.2	54.2	37.9	ND	246.1	632.1	ND	ND	ND	15.8	0.17
SC3-MA-02	338.7	ND	48.9	56.7	38.1	ND	228.8	615.3	ND	ND	ND	14.5	1.19
SC3-MA-03	343.6	ND	49.7	53.4	37.9	ND	241.6	655.2	ND	ND	ND	17.2	1.84
SC3-MA-04	337.8	ND	49.8	52.1	37.1	ND	228.9	621.7	ND	ND	ND	19.9	0.25
SC3-MA-05	343.1	ND	50.6	52.9	38.6	ND	231.5	630.3	ND	ND	ND	17.2	0.18
SC3-MA-06	348.6	ND	50.8	53.1	37.5	ND	230.6	629.4	ND	ND	ND	17.7	0.61
SC3-MA-07	342.5	ND	50.2	52.5	37.1	ND	222.6	610.3	ND	ND	ND	18.8	1.33

ND: No Detectado

periodos de bombeo (primero, segundo y cuarto). Mientras que en las Figuras 71 y 72 se muestra el detalle de cada periodo. De la variación en la Figura 70, los iones Cl⁻ y Na⁺ tienen una clara tendencia descendente (el fluido de perforación bentonítico típicamente tiene alto contenido

de Cl⁻ y Na⁺). Adicionalmente, destaca que durante el primer periodo de bombeo, el agua del pozo SCT3a contiene una concentración de NO₃⁻ similar a la concentración medida en el pozo Tláhuac (Tabla 24). Lo anterior corrobora la presencia de agua utilizada en el lodo de perforación e

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

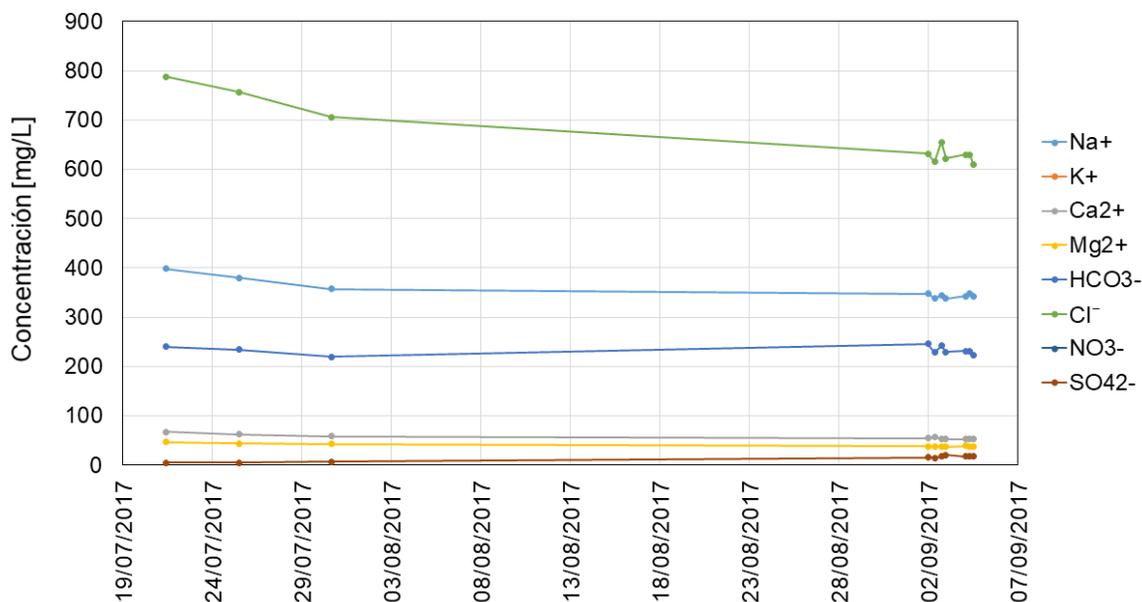


Figura 70. Gráfica que exhibe la variación de la concentración de elementos mayores en la primera y cuarta etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3a..

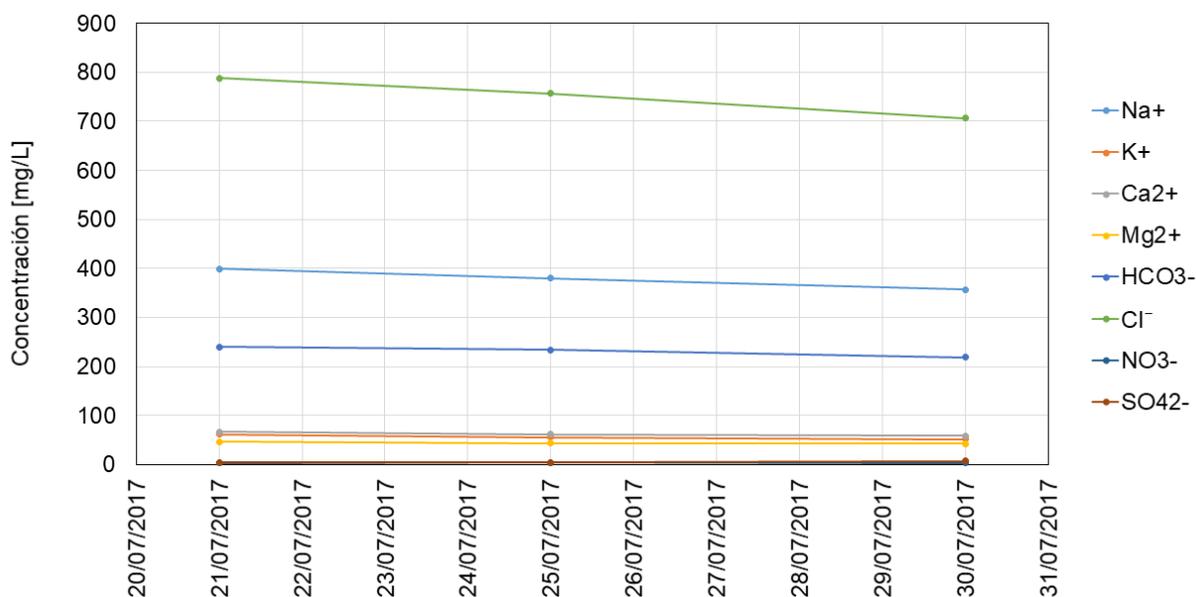


Figura 71. Gráfica que exhibe la variación de la concentración de elementos mayores en la primera y segunda etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3a..

indica que la limpieza del pozo recién inicia. El NO_3^- ya no es detectable en el cuarto periodo de bombeo (Tabla 25). Otros elementos presentan una disminución a través del tiempo (Figuras 70, 71 y 72) que probablemente se relacione con el proceso de limpieza del pozo. El SO_4^{2-} al contrario, aumenta con el tiempo de bombeo, de menos de 7 a más de 17 mg/L (Tablas 24 y 25). Se considera que los resultados de la Tabla 25 están más cercanos

a representar el agua de las formaciones captadas. Se recomienda continuar con los muestreos.

Finalmente, con los resultados de los análisis químicos de elementos mayores es posible realizar un diagrama de Piper (Figura 73), que indica que el agua del pozo SCT3a, tanto en las primeras dos etapas como en la cuarta etapa presenta una composición química similar, perteneciente al grupo de aguas cloruradas-sódicas. Por otra parte, el

