



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

REINTERPRETACIÓN DE LA ESTRATIGRAFÍA E HIDRO-ESTRATIGRAFÍA DE
LA CUENCA DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

DANIEL CRUZ GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ERIC MORALES CASIQUE

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, MX., NOVIEMBRE DE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	0
ABSTRACT	1
I. ANTECEDENTES	2
I.I Introducción	2
I.II Planteamiento del problema	4
I.III Justificación	5
I.IV Objetivos	5
II. MARCO GEOLÓGICO	6
II.I Geología de la Cuenca	6
II.I. I Geología del subsuelo	10
II.II Datos previos a la interpretación	14
II.II. I Registros Geofísicos de pozos	14
II.II. II Núcleos	19
II.II. III Muestras de canal	20
II.II. IV Datos geocronológicos	20
II.II. V Sísmica	23
III. METODOLOGÍA	25
III.I Integración de la información	25
III.II Interpretación de registros geofísicos	30
III.II. I Calculo de propiedades	30
III.II. II Calculo de propiedades (mineralogía compleja)	33
III.II. III Análisis de grupos	34
IV. RESULTADOS	35
IV.I Correlación por análisis de grupos	35
IV.II Descripción de los núcleos	36
IV.III Columnas geológicas de los pozos y mineralogía compleja	37
IV.III. I Pozo Texcoco	39
IV.III. II Pozo Tulyehualco	41
IV.III. III Pozo Mixhuca	43
IV.III. IV Pozo Roma	45
IV.III. V Pozo Copilco	48

IV.III.VI Pozo San Lorenzo Tezonco.....	50
IV.III.VII Pozo Agrícola Oriental	52
IV.III.VIII Pozo Santa Catarina	54
IV.III.IX Pozo El Mirador.....	56
IV.IV Secciones geológicas	58
IV.IV.I Heterogeneidad de las rocas	64
IV.IV.II Hidrogeología.....	68
V. Discusiones	75
V.I Porosidad y permeabilidad	75
V.II Mineralogía compleja.....	80
V.III Continuidad lateral.....	81
V.III.I Pozo Mixhuca	82
V.III.II Pozo Agrícola Oriental.....	84
V.III.III San Lorenzo Tezonco.....	85
V.III.IV Santa Catarina.....	85
V.III.V Tulyehualco.....	86
V.III.VI Roma	87
V.III.VII Mirador	88
V.III.VIII Copilco	89
V.III.IX Texcoco	89
V.V Conclusiones.....	92
REFERENCIAS	94
ANEXO 1 Cálculo de Porosidad	97
ANEXO 2 Cálculo de Permeabilidad (K).	98

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1.- Localización de los pozos Agrícola Oriental (AO), Copilco (CP), Mirador (MR), Mixhuca (MX), Roma (RM), Santa Catarina (SC), San Lorenzo Tezonco (SLT), Texcoco (TX) y Tulyehualco (TL).	4
Figura 2.- Mapa de la geología del área de estudio y zonas circundantes., tomado de Arce et al 2019.....	7
Figura 3.- Perfil realizado en la tesis de Maestría “Estudio Sismológico de Reflexión del subsuelo de la ciudad de México”. Figura tomada de Pérez-Cruz., 1988.	10
Figura 4.- Interpretación realizada en la publicación “Geología de la Cuenca de México”. Figura tomada de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1989.	11
Figura 5.-Interpretación sísmica realizada en la tesis “Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México”. Figura tomada de Unda-López., 2016....	11
Figura 6.-Interpretación de la columna del pozo SLT. Figura modificada de Mooser., 2014.	12
Figura 7.-Interpretación realizada en la publicación “Geología del Valle de México y otras regiones del país”. Figura tomada de Mooser., 2018.	13
Figura 8.-Interpretación realizada en la publicación “Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt”. Figura tomada de Arce et al., 2019.	13
Figura 9.- Clasificación de los Registros Geofísicos de Pozos. (Hernández., 2012).	15
Figura 10.- Características de los núcleos con los que cuenta el Instituto de Geología.	19
Figura 11.- Diagrama general de la metodología seguida en campo y gabinete.	27
Figura 12.- Diagrama de la metodología seguida en la primera etapa del trabajo de gabinete.	28
Figura 13.- Diagrama de la metodología seguida en la segunda etapa del trabajo de gabinete.....	29
Figura 14.- Representación de las curvas correspondientes al triple combo en RGP.	31
Figura 15.- Modelo conceptual de la interpretación por cálculo de VCL y PHIE de la primera etapa del pozo Agrícola Oriental.	32
Figura 16.- Configuración de entrada del modelo de mineralogía compleja.....	34
Figura 17.- Correlación de 4 pozos a través de análisis de grupos.	35
Figura 18.- Interpretación por mineralogía compleja de la primera etapa del pozo Agrícola Oriental.	38
Figura 19 Columna del pozo Texcoco – 1.*, IMP, 1986.	40
Figura 20.- Columna del pozo Tulyehualco. *, IMP, 1986; +, Ferrari, 2003.	42
Figura 21.- Columna del pozo Mixhuca -1. -, *, IMP, 1986; -, Arce et al, 2013 y 2015.	44
Figura 22.- Columna del pozo Roma – 1. *, IMP, 1986.	47
Figura 23.- Columna del pozo Copilco – 1.*, IMP, 1986; +, Ferrari, 2003.	49
Figura 24.- Columna del pozo San Lorenzo Tezonco. -, Arce et al, 2013 y 2015.....	51
Figura 25.- Columna del pozo Agrícola Oriental.	53
Figura 26.- Columna del pozo Santa Catarina.	55
Figura 27.- Columna del pozo El Mirador.....	57
Figura 28.- Pozos profundos usados para la construcción de secciones geológicas, Agrícola Oriental (AO), Copilco (CP), Mirador (MR), Mixhuca (MX), Roma (RM), Santa Catarina (SC), San Lorenzo Tezonco (SLT), Texcoco (TX) y Tulyehualco (TL).	58
Figura 29.- Sección geológica 1.	61
Figura 30.- Sección geológica 2.	63
Figura 31.- Correlación de unidades litológicas a través de la sísmica., Modificado de -----	65

Figura 32.- Sección geológica de los pozos Agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco.....	67
Figura 33.- Sección geológica de los pozos Agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco.....	72
Figura 34.- Sección hidrogeológica de los pozos Agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco.	74
Figura 35.- Curvas sintéticas calculadas para la porosidad.....	76
Figura 36.- Curvas sintéticas calculadas para la permeabilidad.....	77
Figura 37.- Direcciones de flujo en la sección Agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco...	79
Figura 38.- Comparación entre los pozos Agrícola Oriental (izquierda) y Mixhuca (derecha) de 1100- 1700 m de profundidad.....	80
Figura 39.- Registro geofísico del intervalo correspondiente a las cenizas (acuitardo).....	82
Figura 40.- Comportamiento característico de las cenizas (acuitardo) del pozo Mixhuca y que funciona como control para el resto de los pozos.	83
Figura 41.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Agrícola Oriental (rojo).	84
Figura 42.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Santa Catarina (rojo).	85
Figura 43.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Tulyehualco (rojo).	86
Figura 44.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Roma (rojo).	87
Figura 45.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Mirador (rojo).	88
Figura 46.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Copilco (rojo).....	89

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1.- Pozos profundos de la cuenca de México.	3
Tabla 2.- Datos de los pozos antiguos e información con la que cuenta el Instituto de Geología. ...	16
Tabla 3.- Información del pozo San Lorenzo Tezonco con la que cuenta el Instituto de Geología. .	17
Tabla 4.- Información del pozo Agrícola Oriental con la que cuenta el Instituto de Geología.	17
Tabla 5.- Información del pozo Santa Catarina con la que cuenta el IGL.....	18
Tabla 6.- Información del pozo Mirador con la que cuenta el Instituto de Geología.	18
Tabla 7.- Dataciones radiométricas de los pozos utilizados (información obtenida de Unda., 2016 y Arce et al, 2015).	21
Tabla 8.- Dataciones radiométricas de los pozos utilizados (continuación), (información obtenida de Unda., 2016 y Arce et al, 2015).	22
Tabla 9.- Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Texcoco.....	68
Tabla 10.- Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Tulyehualco.....	69
Tabla 11.- Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Mixhuca.	69
Tabla 12.- Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Copilco.	70
Tabla 13.- Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo San Lorenzo Tezonco.	70
Tabla 14.- Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Agrícola Oriental.....	70
Tabla 15.- Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Santa Catarina.	71
Tabla 16.- Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo el Mirador.	71
Tabla 17.- Comparativo entre valores de porosidad para una profundidad común.	75
Tabla 18.- Resultados de las permeabilidades a una profundidad común.	77

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Eric Morales Casique, por la confianza, amistad, dedicación y especialmente por la dirección de esta tesis.

A CONACyT, por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

Al Dr. Guillermo Pérez Cruz por su ayuda y guía.

A los Drs. Enrique Coconi Morales y José A. Hernández Espriú por sus revisiones y grandes aportaciones al momento de revisar esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte del Posgrado en Ciencias de la Tierra.

A José Luis Lezama por guiarme en todas las etapas del trabajo técnico que llevó a la terminación de esta tesis.

A todos y cada uno de los nuevos amigos que hice durante mi estancia en el posgrado, gracias a todos ellos por su amistad y confianza a lo largo de estos años, siempre llevarán un lugar en mi corazón

A mis padres y hermanos, quienes me han apoyado desde siempre.

La puntualidad más allá de llegar temprano a un lugar, lo que denota en una persona es orden, preparación, seriedad, interés y prestigio.

RESUMEN

El alto volumen de agua que requiere la Ciudad de México debido a su densidad poblacional provoca que las fuentes de abastecimiento actuales no sean suficientes para satisfacer la necesidad del vital líquido, por ello, en la última década se ha desarrollado programas de exploración que buscan conocer la estructura y composición del subsuelo de la ciudad de México e identificar zonas de interés hidrogeológico que permitan resarcir la demanda de agua que requiere la ciudad.

En este trabajo se presenta el resultado de la integración de información geofísica y geológica de los pozos profundos de la ciudad de México, estos resultados consisten en la construcción de columnas y un modelo geológico que ayuda a definir horizontes que resultan atractivos para la exploración hidrogeológica.

La falta de información a diferentes profundidades fue un punto que se puede abordar a través de diferentes métodos, como lo explica Garduño-Vergara., 2016., sin embargo, esta tesis aborda un método lineal para el cálculo de parámetros.

Puntos importantes como el nivel estático, hidrofacies, valores de parámetros hidráulicos, calidad de agua, balances hidrológicos no son abordados, pues, pertenecen a un trabajo que se realizó a la par de este y cuyos resultados por ahora no están disponibles.

El principal aporte de esta tesis radica en la presentación de columnas geológicas del subsuelo de la Ciudad de México y de su interpretación con técnicas usadas comúnmente en el ámbito petrolero, tales como la interpretación de registros geofísicos, sísmica, núcleos, muestras de canal y datos geocronológicos que sirvieron para llenar los vacíos de datos encontrados en los diferentes pozos y apoyar la interpolación entre ellos.

A diferencia de la industria petrolera, que comúnmente se desarrolla en rocas sedimentarias y utiliza una gran variedad técnicas geofísicas, en la exploración hidrológica y en particular en la Cuenca de México la interpretación se realizó en rocas volcánicas, intentado adaptar y aplicar ecuaciones de sistemas multifase a un sistema únicamente saturado con agua, alcanzado una buena interpretación dadas las limitaciones.

Como resultado de la interpretación se confirmó que el basamento de la cuenca está compuesto por calizas de Cretácico de la formación Morelos, fracturadas y con presencia de alteración hidrotermal, estas se encuentran sobre yacidas por el vulcanismo del Eoceno y Oligoceno y a su vez el Mioceno (Formación Tepoztlán) se encuentra sobreyacido por el vulcanismo de la Sierra de la Cruces, Sierra Nevada y Chichinautzin del Plioceno al Holoceno, finalmente los sedimentos lacustres.

Aunque aún no se tienen datos geocronológicos, por su posición estratigráfica y apoyados por la respuesta geofísica se definió una unidad semi impermeable que se ubica entre los 1000 y 1150 metros de profundidad, dicha unidad sobreyace a otra de mayor permeabilidad, identificada únicamente en los pozos San Lorenzo Tezonco y Santa Catarina. La unidad hidrológica aportadora no pudo ser identificada en el resto de los sitios.

ABSTRACT

The high volume of water that Mexico City requires due to its population density means that the current supply sources are not sufficient to satisfy the need for the vital liquid, therefore, in the last decade exploration programs have been developed that seek to know the structure and composition of the subsoil of Mexico City and identify areas of hydrogeological interest that allow to compensate the demand for water that the city requires.

This paper presents the result of the integration of geophysical and geological information from deep wells in Mexico City, these results consist of the construction of columns and a geological model that helps define horizons that are attractive for hydrogeological exploration.

The lack of information at different depths was a point that can be addressed through different methods, as explained by Garduño-Vergara., 2016. However, this thesis addresses a linear method for the calculation of parameters.

Important points such as the static level, hydrofacies, values of hydraulic parameters, water quality, hydrological balances are not addressed, since they belong to a work that was carried out at the same time and whose results are not available for now.

The main contribution of this thesis lies in the presentation of geological columns in the subsoil of Mexico City and their interpretation with techniques commonly used in the oil field, such as the interpretation of geophysical records, seismic, cores, channel samples and data geochronological that served to fill the data gaps found in the different wells and support the interpolation between them.

Unlike the oil industry, which commonly develops in sedimentary rocks and uses a great variety of geophysical techniques, in hydrological exploration and particularly in the Mexico Basin, the interpretation was carried out on volcanic rocks, trying to adapt and apply equations of multiphase systems to a system only saturated with water, achieved a good interpretation given the limitations.

As a result of the interpretation, it was confirmed that the basement of the basin is composed of Cretaceous limestones from the Morelos formation, fractured and with the presence of hydrothermal alteration, these are overlaid by the volcanism of the Eocene and Oligocene and in turn the Miocene (Tepoztlán Formation) is overlaid by the volcanism of the Sierra de la Cruces, Sierra Nevada and Chichinautzin from the Pliocene to the Holocene, finally the lake sediments.

Although there are still no geochronological data, due to its stratigraphic position and supported by the geophysical response, a semi-impermeable unit was defined that is located between 1000 and 1150 meters deep, this unit overlaps another with greater permeability, identified only in the wells San Lorenzo Tezonco and Santa Catarina. The contributing hydrological unit could not be identified in the rest of the sites.

I. ANTECEDENTES

I.1 Introducción

Los modelos geológicos son una representación idealizada y simplificada de la realidad, permiten identificar la morfología del depósito y tipos de relaciones (litología, alteración, fluidos, estructura, geometría, etc.). Los modelos son muy importantes pues deben describir la forma de los reservorios y volumen de estos; la heterogeneidad, permeabilidad y conectividad son los primeros parámetros cuantitativos para calcular. Para fines de esta tesis, se presentan elementos fundamentales y se eliminan los aspectos menos significativos (Instituto de Estudios Catalanes 2011, Vaca-Sánchez., 2016, Maptek., 2019).

En esta tesis se utilizó información de modelos geológicos que integra los resultados de los diferentes programas exploratorios; en 1966 se perforo el pozo Texcoco con el propósito de conocer las posibilidades de rehacer el Lago de Texcoco; el programa de 1986 a 1989 tuvo como finalidad identificar la composición geológica del subsuelo de la Ciudad de México y diseñar nueva normatividad de los procesos constructivos posteriores al sismo de 1985; el programa conformado de 2011 a 2018 tuvo como objetivo identificar y delimitar formaciones geológicas que destaquen por su permeabilidad y por la presencia de agua.

En la actualidad, la escasez de agua ha orillado a las autoridades a buscar nuevas fuentes de abastecimiento; en ese contexto, los pozos San Lorenzo Tezonco, los Agrícola Oriental 2B y 2C, Santa Catarina y el Mirador tuvieron como objetivo caracterizar formaciones hidrogeológicas profundas y conocer el potencial para extraer agua del subsuelo de cuenca.

Algunos de los estudios más importantes considerados para este trabajo fueron realizados por la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP) en 1969; posterior al terremoto de 1985 se realizaron perfiles sísmicos de refracción (Pérez-Cruz., 1988); perforaciones profundas exploratorias realizadas por PEMEX y CFE de 1986 a 1987, en 2014 COMESA reinterpretó las secciones sísmicas; los pozos perforados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Petróleos Mexicanos (PEMEX) en 2011-2012, 2016-2017 y 2018, han aportado nueva información acerca de la geología e hidrogeología en el subsuelo de la Ciudad de México (Arce et al., 2013; Morales-Casique et al., 2014; Arce et al., 2015; Morales-Casique et al., 2015; Lezama-Campos et al. 2016).

No se puede negar que la información de trabajos publicados es basta respecto a la interpretación del subsuelo de la ciudad, entre los más citados están los de De Cserna en 1988, Pérez-Cruz en 1988, Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera de 1989; Mooser, F., 1993, y la nueva información permite complementar los datos de pozos perforados en los 80's, las publicaciones que destacan en la actualidad son las de Arce et al., 2013, Arce et al., 2015, Morales-Casique et al., 2014, Morales-Casique et al., 2016, Lezama-Campos., 2016, Morales-Casique., 2018 y Arce et al., 2019.

Los detalles de los pozos profundos utilizados están en la Tabla 1, donde se observan las coordenadas, profundidad y año en que se perforo.

Pozos profundos				
Nombre	Coordenada O	Coordenada N	Profundidad (m)	Año
Texcoco	98°59'53.72''	19°27'35.88''	2060	1967
Tulyehualco	99°03'37.46"	19°16'46.95"	3000	1986
Mixhuca	99°05'12.14"	19°23'35.41"	2452	1986
Roma	99°9'25.91''	19°24'33.90''	3200	1987
Copilco	99°10'22.09''	19°18'50.09''	2258	1987
San Lorenzo Tezonco	99°05'5.10"	19°22'44.18"	2008	2011
Agrícola Oriental 2B y 2C	99°05'10.90"	19°23'43.44"	2004	2016
Santa Catarina	99°05'55.47"	19°17'45.70"	1992	2017
Mirador	99°06'0.38"	19°20'25.74"	2070	2018

Tabla 1.- Pozos profundos de la cuenca de México.

Los pozos profundos han tenido diferentes objetivos, estos han cambiado de acuerdo a cada programa de perforación y del tipo de información que se busca; los objetivos más importantes han sido, conocer la estratigrafía, comportamiento estructural y los recursos hidrogeológicos de las capas del subsuelo; conocer y asignar edad geocronológica a las capas que conforman la cuenca; identificar las diferentes propiedades petrofísicas de las rocas, mejorar el modelo sísmológico y estratigráfico de la cuenca y finalmente el conocer el subsuelo para realizar modificaciones a las normas técnicas de construcción.

La principal interpretación de los datos tuvo un objetivo geofísico por ello vale la pena destacar que los pozos poseen curvas convencionales de interés petrolero (Rayos Gamma, Resistividad somera y profunda, SP, Densidad y Sónico); los pozos Agrícola Oriental 2C, Santa Catarina y el Mirador cuentan con el registro de espectroscopia de Rayos Gamma, el cual da información precisa de los contactos entre las unidades litológicas de diferente composición; la profundidad de los perfiles fueron calibrados con núcleos y muestras de canal para reducir la incertidumbre de error ocasionada por no conocer la profundidad exacta de los datos en los pozos perforados (Lezama-Campos et al, 2016), adicionalmente se cuenta con los resultados de la reinterpretación sísmica realizada por COMESA en 2014 y que ayudara a definir la continuidad lateral de la estratigrafía del subsuelo.

El área donde se encuentran los pozos está limitada por las coordenadas 98°59'53.72'', 19°27'35.88'' y 99°10'22.09'', 19°16'46.95'', en la Figura 1 está la localización de los 9 pozos profundos perforados en la ciudad de México.

UBICACIÓN DE LOS POZOS PROFUNDOS

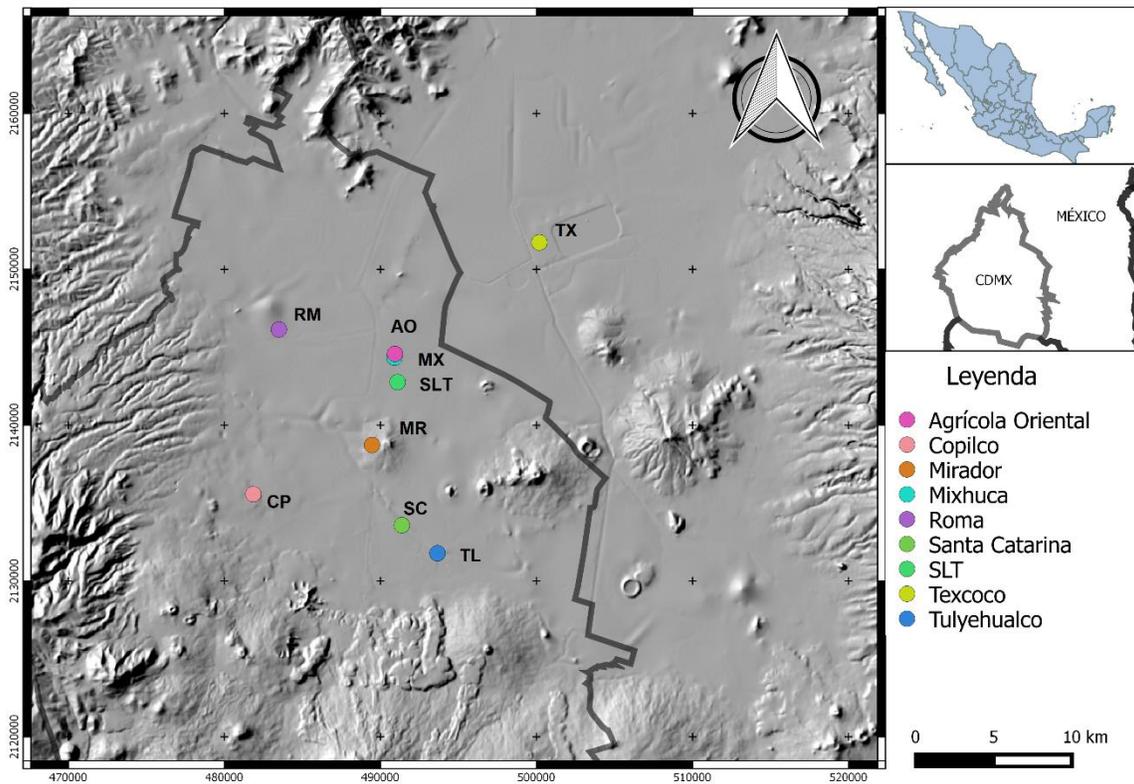


Figura 1.- Localización de los pozos Agrícola Oriental (AO), Copilco (CP), Mirador (MR), Mixhuca (MX), Roma (RM), Santa Catarina (SC), San Lorenzo Tezonco (SLT), Texcoco (TX) y Tulyehualco (TL).

Otro elemento importante utilizado en este trabajo son las edades de las diferentes unidades, que permiten correlacionar los diferentes estratos identificados en los registros, por ello se realizó una recopilación bibliográfica de fechamientos existentes en los pozos San Lorenzo Tezonco, Mixhuca, Texcoco, Tulyehualco, Texcoco, Roma y Copilco (PEMEX., 1987; Ferrari, L. et al., 2003; Arce et al., 2013 y Arce et al 2015), además, personal del IGL realizó separación de circones para determinar la edad de las rocas de los pozos Agrícola Oriental (AO), Santa Catarina (SC) y el Mirador donde destacan las dataciones por Ar-Ar, U-Pb y K-Ar.

I.II Planteamiento del problema

En la Ciudad de México existen 3 problemas principales correspondientes al agua; el primero y más estudiado, son los hundimientos, los cuales provocan graves trastornos al funcionamiento y estabilidad de construcciones de toda índole; la explotación del acuífero superior induce abatimientos piezométricos que conducen a un aumento de los esfuerzos efectivos en el subsuelo provocando deformaciones y hundimientos de magnitud excepcional; la tercera corresponde al abastecimiento de agua potable, la cual ha sido conseguida a partir de la explotación del acuífero superior de la cuenca a través de pozos profundos; debido al alto costo de otras alternativas una opción es que el abastecimiento continúe de fuentes locales cada vez más profundas (Auvinet., 2017).

I.III Justificación

La reciente campaña de perforación de pozos profundos ha dado como resultado nuevos horizontes hidrogeológicamente importantes que se encuentran en rocas volcánicas; por ello, el conocer con más detalle el subsuelo, permitirá describir con mayor precisión la arquitectura estructural y formación de la cuenca, además, la identificación de la continuidad lateral y forma permitirá en un futuro construir modelos de simulación de flujo que incluyan las formaciones profundas.

En trabajos anteriores, se han interpretado los diferentes pozos, algunos de ellos por separado, lo que ha dificultado tener una conceptualización concisa de la cuenca, por ello, aquí se desea realizar una integración de la información existente, así como de los resultados de los pozos recientemente perforados, lo cual, permitirá realizar una correlación de los pozos antiguos y recientes a través de geología y geofísica.

I.IV Objetivos

Reinterpretar la estratigrafía de la cuenca de México, así como estimar parámetros hidrogeológicos por medio de la correlación y el análisis de registros geofísicos de pozos profundos de las décadas de 1960, 1980 y 2010

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Correlacionar la información petrofísica de 9 pozos profundos, secciones sísmicas y datos geocronológicos reportados en la bibliografía.
- Construir columnas geológicas de los pozos recientemente perforados e integrarlas para generar una sección geológica.
- Determinar las unidades hidrogeológicas de la zona de estudio.
- Identificar la continuidad lateral 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).

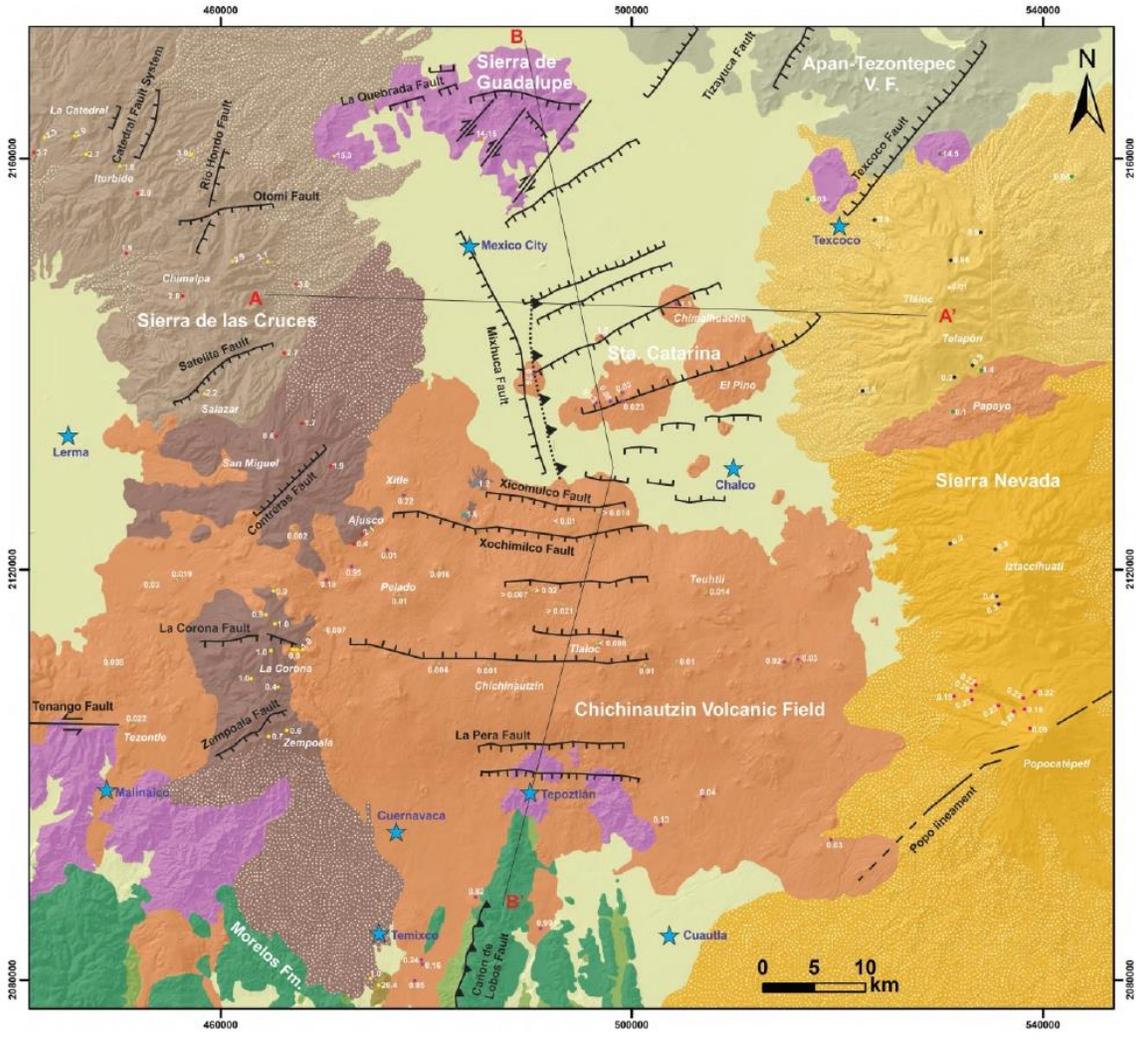
II. MARCO GEOLÓGICO

II.1 Geología de la Cuenca

La cuenca de México es una formación endorreica perteneciente a la sección central de la región fisiográfica conocida como cinturón volcánico Trans-Mexicano, (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), el cual es considerado como un arco volcánico continental con una edad del Mioceno al reciente (Ferrari L, et al., 1999; García-Palomo et al., 2008); su origen está ligado con la subducción de la placa de Cocos y de Rivera; esta región está caracterizada por numerosos volcanes monogenéticos, cráteres de explosión, complejos de calderas, flujos de lava y productos piroclásticos (Unda L., 2016).

Los eventos volcánicos que limitan el área de estudio son: la Sierra Chichinautzin al sur con edades que van de 1.2 a 0.9 Ma.; la Sierra Nevada donde su edad varía de 1.8 ma. al actual y la Santa Catarina al oriente; la sierra de las Cruces al poniente con edades que varían de 3.7 a 07 Ma. (García-Palomo et al., 2008; Arce et al., 2008), al norte en la Sierra de Guadalupe se reportan fechamientos del orden de 14 – 15 Ma. (González-Torres, et al, 2015; Lugo-Hubp, et al., 1996).

Las unidades que, si bien no afloran en la cuenca, si se encuentran en los alrededores, son la Formación Tepoztlán del Mioceno, Formación Mezcala y Formación Morelos del Cretácico Superior e Inferior. El trabajo más reciente del cual se puede obtener una visualización de la geología del área de estudio y de sus alrededores corresponde a Arce et al en 2019., en la Figura 2 se pueden observar las unidades que arriba se mencionan.



Leyenda

Explanation	Stratigraphic unit	Age (Ma)
Cenozoico	Sierra Nevada	Lacustrine
	Chichinautzin	Recent
		1.2-Recent
	Sierra de las Cruces volcanic sequence	3.7
	Miocene volcanism (Tepoztlán Formation)	22.8-5
	Oligocene volcanism	25-30
Eocene	Balsas Group	34
Mesozoico	Maestrichtian	
	Campanian	
	Santonian	Mexcala Formation
	Coniacian	
	Turonian	
	Cenomanian	
	Albian	Morelos Formation

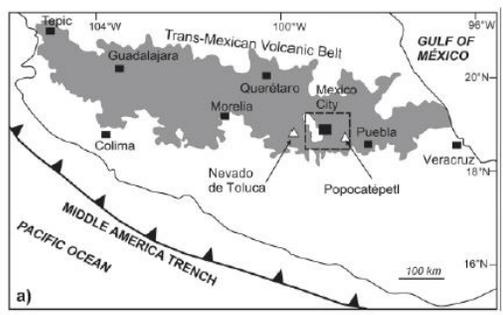
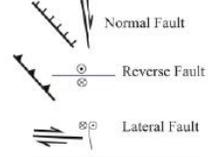


Figura 2.- Mapa de la geología del área de estudio y zonas circundantes., tomado de Arce et al 2019.

La descripción del área de estudio está basada en la clasificación obtenida a partir del pozo San Lorenzo Tezonco la cual fue realizada por Arce et al en 2015., y complementada con la bibliografía (De Cserna., 1988; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1989; González-Torres et al., 2015); la base de la cuenca está formada por rocas carbonatadas, la parte intermedia caracterizada por rocas volcánicas de diferente composición y tipo, las cuales podrían correlacionarse con la clasificación de Pérez-Cruz (1988) donde la Formación Tepoztlán estaría dentro de la unidad volcánica inferior caracterizada por productos volcánicos efusivos y piroclásticos; además, la unidad volcánica superior formada por rocas piroclásticas y pocas efusivas que puede ser correlacionada con las sierras de Chichinautzin y las Cruces; finalmente la cima está conformada por sedimentos que deben de corresponder con la unidad de depósitos lacustres y fluviales (Pérez-Cruz., 1988).

Cretácico

Las rocas más antiguas reportadas en los estudios realizados en la cuenca pertenecen al Cretácico, correspondientes a la formación Morelos y Mezcala, la cual sufrió un plegamiento que fue seguido por un periodo de erosión (De Cserna., 1987; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1989).

La Formación Morelos está compuesta por calizas marinas gruesas del Albiano-Cenomaniano y aflora en el sur de la Sierra Chichinautzin, la unidad es alcanzada por los pozos Mixhuca y Tulyehualco a los 1500 y 1800 m de profundidad respectivamente y llega a alcanzar hasta 900 m de espesor; a esta formación se superpone la Mezcala, la cual es más joven y se encuentra ahí debido al empuje que es observado en el Cañón de los Lobos. (Fries, C., 1960, Pérez-Cruz., 1988; González, Torres et al., 2015; Pemex., 1988; Arce et al., 2019).

La Formación Mezcala se depositó en aguas someras durante el Coniaciano-Campaniano constituido por calizas arcillosas de color gris con presencia de foraminíferos planctónicos, con estratificación rítmica que gradualmente se convierte a lutitas, limolitas y areniscas, esta unidad es identificada en el pozo Mixhuca a los 1720 m de Prof., el espesor máximo corresponde a los 1500 m (PEMEX 1988; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1989 Arce et al., 2013; Unda., 2016;).

Eoceno (Grupo Balsas)

Según De Cserna (1988), el Grupo Balsas corresponde a una molasa continental post-orogénica Laramide, la cual descansa discordantemente sobre carbonatos del Cretácico y está compuesta por depósitos continentales. Aflora al norte de Apaxco en el estado de Hidalgo y al sur del área de estudio, está constituido por un conglomerado oligomítico de calizas compactas con matriz limo-arcillosa, de estratificación masiva y espesor cercano a los 500 m, además de tener interestratificación de yeso y caliza lacustre lenticular con presencia de derrames lávicos basálticos con intercalaciones de riolita (Fries, C., 1960; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1988).

Oligoceno (Depósitos volcánicos)

Las rocas de las que se compone esta unidad van de andesita a riolita fracturadas, erosionadas correspondientes a la riolita Tilzapotla y aflora en la Sierra de Xochitepec, Morelos. El espesor que se tiene registrado va de 390 a 1750 m (Fries, C., 1960). Esta unidad, en los pozos Copilco, Mixhuca y Roma se identifica como derrames lávicos (PEMEX., 1988). Esta unidad es identificada radiométricamente en el pozo Texcoco a los 950 m (25.7 Ma.), en el Mixhuca a los 1281 m (29 Ma.) y en el Roma a los 2207 (25.9 Ma.). (PEMEX., 1988; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1988).

Mioceno (Formación Tepoztlán y Sierra Guadalupe)

La Formación Tepoztlán consiste en una secuencia de lavas afaníticas y de depósitos piroclásticos de composición diversa; secuencias de flujos de lava porfídica, de color gris oscuro; además de flujos de lava como andesita basáltica, andesita y riolita que se pueden identificar al sur de la Ciudad de México con espesores de hasta 800 m y se encuentran mezcladas con depósitos fluviales correspondiente a los primeros episodios de la FVTM (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1988). La Sierra de Guadalupe está constituida por andesita, traquiandesitas de origen eruptivo explosivo y lahares que representan el final de la actividad volcánica, en cambio, los depósitos como pómez, ceniza y arena volcánica corresponden a etapas iniciales de las erupciones (Lugo-Hubp, et al., 1996).

En el pozo Roma la cima se encuentra a los 633 m, en San Lorenzo Tezonco, Agrícola Oriental, Santa Catarina y el Mirador la Formación Tepoztlán no puede ser definida por falta de edades a varias profundidades, (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1988; García Palomo., 2002; González Torres., 2015; Arce et al., 2013, 2015, Morales-Casique et al., 2018).

Plioceno-Pleistoceno (Sierra de las Cruces)

La Sierra de las Cruces sobreyace con discordancia erosional y alcanza hasta 650m de espesor al mioceno; esta se encuentra en los pozos Roma y Copilco (PEMEX., 1988), esta formación está compuesta por lavas de color gris claro de textura porfídica y depósitos piroclásticos con lahares entrelazados y escombros de composición que varía de andesítica a dacítica. Los depósitos ignimbríticos se encuentran parcialmente alterados a arcilla con presencia de bloques de composición riolítica (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1988; García Palomo., 2002; Arce et al., 2013; Arce et al., 2015).

Holoceno (Sierra Nevada, Sierra Chichinautzin y Depósitos lacustres)

La sierra Nevada se encuentra ubicada al oriente de la Ciudad de México y está compuesta por los volcanes Tláloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl y representan la migración del volcanismo del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, la composición química varía de andesita a riolita y dacita, las estructuras principales están conformadas por una intercalación de depósitos piroclásticos, epiclásticos y depósitos de avalancha de escombros que llenan la parte oriental de la cuenca de México (Macias et al., 2012. Siebe et al.,1995).

La Sierra Chichinautzin

Debido a su variabilidad composicional para la Sierra Chichinautzin se utiliza una descripción cercana a la zona de estudio donde se encuentran los paquetes correspondientes a la Sierra de Santa Catarina y Cerro de la Estrella que consisten en lavas de color gris oscuro. La bibliografía correspondiente a esta zona, es escasa, la Sierra de Santa Catarina está conformada por estructuras volcánicas alineadas de E-O (Lugo-Hubp et al., 1994).,el cerro de la estrella se define como un volcán escudo por su forma radial, coronada por un cono de escorias y caracterizado por andesitas con textura porfídica (González Torres., 2015; García Palomo., 2002; Arce et al., 2013, 2015), la Sierra Chichinautzin es una de varias sierras caracterizadas por volcanes monogenéticos, la Sierra Chichinautzin tiene una dirección preferencial de E-O de composición variada que va desde andesítica basáltica y dacítica de color gris oscuro (Arce et al., 2013, 2015).

Depósitos Lacustres

El elemento más superficial corresponde a los sedimentos lacustres con componentes epiclásticos (limos y arcillas) de color amarillo claro e intercalados con capas volcánicas, el cual incluye sedimentos fluviales y ostrácodos en varios niveles donde las edades oscilan entre los 10 y los 220 mil años distribuidos en lugares como Texcoco, Chalco y puntos de la Ciudad (Pérez-Cruz., 1988, Arce en 2013, 2015).

La Figura 2 muestra las fallas que se encuentran en la Cuenca de México muestran orientaciones preferenciales; E-W en la falla normal Xochimilco cuyo bloque caído esta al norte (García-Palomo et al, 2008), NE-SW donde está el graben Santa Catarina (Arce et al, 2013) y la falla Mixhuca cuyo bloque caído corresponde al segmento poniente (Pérez-Cruz, 1988). La perforación de los pozos ha permitido inferir que el subsuelo de cuenca está constituido por un amplio sistema de pilares y bloques escalonados cuyo basamento está formado por secuencias sedimentarias del Mesozoico.

II.1.1 Geología del subsuelo

A lo largo de los años, se han realizado varias interpretaciones del subsuelo de la cuenca, en este apartado se presentarán las que se consideran más importantes y que fueron utilizadas como base para este trabajo resaltando la interpretación realizada por cada autor en su momento.

La Figura 3 muestra un perfil gravimétrico que fue presentado por Pérez-Cruz., 1988., en dicho estudio se explica que la forma está controlada por las calizas y los sedimentos lacustres, las discontinuidades presentes están relacionados con la Falla Mixhuca y se propone una división de 4 unidades: U. arcillas lacustres, U. Volcánica Superior, U. Volcánica Inferior y Calizas del Cretácico.

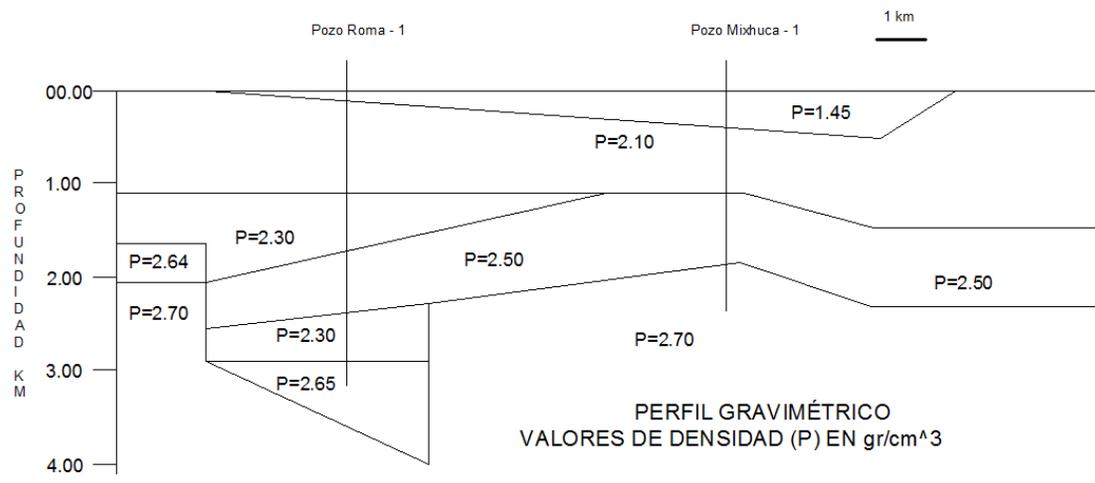


Figura 3.- Perfil realizado en la tesis de Maestría "Estudio Sismológico de Reflexión del subsuelo de la ciudad de México".
Figura tomada de Pérez-Cruz., 1988.

En 1989 Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera concluyeron que las rocas marinas del Cretácico sufrieron un periodo de levantamiento que generó erosión y se presentó acumulación de anhidrita, caliza dolomitizada de ambiente de plataforma y calizas profundas. Durante el Eoceno-Oligoceno se presentó sedimentación clástica (molasa) y erupciones fisurales básicas alcalinas, del Oligoceno-Mioceno se encuentran erupciones calci-alcalinas, acompañados de hiatos relacionados con la generación del Arco Volcánico Trans-mexicano, finalmente se encuentra la sedimentación clástica

aluvial del Plio-cuaternario y la formación endorreica de la cuenca ocasionada por la Sierra Chichinautzin. La Figura 4 muestra la interpretación del modelo geológico.

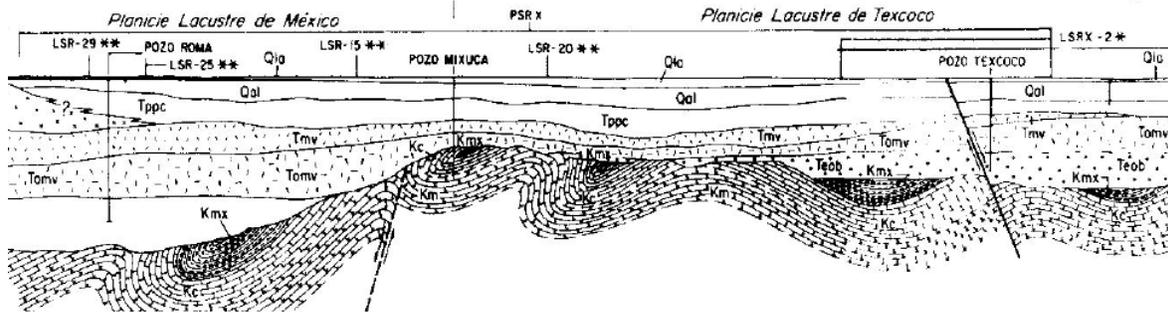


Figura 4.- Interpretación realizada en la publicación “Geología de la Cuenca de México”. Figura tomada de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1989.

Las columnas geológicas realizadas por Unda-López., 2016., permitieron elaborar un modelo geológico que complementa los modelos previos; como resultado se obtuvo una la definición de unidades con mayor resolución, los datos geocronológicos ayudaron a definir límites cronoestratigráficos.

La malla sísmica permitió definir 6 unidades descritas como UC, UV1, UV2, UV3, UV4, UV5 y UA, que aunado a los datos geocronológicos ayudan a identificar la variabilidad lateral de los depósitos del área; la correlación permitió constatar una gran falla que corre de norte a sur en la cuenca que afecta la parte superior del Cretácico hasta el límite estratigráfico de 5 Ma. correspondiente a la falla Mixhuca. La Figura 5 muestra una de las secciones generadas en la tesis de Unda-López de 2016.

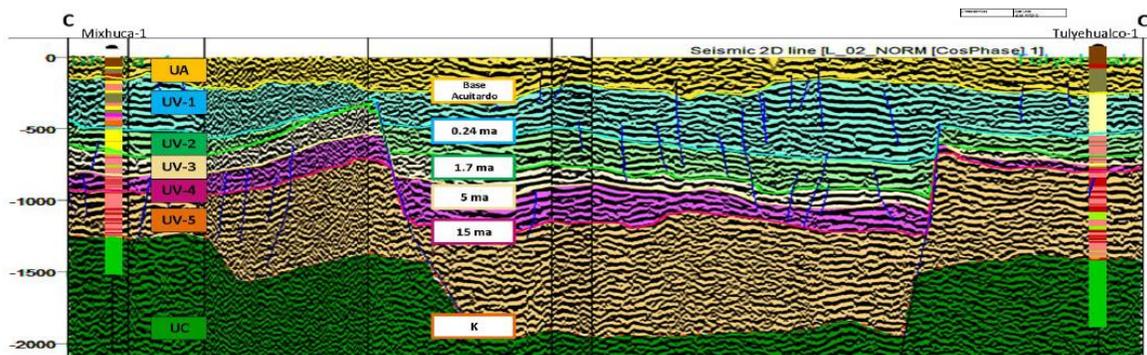


Figura 5.-Interpretación sísmica realizada en la tesis “Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México”. Figura tomada de Unda-López., 2016.

La Figura 6 muestra la interpretación de la columna del pozo San Lorenzo Tezonco tomado de Mooser., 2014., donde se describen 7 formaciones, mientras que la Figura 7 muestra un modelo geológico realizado por Mooser., 2018., en estos esquemas se destaca que una de las unidades importantes es la Mooser identifica como “Formación Taxhimay” que funciona como división entre los acuíferos superiores y el profundo; sin embargo vale la pena recalcar que a esta unidad no se le asigna una edad específica, se asume un espesor cercano a los 380 m y se acuña al norte debajo de la Sierra de Guadalupe y al sur por debajo de la Sierra Chichinautzin.

Litología

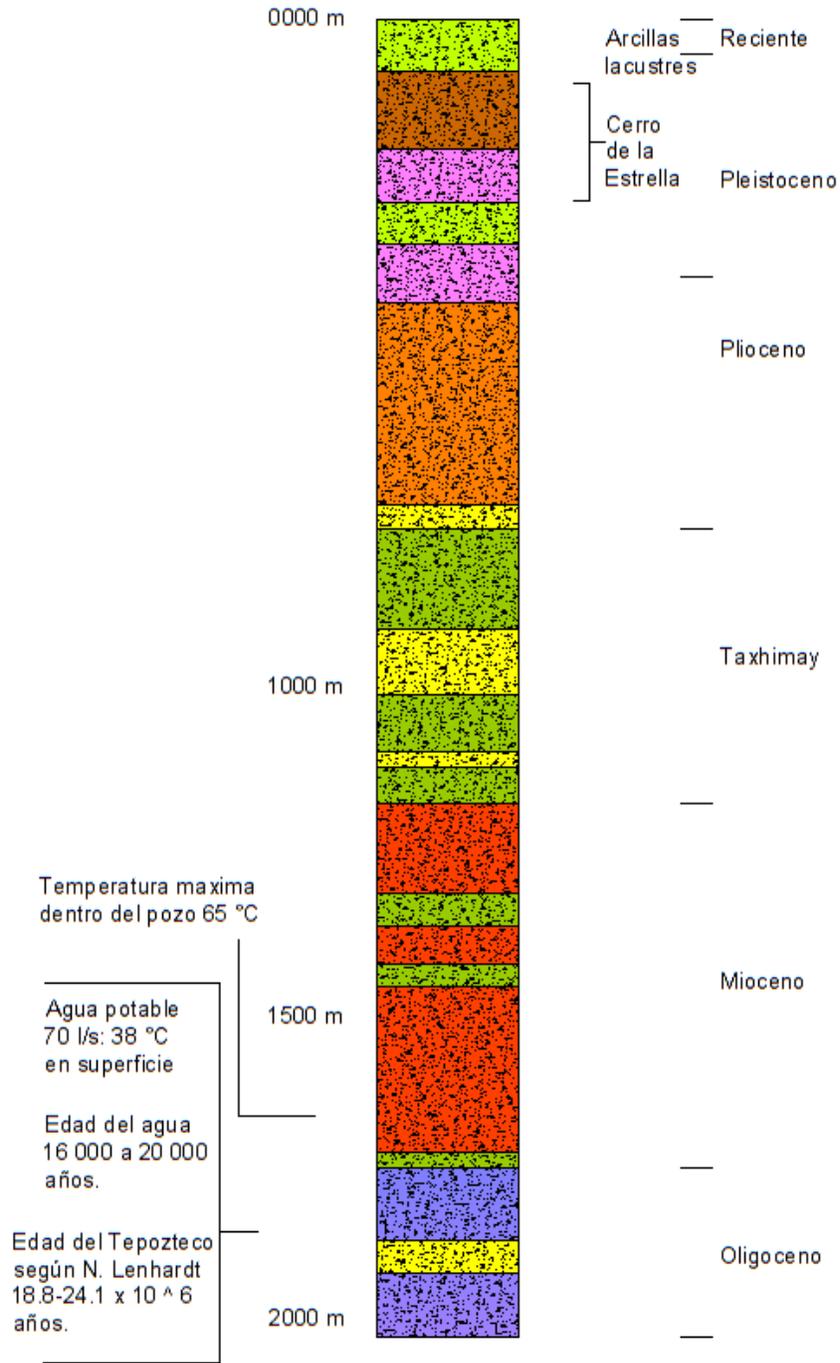


Figura 6.-Interpretación de la columna del pozo SLT. Figura modificada de Mooser., 2014.

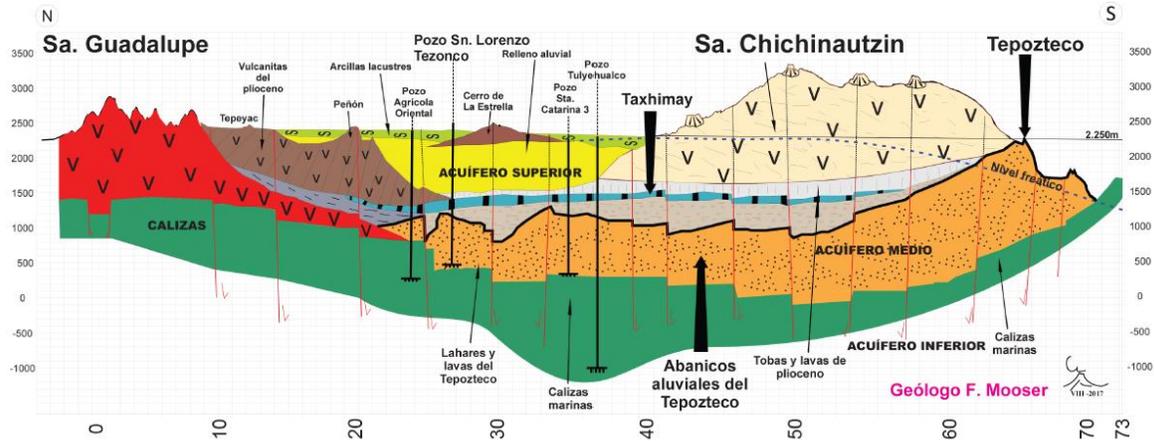


Figura 7.-Interpretación realizada en la publicación “Geología del Valle de México y otras regiones del país”. Figura tomada de Mooser., 2018.

Uno de los últimos trabajos publicados corresponde a Arce et al., 2019., donde se hace una unificación de datos estructurales, información geocronológica, información estratigráfica y complementada con datos nuevos que permiten correlacionar los pozos profundos que se encuentran en el Valle de México. Una de las secciones presentadas se encuentra en la Figura 8.

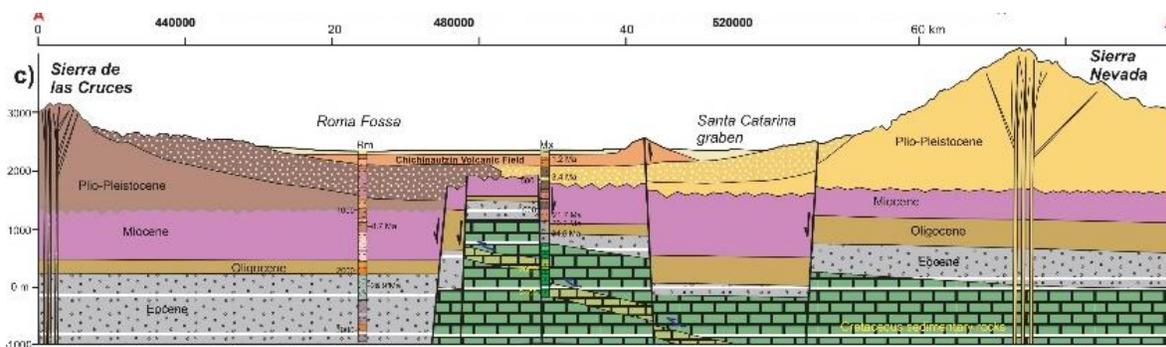


Figura 8.-Interpretación realizada en la publicación “Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt”. Figura tomada de Arce et al., 2019.

Los modelos presentados con anterioridad tienen muchas similitudes respecto a los contactos, fallas y espesores de las unidades. La mayor similitud entre los modelos se basa en la clasificación que hace Pérez-Cruz en 1986, donde divide paquetes según su densidad; trabajos posteriores como el de Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera de 1989 integra información geológica (litología, geometría y estructuras), en 2016, Unda-López., identificó unidades a través de la respuesta sísmica donde cada paquete fue delimitado por los datos geocronológicos publicados hasta esa fecha; Mooser.F., en 2018, propuso un modelo en el que resalta un bloque al que denominó ‘Taxhimay’ el cual divide al acuífero somero del profundo, finalmente Arce et al., en 2019 realizó una división de las unidades según datos geocronológicos, estructurales y litológicos.

El aporte de esta tesis radica en la unificación de los diferentes modelos presentados, los cuales permiten unificar e identificar la continuidad lateral de las diferentes capas, con la información de pozos profundos actuales se busca generar nuevas columnas geológicas que llenen los vacíos de información en las secciones que ya existen. La nueva información generada, permite asumir la continuidad de las rocas, la profundidad de los acuíferos recién encontrados y el comportamiento cualitativo de la capa semipermeable que divide al acuífero somero del profundo, sin embargo, abre nuevas incógnitas, como, cual es el alcance del acuífero profundo (espesor y superficie), las capas de verdad son continuas a lo largo del subsuelo, estos nuevos cuestionamientos no serán respondidos por ahora, pues requieren de otro tipo de análisis e interpretación que no se verán aquí.

II.II Datos previos a la interpretación

II.II. I Registros Geofísicos de pozos

Los registros geofísicos son la representación gráfica de las propiedades físicas y químicas de las formaciones cortadas en el pozo en función de la profundidad y son importantes en la exploración petrolera, minera e hidrogeológica, pues, el análisis cualitativo, cuantitativo e interpretación de las curvas disponibles permiten elegir juegos que brindan información de los cambios litológicos y de las características físicas de las unidades (Schlumberger., 1989).

En registros geofísicos es de vital importancia las metodologías de procesamiento de datos para interpretar resultados a través de diferentes procesos matemáticos y así mejorar la calidad y reducir el tiempo de obtención de estos (Alarcón Martínez M., 2005).

Los registros de pozo utilizados contienen información que varía de acuerdo con las necesidades del momento en que fueron tomados, para cumplir los objetivos de esta tesis los registros utilizados son los convencionales (GR, RXO, RT) pues son con los que se cuenta en la mayoría de los pozos; además, este tipo de curvas ha permitido visualizar cambios respecto a las unidades que integran el subsuelo, permitiendo tener una mejor resolución de la información recabada.

La finalidad de cualquier metodología aplicada a registros geofísicos de pozos es la obtención de parámetros y condiciones del pozo, para evaluar la rentabilidad en caso de la explotación de sus recursos o conjuntarlo a un modelo petrofísico y apoyarlo de información geológica y geofísica de superficie. Para aprovechar los diferentes métodos es necesario adaptar sus características, elementos y operaciones para que se trabaje con la información de los registros y aplicarles un procesamiento, sin importar que algunos de los métodos se desarrollaran con otros fines (Garduño Vergara J., 2016). La clasificación general de los registros geofísicos de pozo se muestra en la Figura 9.

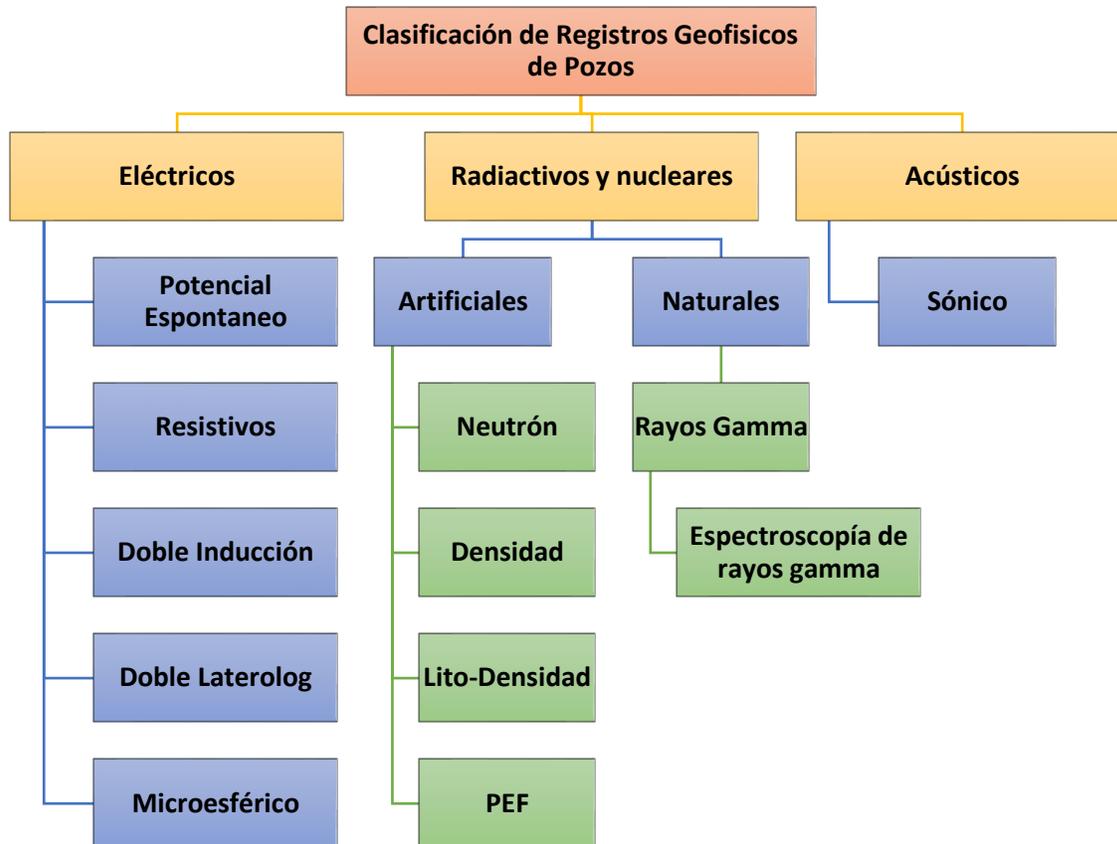


Figura 9.- Clasificación de los Registros Geofísicos de Pozos. (Hernández., 2012).

Aquí se mencionará los diferentes tipos de registros (convencionales y no convencionales) utilizados en los pozos profundos ubicados en el área de estudio, haciendo énfasis en la propiedad física que mide en la roca y de las curvas que se obtienen de cada uno de ellos (Padilla., 2010; Escobar., 2011).

- Registros ATI
 - Herramienta inductiva de imágenes, mide la conductividad de la formación y determina la resistividad en forma más precisa para el cálculo de porosidad y saturación de la formación.
- Registro CNL
 - Herramienta de neutrón compensado, sirve para determinar la porosidad de cada formación en un hueco entubado, midiendo la densidad de átomos de hidrogeno de la cual se deriva la porosidad.
- Registro DSI
 - Herramienta Acústica Dipolar de Cizallamiento que sirve para medir los tiempos compresionales y de corte en forma simultánea y determinar las características anisotrópicas de la formación.
- Registro BHC
 - Herramienta de Sistema sónico de porosidad, que mide los impulsos sónicos y un receptor capta las ondas acústicas de formación.
- Registro DLL

- Herramienta doble laterolog que realiza mediciones profundas y someras y tienen como objetivo medir la resistividad de la zona lavada zona intermedia y de la zona virgen.