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

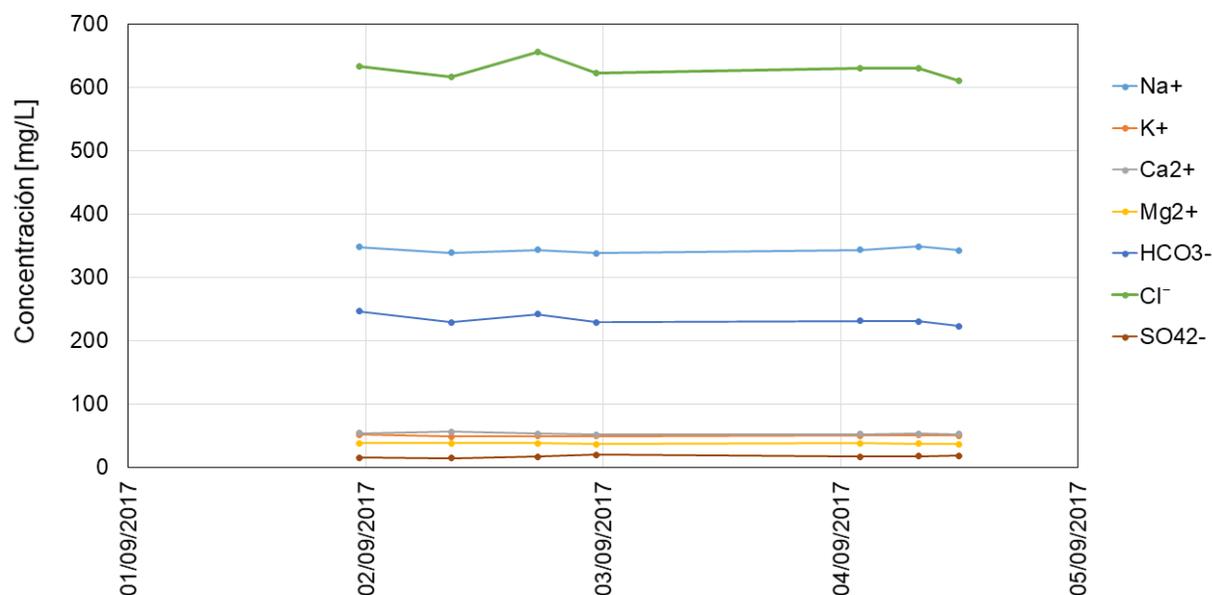


Figura 72. Gráfica que exhibe la variación de la concentración de elementos mayores en la cuarta etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3a.

Tabla 26. Resultados de concentración de elementos traza para el primer, segundo y cuarto periodos de bombeo del pozo SCT3a.

Muestra	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
	Concentración (mg/L)									
6	0.044	0.031	1.032	<LOD	<LOD	0.249	0.24	0.396	<LOD	0.014
7	0.012	0.03	0.87	<LOD	<LOD	0.065	0.154	0.232	<LOD	0.027
9a	0.047	0.031	0.826	<LOD	<LOD	0.079	0.266	0.493	<LOD	0.012
SC3-MA-01	0.055	0.045	0.706	<LOD	<LOD	0.009	0.075	0.305	<LOD	0.009
SC3-MA-02	0.038	0.049	0.68	<LOD	<LOD	0.044	0.419	0.332	<LOD	0.009
SC3-MA-03	0.014	0.052	0.679	<LOD	<LOD	0.042	0.358	0.334	<LOD	0.008
SC3-MA-04	0.087	0.053	0.696	<LOD	<LOD	0.038	0.229	0.326	<LOD	0.018
SC3-MA-05	0.056	0.051	0.713	<LOD	<LOD	0.067	0.143	0.333	<LOD	0.012
SC3-MA-06	0.257	0.055	0.737	<LOD	<LOD	0.028	0.307	0.338	<LOD	0.014
SC3-MA-07	0.033	0.051	0.718	<LOD	<LOD	-	0.236	0.33	<LOD	0.014
Tláhuac	0.019	-	0.064	<LOD	<LOD	0.011	0.134	0.203	<LOD	0.02

agua del pozo Tláhuac, con la que se compararon estos resultados, se encuentra en las bicarbonatadas sódicas. Este resultado es un primer indicativo de que podrían tratarse de sistemas de flujo o acuíferos diferentes.

9.5.2. Elementos traza

Los elementos traza son aquellos que se encuentran con una concentración generalmente menor de 100 microgramos por gramo. Estos elementos, además de ser indicadores de la presencia de contaminación, también son elementos que ayudan a estudiar los procesos geoquímicos que gobiernan el entorno químico del agua y ayudan a caracterizar el origen de ésta. En la Tabla 26 se

presentan los resultados de los elementos traza para las muestras seleccionadas para este estudio y se comparan con los elementos traza obtenidos para el pozo circundante (pozo Tláhuac) al pozo SCT3a.

En la Figura 74 se muestra la evolución en el tiempo de cada uno de los elementos traza a través de los diversos periodos de bombeo (primero, segundo y cuarto). Mientras que en las Figuras 75 y 76 se muestra el detalle de cada uno.

9.5.3. Isótopos estables

Las muestras utilizadas para la caracterización de isótopos estables fueron la SCT-3a-8 y la SC3-MA-07. También fue analizada la muestra obtenida del pozo circundante

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

(Tláhuac) y es comparada con el resultado de una de las muestras del pozo SLT (Morales-Casique *et al.*, 2014).

En la Figura 77 se presenta la gráfica y la comparación de cada una de las muestras y en la Tabla 26 los resultados de las muestras. Los resultados para los isótopos estables Deuterio (δD) y Oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) se comparan con las líneas meteóricas tipo para la Cuenca de México publicadas por Wassenaar *et al.* (2009) y Cortés *et al.* (1997). Las muestras de los pozos SCT3a, Tláhuac y SLT coinciden con las líneas meteóricas, lo que sugiere que el origen del agua fue la precipitación pluvial y no ha estado sujeta a procesos tales como evaporación, lo que modificaría la tendencia.

9.5.4. Fechamiento

La edad del agua subterránea se puede estimar analizando el contenido de radiocarbono (^{14}C) en el carbono inorgánico

disuelto en el agua. Existen varios modelos para estimar la edad. En este estudio utilizaremos el modelo siguiente (Fontes y Garnier, 1979)

$$t = \frac{T_c}{\log 2} \log \frac{Q A_0}{A_c}$$

Donde:

$T_c = 5730 \pm 30$ años, la vida media del ^{14}C .

Q = factor de ajuste (Wigley, 1975).

A_c = actividad específica del carbono moderno de la muestra en pMC (percent million carbon).

A_0 = actividad específica del carbono al $t=0$ (en la recarga).

Para la estimación de A_0 se utilizó el siguiente modelo de Pearson y colaboradores (Fontes y Garnier, 1979):