Los registros geofísicos de pozo fueron adquiridos por personal de PEMEX y la SHCP durante las diferentes etapas de perforación y los datos con los que cuentan los pozos perforados el siglo pasado son: Texcoco con un perfil que va de 148.70-2060.87 m, donde se encuentran Rayos Gamma, Resistividades y Porosidad Neutrón; el Tulyehualco tiene las curvas de Densidad de 625.00-1894.94 m, Porosidad neutrón de 65.00-2999.84, Caliper de 625.00-2099 m y Rayos Gamma de 101.40-2064.84; el Mixhuca tiene el registro Caliper, Acústico, Resistivos, Porosidad Neutrón, Densidad y Rayos Gamma; el pozo Roma posee los perfiles de Rayos Gamma, Acústico, Resistivos, Porosidad del registro Acústico; finalmente del pozo Copilco, solo se cuenta con el informe de perforación.

Del pozo Agrícola Oriental 2B se obtuvieron tres etapas: (1) de 697.00 a 1151.00 m, (2) de 1093.00 a 1567.00 m y (3) de 1570-2010 m. Todas incluyeron Litodensidad (LDL), Neutrón Compensado (CNL), Sónico Dipolar (DSI) y Rayos Gamma (GR). Adicionalmente el (1) y el (3) incluyeron Arreglo Inductivo (AIT), mientras que el (2) incluyó Arreglo Resistivo (DLL). Del pozo Agrícola Oriental 2C se adquirió un registro de 1093.00 a 1567.00 m de profundidad que incluyó Arreglo Inductivo (AIT), Potencial Natural (SP), Rayos Gamma (GR) y Espectroscopia (NGT). Del pozo Santa Catarina se obtuvieron curvas en 2 etapas: (1) de 510.8448 a 1009.4976 m y (2) 1060.0944 a 1773.4788 m, donde se obtuvieron los registros de: Arreglo Inductivo (AIT), Espectroscopia de Rayos Gamma (NGC), Potencial Natural solo en la etapa (1). Finalmente, el pozo El Mirador tuvo 3 etapas: (1) de 471.52-1046.98 y (2) de 1006.29-1755.64 m donde se obtuvieron los registros: Arreglo Inductivo (AIT), Sónico Dipolar (DSI), Litodensidad (LDL) y Espectroscopia de Rayos Gamma (HNGL) (Morales-Casique.,2016).

A manera de resumen se presentan las Tablas de 2 – 6 donde se muestra la información con la que cuenta cada uno de los pozos estudiados.

POZOS		TEXCOCO	TULYE.	MIXHUCA	ROMA	COPILCO	
	PROPIEDAD	INTERVALO					
		148-260	VARIOS	0-2456	999-2452	VARIOS	
RGP	GR	X	101 – 2064	X	X	800–1481	1975-2250
	SP						
	RXO	X	101 – 1895	X	X	5–2250	
	RT	X	101 – 1895	X	X	100–1480	
	CALIPER		625 – 2099	X			
	ACUSTICO			X		5–2250	
	NPHI	X	65 – 2999		X		
	RHOZ		625 – 1894	X		102–796	1975-2250
	HTHO						
	HURA						
	HKF						

Tabla 2.-Datos de los pozos antiguos e información con la que cuenta el Instituto de Geología.

POZO		SLT		
	PROPIEDAD	INTERVALO (M)		
		0 – 500	500 – 998	1140 – 1640
RGP	GR	X	X	X
	SP	X	X	X
	RXO	X	X	X
	RT	X	X	X
	CALIPER			
	ACUSTICO			
	NPHI			
	RHOZ			
	HTHO			
	HURA			
	HFK			
	MUESTRAS DE CANAL	@ 10 M		
	@ 20 M			
NÚCLEOS				

Tabla 3.- Información del pozo San Lorenzo Tezonco con la que cuenta el Instituto de Geología.

POZO		AO		
	PROPIEDAD	INTERVALO (M)		
		697 – 1151	1093 - 1567	1570 – 2010
RGP	GR	X	X	X
	SP			
	RXO	X	X	X
	RT	X	X	X
	CALIPER	X	X	X
	ACUSTICO	X	X	X
	NPHI		X	
	RHOZ	X	X	X
	HTHO		1100 – 1560	
	HURA		1100 – 1560	
	HFK		1100 – 1560	
	MUESTRAS DE CANAL	@ 10 M		920 – 1560
	@ 20 M		500 – 2000	
NÚCLEOS		803 – 844.15	1550 – 1559	1950 – 1954
NÚCLEOS		900 – 918	1130 – 1139	

Tabla 4.- Información del pozo Agrícola Oriental con la que cuenta el Instituto de Geología.

POZO		SC	
	PROPIEDAD	INTERVALO (M)	
		510 – 1009	1060 – 1773
RGP	GR	X	X
	SP		
	RXO	X	X
	RT	X	X
	CALIPER		
	ACUSTICO		
	NPHI		
	RHOZ		
	HTHO	X	X
	HURA	X	X
	HFK	X	X
	MUESTRAS DE CANAL @ 10 M		
MUESTRAS DE CANAL @ 20 M		547 – 1008	
NÚCLEOS		966 – 969	1550 – 1559
NÚCLEOS			1900 – 1909

Tabla 5.- Información del pozo Santa Catarina con la que cuenta el IGL.

POZO		MIRADOR	
	PROPIEDAD	INTERVALO (M)	
		471 – 1046	1006 – 1755
RGP	GR	X	X
	SP	X	X
	RXO	X	X
	RT	X	X
	CALIPER	X	
	ACUSTICO	X	
	NPHI		
	RHOZ	X	
	HTHO		X
	HURA		X
	HFK		X
	MUESTRAS DE CANAL @ 10 M		X
MUESTRAS DE CANAL @ 20 M			
NÚCLEOS			1060.6 – 1062
NÚCLEOS			1971.9 – 1978

Tabla 6.- Información del pozo Mirador con la que cuenta el Instituto de Geología.

II.II. II Núcleos

El área de estudio se encuentra en un ambiente volcánico el cual está conformado por diferentes tipos de roca ígnea dependiendo del producto eruptivo, deposición, energía eruptiva, propiedades del magma, frecuencia eruptiva, paleogeografía y la subsecuente alteración; la arquitectura formacional puede dividirse dependiendo de la escala, edificio volcánico, litología y litofacies, en conjunto, la caracterización petrológica y petrofísica son los factores imprescindibles en la interpretación en este tipo de rocas (Qiquan R., 2014).

Los núcleos de los diferentes pozos fueron proporcionados al Instituto de Geología por el SACMEX y CONAGUA, estos recibieron una limpieza y tratamiento especializado (Hernández- Bernal., 2000), por personal del Instituto de Geología

Durante las perforaciones de los primeros pozos se obtuvieron diversos núcleos, sin embargo, los informes técnicos no están disponibles, lo cual limita la cantidad y calidad de los datos. Además, la interpretación de núcleos se ha realizado por diferentes investigadores lo cual no ha permitido tener un registro unificado de las interpretaciones, generando así variaciones en las correlaciones.

Las principales características de los núcleos con los que cuenta el Instituto de Geología se ven en la Figura 10.



Figura 10.- Características de los núcleos con los que cuenta el Instituto de Geología.

II.II. III Muestras de canal

Durante la perforación de los pozos San Lorenzo Tezonco, Agrícola Oriental 2B y 2C, Santa Catarina y Mirador se realizó un proceso de muestreo continuo sobre los recortes, producto de la perforación, el muestreo, estuvo a cargo de SACMEX en los 3 primeros pozos y CONAGUA en el último, estos elementos son de los más importantes con los que se contó, ya que las muestras otorgan valiosa información acerca de las características de las formaciones y permiten una interpretación cualitativa de la columna geológica del sitio.

Las muestras fueron entregadas en frascos de 350 ml por la supervisión en turno al Instituto de Geología a lo largo de las diferentes etapas de perforación tal como fueron colectadas en el sitio (contenido de agua, lodo y obturante), en el Instituto de Geología personal capacitado les realizó un tratamiento de lavado y secado para el posterior análisis (Morales-Casique., 2018).

Para facilitar la descripción, los recortes fueron colocados en canaletas divididas en secciones de acuerdo con su profundidad y realizando una descripción cualitativa, principalmente buscando cambios de coloración o de minerales constituyentes de los recortes para finalmente correlacionar las canaletas de los diferentes pozos e identificar la lateralidad de las unidades interesantes (Morales-Casique et al., 2018).

II.II. IV Datos geocronológicos

Son utilizados para calcular la edad de eventos con bastante precisión en millones de años; en este trabajo la información se obtuvo a partir de artículos y tesis en los cuales se presenta la información correspondiente a los resultados obtenidos a lo largo de diferentes estudios geocronológicos.

Los métodos radiométricos que se han realizado para la datación son:

- a) Edades por K/Ar, IMP, 1986.
- b) Edades por Ar/Ar, Ferrari, L., 2003.
- c) Edades por Ar/Ar, Arce, JL., et al., 2013.
- d) Edades por U/Pb, Arce, JL., et al., 2015.

Las edades son de utilidad para confirmar la posición estratigráfica en el subsuelo de la Ciudad de México, de esta manera se complementa y asigna una edad a los eventos ocurridos en el área estudiada.

El método K-Ar determina el tiempo a partir del cual el mineral se ha enfriado suficientemente para que el Ar radiogénico no se difunda fuera de los cristales. Las principales limitaciones de este método se deben a los diferentes grados de retención de los minerales. Cuando la edad obtenida es menor que la verdadera se ha producido pérdida de Ar. Esta pérdida generalmente se debe a procesos de recristalización, calentamiento o alteración. Ciertas rocas y minerales pueden contener Ar heredado en cuyo caso las edades son mayores a las reales. La diferencia respecto al método Ar-Ar es que aquí, se irradia la muestra de manera tal que el K39 se transforma en Ar39. De esta forma se pueden medir ambos isótopos en un espectrómetro de masas, lo que redundará en una mayor precisión y permite detectar si la muestra ha tenido una pérdida de Ar (edad más joven de la real) o si tiene un exceso de Ar (edad más vieja), cosa que no se puede hacer con el método K-Ar

tradicional donde el gas con el Ar40 se mide en una sola fusión (INGEIS, Instituto de Geocronología y Geología Isotópica, 1973).

La determinación de a edad por uranio-plomo se realiza a menudo en el mineral de zircón. El zircón tiene una temperatura muy alta de cierre, es resistente a la intemperie mecánica y es muy inerte químicamente. Una de sus grandes ventajas es que cualquier muestra ofrece dos relojes, uno basado en la descomposición del uranio-235 que pasa a plomo 207 con una vida media de alrededor de 700 millones de años, y el segundo que se basa en la descomposición del uranio-238 para dirigir a plomo-206 con una vida media de unos 4,5 millones de años, proporcionando una verificación cruzada incorporada que permite determinar con precisión la edad de la muestra, aunque parte del plomo se ha perdido. (Oxford University Press. 1999).

Los diferentes métodos de datación permiten tener edades absolutas de los eventos en la cuenca, por ello, el conocer estos datos permite asignar la edad de formación del evento. El avance de los métodos radiométricos de U–Pb ha permitido tener errores de hasta 2-2.5 Ma.; sin embargo, el método más utilizado en estos pozos es el de Ar–Ar pues posee mayor precisión respecto al de K–Ar. (Unda., 2016).

En las Tabla 7 y 8 se muestra el compendio de datos referentes a los fechamientos radiométricos de los pozos utilizados en este trabajo, se observa la profundidad, el tipo método de datación y la fuente de la cual fue tomado dicho valor. Sin embargo, se excluirán los datos de Ferrari., 2003., pues no corresponden a algún trabajo publicado.

Pozo	Prof.	Procedencia	Edad.	Método	Fuente
	m.		Ma.		
Mixhuca	420	M. de canal	0.24	Ar – Ar	Arece et al, 2013
	590	M. de canal	1.7	Ar – Ar	Arece et al, 2013
	890	M. de canal	5	U – Pb	Arece et al, 2013
	1010	M. de canal**	13.5	U – Pb	Arece et al, 2013
		Núcleo (998 – 1007)			
	1225 – 1231	Núcleo	21.7	K – Ar	IMP, 1986
	1281 – 1281.4	Núcleo	29.0±2	K – Ar	IMP, 1986
	1431 – 1439	Núcleo	17.5	Ar – Ar	Ferrari, 2003
Tulyehualco	1122 – 1131	Núcleo	11.8 ± 1.8	Kr – Ar	IMP, 1986
	1122 – 1131	Núcleo	16.7	Ar – Ar	Ferrari, 2003
	1327 – 1336	Núcleo	12.2 ± 0.6	Kr – Ar	IMP, 1986
	1327 – 1336	Núcleo	16.9	Ar – Ar	Ferrari, 2003
	1897 – 1899	Núcleo	15.0 ± 0.7	Kr – Ar	IMP, 1986
	1897 – 1899	Núcleo	19.6	Ar – Ar	Ferrari, 2003

Tabla 7.- Dataciones radiométricas de los pozos utilizados (información obtenida de Unda., 2016 y Arce et al, 2015).

Pozo	Prof.	Procedencia	Edad.	Método	Fuente
	m.		Ma.		
Copilco	523 – 532	Núcleo	0.761	K – AR	IMP, 1986
	1700 – 1709	Núcleo	12.3 ± 1	K – AR	IMP, 1986
	1700 – 1709	Núcleo	8.9	AR – AR	Ferrari, 2003
	2150 - 2157	Núcleo	13.7	K – AR	IMP, 1986
	2150 - 2157	Núcleo	15.3	AR – AR	Ferrari, 2003
	2250 – 2258	Núcleo	23.3 ± 1.5	K – AR	IMP, 1986
	2250 – 2258	Núcleo	17.2	AR – AR	Ferrari, 2003
Roma	1263 – 1272	Núcleo	8.7 ± 0.7	K – Ar	IMP, 1986
	2207 – 2210	Núcleo	25.3 ± 2	K – Ar	IMP, 1986
Tezonco	512 – 524	M. de canal	0.25	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	662 – 664	M. de canal	0.9	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	662 – 664	M. de canal	1.8	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	880	M. de canal	5	U – Pb	Arce et al, 2013
	964 – 966	M. de canal	13.5	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	1190	M. de canal	14.5	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	1286	M. de canal	17	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	1408	M. de canal	15	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	1550	M. de canal	18.4	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	1654	M. de canal	17	Ar – Ar	Arce et al, 2013
	1806	M. de canal	17.5	Ar – Ar	Arce et al, 2015
	1920	M. de canal	18.3	Ar – Ar	Arce et al, 2015
	2002	M. de canal	20.1	Ar – Ar	Arce et al, 2015
Texcoco	812	M. de canal	13.4	K – Ar	Arce et al, 2013
	850	M. de canal	18.1	K – Ar	IMP ,1986
	930	M. de canal	22.5	K – Ar	IMP ,1986
	980	M. de canal	25.7	K – Ar	IMP ,1986
	1520	M. de canal	30.4	K – Ar	IMP ,1986
	1600	M. de canal	31.1	K – Ar	IMP ,1986

Tabla 8.- Dataciones radiométricas de los pozos utilizados (continuación), (información obtenida de Unda., 2016 y Arce et al, 2015).

II.II. V Sísmica

Los métodos sísmicos son los más exactos y potencialmente más útiles para diferenciar unidades geológicas según su densidad. Los métodos sísmicos miden la reacción de la masa geológica frente a vibraciones inducidas artificialmente. Las vibraciones se detectan a distintas distancias y direcciones a partir de la fuente de emisión, mediante geófonos, los cuales se alinean a partir del punto de tiro, según una recta única. Si los materiales son homogéneos e isotrópicos, los frentes de ondas a partir del punto de tiro serán esféricos y estarán centrados en el punto de tiro (Telfor. W.M., 1981). La sísmica de refracción tiene dos inconvenientes; el primero, en general es imposible obtener información por debajo de una capa de material compacto y duro (basalto o calizas compactas) que provocan una desviación de las ondas y no permiten un registro directo de las capas infrayacentes; la segunda limitación proviene del coste económico de la prospección sísmica (Davis, S., 1971).

La técnica de reflexión ha sido la más utilizada en la exploración de la Cuenca de México y este método puede ayudar a resolver problemas referentes a capas profundas de alta velocidad, si bien los equipos son más complejos, el método de reflexión es el más indicado para conocer las profundidades de las diferentes unidades divididas según sus velocidades, distribución de las rocas y unidades potencialmente almacenadoras de agua, donde se puede definir con menor riesgo de equivocación la ubicación de bloques que funcionarían como almacén de acuíferos (COMESA., 2014).

Las secciones sísmicas usadas para integrar los datos han sido seleccionadas por que los pozos se encuentran ubicados en la cercanía, lo cual permite unificar la sísmica y los registros geofísicos.

La integración de los métodos indirectos permite realizar una reinterpretación de la información existente aportando datos acerca de las características físicas de las rocas lo cual ayuda a ajustar y crear un modelo geológico que se adapte a las condiciones geológicas y geofísicas de la zona.

Sin importar que tan recientes sean los estudios, la clasificación realizada por Pérez-Cruz en 1988 es la que se usa comúnmente. Por ello en esta tesis, se complementará con la nueva información de los pozos profundos. A continuación, se describen las secuencias identificadas como parte de los horizontes sísmicos.

Unidad de Calizas Cretácicas

- A. Secuencia VII: Formada por las calizas del Cretácico, constituyendo el basamento de la secuencia volcánica.

Unidad Volcánica Inferior

- B. Secuencia VI: Constituida por rocas de composición basáltica y andesítica del Mioceno-Oligoceno, intercaladas con tobas y brechas volcánicas.

Unidad Volcánica Superior

- C. Secuencia VI: Asociada con tobas y brechas de 100 a 200 m de espesor, con una distribución irregular de depósitos piroclásticos.
- D. Secuencia IV: Considerada como un cuerpo de arena o arcilla arenosa de unos 100 m de espesor y capas de basalto de hasta 30 m intercalado con tobas.

- E. Secuencia III: Asociada a conglomerados y tobas intercaladas con basalto de poco espesor.
- F. Secuencia II: Asociada a depósitos de conglomerados, arenas y arcillas de hasta 40 m de espesor intercalados con tobas y basalto de 50 m de espesor.
- G. Secuencia I: Asociada a arenas y arcillas con intercalación de basalto y andesitas no presentes en todos los pozos

Unidad de Arcillas Lacustres

- H. Secuencia lacustre: Unidad más joven y superficial de la zona estudiada, constituida por arcillas lacustres intercaladas con tobas y basalto.

Algunos horizontes fueron identificados en los pozos profundos. En el Capítulo IV se observan los alcances de estas unidades en las columnas geológicas.

En 2014 COMESA realizó un estudio sísmico y analizó las líneas sísmicas existentes (Pérez-Cruz., 1988) y recientes (2013), con el objetivo de detectar acuíferos significativos basándose en la distribución de las rocas y sedimentos almacenadores de agua. Dicho informe dio como resultado las siguientes posibles zonas dentro del área de trabajo:

- Al norte del pozo Mixhuca identifica 2 zonas, una a 1000 y 1500 m; estas zonas se encuentran limitadas por una falla de occidente y presentan alto fracturamiento, lo cual favorece las condiciones para identificarlas como unidades acuíferas.
- Al SW del cerro de la estrella a los 1200 y 2200 m se encuentran zonas altamente fracturadas y es aquí donde según COMESA las formaciones se bastecen.
- En las cercanías del pozo SLT se encuentra una zona de los 1300 a 1350 m de profundidad que presenta alto fracturamiento.

En 2016 Unda-López describió 7 unidades sísmicas que fueron clasificadas según datos geocronológicos preexistentes:

- UA: Unidad superficial que se delimita por la base del acuitardo.
- UV-1: Unidad delimitada por UA y en su base la edad radiométrica 0.24 Ma.
- UV-2: Unidad limitada por las edades radiométricas de 0.24 Ma y 1.7 Ma.
- UV-3: Unidad delimitada por las dataciones de 1.7 Ma y 5.0 Ma.
- UV-4: Unidad delimitada por entre los 5.0 Ma y 15 Ma.
- UV-5: Delimitada por la edad radiométrica de 15 Ma y la cima de las calizas del Cretácico.
- UC: Delimitada en su cima por la unidad UV-5 y sin definir su base.

III. METODOLOGÍA

En este apartado se hablará de los procedimientos utilizados para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo; para el cálculo de la petrofísica se utilizó registros geofísicos; la correlación de unidades se realizó con las muestras de canal y dataciones; la construcción de las secciones y columnas se realizó con el apoyo y análisis de muestras de canal, núcleos, petrofísica, edades y registros.

III.1 Integración de la información

El conjunto de los diferentes métodos usados sirvió para construir y calibrar las 9 columnas geológicas de los pozos estudiados; definir unidades hidrogeológicas correspondientes a las columnas, que no necesariamente corresponden a los límites litológicos; comprobar la continuidad lateral de las unidades atractivas y proponer secciones geológicas e hidrogeológicas correspondientes al área de estudio.

La integración de la información para la construcción de las columnas tuvo la siguiente secuencia:

- Revisión bibliográfica de las unidades geológicas descritas en artículos, informes y tesis anteriores.
- Identificación de unidades geológicas a partir de los registros geofísicos de pozos.
- Identificación de unidades correspondientes a muestras de recorte.
- Correlación de unidades geológicas correspondientes a los registros, muestras de recorte y a las descripciones realizadas en estudios actuales y previos.
- Identificación de unidades hidrogeológicas y su continuidad lateral o correlación a lo largo de los diferentes pozos.
- Corroborar la continuidad lateral por medio de la información geocronológica existentes.
- Correlación de las columnas para generar secciones geológicas e hidrogeológicas.

Cabe destacar que, para fines de este trabajo, las columnas previas fueron modificadas debido a que las unidades o secuencias no deben ser menores a 50 metros pues, espesores menores no pueden ser seguidos a lo largo de los registros ni en la sísmica (esto se puede hacer en futuros trabajos).

El Instituto de Geología de la UNAM fue el encargado de realizar el análisis estratigráfico de los pozos profundos contemporáneos de la cuenca de México (2011 a 2018); esto permitió realizar una integración de la información preexistente y actual en el área de estudio.

La información disponible para este trabajo consiste en registros geofísicos de pozos profundos perforados; secciones sísmicas realizadas por COMESA correspondientes a un informe técnico realizado para el gobierno de la Ciudad de México, datos geocronológicos reportados en trabajos anteriores (PEMEX., 1987; Luca-Ferrari., 2003; Arce et al., 2013; Arce et al., 2015), núcleos y muestras de recorte de perforación de algunos de los pozos explorados (PEMEX., 1987; Morales-Casique et al., 2018).

La interpretación y correlación de los pozos se realizó en dos etapas; la primera, consistió en interpretar los registros recientes, cada uno de ellos por medio de dos diferentes análisis; cualitativo, el cual consistió en una descripción litológica y física de las muestras colectadas durante la perforación, buscando cambios de coloración o de minerales constituyentes; cuantitativo, por medio de los perfiles convencionales y de espectroscopia se realizó el cálculo de grupos donde se zonificó de acuerdo a propiedades físicas (respuesta tipo que corresponde a diferentes características de formaciones hidrogeológicas) y químicas (respuesta tipo que corresponde a variaciones entre diferentes eventos volcánicos); posteriormente se integró la información donde se observó que el análisis cuantitativo tiene gran coincidencia con la clasificación hecha en el análisis cualitativo; finalmente, los resultados de los pozos recientes (columnas) fueron correlacionados con los pozos antiguos y de esta manera se pudo generar diferentes secciones geológicas.

Secciones específicas de los núcleos fueron llevadas al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) donde se realizaron varias pruebas con el objetivo de conocer las propiedades petrofísicas (porosidad, permeabilidad y propiedades caloríficas) y cotejarlas con los datos de los registros geofísicos generados a través de software, finalmente se realizó un aforo del pozo Santa Catarina y así se compararon las propiedades intrínsecas del acuífero con las obtenidas en laboratorio (Morales-Casique et al, 2019).

Como resultado final del proceso de integración de datos geológicos y geofísicos se construyeron columnas geológicas de los pozos Agrícola Oriental, Santa Catarina y el Mirador, de esta manera se reinterpretó en conjunto con las columnas existentes de los pozos perforados anteriormente y se generó una serie de secciones geológicas que engloba a estos 9 pozos.

Posterior a la construcción de las secciones se ubicó estratigráficamente la información de edades absolutas de acuerdo con estudios de radiométricos, lo cual, da más certeza a la correlación hecha a través de los registros geofísicos, por último, se asignó una formación de acuerdo con la clasificación hecha por Arce et al., 2013 y Arce et al., 2015. Las Figuras 11 a 13 muestran de manera gráfica, la metodología seguida durante este trabajo.

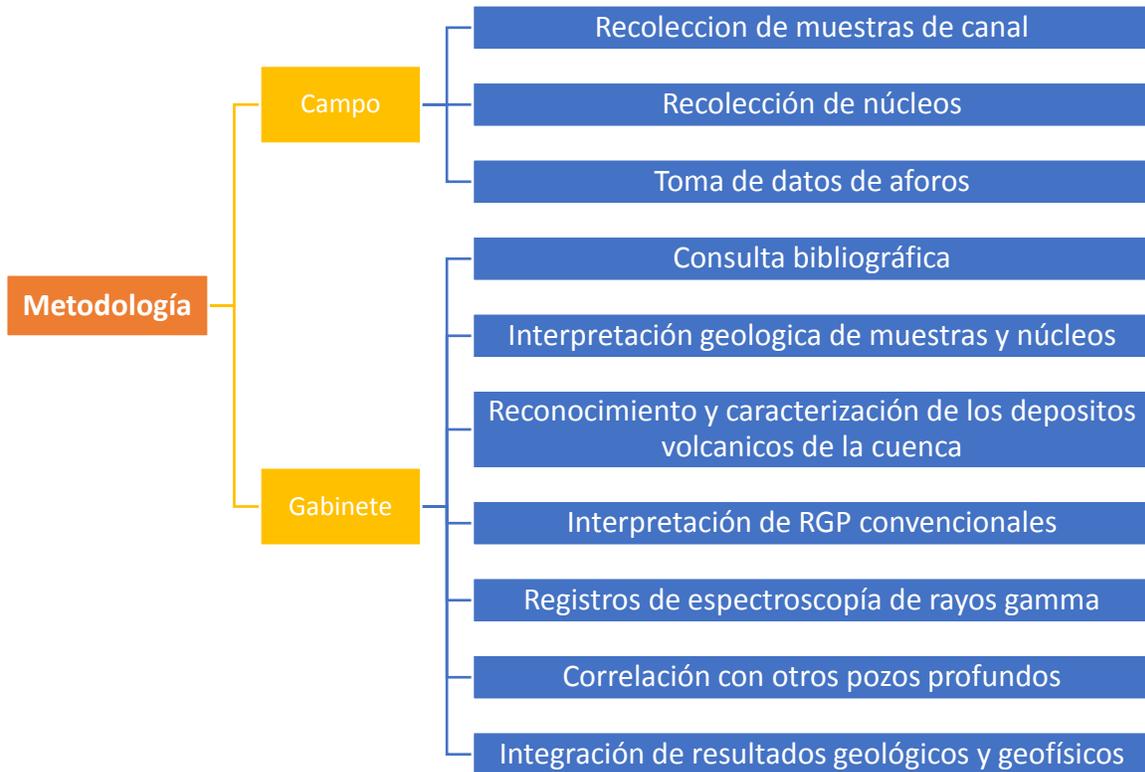


Figura 11.- Diagrama general de la metodología seguida en campo y gabinete.

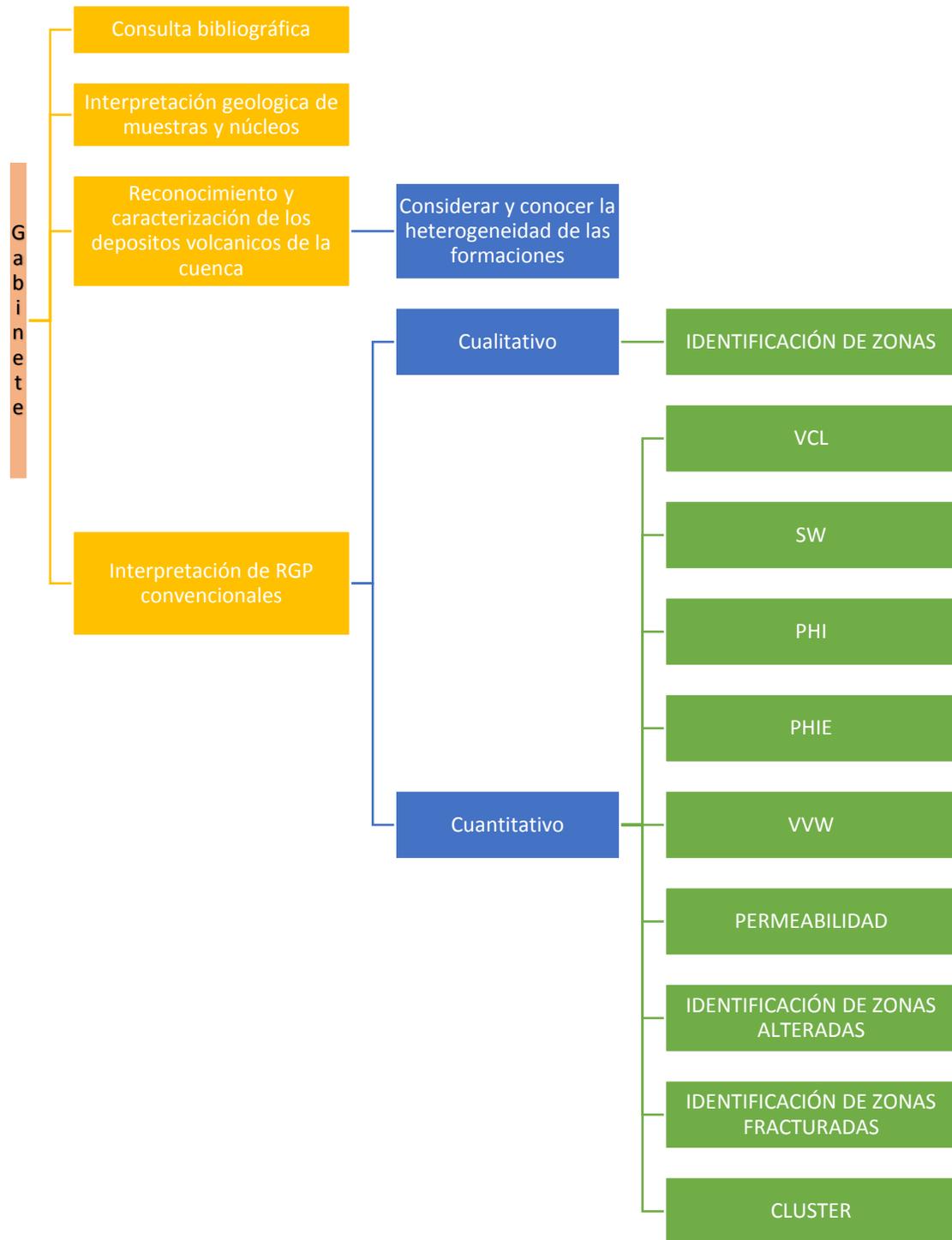


Figura 12.- Diagrama de la metodología seguida en la primera etapa del trabajo de gabinete.