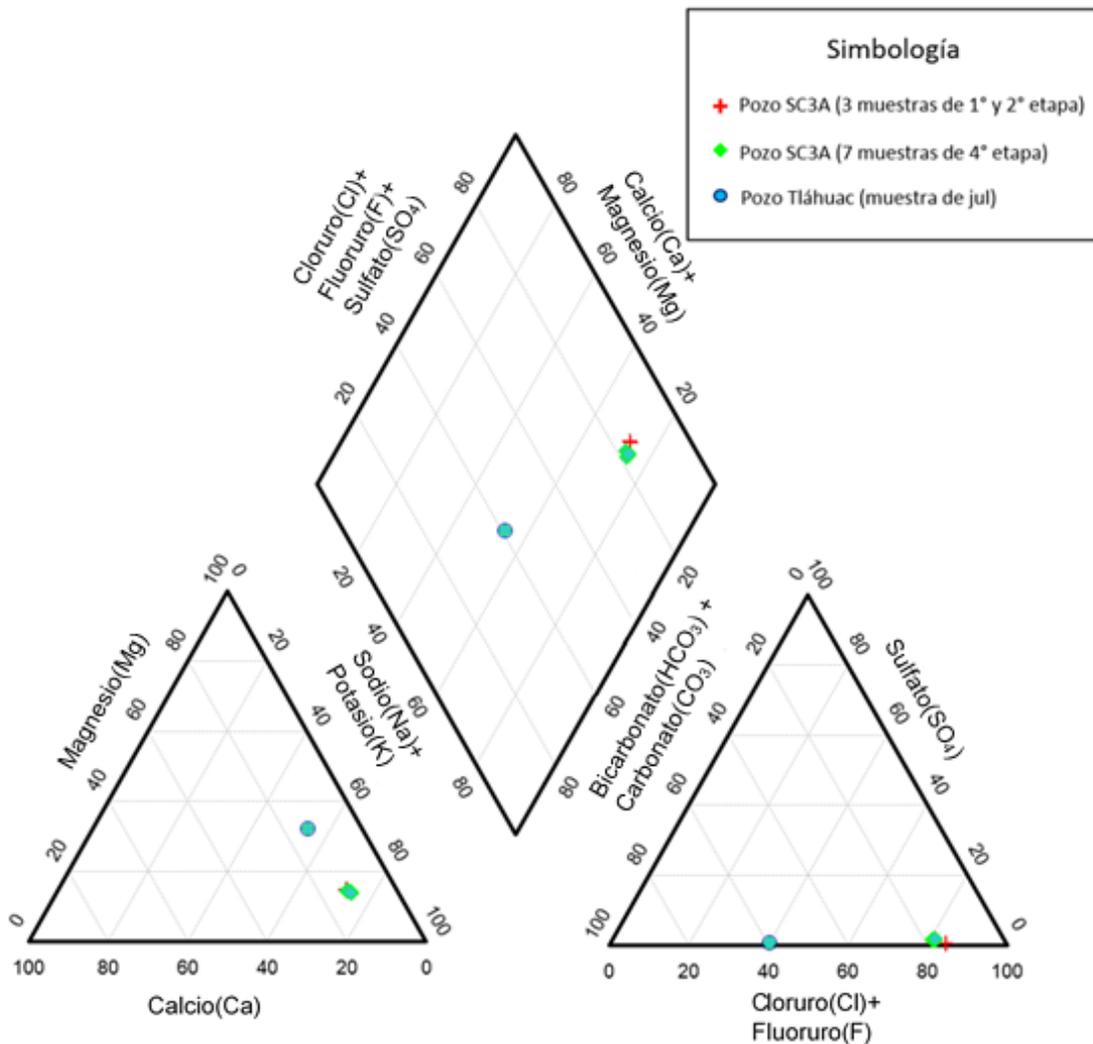


Figura 73. Diagrama de Piper donde se indica la composición de las muestras del pozo Tláhuac y Santa Catarina 3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

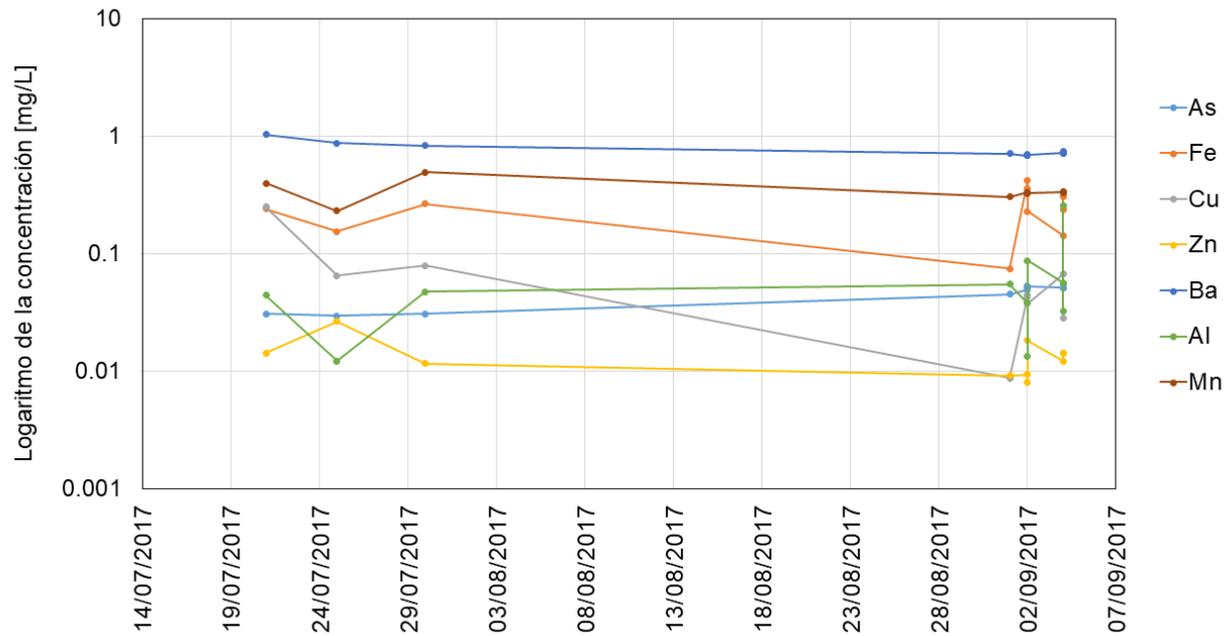


Figura 74. Gráfica que exhibe la variación de la concentración de elementos traza en la primera, segunda y cuarta etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3a.

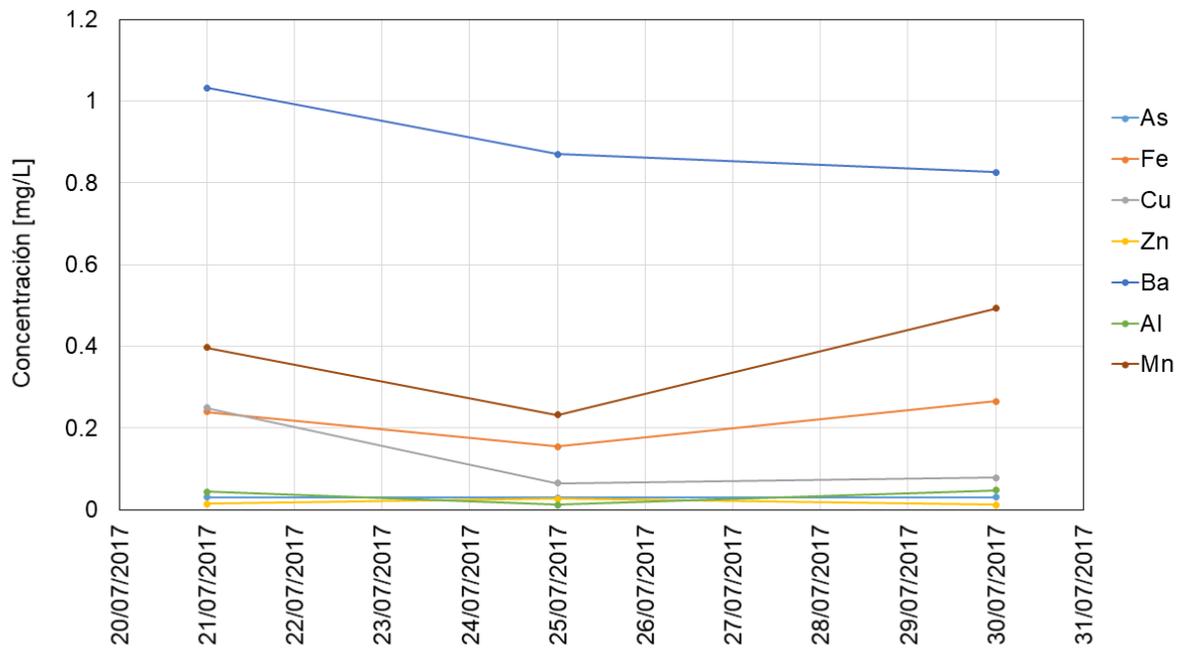


Figura 75. Gráfica que exhibe la variación de la concentración de elementos traza en la primera y segunda etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