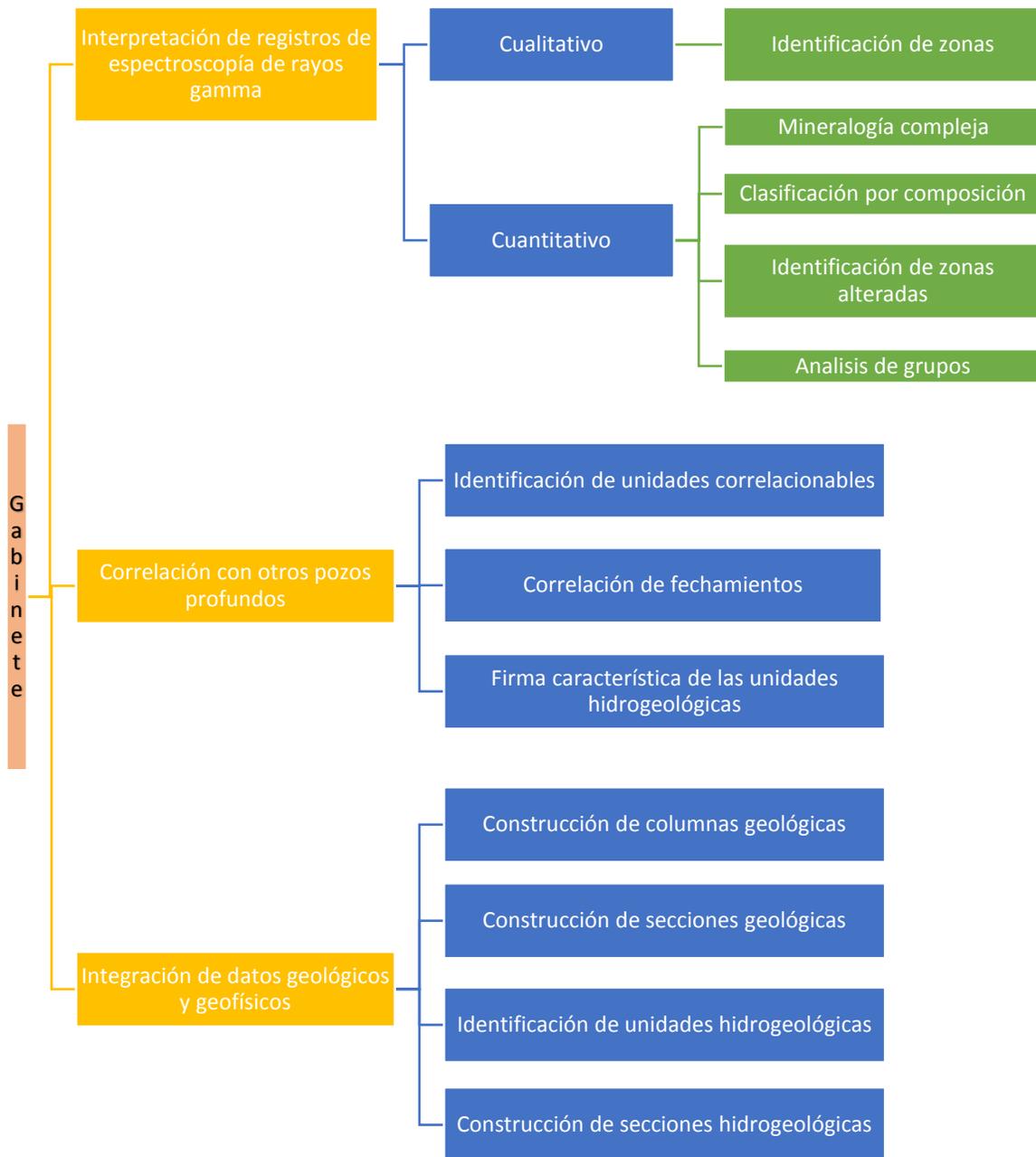


Figura 13.- Diagrama de la metodología seguida en la segunda etapa del trabajo de gabinete.

III.II Interpretación de registros geofísicos

En este apartado, se hablará de manera general en que consiste el tratamiento aplicado a los registros geofísicos, se dará una breve descripción del método sin hacer énfasis en la correlación de los resultados; el análisis conjunto de todos los pozos se realizará en el capítulo IV.

Es muy importante recalcar que la interpretación mostrará variaciones dependiendo de la etapa que se está analizando y del tipo de calibración que recibió la herramienta. La variación no es muy notable en los registros de inducción, pues estos se encargan de medir las propiedades eléctricas de la roca; sin embargo, los registros que muestran variaciones son LDL, DSI, BHC Y DLL, el error varía dependiendo del ambiente geológico en el que fue calibrada (Schlumberger, 1989).

III.II. I Calculo de propiedades

Considerando que el pozo Agrícola Oriental en su primera etapa, es el más completo respecto al contenido de curvas, se utilizó para calibrar curvas sintéticas. De manera representativa las Figuras 14 a 19 muestran el análisis que se les da a los perfiles (Schlumberger, 1989) con modificaciones en la interpretación aplicadas a la exploración hidrogeológica.

El “Triple Combo” consiste en un conjunto de herramientas combinadas para generar un amplio conjunto de medidas de propiedades físicas. El término se deriva de las tres medidas de principio recogidas por la cadena de herramientas: densidad, porosidad y resistividad (Bilingham M., 2011).

La configuración tipo triple combo se observa en la Figura 14, donde en el carril 1 se encuentra la profundidad; en el carril 2 se muestra una división por zonas, clasificadas de manera cualitativa de acuerdo al comportamiento de las curvas (visual del interprete); el carril 3 se encuentran las curvas rayos gamma (GR), caliper (HCAL) y potencial espontaneo (SP); en el carril 4 están representadas los perfiles de resistividad somera y profunda; el último bloque de curvas está formado por densidad (RHOZ), porosidad neutrón (NPHI) y acústico (DTCO).

El contenido de arcilla es el principal valor calculado en la industria petrolera, la respuesta de rayos gamma es el indicativo del volumen de arcilla en las unidades litológicas, particularmente en rocas volcánicas la respuesta observada corresponde a los minerales radiactivos, el mineral que reacciona a este tipo de registro es potasio, la respuesta radiactiva permite suponer el tipo de roca; para esta tesis llamaremos a este valor respuesta radiactiva (RR), dicho valor será calculado a partir de la curva GR y su valor está dado por la ecuación (1) :

$$RR = \frac{GR - GR_{MIX}}{GR_{MAX} - GR_{MIX}} \quad (1)$$

Donde

GR = es el valor de Rayos Gamma medido.

GR_{MIN} = es el valor de Rayos Gamma mínimo registrado en el perfil, siempre y cuando esté por debajo de 20 ° GAPI.

GR_{MAX} = es el valor de Rayos Gamma máximo registrado en el perfil, siempre y cuando esté por debajo de 90 ° GAPI.

En este tipo de rocas la respuesta de este perfil corresponde a la presencia de minerales con contenido de Potasio (K); a diferencia de las rocas sedimentarias, los Rayos Gamma en rocas volcánicas ayudan a identificar si corresponde a acida o básica (Guzmán Andrews et al., 2014).

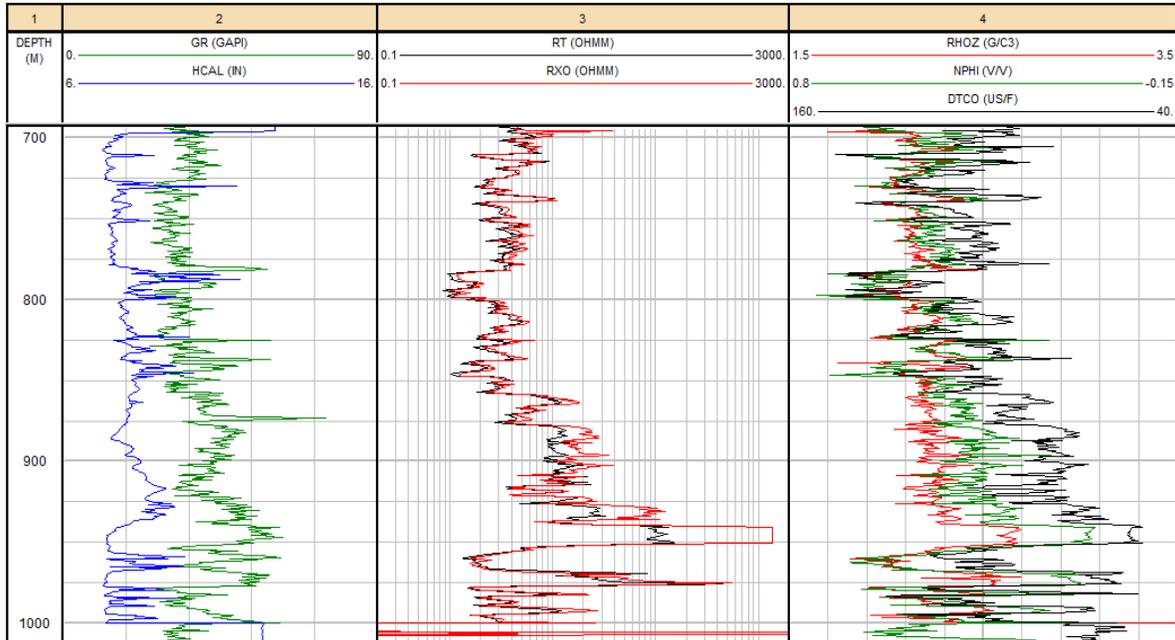


Figura 14.- Representación de las curvas correspondientes al triple combo en RGP.

La porosidad efectiva (PHIE) se considera como el volumen de poros interconectados respecto al volumen total del material; dependiendo del tipo de roca un alto valor de RR puede significar que posee una baja movilidad del fluido y un porcentaje medio de interconexión de poros dependiendo si la roca es alterada o esta fracturada. La ecuación (2) para el cálculo de la porosidad efectiva es:

$$PHIE = NPHI * (1 - RR) \quad (2)$$

La Figura 15 muestra una clasificación de acuerdo con un modelo respecto a la respuesta de potasio, porosidad y porosidad efectiva; el color ocre simboliza la respuesta de los minerales que tienen respuesta al K y que posiblemente corresponden a un cierto grado de alteración. La porosidad efectiva se encuentra iluminada de color rojo. El espacio sobrante corresponde al material rocoso que en este caso son rocas volcánicas indiferenciadas.

La zona previa a los 700 m muestra un alto contenido de minerales de K o correspondientes a zonas alteradas, un bajo volumen de roca no alterada y una porosidad efectiva alta; la etapa que va de 700 – 880 m muestra que existe cerca de 60% de roca no alterada, el contenido de minerales arcillosos o que responden al K es cercano al 10 %, el complemento corresponde a la porosidad efectiva que en promedio es 30%; la siguiente etapa corresponde de los 880 – 1070 m donde el volumen de materia que responde al K o a rocas arcillosas es cercano al 30 % y el correspondiente a la porosidad efectiva es de 15 % porque resulta que el volumen de roca no alterada es cercano al 55 %; finalmente de 1070 – 1130 m describe como el contenido de arcillas o material de K va en aumento respecto a la profundidad.

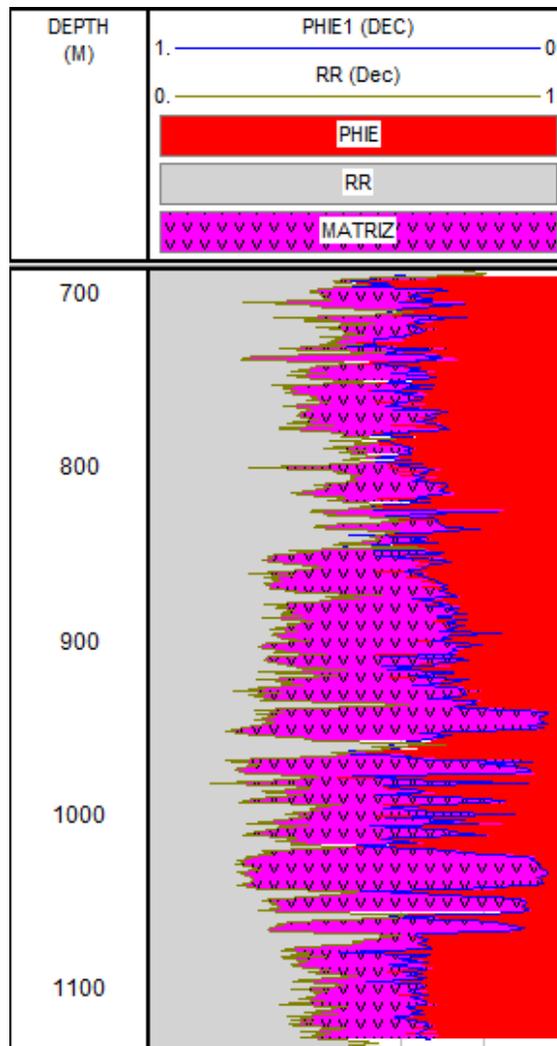


Figura 15.- Modelo conceptual de la interpretación por cálculo de VCL y PHIE de la primera etapa del pozo Agrícola Oriental.

El volumen poroso de las rocas es ocupado por agua, aceite y gas en diferentes proporciones, debido al ambiente geológico en el que se encuentran ubicados los pozos la Ciudad de México, se puede suponer que el volumen poroso únicamente es ocupado por agua.

La Saturación de agua (S_w) es calculada como el volumen ocupado por un fluido dividido entre la porosidad total, por lo tanto, el valor de la saturación de agua es igual a 1.

Varios de los pozos no cuentan con la curva de porosidad, por ello, se recurrió a calcular una porosidad sintética, en la industria petrolera existen varios modelos que permiten calcularla, en esta tesis se calculó con los métodos de Simandoux, Waxman-Smits, Indonesia, Doble Agua y Archie. La metodología para la generación de la curva sintética de porosidad se muestra en el anexo 1.

El cálculo de la porosidad en toda la columna permite conocer el valor de la conductividad hidráulica (K) que para fines hidrogeológicos su unidad esta expresada en m^2 ; estimar este valor de manera indirecta a partir de perfiles geofísicos es complicado; el software usado en la interpretación petrofísica permite hacer estimaciones a través de diferentes fórmulas usadas en la industria

petrolera, al compararlas con el valor en un núcleo analizado por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), se determinó que la conductividad hidráulica (K) calculada con el software es la que más se ajusta a la medida en el núcleo. Los diferentes métodos de cálculo de esta propiedad se describen en el anexo 2.

La conductividad hidráulica explica la capacidad de los materiales para almacenar y transmitir fluidos. La unidad de la conductividad hidráulica se expresa en m^2 y describe la propiedad que permite el flujo de un fluido en diferentes materiales rocosos; para cuestiones de esta tesis, cuando la conductividad hidráulica es mayor a $9.86E-14 m^2$ corresponde a unidades que pueden ser consideradas como acuíferos, mientras que si la conductividad es menor a $9.86E-14 m^2$ la unidad puede considerarse como un acuitardo.

En la sección IV.III.I se presenta la estimación de la conductividad hidráulica en cada una de las columnas geológicas, además de presentar tablas donde se muestran los valores estadísticos de diferentes unidades.

III.II. II Calculo de propiedades (mineralogía compleja)

Mineralogía compleja es una extensión del software que permite calcular de manera conceptual el contenido de minerales y contenido de agua en una sección determinada. Para este método, se requiere de una muestra que sea utilizada como control y así se haga una calibración de las propiedades de los minerales a usar, para la primer etapa del pozo AO se usó como control los resultados de análisis de roca total (Morales –Casique., 2018), estos resultados fueron utilizados para alimentar el modelo, dicho modelo requiere de conocer las propiedades acústicas, resistivas, químicas, radiactivas, de densidad y de contenido de en el área a calibrar.

Uno de los retos más importantes durante este trabajo fue describir que es lo que indica la respuesta del registro de Rayos Gamma y relacionarlo con la gran variabilidad mineralógica presente en las columnas; tomando como base los trabajos de Guzmán-Andrews et al., 2014 y García-Cruz., 2011, se puede suponer que, valores relativamente altos de Gapi (50-90) indican alteración hidrotermal que ocasionalmente es confundida con una zona sucia (arcillas).

La composición química del magma es unos de los factores importantes que da origen a los productos de la cristalización, tales como rocas oscuras (máfica) con contenido de hierro y magnesio y bajo contenido de sílice (Ol, Px, An, Bt) o rocas claras (intermedias) con contenido mayor de minerales que contienen K, Na, Ca, Fe y Mg de bajo contenido de sílice (cuarzo y feldespatos).

El software usado contiene un apartado titulado Advanced Intepretation y dentro del esta el paquete de Mineral Solver; ahí se encuentran tres ventanas, la primera (Curves) debe rellenarse con las curvas que alimentan el modelo; la segunda (Parameters) requiere introducir el intervalo en el cual se correrá el modelo; la tercera (Models) es la más importante, pues aquí es donde los valores de que alimentan al modelo se deben introducir.

En la primera fila se deben colocar los minerales que conforman las rocas de la columna geológica; la primera columna, debe de tener como entrada las curvas que corresponden al modelo y según sea el caso las curvas sintéticas calculadas (Senergy., 2008).

Para el caso de rocas volcánicas se utilizó la configuración que se observa en la Figura 16 donde se introducen las propiedades fisicoquímicas de los minerales que componen a las rocas

						Mineral	Water Sw	Water Sxo	Quartz	Biotite	Anf	Pgl	FeL_k	Albite	Oliv
						Type	Hyd. Sxo	Water Sxo	Matrix	Matrix	Matrix	Matrix	Matrix	Matrix	Matrix
						Shading									
						Use		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Curve / Val	Equation	Eq. Mode	Use	Confidence	Inv. Fact.	Result	Vwater	Vwater	VSand	VBiotite	VAnf	VPgl	VFel-K	VAlbite	VOliv
1.0	Unity	Model	✓	0.01	1.0		1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.
VCL	Linear	Model	✓	.01	1.0		0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
DTCO	Sonic	Model	✓	0.01	1.0		189.	189.	55.	50.8	43.9	51.	100.	49.	36.
NPHI	Neutron	Model	✓	0.02	1.0		Auto	Auto	Auto	0.13	0.2	0.2	0.35	-0.001	0.4
RHOZ	Density	Model	✓	0.02	1.0		Auto	Auto	2.65	3.04	3.2	2.6	2.65	2.6	3.8

Figura 16.- Configuración de entrada del modelo de mineralogía compleja.

III.II. III Análisis de grupos

La correlación de pozos se realizó con software especializado, con el objetivo de encontrar unidades hidrogeológicamente atractivas, la continuidad de las unidades se confirmó con ayuda de secciones sísmicas. El software generó grupos de elementos con características similares a partir de sus magnitudes y la relación entre los datos de las diferentes curvas. Este método realiza una distinción entre las facies de acuerdo con la técnica estadística K mean (método de agrupamiento), el cual parte de un conjunto de n observaciones en k grupos en el que cada dato pertenece al grupo más cercano a la media, de esta manera se genera la sucesión de conjuntos que comparten un comportamiento tipo, (Garduño., 2016; Senergy., 2008).

La correlación por grupos tiene la finalidad de:

- Identificar diferentes comportamientos de las propiedades (físicas y químicas) en los pozos.
- Correlación geológico-estratigráfica y su coincidencia a través de geofísica e hidrogeología.
- Interpolar pozos cercanos para identificar acuíferos y acuitardos a través del comportamiento de los perfiles geofísicos e interpolarlos a los pozos cercanos.

IV. RESULTADOS

IV.1 Correlación por análisis de grupos

La Figura 17 muestra un ejemplo de la correlación hecha con 4 pozos a través del análisis de grupos, la unidad compuesta por sedimentos lacustres correspondientes a la zona más superficial de la Cuenca de México, en el segundo bloque están las vulcanitas del terciario-cuaternario correspondientes a los horizontes sísmicos conocidos como la Unidad Volcánica Superior y Unidad Volcánica Inferior, finalmente la Unidad de Calizas Cretácicas en el fondo (Pérez-Cruz., 1988); el análisis de grupos logra definir con bastante claridad una correlación entre unidades, de esa forma se puede limitar la base y la cima de bloques dentro de los horizontes.

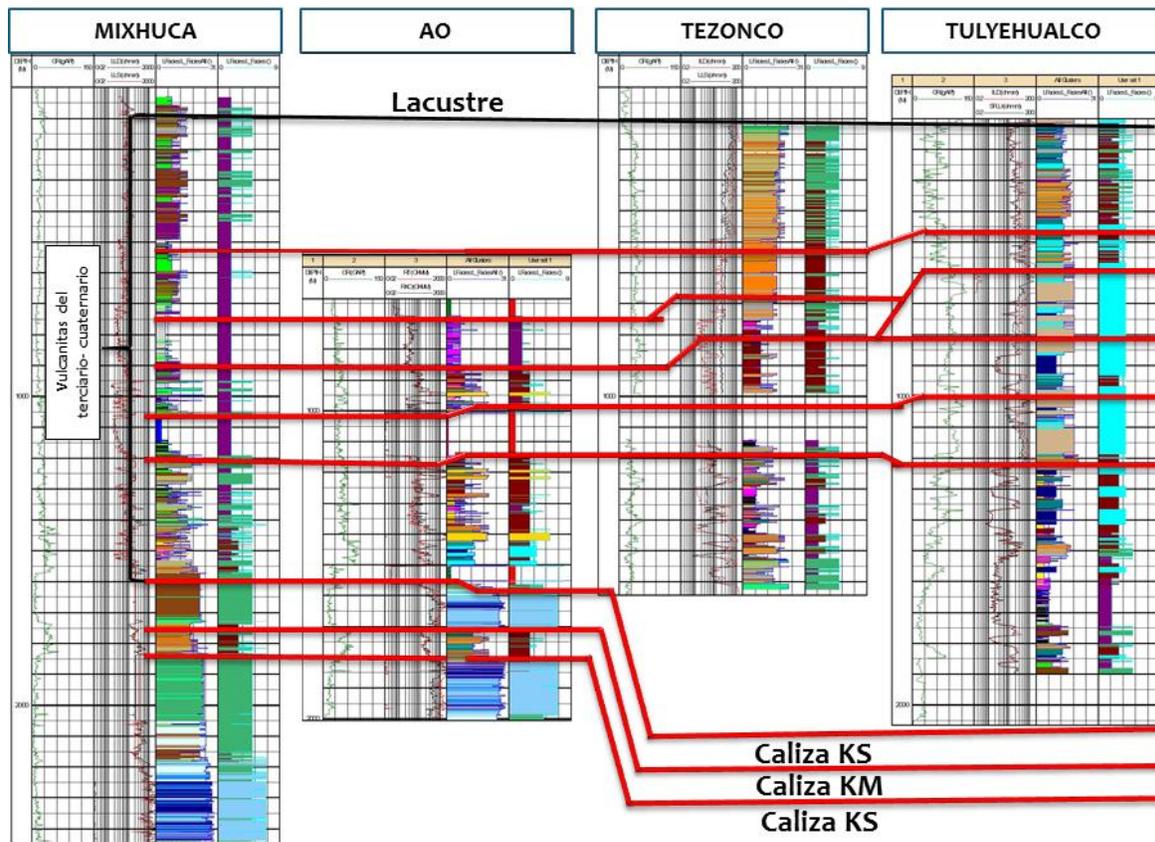


Figura 17.- Correlación de 4 pozos a través de análisis de grupos.

IV.II Descripción de los núcleos

La descripción de las muestras y núcleos fue realizada por el Dr. José Luis Arce, del Instituto de Geología y parte de la descripción puede ser revisada con más detalle en el informe del pozo Agrícola Oriental (Morales-Casique et al., 2018). La descripción de las muestras sirvió para calibrar y determinar la respuesta geofísica con un material litológico y principalmente construir columnas geológicas, por ello la interpretación y descripción de las muestras es una etapa importante en la caracterización estratigráfica; la descripción de las columnas de los pozos perforado en 1980 se pueden revisar en diferente bibliografía donde hace una recopilación de las descripciones existentes (Pérez-Cruz., 1989; Arce et al., 2013; Arce et al., 2015.; González-Torres., 2015; Unda-López., 2016; Lezama-Campos., 2016; Arce et al., 2019).

El pozo Agrícola Oriental posee 5 núcleos; el primero de los 830.00 a los 845.00 m donde están muestras de material arcilloso y alterado con presencia de bloques de basalto; debido al grado de alteración la interpretación mineralógica no es posible; sin embargo, una interpretación geofísica la describe como una zona de baja resistividad cuya velocidad sónica disminuye conforme se profundiza, generando una unidad litológica de baja permeabilidad (Morales-Casique et al., 2018).

El núcleo 2 va de los 900.0 a los 918.0 m y está compuesto por un material gris verdoso constituido por clastos de hasta 40 cm inmersos en una matriz de ceniza con un alto grado de alteración hidrotermal (epidota), pómez dispersa y material de composición andesítica; la interpretación geofísica la describe como una zona heterogénea con variaciones de resistividad.

El núcleo 3 va de los 1130.0 a los 1139.0 donde se describen fenocristales, material arcilloso, alterado y masivo y conforme profundiza, el material se vuelve mucho más consolidado con textura porfídica con fenocristales de plagioclasas; por las propiedades medidas en el registro se puede determinar que es una zona homogénea.

El núcleo 4 es una lava de color gris claro de los 1550.0 a los 1559.0 m, homogénea con fracturas rellenas de epidota y calcita de composición andesítica, conforme se profundiza, el núcleo muestra brechas rellenas de calcita, piritita y epidota, un aumento de fracturas, presencia de evidencias que describen una falla normal y el aumento del grado de alteración, representada por altos resistivos con cambios abruptos y bajos acústicos (Vázquez-Serrano et al, 2019, Morales-Casique et al., 2018)

El núcleo 5 va de los 1950.0 a los 1954.0 m donde se encuentran calizas del Cretácico superior y medio, la zona se caracteriza por altos resistivos y cambios en los valores de rayos gamma. Según los resultados de Vázquez-Serrano et al, 2019 esta zona está afectada por fallas, lo es causa de la alta variación de los perfiles geofísicos.

En el pozo Santa Catarina se recuperaron 3 núcleos; el primero va de 996.0 a 999.0 m y está conformado por un paquete de color gris verdoso constituido de cenizas gruesas con fragmentos redondeados clasificados como lahar; además existe un paquete de color gris verdoso, arcilloso, masivo y fragmentos también clasificado como un lahar. Las diferencias entre las unidades de resistividad corresponden a una elevada socavación que se puede comprobar con el registro Caliper.

El núcleo 2 va de 1550.0 a 1559.0 m y consta de un paquete de 4 metros de material color rojizo, alterado, y endurecido, con contenido de sílice como cementante clasificado como un depósito de cenizas alterado que se convirtió en paleosuelo. Subyacente por un paquete masivo de color café

claro, con fragmentos subangulares inmersos en una matriz de ceniza gruesa, la capa es subyugada por un material masivo de color verde rosado con fragmentos líticos inmerso en una matriz de ceniza media con presencia de fracturas rellenas y presencia de líticos alóctonos presumiblemente corresponde a un lahar; donde las curvas muestran intercalación de materiales de baja resistividad con materiales de alta resistividad, los bajos resistivos muestran zonas de socavación interpretadas como zonas alteradas y arcillosas.

El núcleo 3 va de los 1900.00 a los 1909.00 m donde se observa una secuencia de depósitos de lahar de color verde claro ocasionado por el hidrotermalismo y presencia de líticos redondeados heterolitológico compuesto de material redondeado y fragmentos de lava.

IV.III Columnas geológicas de los pozos y mineralogía compleja

Las columnas geológicas son la representación gráfica de las variaciones de los cuerpos rocosos del subsuelo en sentido vertical y horizontal. Para una mejor correlación, las columnas deben contener información cronológica; las columnas fueron construidas con datos de muestras de recorte de perforación, núcleos de perforación y registros geofísicos de pozos. La construcción de las 9 columnas de los pozos profundos permitirá comprender la variación lateral de las unidades.

Una de las consideraciones más importantes fue uniformizar el formato de las columnas debido a que con anterioridad cada una fue elaborada con distintos criterios de acuerdo con las diferentes personas que interpretaron las muestras.

Tomando en cuenta que los pozos Agrícola Oriental y San Lorenzo Tezonco no presentan descripción de muestras de canal en los primeros 500 metros se rellenó estos vacíos con información del pozo Mixhuca para hacer una correlación de unidades de acuerdo con las divisiones observadas en el registro.

El pozo Santa Catarina tiene una profundidad de 1992 metros, pero, no cuenta con registro geofísico ni muestras de canal en los primeros 500 metros. Las muestras de recorte van de 580 hasta los 1080 metros y el registro geofísico va de los 580 a 1800 metros; por ello se generaron curvas sintéticas que ayudan a llenar los vacíos de información por la ausencia de curvas de porosidad (PHI), densidad (RHOZ) y acústico (DT), posteriormente se hizo el cálculo con mineralogía compleja para el resto de los pozos (perforados en 1967, 1986 y 1987) los cuales tienen descripción y columna en la totalidad de este.

Al comparar la interpretación por mineralogía compleja de la primera etapa del pozo Agrícola Oriental con la columna generada a partir del recorte en el mismo intervalo se puede concluir lo siguiente: el material está compuesto principalmente por rocas que contienen plagioclasas (verde), un bajo contenido de biotita (rojo), de color gris, los minerales con contenido de K correspondientes a material alterado o arcilloso asociado probablemente a bloques de andesita; dos etapas con contenido de cuarzo (amarillo) ligados a lavas dacíticas y finalmente de color azul se muestra el contenido de agua total dentro de la unidad analizada. La Figura 18 muestra que el modelo describe bien el comportamiento de los resultados observados en las muestras de canal.

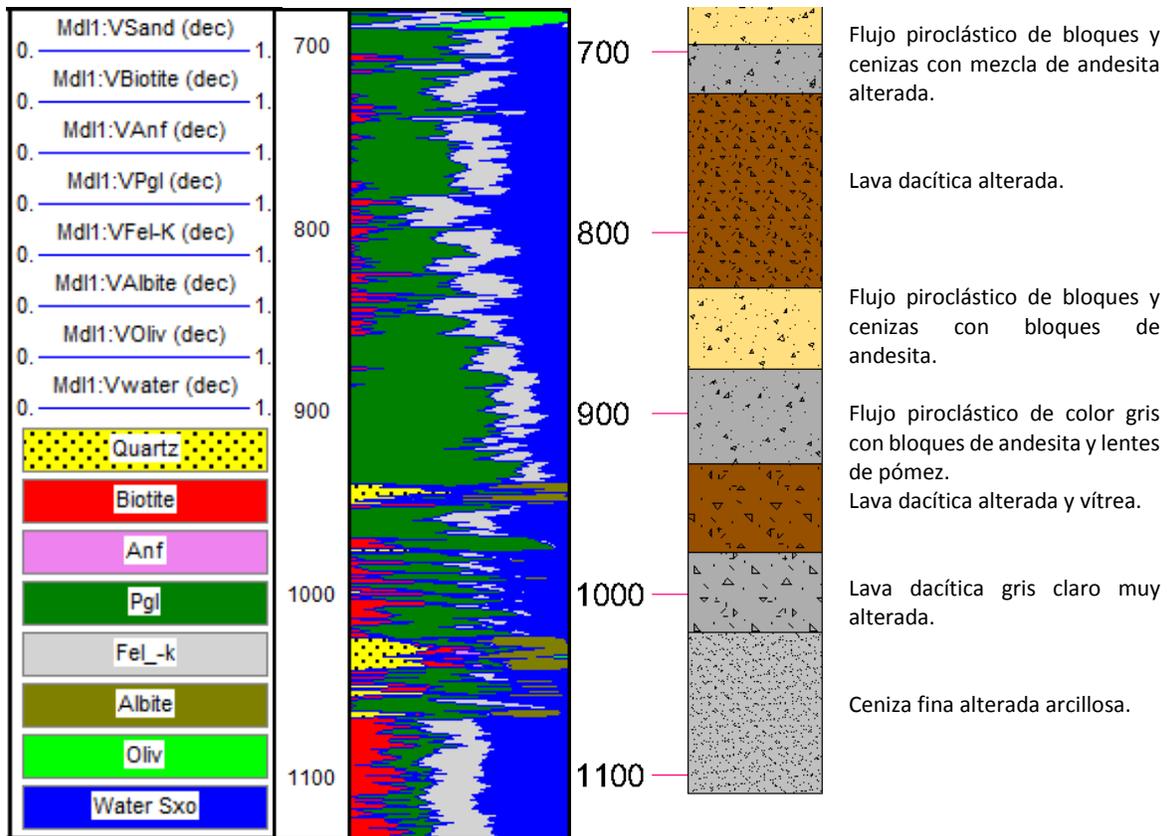


Figura 18.- Interpretación por mineralogía compleja de la primera etapa del pozo Agrícola Oriental.

A continuación, se muestran las columnas generadas a partir de la integración de la información recabada en este trabajo, basándose en la clasificación realizada por Arce et al., 2015.

IV.III.I Pozo Texcoco

El pozo Texcoco fue perforado en 1967 por la SHCP a una profundidad de 2060 metros. La Figura 19 muestra la columna utilizada para este trabajo, donde las unidades descritas se obtuvieron del informe realizado por el IMP en 1967 y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Alternancia de calizas masiva a granular de compacta a suelta con cavidades rellenas de calcita, margas arcillosas blancas a café claro de compactas a sueltas con arcilla limpia subyacidas por tobas arenosas y arcillas, compactas a sueltas, color gris a café claro con presencia de líticos alterados y conglomerados formados por andesita y basalto de gris a oscuro en matriz arcillosa por alteración de tobas y cenizas. De 105 m de espesor.
- II. Andesita-Chiquihuitita de color gris oscuro a claro, compacta, densa y en algunas zonas muy fracturada con presencia de zonas de alteración y oxidación. De 363 m de espesor.
- III. Basaltos de color gris oscuro a gris claro y rojo, en partes vesicular y densa con vesículas rellenas de sílice con material verde sericitizado con aspecto de serpentina. De 385 m de espesor.
- IV. Aglomerados de color verde a café amarillento y gris claro a oscuro, de compacto ha suelto formado por fragmentos de rocas ígneas y tobas arenosas formadas de basalto y andesita sin gradación. De 398 m de espesor.
- V. Tobas de color gris claro y café claro, de grano fino verde oscuro; con presencia de líticos alterados, de textura arenosa a arcillas de gris claro a verde claro con aspecto ocasional de conglomerados y representando zonas de fracturas. De 343 m de espesor.
- VI. Anhidrita exigentica color gris claro a café oscuro, compacta, masiva y fibrosa con clastos de caliza masiva de color crema, intercalada con arcilla y marga café rojizo, dura y fractura concoidal. De 178 m de espesor.
- VII. Tobas arenosas y arcillosas, compactas a sueltas de color gris claro a café crema con líticos con alteración con fragmentos de andesita y basalto. De 135 m de espesor.
- VIII. Arcillas poco consolidadas. De 167 m de espesor.

POZO TEXCOCO

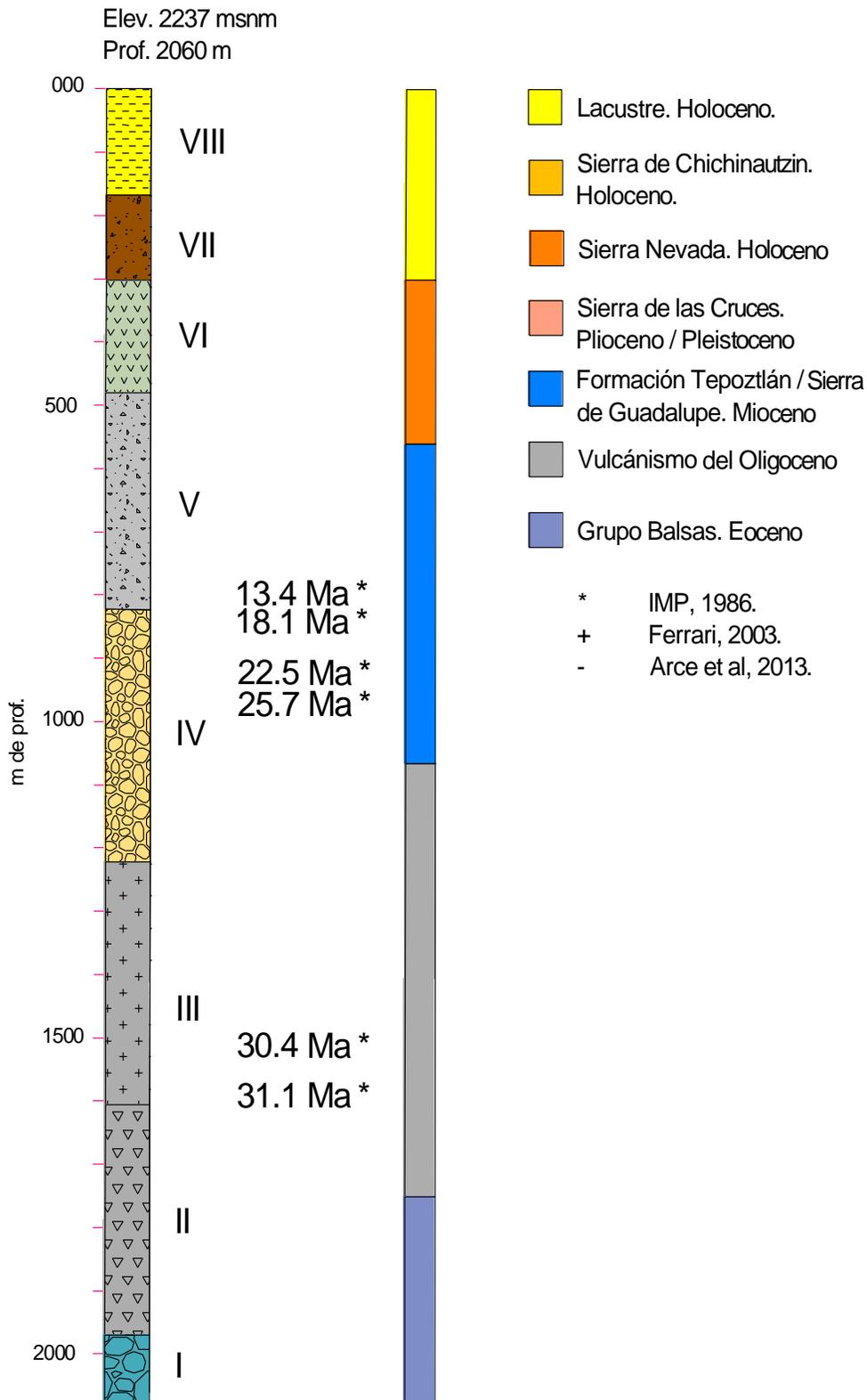


Figura 19 Columna del pozo Texcoco – 1. IMP, 1986.

IV.III.II Pozo Tulyehualco

El pozo Tulyehualco fue perforado en 1986 a una profundidad de 3000 metros, la Figura 20 muestra la columna utilizada para este trabajo, las unidades descritas se obtuvieron del informe realizado por PEMEX en 1987 y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Wackestone con conchas y placas de equinodermos.
- II. Mudstone con fracturas verticales y horizontales.
- III. Mudstone con fracturas rellenas de bentonita pirita y calcita.
- IV. Toba de color gris claro a gris oscuro y verdoso por alteración, semicompacta, arenosa y dura con arcilla gris claro con fragmentos de basalto gris oscuro y rojizo por alteración.
- V. Basalto gris oscuro y café rojizo por alteración, de estructura maciza con escasas fracturas selladas por toba verde olivo y Qz blanco y calcita del mismo color.
- VI. Brecha volcánica constituida por fragmentos de basalto gris oscuro y toba café rojizo.
- VII. Toba gris verdosa y café claro, de aspecto vítreo.
- VIII. Brecha volcánica constituida por fragmentos de basalto gris oscuro, gris verdoso.
- IX. Basalto gris oscuro y café oscuro de estructura maciza con fracturas rellenas de toba verde olivo y cuarzo blanco.
- X. Intercalaciones de toba gris claro y verde olivo semicompacta con basalto gris oscuro y café oscuro de estructura maciza con fracturas rellenas de toba verde olivo y cuarzo blanco.
- XI. Toba café claro y café rojizo semicompacta y de estructura maciza.
- XII. Basalto gris claro afanítico y andesítico.
- XIII. Secuencia de basaltos gris oscuro y gris verdoso de aspecto andesítico con toba verde oscuro y verde claro de aspecto andesítica.
- XIV. Toba gris oscuro a gris verdoso y café rojizo por alteración, compacta con trazas de bentonita gris claro y basalto gris oscuro y afanítico.
- XV. Gravas, cenizas y arenas de origen volcánico de color café claro de grano grueso de mala compactación, con areniscas de aspecto brechoide, de color café claro. Toba de color crema, café claro a café rojizo, suave, toba arenosa de color crema semidura con lentes de bentonita amarillo claro y tobas de color rojizo de textura vítrea semidura, con presencia de margas y calizas lacustres.
- XVI. Unidad de sedimentos lacustres con intercalaciones de arcillas de color gris a gris verdoso y rocas volcánicas.

POZO TULYEHUALCO

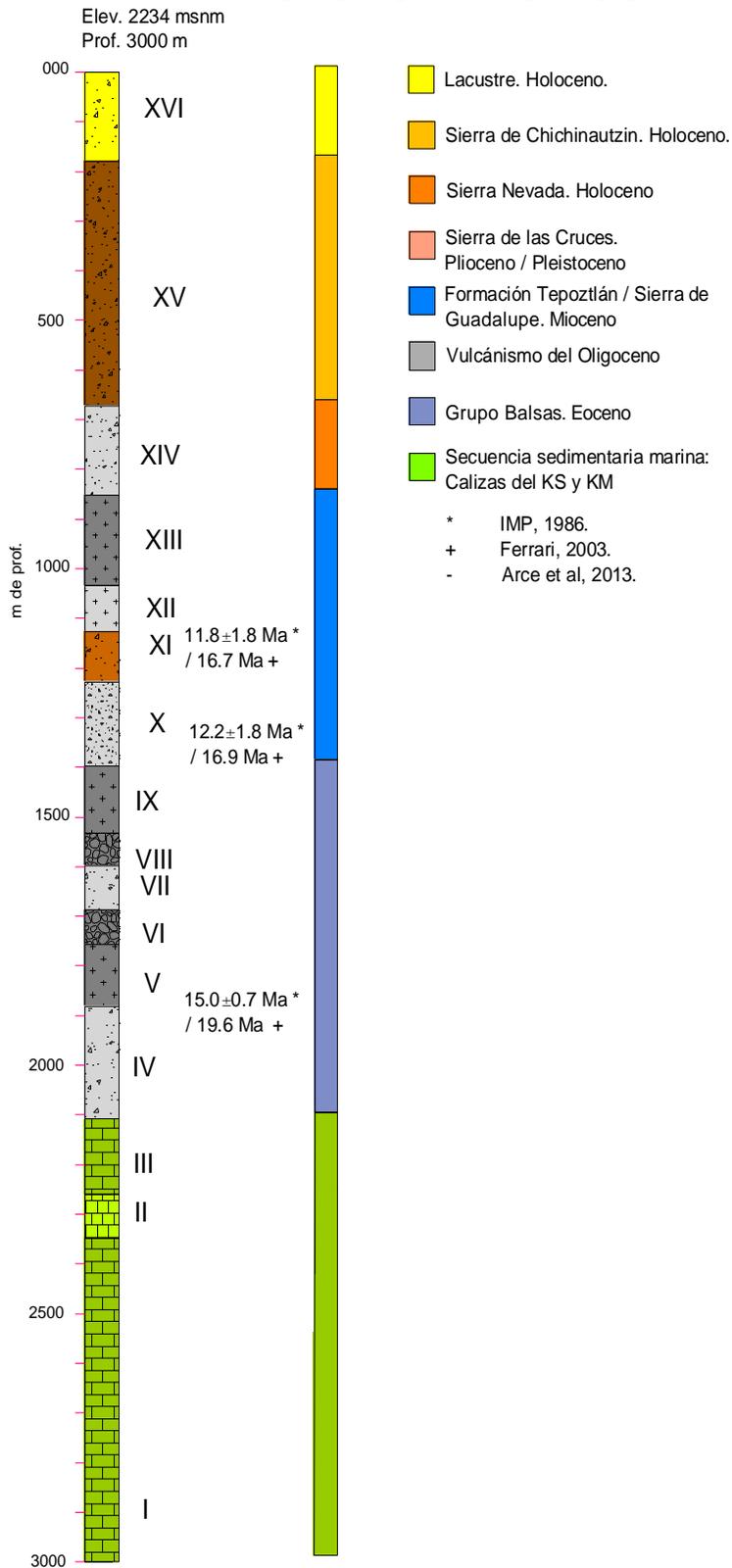


Figura 20.- Columna del pozo Tulyehualco. IMP, 198..

IV.III.III Pozo Mixhuca

El pozo Mixhuca fue perforado en 1986 a una profundidad de 2452 metros, la Figura 21 muestra la columna utilizada para este trabajo, las unidades descritas se obtuvieron del informe realizado por el IMP en 1987 y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Mudstone con fracturas delgadas rellenas de bentonita, piritita y calcita.
- II. Mudstone arcilloso con fracturas verticales y horizontales y por Wackestone con fragmentos de conchas y placas de equinodermos.
- III. Mudstone con fracturas delgadas rellenas de bentonita, piritita y calcita.
- IV. Lava de color gris, porfídica con Px, Anf y epidota, alterada, con fracturas rellenas de calcita y piritita de composición andesita-dacita.
- V. Lava andesítica porfídica con piritita diseminada, de color gris claro.
- VI. Flujo piroclástico de cenizas, alterado.
- VII. Toba gris claro, verde esmeralda, basalto café rojizo con oxidación alrededor de cristales de olivino.
- VIII. Basalto café y gris oscuro de estructura compacta, toba arenosa gris clara deleznable.
- IX. Toba gris verdosa, suave y plástica de aspecto arenoso.
- X. Lava dacítica alterada y vítrea de color gris oscuro.
- XI. Intercalaciones de basalto y toba.
- XII. Flujo piroclástico de bloques y cenizas amarillento, alterado, arcilloso y muy fracturado, con bloques de andesita.
- XIII. Toba café claro rojizo, de composición dacítica.
- XIV. Toba café claro y rojizo con trazas de basalto y andesita gris.
- XV. Brecha volcánica con fragmentos de basalto gris.
- XVI. Lava andesita-basáltica, color gris oscuro (Plg + Ol +Px).
- XVII. Ignimbrita rosa.
- XVIII. Tobas y conglomerados volcánicos con fragmentos de basalto gris oscuro.
- XIX. Tobas, basaltos, y arcillas cafés claro, suave y plástica.
- XX. Tobas y conglomerados volcánicos.
- XXI. Secuencia de depósitos lacustres y depósitos piroclásticos.

POZO MIXHUCA

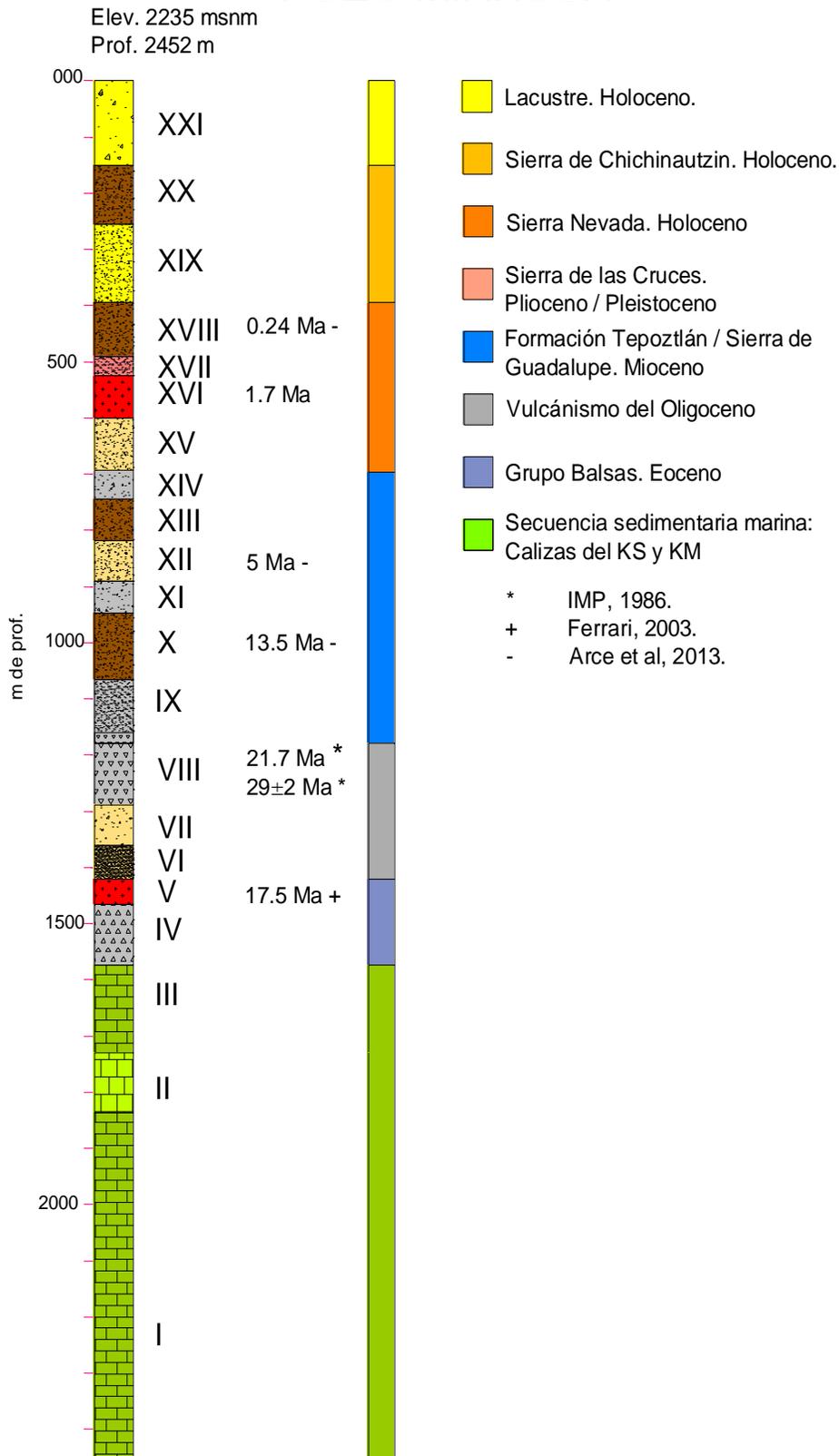


Figura 21.- Columna del pozo Mixhuca -1. -, *, IMP, 1986; -, Arce et al, 2013 y 2015.

IV.III.IV Pozo Roma

El pozo Roma fue perforado en 1987 a una profundidad de 3200 metros, la Figura 22 muestra la columna utilizada para este trabajo, las unidades descritas se obtuvieron del informe realizado por PEMEX en 1987 y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Toba gris de claro a oscuro y verdoso, semicompacta de aspecto limolítico fino con pirita diseminada y ligeramente calcárea.
- II. Tobas de gris claro a gris verdoso de aspecto arenoso y limolítico con pirita diseminada con trazas de basalto gris y café oscuro.
- III. Brecha calcárea constituida por fragmentos de mudstone.
- IV. Basalto gris oscuro y café oscuro afanítico y compacto con presencia de toba lítica gris oscuro y gris verdoso semicompacta.
- V. Toba lítica café rojizo y gris verdoso semicompacta a compacta ocasionalmente arenosa con presencia de basalto gris oscuro a gris claro y café rojizo con trazas de calcita blanca y rara vez dolomía.
- VI. Basalto gris oscuro y café rojizo alterado de estructura maciza con presencia de toba gris claro a gris verdoso, semicompacta.
- VII. Secuencia de tobas gris verdoso, gris claro y café rojizo semicompacta con presencia de vidrio volcánico blanco transparente y presencia de basalto gris oscuro.
- VIII. Toba café rojizo oscuro y gris oscuro compacta con presencia de basalto café rojizo oscuro.
- IX. Toba gris oscuro y café rojizo semicompacta con presencia de basalto gris y limolita café rojizo.
- X. Basalto gris oscuro y café rojizo.
- XI. Toba gris verdosa a gris claro y café semicompacta.
- XII. Secuencia de basalto gris oscuro y café rojizo de estructura maciza y brechas volcánicas constituidas por fragmentos de basalto café y café rojizo en matriz tobácea.
- XIII. Secuencia de toba lítica de verde olivo a verde esmeralda con fragmentos de basalto, riolita, vidrio y cuarzo; basalto gris oscuro de estructura masiva y brecha volcánica constituida por fragmentos de basalto café.
- XIV. Toba riolítica gris claro a verdoso con basalto gris semicompacta.
- XV. Toba riolítica compacta con inclusiones de piroclastos y tobas vítreas de rosado a verde claro.
- XVI. Brecha volcánica constituida por basalto y andesita gris claro a oscuro y café rojizo alterado con toba riolítica rosa y vidrio volcánico.
- XVII. Toba de arenosa a limosa de café rojizo a café claro, con presencia de basalto andesita clorita y vidrio volcánico.
- XVIII. Brecha andesítica de color gris claro a gris verdoso con fragmentos de basalto gris oscuro con presencia de vidrio volcánico transparente con trazas de riolita.
- XIX. Secuencia de brecha volcánica constituida por fragmentos de andesita y basalto de gris oscuro en matriz tobácea café rojizo, toba arenosa de crema a café claro y flujos de andesita verde clara y basalto con matriz de toba.
- XX. Secuencias de toba gris verdoso a gris claro a crema, vítrea y arenosa semidura con basalto oscuro y gris claro afanítico y brecha de basalto gris claro a oscuro afanítico, café claro alterado y andesita gris.

- XXI. Toba arenosa café claro y amarillenta suave y semidura, con conglomerado volcánico andesítico gris verdoso a blanquizco y basalto gris oscuro a café rojizo afanítico con vidrio volcánico.
- XXII. Conglomerado volcánico constituido por fragmentos de toba blanquecina, basalto café a rojizo alterado con andesita gris blanquizco y verde claro.
- XXIII. Sedimentos lacustres.

POZO ROMA

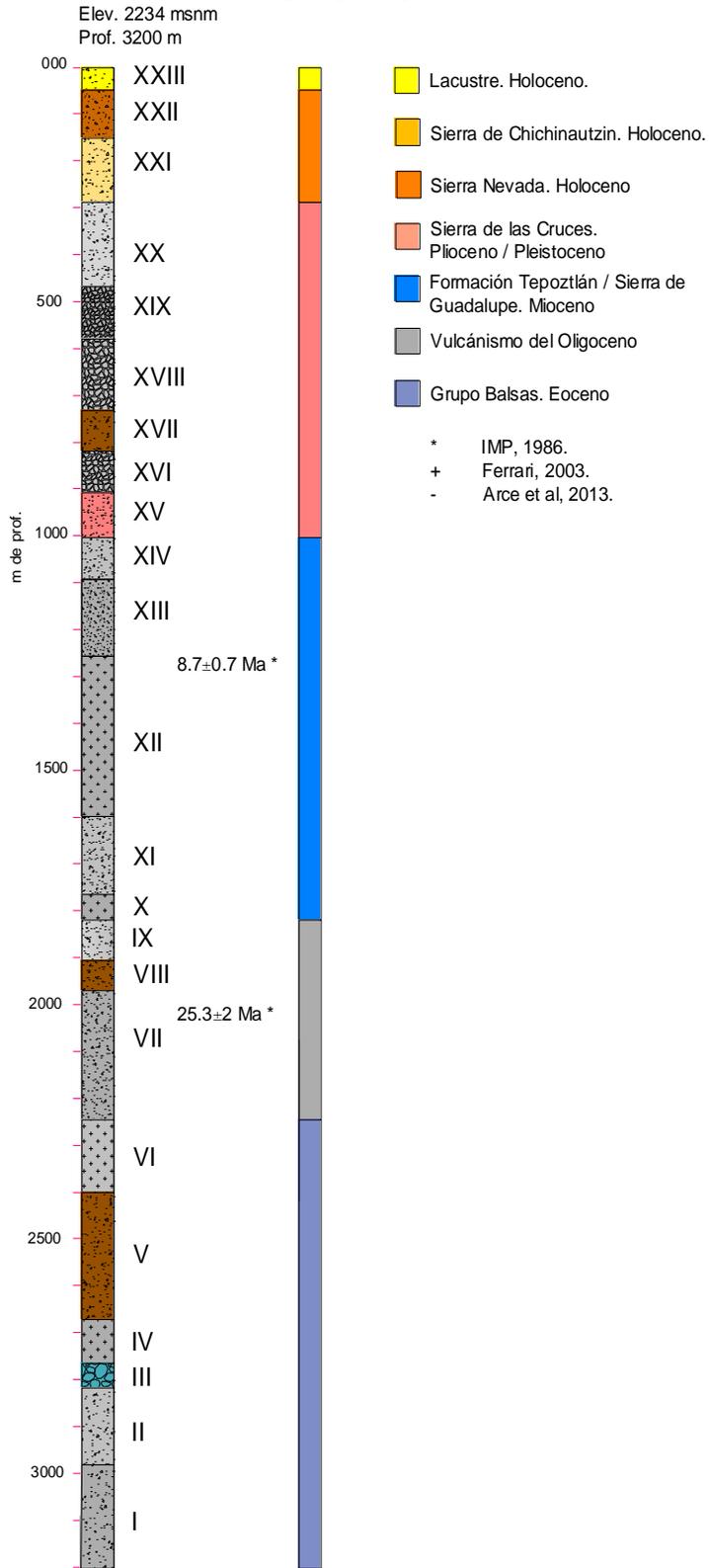


Figura 22.- Columna del pozo Roma – 1. *, IMP, 1986.

IV.III.V Pozo Copilco

El pozo Copilco fue perforado en 1987 a una profundidad de 2258 metros, la Figura 23 muestra la columna utilizada para este trabajo, las unidades descritas se obtuvieron del informe realizado por PEMEX en 1987 y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Basalto gris oscuro de estructura maciza, con cristales de olivino y fracturas.
- II. Basalto con toba (alterada de composición andesítica) de estructura compacta, piroclástica con fragmentos andesíticos en matriz de ceniza.
- III. Brecha volcánica constituida por toba angulosa con fracturas verticales, basalto y pómez.
- IV. Basalto gris oscuro a gris claro, denso, café rojizo por alteración, con presencia de arcilla café claro, con intercalaciones de arenas tobácea y arcillas de café claro, suave y plástica por alteración.
- V. Arcillas y arenas tobácea de color gris claro a oscuro semicompacta con grano de fino a medio.
- VI. Toba café rojizo con trazas de pómez café claro suave y arenisca tobácea gris claro semicompacta.
- VII. Basalto, pómez y brechas volcánicas con fragmentos angulosos de composición tobácea.
- VIII. Toba café de rojizo a verde olivo.
- IX. Basalto gris oscuro a negro, abundantes cristales de olivino con fracturas y partes de color rojizo por alteración.
- X. Arcillas cafés claro con tobas y fragmentos de basaltos.
- XI. Arcilla de composición tobácea semicompacta con basalto de color gris.
- XII. Toba café de rojiza a verde olivo, basalto, trazas de pómez y brecha volcánica con fragmentos angulosos.
- XIII. Brechas volcánicas con fragmento de tobas y trazas de basalto y basalto alterado.