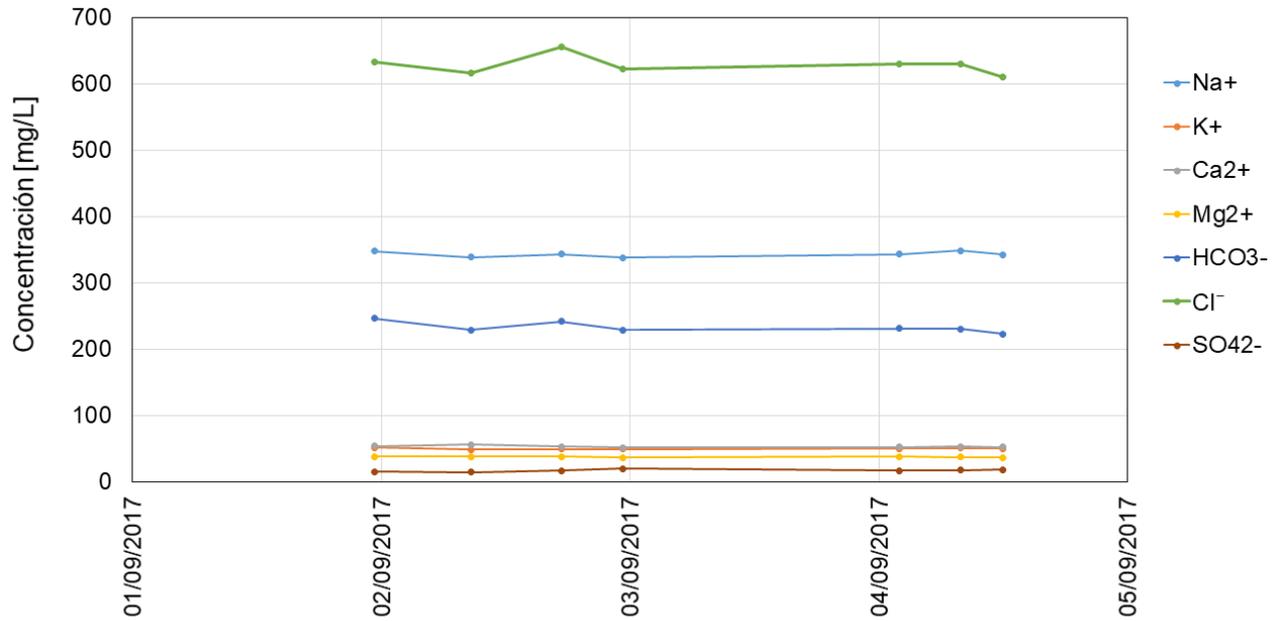


Figura 76. Gráfica que exhibe la variación de la concentración de elementos traza en la cuarta etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3a.

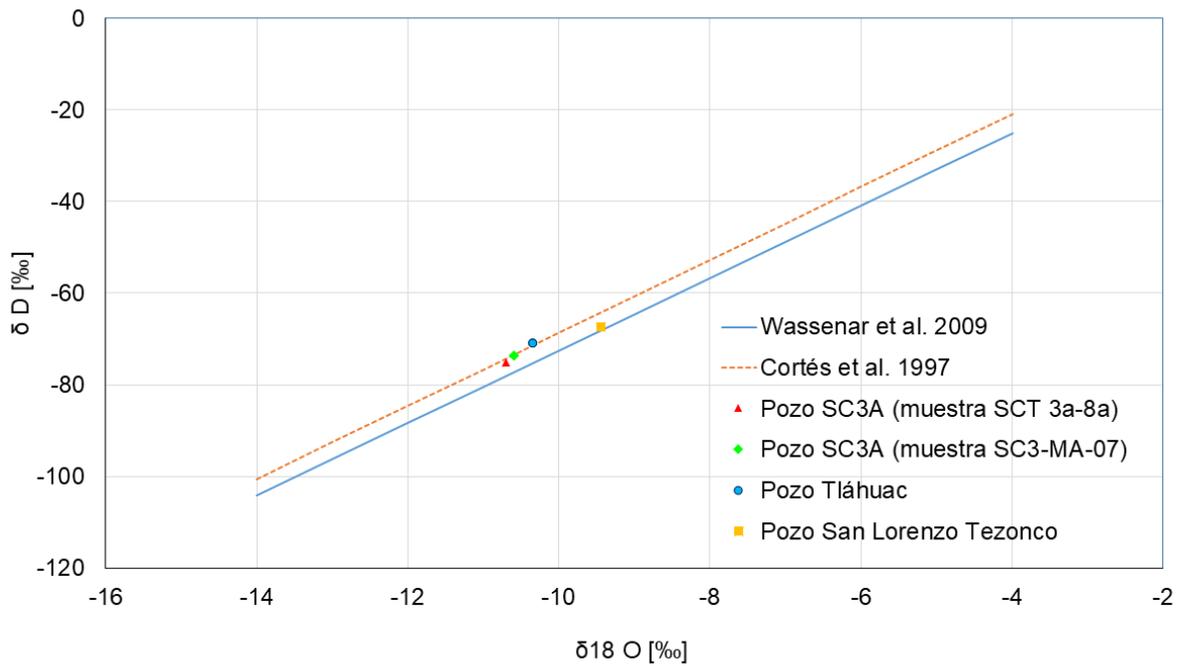


Figura 77. Gráfica de $\delta^{18}O$ contra δD de las muestras. Los datos del pozo San Lorenzo Tezonco fueron tomados de Morales-Casique *et al.* (2014).

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

$$A_0 = \frac{\delta_T - \delta_c}{\delta_g - \delta_c} (A_g - A_c) + A_c$$

Donde:

δ_T = composición isotópica estable $\delta^{13}\text{C}$ del carbono total disuelto.

δ_c = composición isotópica estable $\delta^{13}\text{C}$ de los carbonatos sólidos.

δ_g = composición isotópica estable $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 en el suelo.

A_g = actividad del ^{14}C en el CO_2 del suelo.

A_c = actividad del ^{14}C en los carbonatos sólidos.

El modelo de Pearson y colaboradores toma en cuenta el $\delta^{13}\text{C}$ para calcular la actividad del carbono al $t=0$. Este procedimiento para calcular la edad del agua ha sido utilizado por Edmunds *et al.* (2002) para estimar la edad del agua subterránea en diversos pozos en la Cuenca de México y por Morales-Casique *et al.* (2014) para estimar la edad del agua proveniente del pozo SLT. Se adoptan aquí los valores que Edmunds *et al.* (2002) propusieron para calcular A_0 : $A_g = 100\%$, $\delta_c = 0.8\%$ y $\delta_g = 0.26\%$.

La prueba de datación de agua se utilizó la muestra SCT-3a-8 y la muestra SCM-MA-07, las cuales mostraron mayor claridad y pocos sedimentos.

Cálculo de edades

Muestra SCT-3a-8a. Para esta muestra, $\delta^{13}\text{C} = \delta_T = -5.4$ (resultado de laboratorio, Tabla 31). Los parámetros para calcular A_0 se muestran en la Tabla 27. La Tabla 28 muestra los valores para el cálculo de la edad. Se observa que $A_0 < A_c$, lo que resultaría en una edad negativa. La muestra SCT-3a-8a fue colectada 3 horas antes de la SCT 3a-9 y como se observa en la Tabla 24, el contenido de NO_3^- indica que el agua extraída aún estaba mezclada con agua del fluido de perforación. Esto explica el contenido tan alto en pMC de ^{14}C y la edad negativa.

Muestra SCM-MA-07. Para esta muestra, $\delta^{13}\text{C} = \delta_T = -5.7$ (resultado de laboratorio, Tabla 31). Los parámetros para calcular A_0 se muestran en la Tabla 29. La Tabla 30 muestra los valores para el cálculo de la edad. Como se puede observar en la Tabla 30 la edad de la muestra SCM-MA-07 es de 5413 años. Esta edad es considerablemente menor que la estimada con el mismo modelo para el agua del pozo SLT (Morales-Casique *et al.*, 2014) que fue de 14237 años. Las edades en los pozos SCT3a y SLT no necesariamente tienen que coincidir. Sin embargo, debido a que el proceso de limpieza y desarrollo del SCT3a fue más corto que el del SLT, se recomienda verificar la edad tomando una muestra en unos meses, ya que el pozo SCT3a haya operado continuamente.

Tabla 27. Composición isotópica de las muestras de agua del pozo Tláhuac y Santa Catarina 3a. del pozo SCT3a.

Isótopo	Unidad	Resultado SC3a 8a	Resultado Tláhuac	Resultado SC3a SCM-MA-07
δD	‰	-75.15	-71.12	-73.6
$\delta^{18}\text{O}$	‰	-10.7	-10.33	-10.6

Tabla 28. Valores empleados para el cálculo de A_0 de la muestra SCT-3a-8a.

Factor	Valor
δ_T	-5.4
δ_c	0.8
δ_g	-26
A_g	100

Tabla 29. Muestra los valores para el cálculo de la edad para la muestra SCT-3a-8a.

Factores	Valor
T_c	5730
Q	1
A_0	23.134328
A_c	26.5
t (años)	RC*

*RC-Resultado Comprometido

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla 30. Valores empleados para el cálculo de A₀ de la muestra SCM-MA-07.y Santa Catarina 3a.del pozo SCT3a.

Factor	Valor
δ_T	-5.7
δ_c	0.8
δ_g	-26
A_g	100

Tabla 31. Muestra los valores para el cálculo de la edad para la muestra SCM-MA-07.

Factor	Valor
T _c	5730
Q	1
A ₀	24.2537313
A _c	12.6
t (años)	5413.6065

Tabla 32. Composición isotópica de las muestras de agua del pozo San Lorenzo Tezonco y Santa Catarina 3a.

Isótopo	Unidad	Resultado SLT	Sólidos totales disueltos	Resultado SC3a 8a	STD	Resultado SC3a SCM-MA-07	STD	Observaciones
δ_D	‰	-67.3		-75.15		-73.6		Datos obtenidos en un Espectrómetro de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS, por sus siglas en Inglés)
$\delta^{18}O$	‰	-9.44		-10.7		-10.6		Datos obtenidos en un Espectrómetro de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS, por sus siglas en Inglés)
$\delta^{13}C DIC$	‰	-5.8		-5.4		-5.7		Datos obtenidos en un Espectrómetro de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS, por sus siglas en Inglés)
$^{14}C DIC$	pMC	4.4	0.1	26.5	0.1	12.6	0.1	Datos obtenidos en un Espectrómetro de Masas con Acelerador (AMS, por sus siglas en Inglés)

CONCLUSIONES

A partir del análisis e integración de la información y datos colectados durante la perforación, la interpretación estratigráfica del pozo Santa Catarina 3a es la siguiente:

- 510 a 789 md. Andesitas, probablemente fracturadas y alteradas en la cima y más competentes y menos alteradas hacia la base. No hubo pérdidas de circulación considerables en este intervalo.
- 789 a 887 md. Ignimbrita de color rosado. El registro geofísico sugiere que en esta zona existe menor enjarre y probablemente menor permeabilidad en la formación.
- 887 a 919 md. Flujo tipo lahar, principalmente cenizas. Esta clasificación se apoya en el primer núcleo (N1-SCT3a, 966 - 969 m) donde la ceniza se encuentra muy

alterada hacia arcilla. Los valores de resistividad disminuyen hasta 1 a 3 Ohm-m, los valores API del registro de rayos gama aumentan y se observa una menor concentración de los elementos del registro de espectroscopia.

- 919 a 1141 md. Lahar color rojizo, alterado con matriz arcillosa y fragmentos de roca redondeados de 2 hasta 35 mm. Este intervalo pudo clasificarse gracias a las muestras de canal y a muestras obtenidas in situ, junto con los análisis de laboratorio de DRX. Elevada socavación en el agujero y pérdida total de circulación observada durante la perforación. Debido a la pérdida total de circulación, a partir de los 1008 md fue imposible coleccionar muestras de canal. Adicionalmente, el registro geofísico solo llegó hasta los 1700 md. De 1700 a 2026 md solo se contó con la bitácara de perforación y el núcleo N3-SCT3a se encontraba alterado. alteración. Por lo tanto,

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

las secciones siguientes fueron interpretadas a partir de los registros geofísicos de pozo, dos núcleos y la correlación con el pozo Tulyehualco-1.

- 1141 a 1347 md. Flujo piroclástico poco alterado y permeable, con base en el registro geofísico y en lo observado en el pozo Tulyehualco a esta profundidad. En el registro se observa una secuencia relativamente homogénea, más competente (por la poca socavación del agujero) y donde los valores de resistividad para la curva de mayor profundidad de investigación (AT90) son relativamente constantes, entre los 10 y 50 Ohm-m.

- 1347 a 1647 md. Depósitos de lahar heterogéneos, con diferentes condiciones de depósito o diferentes fuentes. En las zonas de contacto entre eventos se observa alteración, lo que genera un contacto gradual y perturbado producto de la interacción mineralógica entre ambos depósitos (puede apreciarse en el md 1554 del N3-SCT3a), probablemente por flujo de agua. La parte más competente y más resistiva, concuerda con un depósito de lahar de color rojizo, endurecido, mientras que los intervalos donde se observa mayor socavación, menor resistividad y formación de enjarre corresponden a las secuencias más alteradas y posiblemente arcillosas. En este segmento se observan intervalos cortos con rasgos similares a la facie permeable superior, por lo que no se descarta que estos intervalos cortos también aporten a la producción del pozo.

- 1647 a 2026 md. Depósitos de lahar. La formación es competente y con características similares a lo visto en el núcleo N3-SCT3a.

La interpretación hidrogeológica de esta columna estratigráfica es la siguiente. El acuífero superior, actualmente en explotación, probablemente se extienda hasta los 780 md. La base de este acuífero podría extenderse 90 m más para incluir la ignimbrita rosa, que pudiera tener permeabilidad secundaria por fracturamiento. Sin embargo, el registro geofísico sugiere que en esta zona existe menor enjarre y probablemente menor permeabilidad en la formación por lo que el funcionamiento de esta unidad hidrogeológica aún es ambiguo.

Subyaciendo este acuífero hay dos segmentos que podrían comportarse como acuitardos (de muy baja permeabilidad). El primer segmento es el flujo tipo lahar, principalmente cenizas alteradas a arcilla (~32 md de espesor). El segundo segmento es el lahar color rojizo, alterado con matriz arcillosa (~220 md de espesor), aunque este segmento no es homogéneo y es interrumpido por

un segmento de alta permeabilidad a los 1008 md (donde se presentó la pérdida total de circulación). Debido a que esta profundidad finalizó el primer registro geofísico y el otro registro inició a los 1060 md, el segmento de alta permeabilidad no fue observado en los registros.

Respecto a estos acuitardos, hacen falta pruebas hidráulicas para determinar su permeabilidad. Los aforos que rutinariamente se realizan no permiten estimar los parámetros de los acuitardos. Adicionalmente, otros asesores del SACMEX han propuesto que los acuitardos arcillosos, denominados informalmente formación Taxhimay, tienen un origen lacustre (sedimentario). Los resultados de las pruebas de DRX a las arcillas de los segmentos arcillosos sugieren que el origen no es lacustre. Las cuatro muestras se componen de una arcilla de la familia de las esmectitas. En ninguna de las muestras analizadas la esmectita se encuentra interestratificada (por ejemplo, con illita o clorita). La estratificación es común en rocas sedimentarias y, de ser de origen lacustre, debiera observarse. La ausencia de estratificación sugiere que estas arcillas pudieron originarse por alteración hidrotermal de rocas ácidas o de depósitos de ceniza volcánica.

Subyaciendo estos acuitardos se localiza un estrato de ~206 md de espesor de flujos piroclásticos, con respuesta geofísica relativamente homogénea y de buena permeabilidad. La buena permeabilidad de este segmento de más de 200 md de espesor se infiere de las siguientes evidencias: (a) la separación entre las curvas resistivas, (b) la caída significativa de temperatura registrada por el sensor de la barrena durante la perforación de este segmento, y (c) el ascenso de nivel de lodos hasta a los 32 m de profundidad durante esta etapa, a pesar de la pérdida de circulación. Es probable que este segmento sea el principal aportador al caudal que se extrae de este pozo. El hecho de que la temperatura a la descarga del pozo sea menor o igual a 50°C es consistente con esta evaluación.

Posteriormente se encuentran ~300 md de depósitos de lahar heterogéneos, alternando segmentos de buena permeabilidad con segmentos de baja permeabilidad. Finalmente, se encuentran flujos piroclásticos de ~400 md de espesor, consolidados y que podrían ser permeables por fracturamiento.

Finalmente, se tomaron muestras de agua durante varios aforos y se hizo la interpretación hidráulica de estas pruebas. Puesto que el ademe ranurado se extiende a los tres segmentos que probablemente

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

aportan el agua extraída del pozo, no es posible hacer un análisis para obtener valores de conductividad hidráulica para cada uno de ellos.

Se reportan los resultados de los análisis químicos del agua (iones mayores y elementos traza). Los isótopos estables son congruentes con un origen meteórico de ésta. Para estimar la edad, dos muestras de agua se analizaron para contenido de ^{14}C . La primera muestra dio un alto contenido de carbono moderno por lo que suponemos que aún estaba contaminada con agua ajena a la formación introducida durante la perforación. La segunda muestra dio una edad de más de 5800 años. Sin embargo, existen dudas de la integridad de esta última muestra porque fue tomada posterior a un problema que originó una rotura en el ademe ciego a ~200 md de profundidad, y en el cual seguramente hubo ingreso de agua somera.