POZO COPILCO

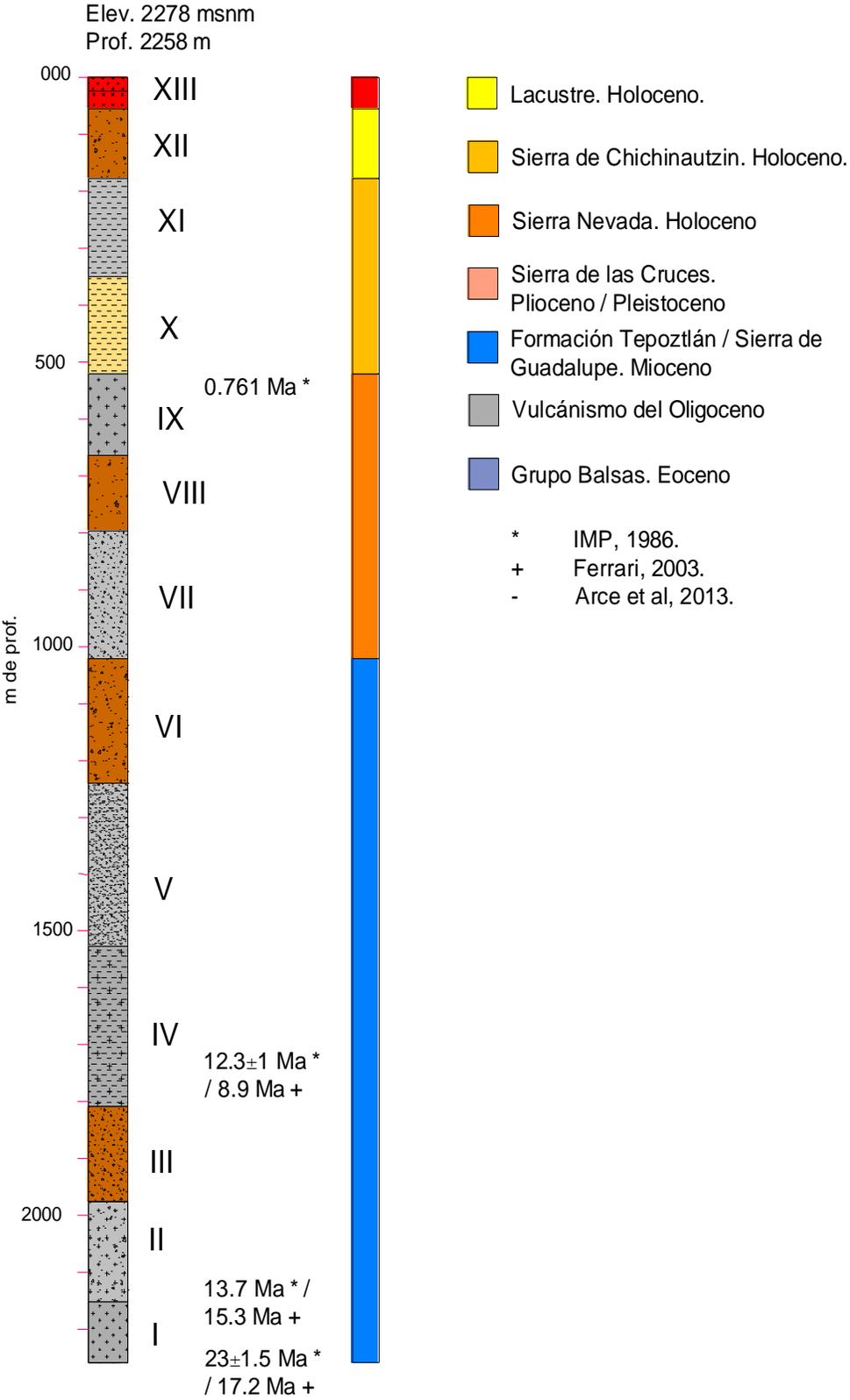


Figura 23.- Columna del pozo Copilco – 1. *, IMP, 1986; +, Ferrari, 2003.

IV.III.VI Pozo San Lorenzo Tezonco

El pozo San Lorenzo Tezonco fue perforado en 2011 a una profundidad de 2008 metros, la Figura 24 muestra la columna utilizada para este trabajo, las unidades descritas se obtuvieron de los datos presentados por Arce et al (2013 y 2015) y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Lava andesítica, de color gris oscuro y rojizo inmerso en una matriz vítrea.
- II. Lava andesítica basáltica, de color gris oscuro - rojizo, afanítica.
- III. Secuencia de flujos de lava andesítica, gris oscuro, porfídica en matriz vítrea, presencia de mineralización hidrotermal como epidota, pirita y montmorillonita.
- IV. Secuencia de flujos de lava de color gris oscuro, porfídica en matriz vítrea.
- V. Secuencia de flujos de lava porfídicas, de color gris oscuro.
- VI. Ceniza fina alterada arcillosa (correlación).
- VII. Secuencia de flujos de lava afanítica y depósitos piroclásticos de composición andesítica. Con composición química homogénea.
- VIII. Ignimbrita de color rosado, poco consolidado con abundantes fenocristales de Pl, Qz y vidrio.
- IX. Flujo piroclástico de bloques y cenizas, gris-blanco, mezclado con lava andesítica alterada (con correlación de pozos cercanos).
- X. Lavas y depósitos piroclásticos de composición dacítica.
- XI. Secuencia andesítica basáltica y dacítica, afanítica de color gris oscuro.
- XII. Tobas y conglomerados volcánicos con fragmentos de basalto gris oscuro (con correlación de pozos cercanos).
- XIII. Tobas y conglomerados volcánicos (con correlación de pozos cercanos).
- XIV. Sedimentos lacustres.

POZO SAN LORENZO TEZONCO

Elev. 2234 msnm
Prof. 2008 m

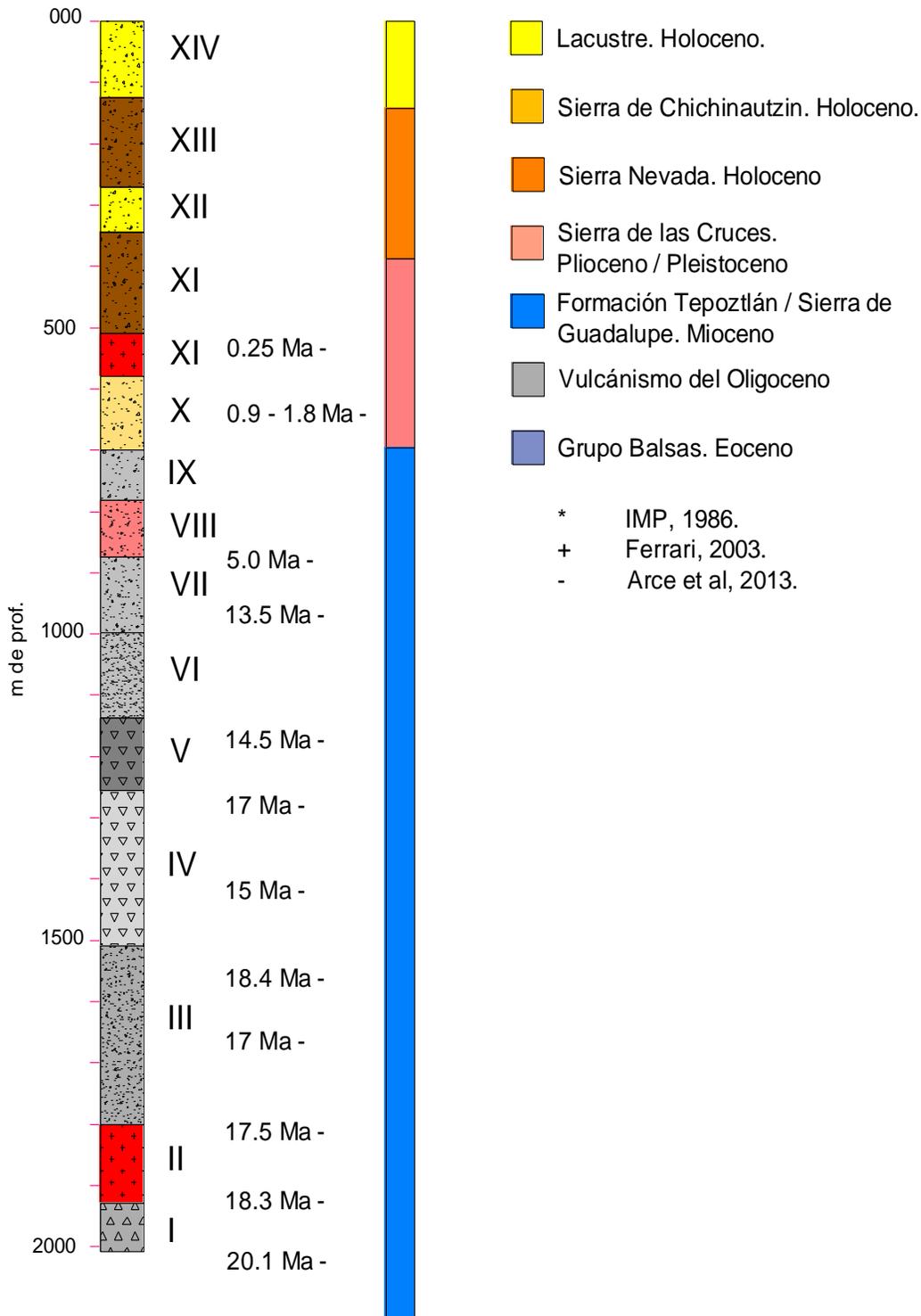


Figura 24.- Columna del pozo San Lorenzo Tezonco. -, Arce et al, 2013 y 2015

IV.III.VII Pozo Agrícola Oriental

El pozo Agrícola Oriental fue perforado en 2016 a una profundidad de 2004 metros, la Figura 25 muestra la columna utilizada para este trabajo, las unidades descritas se obtuvieron de los datos presentados por Morales Casique et al (2018) y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Calizas de color gris claro, recristalizadas.
- II. Calizas de color gris claro, arcillosas.
- III. Calizas de color gris claro, recristalizadas.
- IV. Lava de color gris, porfídica con Px, Anf y epidota, alterada, con fracturas rellenas de calcita y piritita, de composición andesita-dacita.
- V. Lava andesítica porfídica con piritita diseminada, de color gris claro.
- VI. Flujo piroclástico de cenizas, alterado.
- VII. Flujo piroclástico de bloques y cenizas de composición dacítica (brecha volcánica).
- VIII. Lava vítrea porfídica, con Plg, Bt y piritita diseminada de color gris alterada y arcillosa.
- IX. Lava gris alterada y arcillosa.
- X. Ceniza fina alterada arcillosa.
- XI. Lava dacítica alterada y vítrea de color gris oscuro a gris claro muy alterada (arcillosa).
- XII. Flujo piroclástico de bloques y cenizas de color gris (Plg + Px) con bloques andesíticos y lentes de pómez.
- XIII. Flujo piroclástico de bloques y cenizas amarillento, alterado, arcilloso y muy fracturado, con bloques de andesita.
- XIV. Lava dacítica alterada, deleznable.
- XV. Flujo piroclástico de bloques y cenizas, gris-blanco, mezclado con lava andesítica alterada.
- XVI. Flujo piroclástico de bloques y cenizas alterado.
- XVII. Lava andesita-basáltica, color gris oscuro (Plg + Ol +Px).
- XVIII. Ignimbrita rosa.
- XIX. Lava dacítica.
- XX. Tobas, basaltos, y arcillas cafés claro, suave y plástica (con correlación de pozos cercanos).
- XXI. Lava dacítica, vítrea.
- XXII. Depósitos lacustres.
- XXIII. Pómez dacítica y secuencia de depósitos lacustres con depósitos piroclásticos.

POZO AGRÍCOLA ORIENTAL

Elev. 2233 msnm

Prof. 2004 m

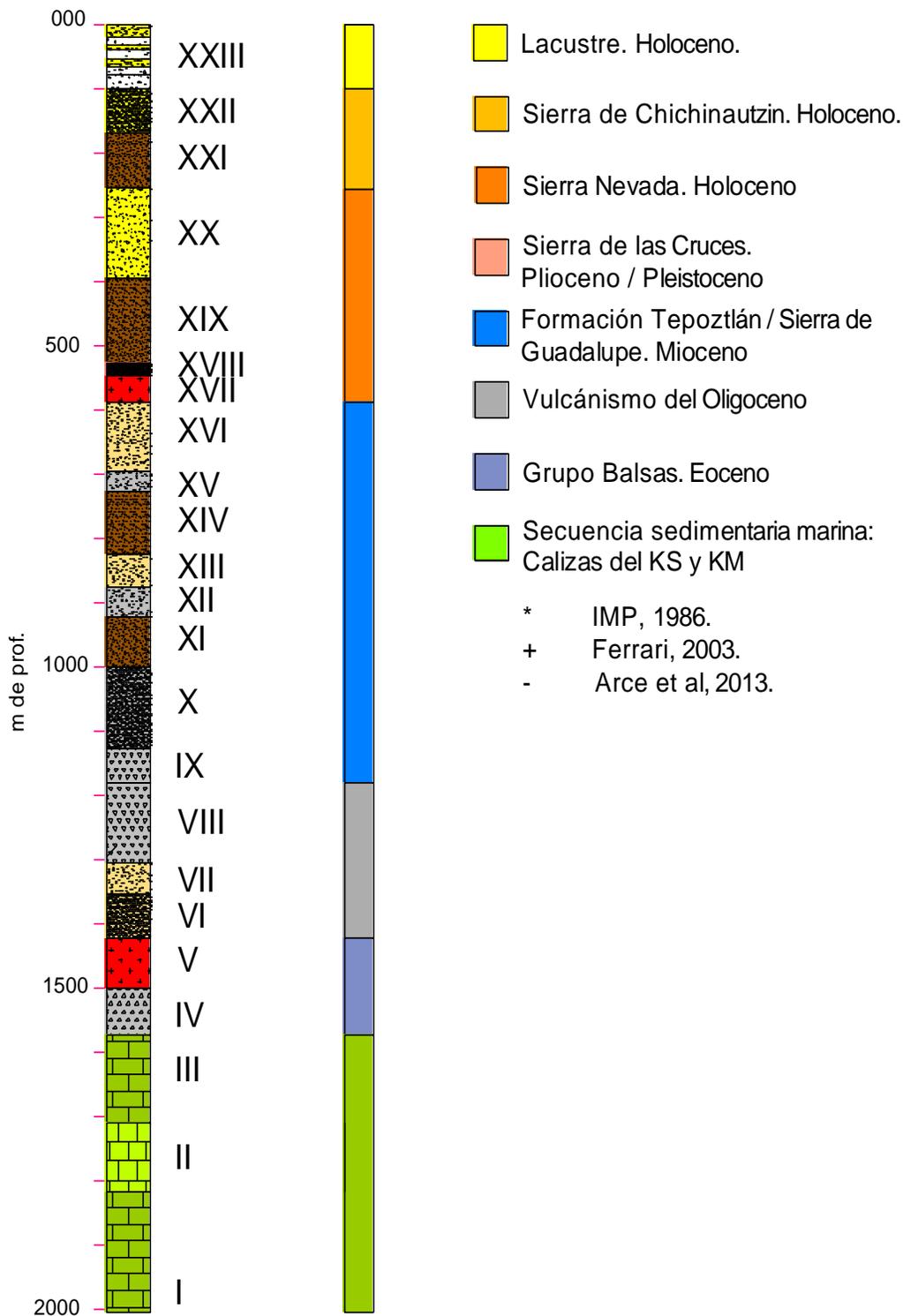


Figura 25.- Columna del pozo Agrícola Oriental.

IV.III.VIII Pozo Santa Catarina

El pozo El Mirador fue perforado direccionalmente en 2017 alcanzando una profundidad real de 1992 metros, la Figura 26 muestra la columna utilizada para este trabajo, las unidades descritas se obtuvieron de las muestras con las que cuenta el IGL (recortes, núcleos y registros geofísicos) permitiendo hacer una columna hasta los 1800 m y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Sin datos.
- II. Material competente, poco alterado y compacto probablemente andesítico (calculado a través de mineralogía compleja).
- III. Secuencia de flujos de lahar de diferentes texturas.
- IV. Intercalación de material consolidado y no consolidado, de alterado a sana (calculado a través de mineralogía compleja)
- V. Secuencia de materiales arcillosos con presencia de líticos redondeados en matriz gruesa de textura porfídica, secuencia de flujos de lahar de diferentes texturas.
- VI. Unidad heterogénea que va de alterada a no alterada, probablemente lahar de diferente grado de agregación (calculado a través de mineralogía compleja).
- VII. Unidad homogénea de alta permeabilidad, de granulometría intermedia quizá cenizas de composición andesítica (calculado a través de mineralogía compleja).
- VIII. Unidad compacta ligeramente alterada de composición andesítica (calculado a través de mineralogía compleja).
- IX. Muestra de color rojizo con fragmentos de color rojizo con líticos finos gris oscuro de textura porfídica con calcedonia en matriz arcillosa clasificado como lahar.
- X. Lava dacítica alterada, deleznable de textura porfídica.
- XI. Flujo piroclástico de bloques y cenizas de color gris-blanco, presencia de pómez, líticos, Pl, Px y vidrio.
- XII. Lava andesítica, color gris claro (Plg + Ol +Px), de textura porfídica, alterada por hidrotermalismo.
- XIII. Ignimbrita rosa.
- XIV. Muestra de color gris claro porfídica con fenocristales de Pl, Bt, alterados de composición andesítica.
- XV. Sin datos.

POZO SANTA CATARINA

Elev. 2238 msnm
Prof. 1992 m

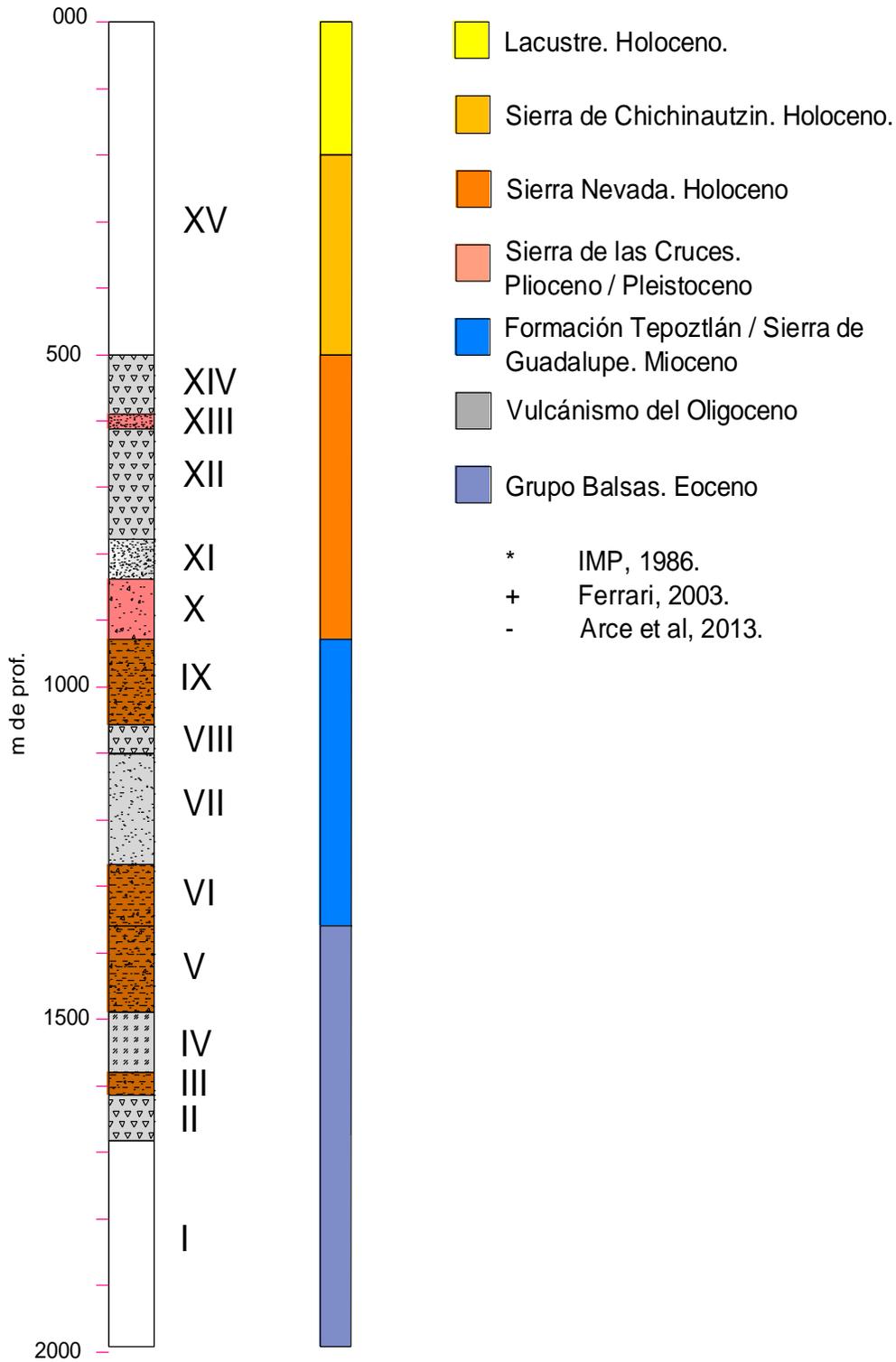


Figura 26.- Columna del pozo Santa Catarina.

IV.III.IX Pozo El Mirador

El pozo El Mirador fue perforado direccionalmente en 2018 alcanzando una profundidad real de 2280 metros, la Figura 27 muestra la columna utilizada para este trabajo, las unidades descritas se obtuvieron de las muestras con las que cuenta el IGL (recortes, núcleos y registros geofísicos) permitiendo hacer una columna hasta los 2140 m y en orden ascendente son las siguientes:

- I. Flujo de bloques y cenizas de composición andesítica y presencia de Pl y Qz.
- II. Flujo de lava de composición andesítica.
- III. Material blanco alterado con presencia de líticos, con ligera alteración de color verde y lava alterada amarilla a verde y presencia de líticos.
- IV. Flujo de lava de color café oscuro alterado y presencia de líticos de composición dacítica.
- V. Material gris oscuro de textura afanítica y matriz vítrea con material alterado de verde a rojizo de composición basáltica.
- VI. Secuencia de flujos piroclásticos de color rojizo alta presencia de Qz y brechas volcánicas de color gris oscuro y líticos alterados de color rojizo.
- VII. Muestra de color gris oscuro, material alterado de color verde a rojizo con alteración y presencia de Qz y Ol.
- VIII. Muestra de color gris oscuro y estructura porfídica con presencia de material piroclástico poco alterado.
- IX. Material porfídico color café claro, ignimbrita alterada.
- X. Material gris oscuro con presencia de pirita, Qz, de composición andesítica.
- XI. Ignimbrita de color rosado, poco consolidada con abundantes fenocristales de Pl, Qz y vidrio.
- XII. Flujo piroclástico de bloques y cenizas, presencia de pómez, Pl, An, Qz, de composición andesítica e intercalaciones de material alterado.
- XIII. Flujo piroclástico de bloques y cenizas, presencia de pómez, pirita, Pl, Qz, de composición andesítica.
- XIV. Flujo piroclástico de bloques y cenizas de composición dacítica.
- XV. Sin recuperación.

POZO EL MIRADOR

Elev. 2292 msnm
Prof. 2070 m

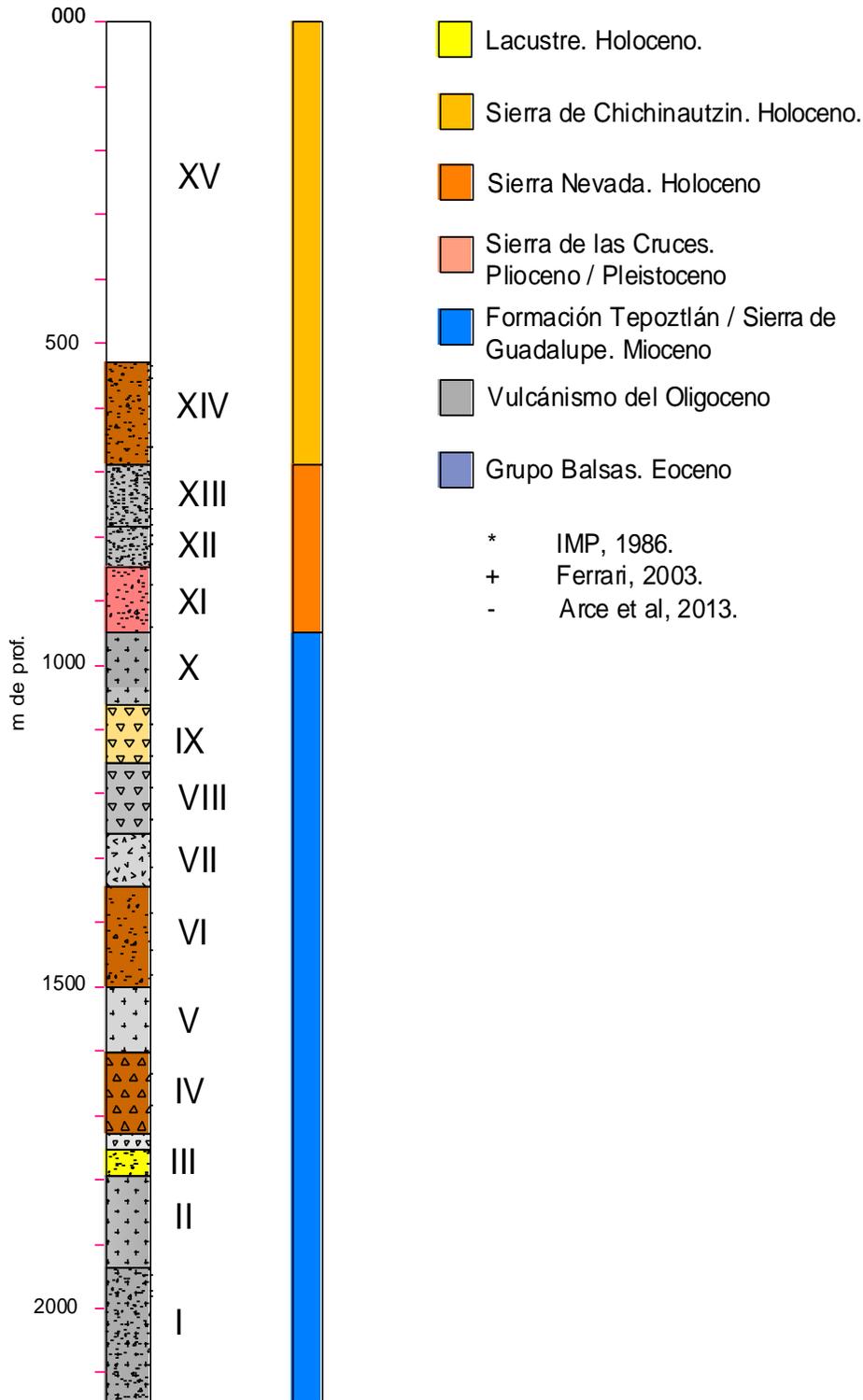


Figura 27.- Columna del pozo El Mirador.

IV.IV Secciones geológicas

En este apartado se mostrarán 2 secciones, la Figura 28 se generó a partir de edades geocronológicas, muestras de canal, núcleos de perforación, interpretación sísmica, datos de publicaciones anteriores, registros geofísicos de pozos y las columnas generadas en el presente trabajo.

Según las edades publicadas en diversos trabajos, (Arce et al., 2013 y Arce et al., 2015; Pérez-Cruz., 1988; PEMEX., 1986) el basamento de la cuenca está constituido por carbonatos del Cretácico. Estos son sobrecuados por secuencias del Eoceno correspondientes al grupo Balsas. Sobre éste, se encuentran unidades pertenecientes al volcanismo del Oligoceno (23.03 – 33.9 Ma.) y Mioceno (5.33 – 23.03 Ma.) que incluye a la Sierra de Guadalupe y a la Formación Tepoztlán, finalmente seguidas de unidades volcánicas del Plioceno al Holoceno (5.33 - reciente) , en este intervalo se encuentra la Sierra de las Cruces, Sierra Nevada, Sierra Chichinautzin y la unidad lacustre que conforma la cobertura de la Ciudad de México, (International Chornostratigraphic Chart, 2018; Arce et al, 2019).

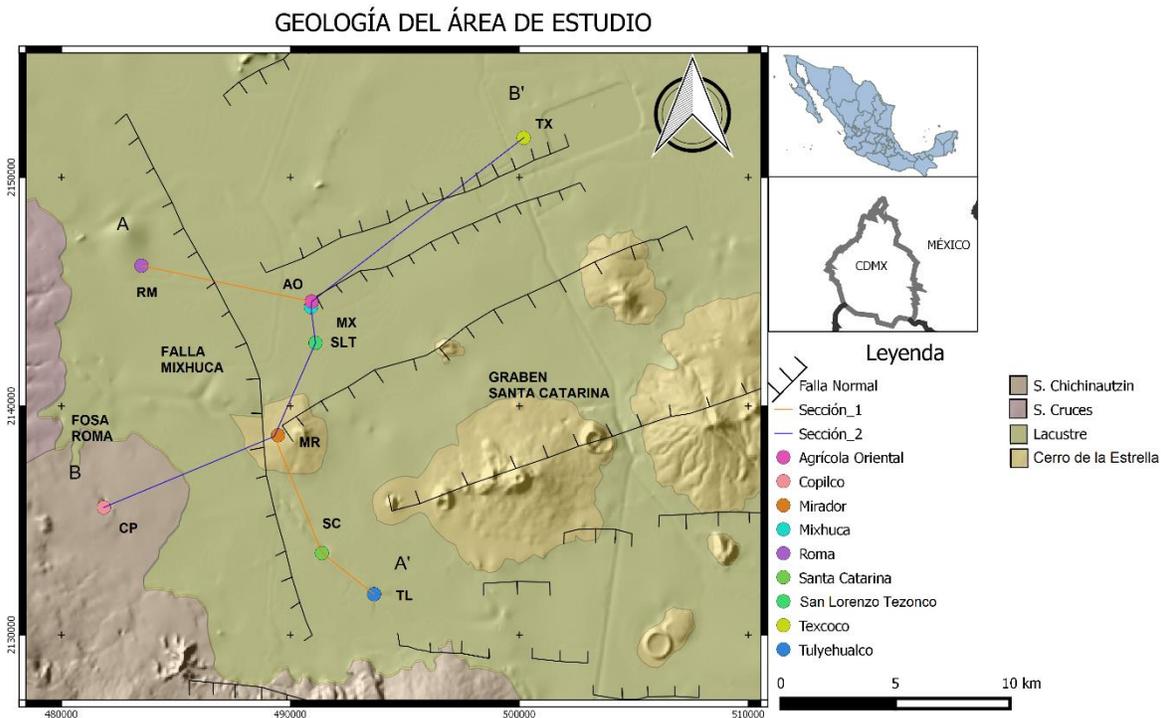


Figura 28.- Pozos profundos usados para la construcción de secciones geológicas, Agrícola Oriental (AO), Copilco (CP), Mirador (MR), Mixhuca (MX), Roma (RM), Santa Catarina (SC), San Lorenzo Tezonco (SLT), Texcoco (TX) y Tulyehualco (TL).

Con anterioridad se han realizado diferentes intentos de conocer el subsuelo de la Cuenca de México (Pérez-Cruz., 1988; Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1989; Lezama-Campos et al., 2016; Arce et al, 2013 y Arce et al., 2015); en estos trabajos generaron columnas y secciones que en su momento resultaban incompletas debido a la ausencia de datos y a la separación entre pozos. La reciente campaña de exploración profunda realizada por el SACMEX ha permitido tener nueva información de la estratigrafía del subsuelo. Los pozos perforados en la última década permiten

rellenar los vacíos y cerrar la brecha entre correlaciones, mejorando así, la conceptualización del subsuelo.