Referencias

- Arce, J.L., Layer, P.W., Morales-Casique, E., Benowitz, J.A., Rangel, E., Escolero, O., 2013, New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266(1), 34-49.
- Arce, J.L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J.I., Macías-Romo, C., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Escolero, O., Lenhardt, N., 2015, Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 123-143.
- Cortés, A., Durazo, J., Farvolden, R.N., 1997, Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico and vicinity: annotated bibliography and interpretation: *Journal of Hydrology*, 198(1-4), 346-376.
- Edmunds, W.M., Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., 2002, Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City: *Journal of Hydrology*, 258(1-4), 1-24.
- Fontes, J.C., Garnier, J.M., 1979, Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: A review of the existing models and a new approach: *Water resources research*, 15(2), 399-413.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lezama-Campos, J.L., Morales-Casique, E., Castrejón-Pineda, R., Arce, J.L., Escolero, O., 2016, Interpretación del registro geofísico del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y su correlación litológica en la cuenca de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(2), 198-208.
- Morales-Casique, E., Escolero, O.A., Arce, J.L., 2014, Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México: *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 31(1), 64-75.
- Morales-Casique, E., Escolero, O.A., Arce, J.L., 2015, Estimación de parámetros mediante inversión y análisis de las pérdidas hidráulicas lineales y no-lineales durante el desarrollo y aforo del pozo San Lorenzo Tezonco: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 203-214.
- Morales Casique, E., Arce, J.L., Lezama, J.L., Escolero, O.A., 2018, Análisis de la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos que conforman el subsuelo de la cuenca de México a partir de la perforación de dos pozos profundos, uno a 2000 m y otro a 1570 m denominados Agrícola Oriental no. 2B y 2C: *Boletín del Instituto de Geología, UNAM*, 121, 113 p.
- Wassenaar, L.I., Van Wilgenburg, S.L., Larson, K., Hobson, K.A., 2009, A groundwater isoscape (δD , $\delta^{18}\text{O}$) for Mexico: *Journal of Geochemical Exploration*, 102(3), 123-136.
- Wigley, T.M.L., 1975, Carbon 14 dating of groundwater from closed and open systems: *Water Resources Research*, 11(2), 324-328.

Apéndice

Posterior al término del contrato fijado por el Instituto de Geología y el SACMEX, el pozo Santa Catarina 3a fue sometido a pruebas adicionales de desarrollo y aforo. Al ser de relevancia para su caracterización y futuras investigaciones en perforaciones profundas, el Instituto de Geología continuó con los trabajos de monitoreo de las pruebas de desarrollo y las pruebas de aforo. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas durante marzo de 2018.

A1 Quinta etapa de desarrollo del pozo Santa Catarina 3a

Para realizar esta etapa del desarrollo del Pozo Santa Catarina 3a, la empresa Hidrograma, encargada de las maniobras de desarrollo, colocó 49 tubos de 3.05 m dentro del pozo, teniendo una longitud total de 149.45 m de tubería.

El 5 de marzo del 2018, personal del Instituto de Geología instaló nuevamente un sensor capaz de medir presión y temperatura dentro del pozo con el fin de registrar las variaciones del nivel del agua y temperatura durante el

desarrollo. Dicho sensor quedó colocado a una profundidad de 141.6 m con respecto al nivel del terreno. Ese mismo día se registró una profundidad del n.e. de 63.245 m. Esta medida fue la misma para el 6 de marzo del 2018, día previo en que iniciaron las pruebas de desarrollo.

El 7 de marzo se terminó de instalar la tubería, se colocó el cabezal y se conectó el motor. El desarrollo inició el 8 de marzo a las 22:55 h con 1200 rpm y aumentó a 1300 rpm después de 10 minutos. A las 4:20 h se tomó una muestra de agua ya que en este momento se habían bombeado 158762.503 litros de agua, correspondientes a la columna de agua dentro del pozo. A las 21:00 h fue la última medida a 1500 rpm y de ahí se aumentaron las revoluciones a 1600 rpm. Una hora después se leyó el nivel dinámico, a continuación a las 6:55 h del 9 de marzo se aumentaron las revoluciones a 1700 y a las 10:00 h se reventó la sonda con la que se estaba midiendo el nivel dinámico. Se continuó registrando el volumen bombeado y a las 13:30 h se detuvo el bombeo debido a que el motor se quedó sin diesel. A las 14:30 h se reinició el bombeo. El desarrollo del pozo Santa Catarina 3a concluyó el 9 de marzo a las 22:19 h.

En la Tabla 1 se muestra el caudal promedio calculado cada hora, el volumen de agua bombeado durante el desarrollo, las revoluciones por minuto a

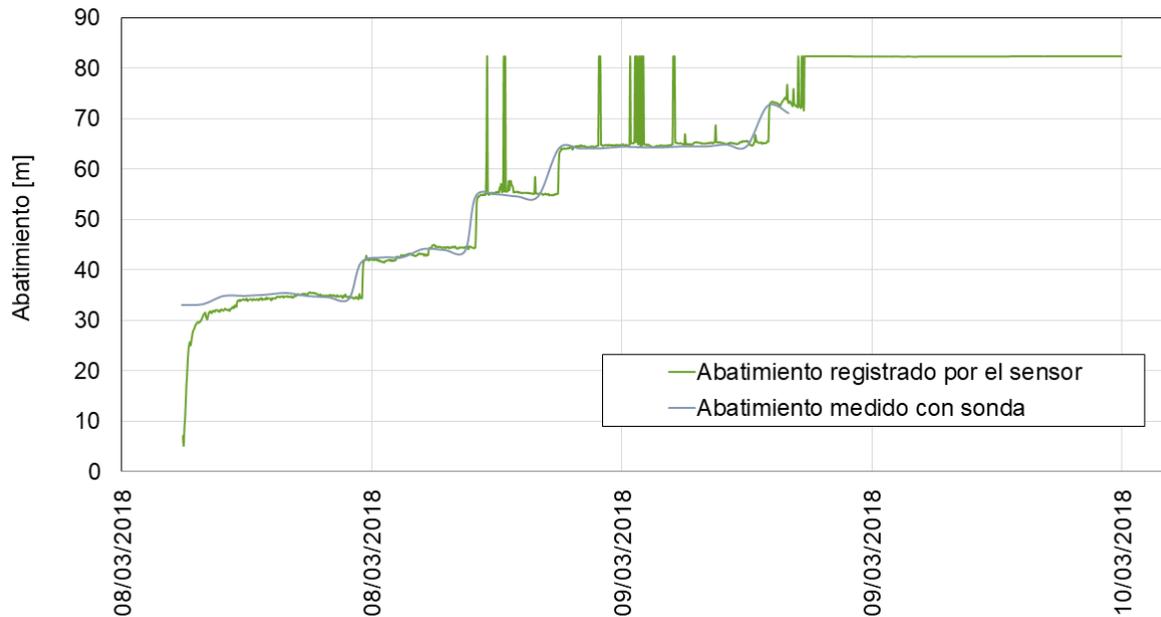


Figura A1. Comparación entre datos registrados por el sensor respecto a los medidos con sonda en el pozo Santa Catarina 3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

Tabla A1. Caudal promedio calculado cada hora, volumen de agua bombeado durante el desarrollo, revoluciones por minuto a las que se encontraba el motor y parámetros físico-químicos como sólidos totales disueltos (STD), conductividad eléctrica, temperatura y pH.

Fecha y hora	Caudal promedio [L/s]	Volumen acumulado [m ³]	rpm	STD [ppm]	Conduc. eléctrica [μS]	Temp [°C]	pH
8/3/2018 2:55		263719.6	1300	350	795	30.1	7.9
8/3/2018 3:55	33.92	263890		931	2300	37.5	7.8
8/3/2018 4:55	32.41	263972					
8/3/2018 5:55	37.77	264108		1168	3070	40.8	7.3
8/3/2018 6:55	38.05	264245		1178	3180	42.4	7.3
8/3/2018 7:55	41.11	264393		1199	3280	42.8	7.2
8/3/2018 8:55	38.05	264530		1213	3320	43.5	7.3
8/3/2018 9:55	37.22	264664		1186	3320	41.7	7.3
8/3/2018 10:55	41.11	264812		1219	3330	51	7.3
8/3/2018 11:30	46.66	264896	1400				
8/3/2018 12:30	41.38	265045					
8/3/2018 13:30	42.77	265199		1248	3350	51.6	7.3
8/3/2018 14:30	46.38	265366		1226	3410	21.1	7.3
8/3/2018 15:30	40.83	265513		1242	3450	50.9	7.3
8/3/2018 16:30	47.77	265685		1227	3460	47.7	7.4
8/3/2018 17:00	41.11	265759		1233	3530	48.9	7.3
8/3/2018 18:00	45	265921	1500	1236	3580	49.3	7.3
8/3/2018 19:00	56.11	266123		1238	3560	49.1	7.4
8/3/2018 20:00	51.6	266309					
8/3/2018 21:00	48.33	266483					
8/3/2018 22:00	58.33	266693	1600				
8/3/2018 23:00	53.88	266887		1272	3510	51	7.4
9/3/2018 0:00	51.38	267072		1259	3562	51	7.3
9/3/2018 1:00	60	267288		1280	3570	49	7.3
9/3/2018 2:00	55.55	267488		1278	3580	47	7.4
9/3/2018 3:00	56.38	267691		1281	3490	47	7.6
9/3/2018 4:00	55	267889					
9/3/2018 5:00	55.27	268088					
9/3/2018 6:00	56.94	268293		1280	3530	48	7.4
9/3/2018 7:00	55.83	268494		1280	3260	47.5	7.4
9/3/2018 8:00	60.55	268712	1700	1277	3550	49	7.5
9/3/2018 9:00	61.11	268932		1255	3630	50.7	7.4
9/3/2018 10:00	59.44	269143		1255	3600	50.6	7.4
9/3/2018 11:00	60	269362		1244	3620	53.5	7.4
9/3/2018 12:00	27.02	269567		1267	3620	51.3	7.2
9/3/2018 13:00	55.55	269769		1270	3640	52.4	7.3
9/3/2018 14:00				1263	3540	51.8	7.3
9/3/2018 15:00		270085		1255	3590	50.1	7.3
9/3/2018 16:00	50.27	270266	1600	1241	3630	47.3	7.3
9/3/2018 17:00	67.77	270510					
9/3/2018 18:00	58.33	270720					
9/3/2018 19:00	59.44	270934					
9/3/2018 20:00	61.94	271157					
9/3/2018 21:00	59.44	271371					
9/3/2018 22:00	0	271567					

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

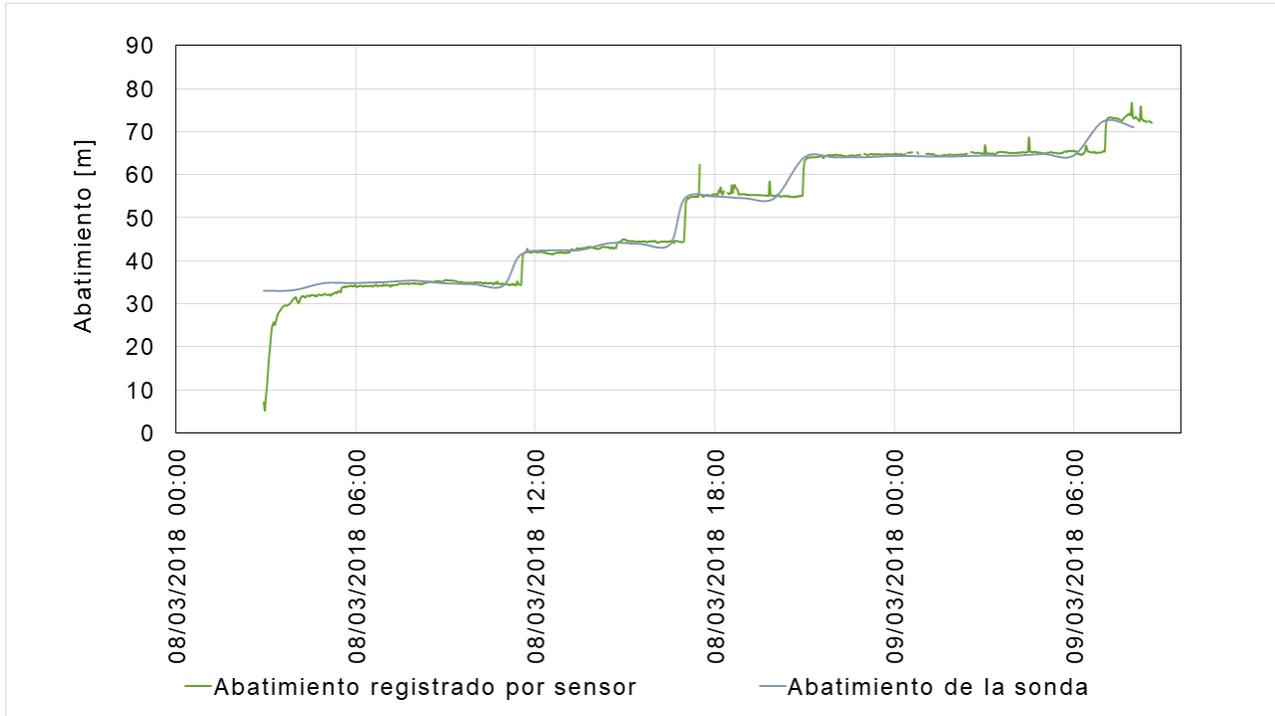


Figura A2. Datos procesados del pozo Santa Catarina 3a.

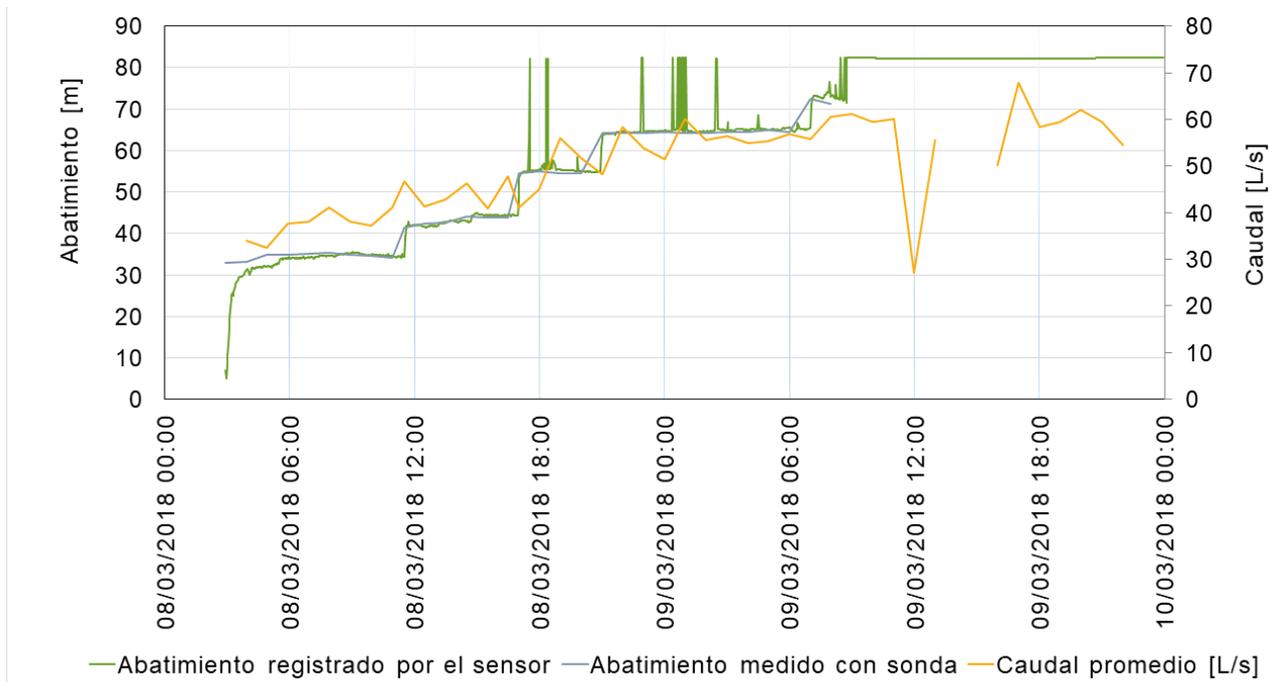


Figura A3. Comparación entre los descensos registrados respecto al caudal observado por el medidor de flujo electromagnético instalado en el tren de descarga.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