La Figura 29 corresponde a la Sección 1, tiene una longitud de 22.22 km con dirección NW-SE, en esta se encuentran ubicados los pozos Roma, Mixhuca, San Lorenzo Tezonco, Mirador, Santa Catarina, Tulyehualco y la falla Mixhuca y el graben de Santa Catarina; la clasificación presentada corresponde a la mezcla entre las clasificaciones hechas por Arce et al., 2015; Arce et al., 2019; Pérez-Cruz., 1988 y la calibración realizada en conjunto con los registros geofísicos, recorte de perforación y núcleos.

El basamento está constituido por carbonatos del Cretácico sin diferenciar, los cuales reciben la clasificación H-C cuya base no está identificada, pero, su cima fue alcanzada por los pozos Tulyehualco (a los 2100 m de Prof.), Mixhuca (1573 m de Prof.) y el Agrícola Oriental (1550 m de Prof.), la diferencia de profundidad de la cima corresponde a la falla Mixhuca y al graben de Santa Catarina ubicada entre los pozos Agrícola Oriental y San Lorenzo Tezonco (Vásquez- Serrano et al., 2019); aunque se encontraron diferencias litológicas correspondientes al Ks y Km existe una relación estructural (pliegues recumbentes y fallas inversas) que explica esta variación por lo que no es conveniente representarla en las secciones

Con base en los resultados presentados durante el estudio sísmico de Pérez-Cruz., 1988., la clasificación cronoestratigráfica de Arce et al., 2015. y los diversos resultados geocronológicos de PEMEX, 1987., las unidades presentadas en esta tesis surgieron a partir de unificar en bloques y limitarlos respecto a la edad geocronológica.

La unidad clasificada como H-4 puede relacionarse con la Formación Balsas y es encontrada por los pozos el Santa Catarina (de 1360 a 2100 m de Prof.), el Roma no toca la base, pero, la cima es alcanzada a los 2250 m de profundidad, el Mixhuca y el Agrícola Oriental encuentran la unidad de los 1420 a los 1550 m de profundidad. La unidad correspondiente a vulcanismo del Oligoceno se puede clasificar como parte del H-4, esta clasificación está dada por las dataciones, sin embargo, los datos de Pérez- Cruz, 1988, ubican al Oligoceno y a la Formación Balsas dentro del mismo Horizonte, los pozos que atraviesan este bloque, son el Roma (de 1820 a 2240 m de Prof.), el Agrícola Oriental y Mixhuca tocan la unidad de los 1180 a los 1420 m de profundidad, el resto de los pozos, no parecen atravesar la unidad.

El horizonte H-3 es correspondiente con la Formación Tepoztlán y es atravesado por los pozos Tulyehualco (de 860 a 2100 m de Prof.), Santa Catarina (de 930 a 1560 m de Prof.), Mirador y San Lorenzo Tezonco que no tocan la base, pero su cima se encuentra a los 950 m y 975 m de profundidad respectivamente, los pozos Mixhuca y Agrícola Oriental la encuentran entre los 700 y los 1180 m de profundidad y el Roma ubica la unidad entre los 1000 y 1820 m.

H2 es correspondiente con la Sierra Nevada, los pozos que encuentran esta unidad son el Tulyehualco (de 660 m a 860 m), Santa Catarina (de 500 a 930 m), Mirador (de 690 a 950 m), San Lorenzo Tezonco (de 510 a 975 m), Agrícola Oriental y Mixhuca de 390 m a 700 m de profundidad, el pozo Roma no tiene presencia de rocas pertenecientes a la Sierra Nevada, sin embargo, la unidad que se encuentra de los 290 a los 1000 m de profundidad corresponde a vulcanismo proveniente de la Sierra de las Cruces.

H-1 es ubicado dentro del vulcanismo de la Sierra Chichinautzin y es atravesado por los pozos Roma (de 50 a 290 m), Mixhuca y AO (de 160 a 390 m), SLT (de 130 a 510 m), el Mirador, por su ubicación, los primeros 690 m corresponden a vulcanismo del Cerro de la Estrella, Santa Catarina (de 120 a 500 m) y el Tulyehualco (de 180 a 660 m).

Sección Geológica 1

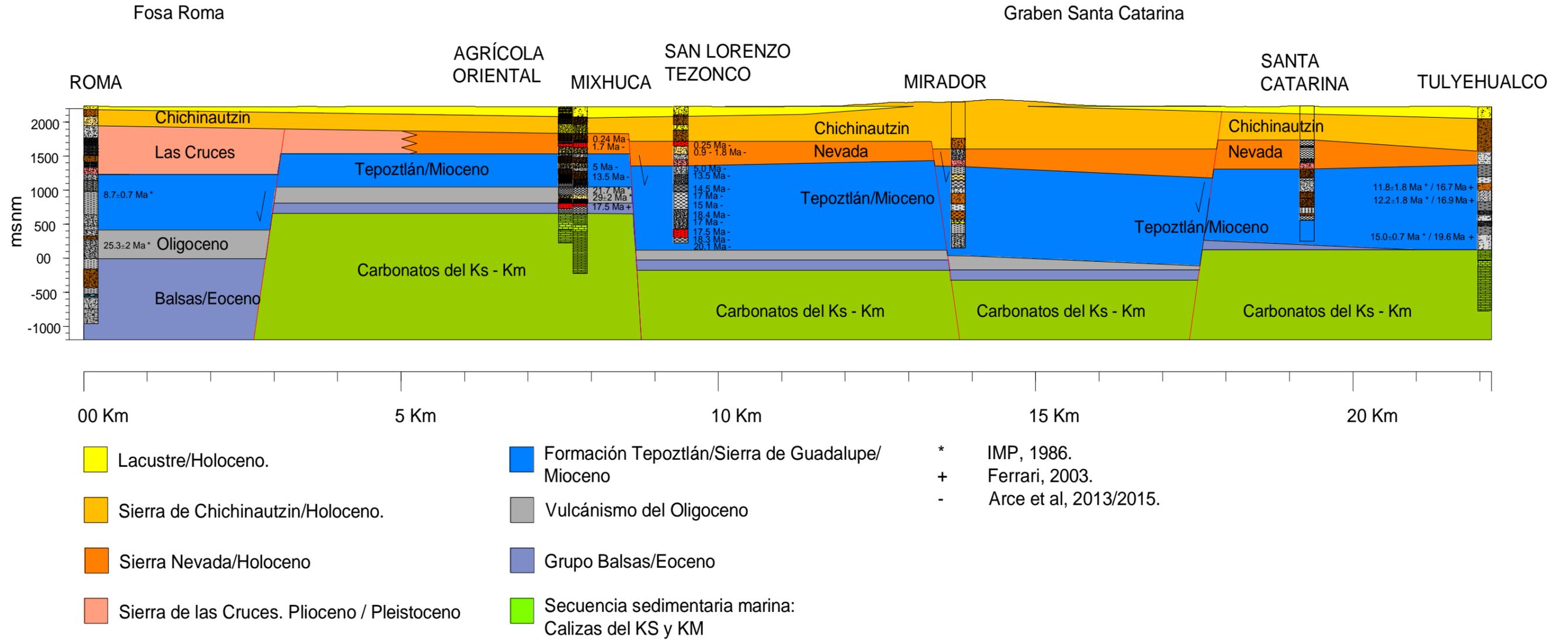


Figura 29.- Sección geológica 1.

La Figura 30 corresponde a la sección 2, tiene una longitud de 26.1 km, en ella se encuentran ubicados los pozos Copilco, Mirador, San Lorenzo Tezonco, Mixhuca, Agrícola Oriental, Texcoco y la falla Mixhuca el graben Santa Catarina; la clasificación presentada corresponde a la mezcla entre las clasificaciones hechas por Arce et al 2015 y 2019; Pérez-Cruz, 1988; y la calibración realizada en conjunto con los registros geofísicos, recorte de perforación y núcleos.

A lo largo del pozo Copilco, los Horizontes encontrados son el H-3 cuya base no es identificada, pero su cima se encuentra a los 1020 m de profundidad y es correspondiente con la formación Tepoztlán; el H-2 se encuentra entre los 520 y los 1020 m y corresponde a la Sierra Nevada; el H-1 tiene un intervalo que va de los 177 a los 520 m perteneciente a la Sierra Chichinautzin.

El pozo Mirador ubicado en el cerro de la Estrella está constituido por el horizonte H-3 (Formación Tepoztlán) con base no definida y cima en los 950 m de profundidad; H-2 (Sierra Nevada) de los 690 a los 950 m y H-1 (Sierra Chichinautzin) que va desde la superficie hasta los 690 m.

El pozo San Lorenzo Tezonco que se ubica al norte del graben de Santa Catarina, no atraviesa la unidad H-3 (Formación Tepoztlán) sin embargo su cima está a los 975 m de profundidad; el horizonte H-2 (Sierra Nevada) se encuentra entre los 510 a los 975 m; finalmente H-1 corresponde a la Sierra Chichinautzin se encuentra entre los 130 a 510 m de profundidad.

El pozo Mixhuca y Agrícola Oriental se encuentran muy cercanos entre sí, por ello se decidió unificar las profundidades de sus horizontes, para el H-C (carbonatos) no se conoce la base pero la cima se encuentra a los 1550 m; el H-4 (Grupo Balsas y vulcanismo del Oligoceno) se encuentran entre los 1180 y 1550 m de profundidad; H-3 (Formación Tepoztlán) se encuentra de los 700 a los 1180 m; para la unidad H-2 (Sierra Nevada) el intervalo va de 390 m a 700 m de profundidad; finalmente la unidad H-1 (Sierra Chichinautzin) se encuentra entre 160 y 390 m de profundidad.

El pozo Texcoco se encuentra en el graben que lleva su nombre, al NE de la ciudad, la clasificación de edades fue determinada a partir de las edades radiométricas reportadas por el IMP en 1986, el horizonte H-4 (grupo Balsas y vulcanismo del Eoceno) no ubica la base del bloque, pero, la cima está a los 1070 m de profundidad; el horizonte H-3 por su ubicación corresponde a la Sierra de Guadalupe y por su edad es correlacionarle con la Formación Tepoztlán, su intervalo está entre los 560 y 1070 m de profundidad; H-2 es correspondiente con la Sierra Nevada y su alcance va de los 300 a los 560 m; el horizonte H-1 no es encontrado en la columna, por ello, se asume que se acuña en algún lugar.

Sección Geológica 2

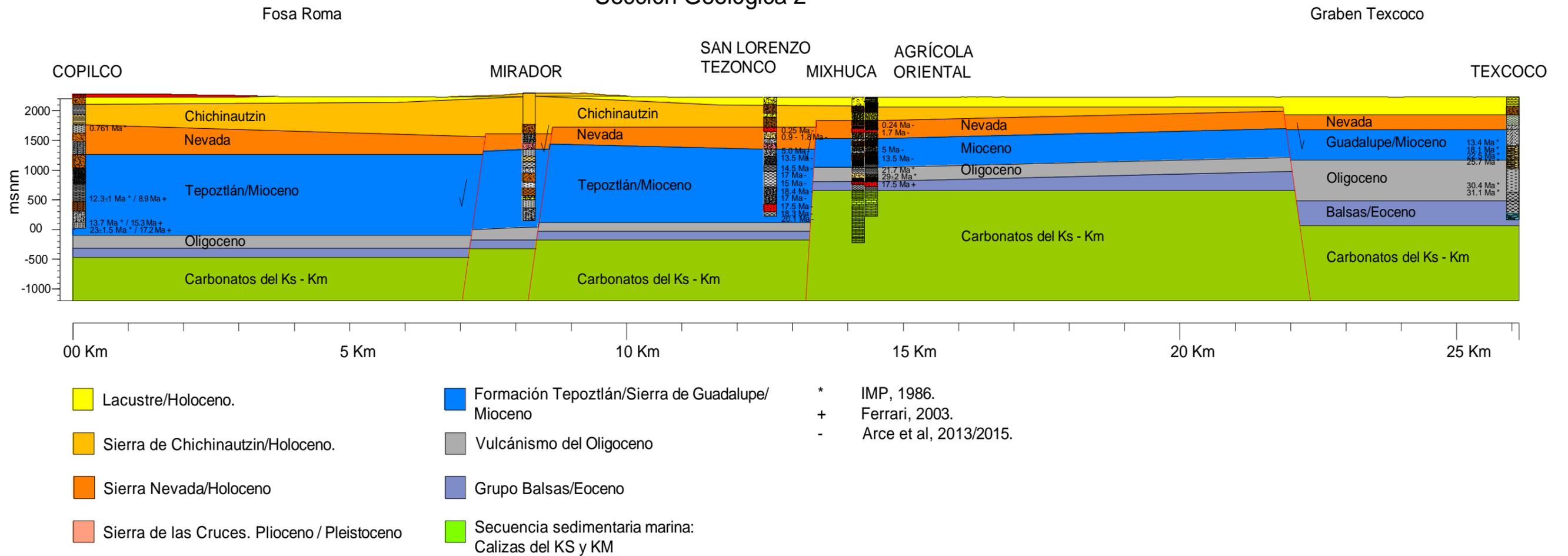


Figura 30.- Sección geológica 2.

IV.IV.I Heterogeneidad de las rocas

La diferencia entre propiedades físicas y mineralógicas de las unidades litológicas cortadas por los pozos pueden ser justificadas por la gran heterogeneidad de las rocas (continuidad y extensión lateral) en ambientes volcánicos y volcánico - sedimentarios en un área relativamente pequeña como la del Valle de México. Esta variabilidad puede ser explicada a partir de la representación superficial de las diferentes formaciones rocosas en áreas aledañas al valle, tal es el caso de los diferentes mapas presentados en diversos trabajos (Fries C., 1960; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1989; Lugo-Hub et al 1996; Santoyo et al., 2005; Mooser en Santoyo et al., 2005; Garcia-Palomo et al., 2008; González-Torres et al., 2015; Lezama-Campos et al., 2016; Arce et al., 2013, 2015, 2018 y 2019) que muestran gran heterogeneidad en depósitos superficiales y por consiguiente limitada continuidad de unidades litológicas.

Como ya se mencionó en este capítulo, uno de los objetivos es identificar la continuidad lateral de las formaciones, para ello se recurrió a la correlación a través de perfiles sísmicos, la Figura 31 muestra la relación entre unidades litológicas de los pozos, dicha sección fue construida a partir de información sísmica disponible, registros geofísicos y la estratigrafía de cada pozo. La posibilidad de que los estratos productores y unidades hidrogeológicas identificados en el pozo San Lorenzo Tezonco tengan continuidad hacia los pozos Agrícola Oriental y Mixhuca puede ser visible en las Figuras 31 y 32, pues la información sísmica, interpretación cuantitativa y cualitativa permiten apoyar esa correlación e identificar elementos estructurales que afectan o permiten la continuidad de los estratos.

Primeramente, se mostrará la continuidad de las unidades litológicas presentes en estos 3 pozos. Las fallas presentes se tomaron de la interpretación de las líneas sísmicas que se encuentran cercanas al pozo agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco, además de ser complementado con la interpretación estructural realizada por Vázquez-Serrano., 2019.

En esta sección se ha identificado una unidad que cumple con las características de acuitardo, sin embargo, este bloque tiene un espesor que va de los 100 a los 250 metros y no es posible seguirlo debido a la separación que existe entre los pozos que va de los 7 a los 11 km y al alto grado de heterogeneidad que poseen las rocas volcánicas.

Los pozos más cercanos entre si son el Agrícola Oriental separado del Mixhuca por 230 metros y a su vez este último se encuentra a 1.58 km del San Lorenzo Tezonco; estos 3 pozos se utilizaron para mostrar de manera general el grado de heterogeneidad que existe entre unidades aun estando a corta distancia.

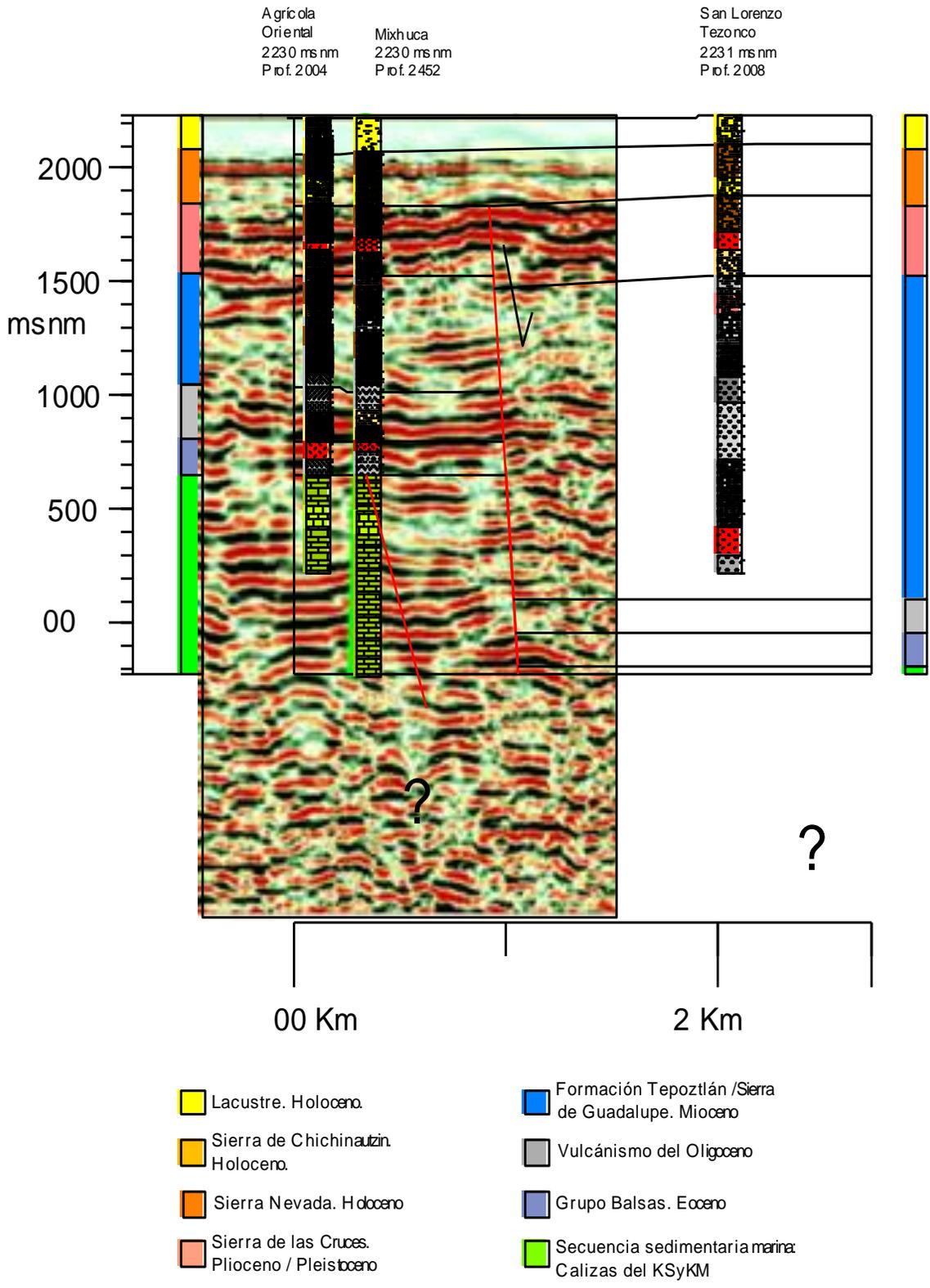


Figura 31.- Correlación de unidades litológicas a través de la sísmica.

La Figura 32 muestra una sección en la que están los 3 pozos, la continuidad lateral de la unidad que es considerada como acuitardo va de los 1000 a los 1150 m y está constituida por cenizas arcillosas alteradas; de acuerdo con Vásquez-Serrano et al., 2019. Existe una serie de fallas que pertenecen al flanco norte de la fosa de Santa Catarina, las observaciones descritas en ese estudio establecen un contacto entre rocas volcánicas del Oligoceno (Andesitas) y carbonatos del Cretácico. La aseveración anterior es confirmada cuando se integró información de núcleos, muestras de canal, interpretación sísmica y los registros geofísicos.

A primera vista se puede ver que existen unidades continuas y discontinuas; al parecer, en los 3 pozos, la continuidad parece conservarse en las 6 primeras unidades (600 metros) donde estas consisten en depósitos lacustres, tobas, derrames lávicos y una unidad alterada. Los siguientes 400 metros, parecen no tener continuidad respecto a la descripción litológica. Se observa continuidad lateral de las cenizas y el bloque que está debajo (300 m); sin embargo, esta continuidad se ve afectada por la falla que se encuentra entre los pozos. Los bloques que están por encima de las calizas de los pozos Agrícola Oriental y Mixhuca no parecen tener continuidad con el pozo SLT, probablemente debida a la presencia de la falla Mixhuca (Vásquez-Serrano et al., 2019). Por encima de los 2000 metros de profundidad en el pozo San Lorenzo Tezonco se asume que se encuentra la base de la Formación Tepoztlán, unidades correspondientes al vulcanismo del Oligoceno y el Grupo Balsas. Finalmente, en los pozos Agrícola Oriental y Mixhuca a los 1550 metros comienzan las unidades cretácicas, mientras que en el San Lorenzo Tezonco los carbonatos no son visibles y se asume que se encuentran cercanos a los 2200 m.

La variabilidad mineralógica es muy común en rocas volcánicas. Para el caso particular de la Ciudad de México algunas etapas en la perforación presentan alteración hidrotermal acompañada de una gran variedad litológica ocasionada por los diferentes eventos magmáticos presentes en el área y descritos con anterioridad.

IV.IV.II Hidrogeología

Un parámetro para tener en cuenta para futuros trabajos de modelación hidrogeológica es la conductividad hidráulica (K), que es la medida de la capacidad del flujo para fluir a través de los poros de un material; este parámetro depende de la densidad, viscosidad y otras propiedades del medio (Selley. R., 2016).

La unidad para medir la conductividad hidráulica es el metro cuadrado (m^2) y es diferente para cada material rocoso, el factor principal que determina la conductividad es el grado cristalino, fracturas y tamaño de grano de la roca (Selley. R., 2016).

Al igual que en las columnas geológicas, donde se busca distinguir las diferentes unidades por composición litológica; en hidrogeología se busca conocer la distribución de la conductividad, esto implica que varias unidades litológicas pueden ser agrupadas en un mismo paquete de propiedades hidrogeológicas.

A continuación, se muestran las tablas 9 a 16 donde se identifican las medidas estadísticas de las unidades de la información recabada en este trabajo, la varianza para el caso de las unidades identificadas describe la variabilidad de la dispersión. Para el caso de las tablas, la mayoría de las medias de cada unidad de los diferentes pozos estos valores se encuentran entre $1.77e-9$ y $8.9e-19$, y poseen una varianza que va de $1.31e-18$ a $5.19e-37$ lo que significa que los paquetes no son homogéneos y existe una gran variabilidad de propiedades (conductividad hidráulica) dentro del mismo paquete litológico.

Conductividad hidráulica del pozo Texcoco							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m^2)	Max(m^2)	Prom(m^2)	Var(m^2)	Unidades geológicas
a	624	816	6.37E-17	1.41E-14	4.11E-15	4.36E-30	V
b	816	1040	9.87E-30	2.44E-14	3.08E-15	2.93E-29	IV
c	1040	1245	6.22E-20	3.67E-15	5.95E-16	6.72E-31	IV
d	1245	1428	9.87E-30	4.60E-15	9.09E-16	5.01E-31	III
e	1428	1605	9.87E-30	7.27E-15	7.94E-16	1.80E-30	III
f	1605	1741	4.43E-17	1.27E-14	2.54E-15	6.55E-30	II
g	1741	1971	3.12E-15	2.62E-14	1.05E-14	2.29E-29	II
h	1971	2060	6.80E-18	3.28E-14	7.12E-15	3.28E-29	II y I

Tabla 9.-Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Texcoco.

Conductividad hidráulica del pozo Tulyehualco							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m ²)	Max(m ²)	Prom(m ²)	Var(m ²)	Unidades geológicas
a	668	819	9.87E-30	5.23E-18	1.81E-19	5.19E-37	XV y XIV
b	819	1088	9.87E-30	5.55E-17	2.50E-18	6.63E-35	XIV, XII Y XII
c	1088	1219					XII y XI
d	1219	1287	9.87E-30	1.73E-17	9.62E-19	1.25E-35	XI y X
e	1287	1416					X y IX
f	1416	1581	9.87E-30	7.83E-16	1.64E-17	8.81E-33	IX y VIII
g	1581	1809	2.52E-22	1.95E-16	1.76E-17	1.38E-33	VIII, VII, VI y V
h	1809	1873	9.87E-30	2.56E-17	8.90E-19	2.18E-35	V

Tabla 10.-Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Tulyehualco.

Conductividad hidráulica del pozo Mixhuca							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m ²)	Max(m ²)	Prom(m ²)	Var(m ²)	Unidades geológicas
a	177	406	1.38E-26	9.24E-12	1.91E-13	3.97E-25	XXI, XX, XIX Y XVII
b	406	492	1.43E-22	7.57E-13	7.96E-14	6.34E-27	XVIII
c	492	586	2.23E-28	1.27E-12	3.59E-14	1.90E-26	XVII y XVI
d	586	705	4.11E-16	2.67E-12	1.81E-13	7.65E-26	XVI, XV y XIV
e	705	776	3.21E-23	3.64E-12	1.72E-13	2.40E-25	XIV y XIII
f	776	956	1.43E-22	2.76E-12	1.26E-13	4.84E-26	XIII, XII, XI y X
g	956	1072	3.13E-26	4.51E-12	1.79E-13	3.19E-25	X y IX
h	1072	1186	3.75E-15	4.71E-12	4.65E-13	2.23E-25	IX y VIII
i	1186	1220	5.05E-27	4.40E-13	1.68E-14	1.51E-27	VIII
j	1220	1525	6.43E-18	6.07E-13	5.46E-14	9.64E-27	VIII, VII, VI, V y IV
k	1525	1736	1.38E-27	4.93E-14	5.28E-16	1.05E-29	IV y III
l	1736	1834	6.72E-23	1.08E-14	1.70E-15	2.03E-30	II
m	1834	2024	2.23E-28	2.39E-13	2.31E-16	2.57E-29	II y I
n	2024	2179	1.27E-22	2.39E-13	8.60E-16	9.83E-29	I
o	2179	2445	1.38E-26	3.44E-15	1.18E-17	1.87E-32	I

Tabla 11.-Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Mixhuca.

Conductividad hidráulica del pozo Copilco							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m ²)	Max(m ²)	Prom(m ²)	Var(m ²)	Unidades geológicas
a	102	182	2.29E-18	1.36E-08	1.09E-10	1.31E-18	XIII y XII
b	182	340	2.25E-14	2.35E-13	3.94E-14	9.03E-28	XII y XI
c	340	663	1.07E-17	3.72E-13	4.15E-14	4.19E-27	X y IX
d	663	796	1.42E-15	1.96E-11	3.63E-14	4.61E-25	VIII
e	796	1200	1.29E-18	1.63E-10	4.28E-13	1.46E-23	VII y VI
f	1200	1527	1.48E-13	7.24E-11	1.26E-11	8.43E-23	VI y V
g	1527	1809	5.82E-15	1.44E-10	7.92E-12	3.74E-22	IV
h	1809	2250	3.65E-16	3.43E-10	2.14E-11	1.23E-21	III, II y I

Tabla 12.-Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Copilco.

Conductividad hidráulica del pozo San Lorenzo Tezonco							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m ²)	Max(m ²)	Prom(m ²)	Var(m ²)	Unidades geológicas
a	719	829	9.87E-30	3.66E-14	6.56E-15	8.00E-29	IX y VIII
b	829	860	9.87E-30	7.96E-15	2.37E-15	5.78E-30	VIII
c	860	907	9.87E-30	3.40E-14	1.28E-14	1.04E-28	VIII y VII
d	907	992	9.87E-30	3.03E-14	2.65E-15	5.76E-29	VII
e	992	1138					VII y VI
f	1138	1292	9.87E-30	7.14E-14	1.10E-14	3.75E-28	V y IV
g	1292	1691	9.87E-30	8.62E-14	9.25E-15	3.26E-28	IV y III

Tabla 13.-Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo San Lorenzo Tezonco.

Conductividad hidráulica del pozo Agrícola Oriental							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m ²)	Max(m ²)	Prom(m ²)	Var(m ²)	Unidades geológicas
a	661	690	9.87E-30	2.54E-14	1.93E-15	1.18E-29	XVI
b	690	940	9.87E-30	1.10E-11	8.24E-13	4.24E-25	XVI, XV, XIV, XIII, XII y XI
c	940	1000	4.52E-17	2.33E-12	4.43E-13	2.81E-25	XI
d	1000	1144					X
e	1144	1279	9.87E-30	1.05E-12	7.02E-14	1.48E-26	IX y VIII
f	1279	1384	7.67E-19	8.84E-13	1.28E-13	1.40E-26	VIII, VII y VI
g	1384	1500	2.10E-27	2.49E-12	9.18E-14	5.38E-26	VI y V
h	1500	1560	9.87E-30	2.69E-13	7.03E-15	1.26E-27	IV
i	1560	1646	9.87E-30	1.67E-12	5.26E-14	3.08E-26	IV y III
j	1646	1713	9.87E-30	9.92E-12	5.76E-13	1.30E-24	III
k	1713	1807	3.06E-20	2.45E-12	6.20E-14	3.48E-26	II
l	1807	1873	9.87E-30	2.08E-11	8.54E-14	4.87E-25	II y I

Tabla 14.-Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Agrícola Oriental.

Conductividad hidráulica del pozo Santa Catarina							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m ²)	Max(m ²)	Prom(m ²)	Var(m ²)	Unidades geológicas
a	543	611	5.40E-16	9.61E-11	1.09E-11	2.31E-22	XIV y XIII
b	611	842	7.46E-16	1.10E-10	8.35E-12	1.33E-22	XIII, XII y XI
c	842	920	3.23E-13	1.49E-10	5.73E-11	1.33E-21	X
d	920	1009	1.42E-11	3.90E-10	1.45E-10	2.00E-21	IX
e	1009	1075					IX
f	1075	1149	7.62E-14	6.22E-11	9.48E-12	1.69E-22	IX, VIII y VII
g	1149	1316	9.75E-13	3.54E-11	7.13E-12	2.98E-23	VII y VI
h	1316	1420	2.08E-12	2.81E-10	8.30E-11	6.88E-21	VI y V
i	1420	1696	2.03E-14	3.85E-10	8.80E-11	9.80E-21	V y IV
j	1696	1772	1.41E-10	3.49E-10	2.54E-10	2.23E-21	III y II

Tabla 15.-Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo Santa Catarina.