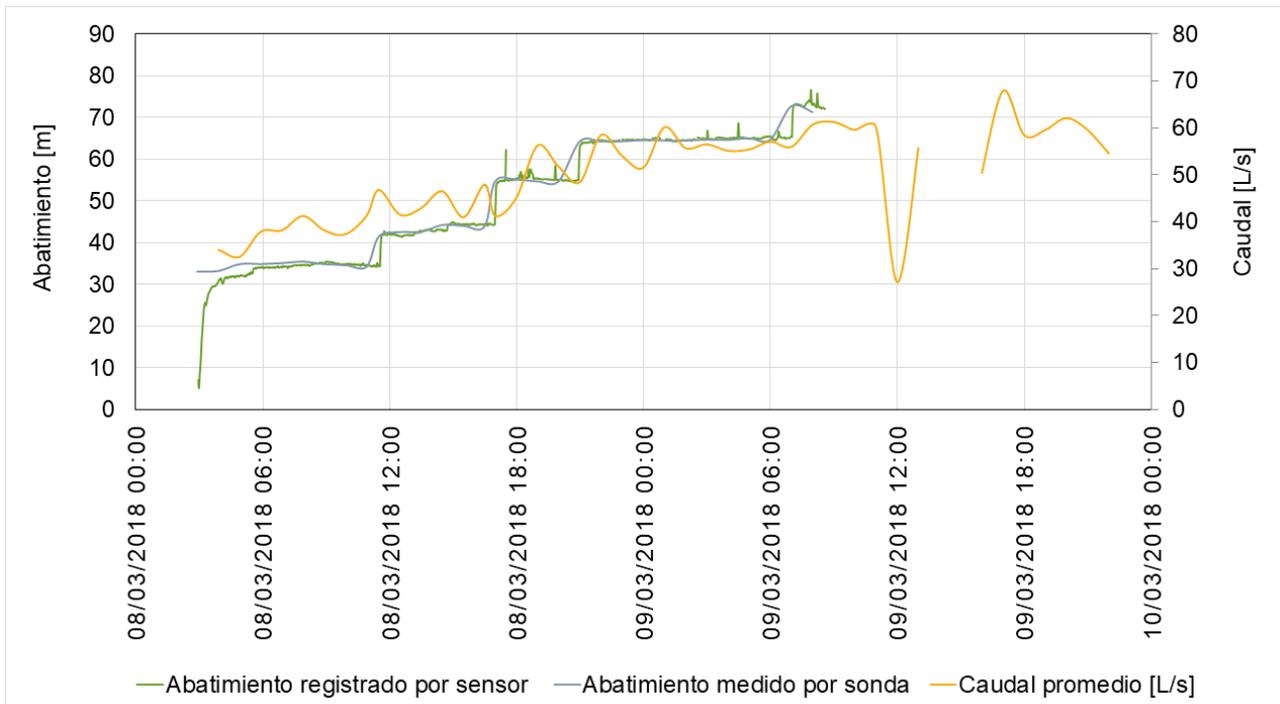


Figura A4. Comparación entre los descensos corregidos registrados respecto al caudal medido por el medidor de flujo electromagnético instalado en el tren de descarga.

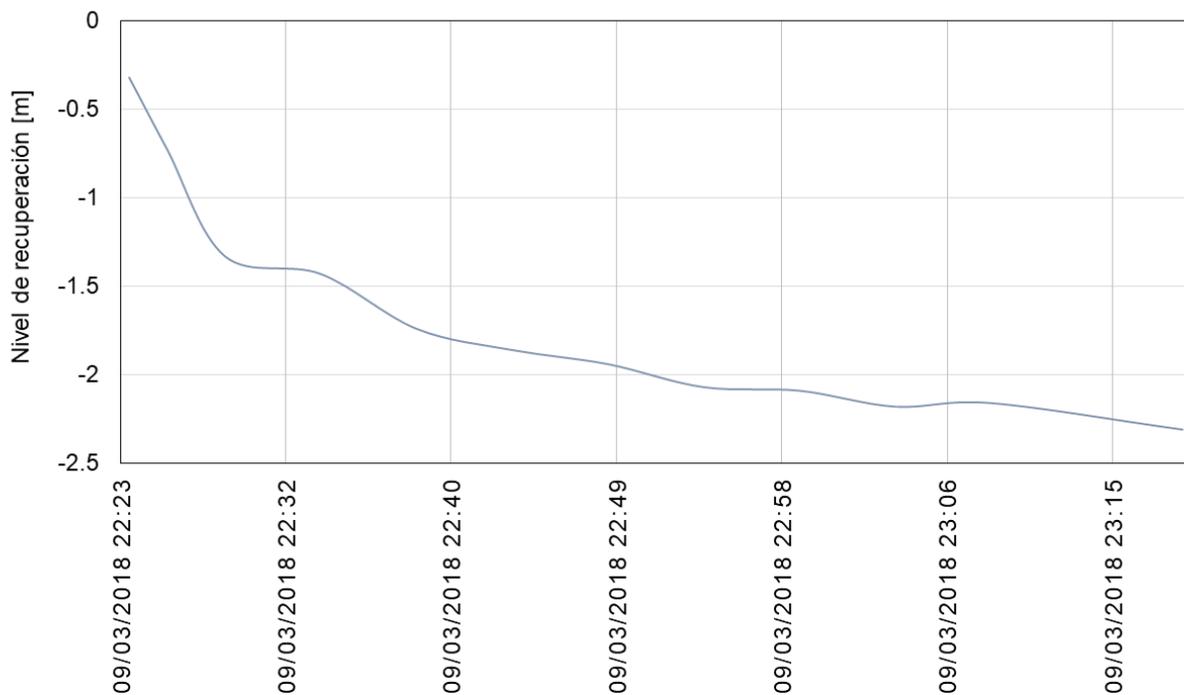


Figura A5. Resultados del ensayo de recuperación en el pozo Santa Catarina 3a.

Análisis de la estratigrafía del pozo profundo Santa Catarina 3a

las que se encontraba el motor y parámetros físico-químicos tales como sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, temperatura y pH.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas a partir del bombeo realizado del 8 al 9 de marzo del 2018.

La Figura A1 muestra el abatimiento del nivel del agua medido con diferentes instrumentos. La gráfica verde corresponde al abatimiento registrado por el sensor colocado en la tubería, los valores mayores a 80 m son datos erróneos leídos por el sensor. La gráfica azul corresponde al abatimiento medido manualmente con una sonda. Al comparar los resultados de ambas gráficas se observa que ambos métodos son equivalentes respecto a los resultados y curvas obtenidas.

Las curvas están referidas al n.e. (63.245 m). El inicio de curva verde muestra el abatimiento generado en los primeros minutos del desarrollo. En ambas curvas se aprecian 4 escalones y el inicio del 5º, los cuales corresponden a las diferentes revoluciones, siendo el primer escalón para 1300 rpm y el cuarto para 1600 rpm. Sólo se aprecia el inicio de 1700 rpm ya que se decidió detener el bombeo. La Figura A1 muestra las curvas anteriores pero sin los valores erróneos registrados por el sensor. En las Figuras A1 y A2 se puede observar en la esquina

inferior de las gráficas una ligera curva azul, la cual corresponde a las medidas leídas con la sonda una vez que se detuvo el bombeo. Esto es llamado ensayo de recuperación.

Al analizar el comportamiento del abatimiento respecto al caudal no es muy evidente que cierto caudal corresponde con las revoluciones a las que se encontraba el motor, ya que éste es de combustión interna, lo cual provocó que las revoluciones variaran en ± 10 rpm provocando que no hubiera un caudal estable. Sin embargo, a grandes rasgos se observa aumento del caudal junto con las revoluciones (Figura A3).

La Figura A4 muestra los abatimientos sin error junto con la curva de caudal, esto con el objetivo de no causar una mala interpretación al analizar los datos anómalos y compararlos con los del caudal medido.

El ensayo de recuperación posterior al desarrollo muestra cómo el acuífero posee propiedades ideales para ser explotado, pues, la recuperación total se alcanzó antes de los primeros 5 minutos después de apagar el motor de la bomba. En la Figura A5, el cero corresponde al n.e. inicial (63.245 m) y los valores negativos indican la cantidad de metros de agua sobre el n.e. inicial, es decir, la última medición que se realizó la profundidad del agua desde el suelo fue de 60.935 m.