Conductividad hidráulica del pozo el Mirador							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m ²)	Max(m ²)	Prom(m ²)	Var(m ²)	Unidades geológicas
a	1001	1145	1.38E-26	4.92E-07	1.77E-09	5.04E-16	X y IX
b	1145	1325	9.87E-30	1.23E-12	5.12E-14	2.55E-26	VIII y VII
c	1325	1500	1.94E-24	4.21E-12	1.34E-13	1.57E-25	VII y VI
d	1500	1537	9.87E-30	6.76E-13	1.01E-14	4.45E-27	V
e	1537	1598	6.77E-17	2.51E-12	2.18E-13	1.67E-25	V
f	1598	1727	9.87E-30	5.11E-13	8.28E-15	2.43E-27	V y IV
g	1727	1937	9.87E-30	1.04E-12	2.37E-14	8.23E-27	IV, II y I
h	1937	2119	4.35E-18	1.10E-12	1.95E-14	6.80E-27	II y I

Tabla 16.-Medidas estadísticas de conductividad hidráulica del pozo el Mirador.

Con la información de las Tablas 9 a 16 se construyó una sección que intenta mostrar la distribución de conductividad hidráulica en un espacio correspondiente a los pozos Agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco. En la Figura 33 se muestra cómo es que la mayoría del material litológico posee unidades con mayor conductividad ($8e-10$ m² a $2e-10$ m²) en la mayoría del espacio estudiado de los pozos Agrícola Oriental y Mixhuca; existen unidades que son menores a $2e-10$ en varios intervalos del pozo San Lorenzo Tezonco que pueden ser relacionadas con unidades semi impermeables que también fueron identificadas en Morales-Casique., 2014, donde existió pérdida de circulación y disolución de lodo, indicando aporte de agua de formación.

Conductividad hidráulica del pozo el Mirador							
Unidad	Cima(m)	Base(m)	Min(m ²)	Max(m ²)	Prom(m ²)	Var(m ²)	Unidades geológicas
a	1001	1145	1.38E-26	4.92E-07	1.77E-09	5.04E-16	X y IX
b	1145	1325	9.87E-30	1.23E-12	5.12E-14	2.55E-26	VIII y VII

Para realizar la interpretación hidrogeológica se utilizó la sección de la Figura 32 debido a que los pozos son cercanos entre sí y al igual que la sección geológica el seguir unidades permite identificar la continuidad de las capas a lo largo de los pozos.

La continuidad en esta sección es afectada por la falla que se encuentra entre los pozos Mixhuca y San Lorenzo Tezonco. Como se mostró en este capítulo se identificaron unidades que corresponden al mismo material en 8 de los 9 pozos y aunque parece ser el mismo bloque, no se puede determinar si es continuo a lo largo del subsuelo.

Es evidente que las unidades hidrogeológicas no coinciden con las litológicas. La Figura 32 muestra zonas que son de interés para este estudio, donde la clasificación de estas unidades se tomó a partir de los resultados presentados por COMESA, 2013., Morales-Casique 2014 y 2015., Lezama-Campos, 2016.; además, existen vacíos en la interpretación en los primeros 500 metros y en el área correspondiente a los carbonatos debido a que en estos intervalos no se tiene información de los registros geofísicos, los cuales pueden otorgar información acerca de la posible permeabilidad de las zonas.

Las fallas identificadas en la sección geológica favorecen el flujo de agua hacia las zonas con mayor grado de almacenamiento, favoreciendo que el material fracturado tenga una mayor permeabilidad, pues permiten el flujo de agua en las diferentes zonas (Vásquez-Serrano et al., 2019).

La Figura 34 en su parte más profunda (magenta) corresponde a una zona fracturada que posiblemente almacena agua debido a que es sobreyacidos por unidades que manifestaron una cantidad de agua considerable durante la perforación de los pozos (azul) en 2 diferentes etapas (Morales-Casique et al., 2014). El color amarillo mezclado con azul simboliza presencia de agua en un material arcilloso, la combinación entre amarillo y rojo representa un material que va de arcilloso a no alterado. La zona coloreada de gris se encuentra constituida por material piroclástico con una matriz de cenizas arcillosas y alteradas que presumiblemente y con ayuda del registro se determinó que puede servir como separación entre unidades productoras, limitando así un flujo vertical entre los acuíferos por encima de los 1000 metros y los acuíferos profundos (1500 m).

Físicamente los acuíferos se encuentran emplazados en rocas fracturadas porfídicas, lavas andesíticas vítreas, lavas porfídicas y lavas fracturadas con presencia de alteración hidrotermal; este tipo de propiedades es muy característico en acuíferos alojados en rocas volcánicas.

Las unidades poco permeables se ubican en ignimbritas, lavas, brechas volcánicas, rocas piroclásticas alteradas constituidas por cenizas y tobas de composición andesítica y dacítica, además de presentar fracturas rellenas; el tamaño de los materiales y la alteración son la causa por la cual estos materiales se clasificaron de esta forma.

Las zonas fracturadas pueden ser conductos que favorezcan el flujo a través de la roca, las fracturas se encuentran flujos de lava andesítica de características homogéneas, lava afanítica, depósitos piroclásticos y secuencias basálticas, el fracturamiento es presente en los carbonatos del Cretácico, el origen del fracturamiento es debido a la presencia de la Falla Mixhuca (Vásquez-Serrano et al., 2018).

V. Discusiones

V.1 Porosidad y permeabilidad

En capítulos anteriores se comentó que algunos de los parámetros fueron estimados a través de ecuaciones lineales con el objetivo de generar parámetros sintéticos que permitieron llenar los vacíos de información que alimentan al modelo de mineralogía compleja.

La tabla 9 muestra el comparativo entre diferentes métodos de estimación de porosidad, el primer método corresponde a la medición tomada de manera indirecta (registros geofísicos), la segunda corresponde a lo calculado por el INELL, ambos son similares y por ello se consideraron como referente para hacer el comparativo de los diferentes métodos. El método de “Doble agua” es el que mejor se ajusta a los usados como referente; aunque el resto de los modelos se ajusta al comportamiento de la porosidad, sobrepasan el valor que sirve como referencia, por ello es por lo que no son considerados como viables. En el anexo 1 se puede tener más información de las ecuaciones usadas.

Método	Valor estimado
NPHI	27.3
INEEL	28.7
DOBLE AGUA (DW)	26.3
SIMANDOUX (SM)	ND
ARCHIE	31.4
INDONESIA (IND)	31.0

Tabla 17.- Comparativo entre valores de porosidad para una profundidad común.

La Figura 33 muestra como las curvas sintéticas describen bastante bien la realidad (NPHI e INEL), la porosidad sintética que se decidió utilizar fue calculada a partir de la ecuación de Doble agua, pues, fue la que mejor se ajustó a la respuesta medida por el INEEL en el núcleo y al valor medido por la herramienta NPHI.

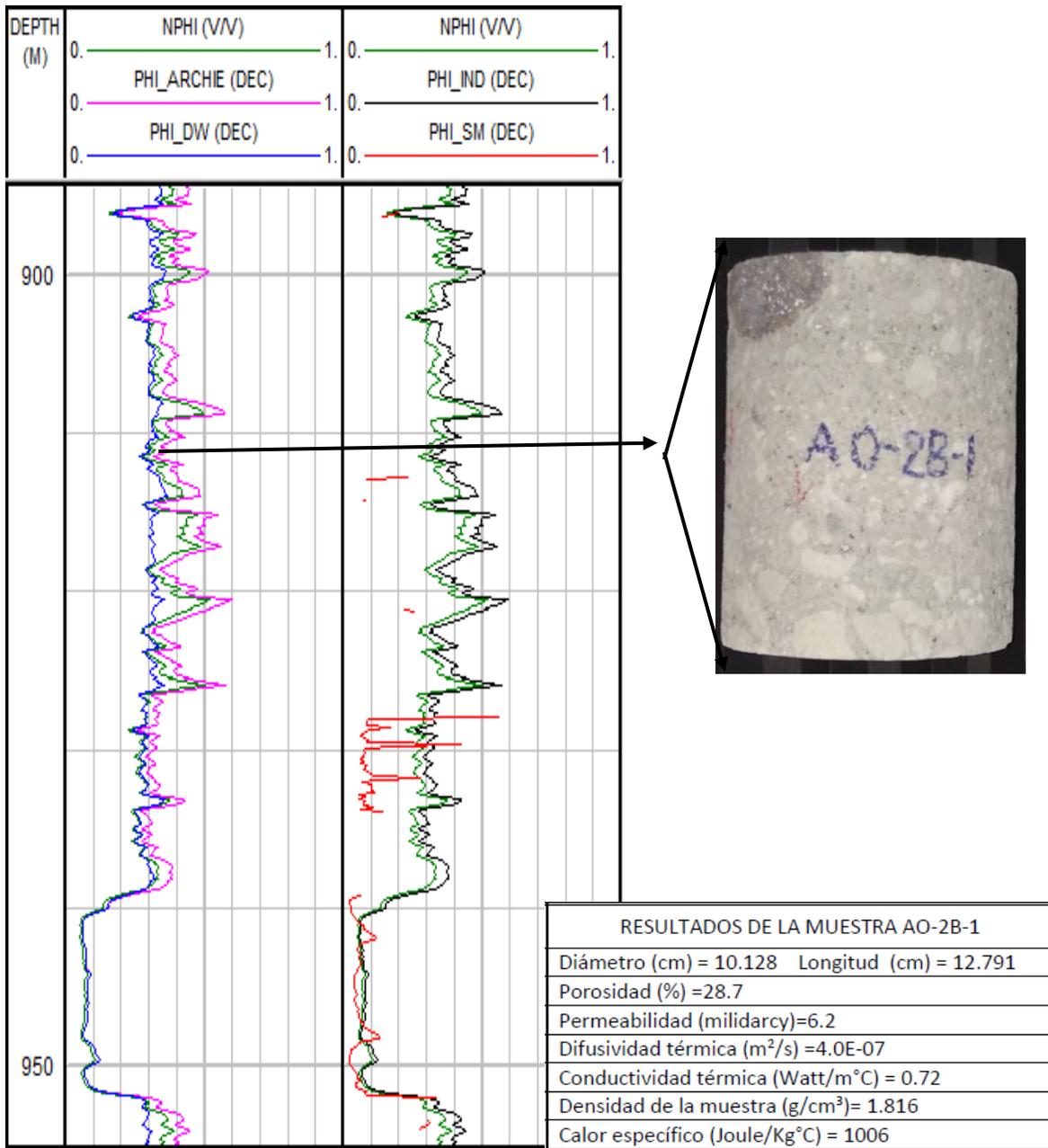


Figura 35.- Curvas sintéticas calculadas para la porosidad.

Del mismo modo que se estimó la porosidad (PHI), la estimación de la permeabilidad fue seleccionada a partir de los valores que más se ajustaron con el medido por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL).

La Figura 34 muestra las diferentes curvas calculadas para la permeabilidad, siendo el método por default del software el que mejor se ajusta al valor registrado en el núcleo, la Tabla 1 muestra el comparativo de los valores obtenidos de cada una de las curvas, siendo los métodos de Coates, Domanoir y Tixier los que menos se ajustan al comportamiento registrado por el INEEL.

Método	Valor md
INEEL	6.2
IP	5.15
TIMUR	4.29
TIXIER	1.62
DOMANOIR	0.15
COATES	0.3

Tabla 18.- Resultados de las permeabilidades a una profundidad común.

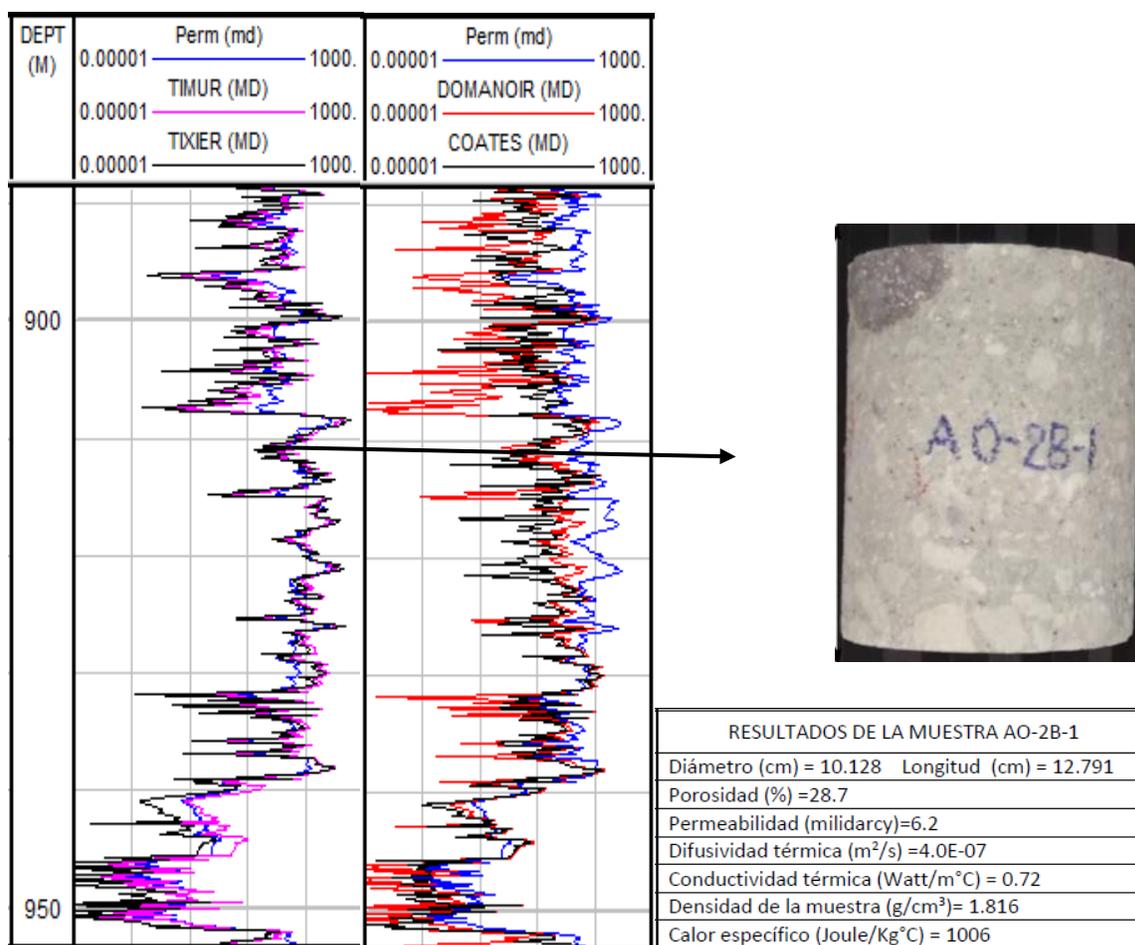


Figura 36.- Curvas sintéticas calculadas para la permeabilidad.

El comportamiento de la conductividad hidráulica (permeabilidad) puede ser visualizada a lo largo de los pozos Agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco, esto se puede ver en la Figura 37

donde las direcciones de flujo están marcadas con flechas. El pozo San Lorenzo Tezonco será usado como referencia para describir, pues es el que actualmente se explota y se tiene identificadas las unidades que son aprovechables, las flechas que parten de un mismo estrato o unidad en direcciones contrarias indican unidades casi impermeables o alteradas que dificultan el flujo de fluidos a través del material (800, 1350 y 2000 m de profundidad en el pozo San Lorenzo Tezonco); mientras que los lugares donde las flechas convergen, indican unidades permeables o fracturadas donde los fluidos se acumulan con mayor facilidad (1200, 1700 m de profundidad en el pozo San Lorenzo Tezonco), esto también puede ser corroborado en la Figura 32 , 33, 34 y en Morales-Casique., 2014., donde se habla de zonas de aporte y pérdida de circulación.

Distribución de conductividad hidráulica

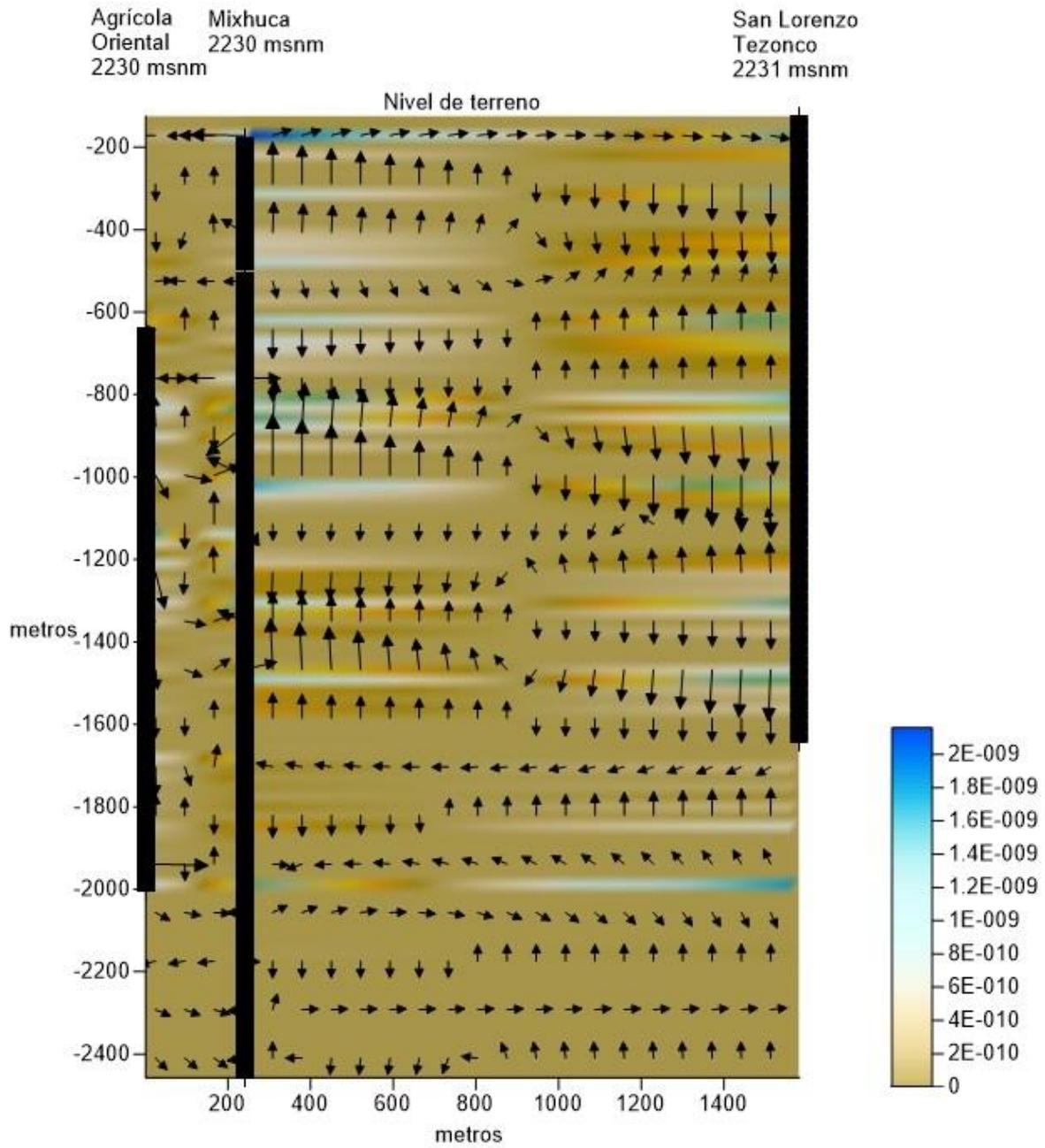


Figura 37.-Direcciones de flujo en la sección Agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco.

V.II Mineralogía compleja

Para el caso de este método, el potasio (k) es el mineral utilizado para identificar o clasificar el tipo de roca según su respuesta al mineral radiactivo. La Figura 35 muestra en color gris la respuesta volumétrica al material radiactivo que en este caso es el potasio; los volúmenes de material que están entre los 700 y 930 m de profundidad son pequeños, lo cual sería indicativo de la presencia de rocas andesíticas y cenizas alteradas; el bloque que va de 930 a 1050 m de profundidad presenta un volumen muy bajo de minerales radiactivos ocasionado por la presencia de material compuesto por dacita; finalmente la etapa que va de 1050 a 1100 m de profundidad está compuesto por cenizas volcánicas alteradas, considerando el gradiente geotérmico, profundidad y el tipo de roca que conforma el basamento, existe un grado bajo de hidrotermalismo lo cual explica el volumen alto de minerales radiactivos y alterados.

La Figura 35 se muestra el comparativo entre dos pozos Agrícola Oriental (izquierda) y Mixhuca (derecha) de 1100-1700 m de profundidad, en esta calibración vale la pena destacar que existe un horizonte bien identificado por su alto contenido de minerales que responden a minerales radiactivos en ambos pozos, este bloque es considerado como un acuitardo alojado en un material de matriz de cenizas finas alteradas arcillosas en el intervalo de los 1000 a 1150 m de profundidad. El conocer este horizonte ayuda a identificar la continuidad lateral a lo largo de los diferentes pozos y dicha correlación se mostrará a en secciones posteriores.

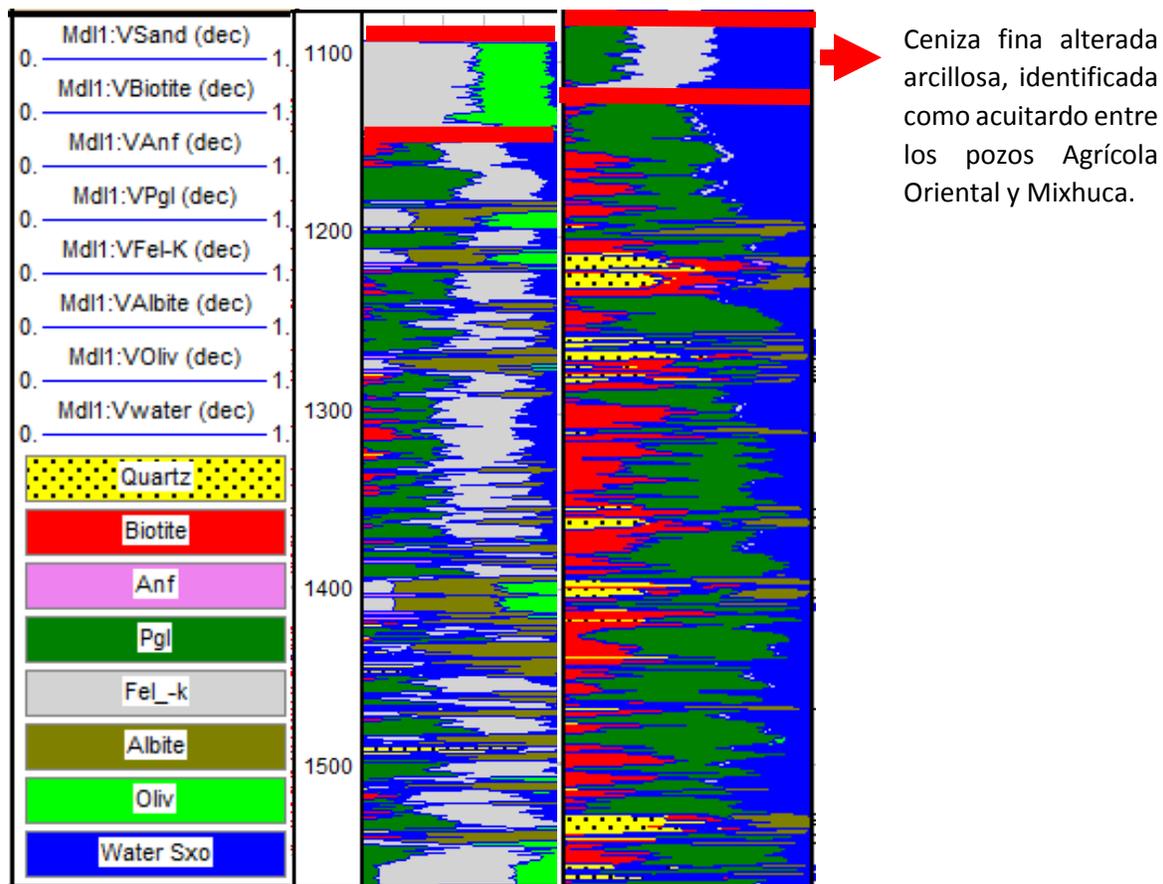


Figura 38.- Comparación entre los pozos Agrícola Oriental (izquierda) y Mixhuca (derecha) de 1100-1700 m de profundidad.

V.III Continuidad lateral

Uno de los objetivos particulares consiste en identificar la continuidad de las unidades litológicas en el subsuelo de la cuenca, para el caso de este trabajo, únicamente se intentará mostrar la continuidad de una capa, se presume que funciona como acuitardo, separando los acuíferos profundos (mayores a 1000 metros de profundidad) de los someros (actualmente explotados); como parte de la identificación de esta unidad, se utilizaron una serie de combinaciones de perfiles geofísicos que permiten reconocer un comportamiento característico de la unidad a corroborar.

Con la información presentada por Mooser., 1993, Mooser., 2014, Mooser., 2018, y complementada con Unda-López., 2016, Morales-Casique., 2015 y Arce et al., 2019, se puede suponer de manera preliminar que la unidad poco permeable tiene un espesor que va de los 100 a los 150 metros y se encuentra acuñada entre la S. Guadalupe y el vulcanismo del Mioceno al norte, mientras que, para el sur, la unidad se acuña debajo de la Sierra Chichinautzin. Debido a que definir el alcance no es el objetivo de esta tesis, solo se identificará la unidad en cada uno de los pozos; el alcance del bloque se puede definir en futuros trabajos a partir de un estudio detallado de la sísmica.

La unidad por caracterizar corresponde a las cenizas que se encuentran de los 1070 a los 1150 metros de profundidad en el pozo Mixhuca. Esta ceniza reúne las características de un acuitardo (formación de baja permeabilidad); la Figura 36 muestra un acercamiento al perfil rayos gamma del intervalo donde se encuentran las cenizas. La señal registrada indica una unidad homogénea con valores promedio de 30 GAPI lo cual indica que se trata de una ceniza arcillosa quizá alterada; RT y RXO tienen resistividades bajas y muy parecidas, lo cual podría indicar que el lodo de perforación no penetró en la formación, confirmando así, que se trata de una unidad arcillosa. RHOZ muestra que el material tiene una densidad promedio de 1.9 g/cm³; esta baja densidad puede ser debida a que el material se encuentra con agua y es poroso, haciendo así que la densidad baje; finalmente, del registro acústico se puede determinar que en la cima el material es poco compacto y conforme se acerca a la base el material parece ser ligeramente más compacto y menos poroso.

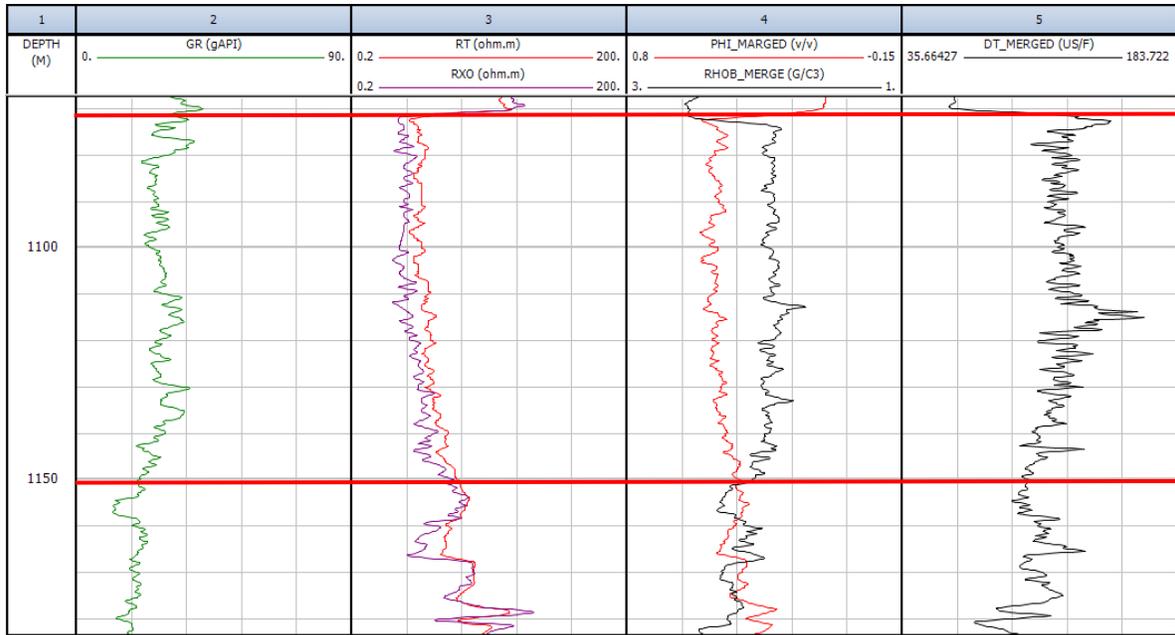


Figura 39.- Registro geofísico del intervalo correspondiente a las cenizas (acuitardo).

Para la identificación de un comportamiento característico de la unidad de cenizas se usó una serie de combinaciones de gráficos de dispersión, respecto a las 6 diferentes curvas. La Figura 37 muestra las diferentes conductas de las permutaciones. De esa figura, podemos concluir que: RT tiene combinación positiva con RXO y RHOZ, combinación negativa con DTCO, NPHI y GR; para RXO se ve que guarda una relación positiva con RT y RHOZ y una negativa con NPHI, DTCO y GR; para GR se puede ver que la tiende a ser positiva con NPHI y DTCO y negativa con RHOZ; para RHOZ tanto NPHI y DTCO conservan una tendencia positiva; finalmente, DTCO posee una correlación positiva con NPHI. Con estas características, podemos buscar los rasgos característicos similares en cada uno de los pozos.

V.III.1 Pozo Mixhuca

Para comprobar si las unidades tienen el mismo comportamiento que el bloque de matriz de cenizas que el encontrado en el pozo Agrícola Oriental y Mixhuca se graficaron las combinaciones de curvas de los diferentes pozos.

La identificación de unidades tiene la función de determinar que paquetes son las que pueden usarse como marcadores al momento de realizar una sección geológica, la descripción litológica, los datos geocronológicos y los nuevos pozos perforados permiten que los bloques marcados puedan ser seguidos a lo largo del subsuelo con mayor precisión.

El pozo Mixhuca fue el primer pozo a analizar y que sirvió como control, el paquete usado en el pozo tiene un intervalo de 1000 a 1150 m de profundidad y es que está compuesto por el material de matriz arcillosa con alta respuesta a minerales radiactivos y considerados como unidad casi impermeable.

Para mostrar el comparativo entre los datos primero se hizo el grafico para el pozo Mixhuca, en la diagonal principal se muestran los histogramas, de aquí podemos determinar que la distribución de rayos gamma y densidad es bimodal, este comportamiento puede ser debido a que se observa la matriz y el material piroclástico inmerso en dicha matriz; la porosidad tiene una alta frecuencia en valores altos (40 – 50 %) quizá debido al tipo de matriz en la que se encuentra el material; del registro acústico podemos inferir que el material es poco compacto, lo cual se confirma con la respuesta de los registros resistivos, donde la resistividad es baja.

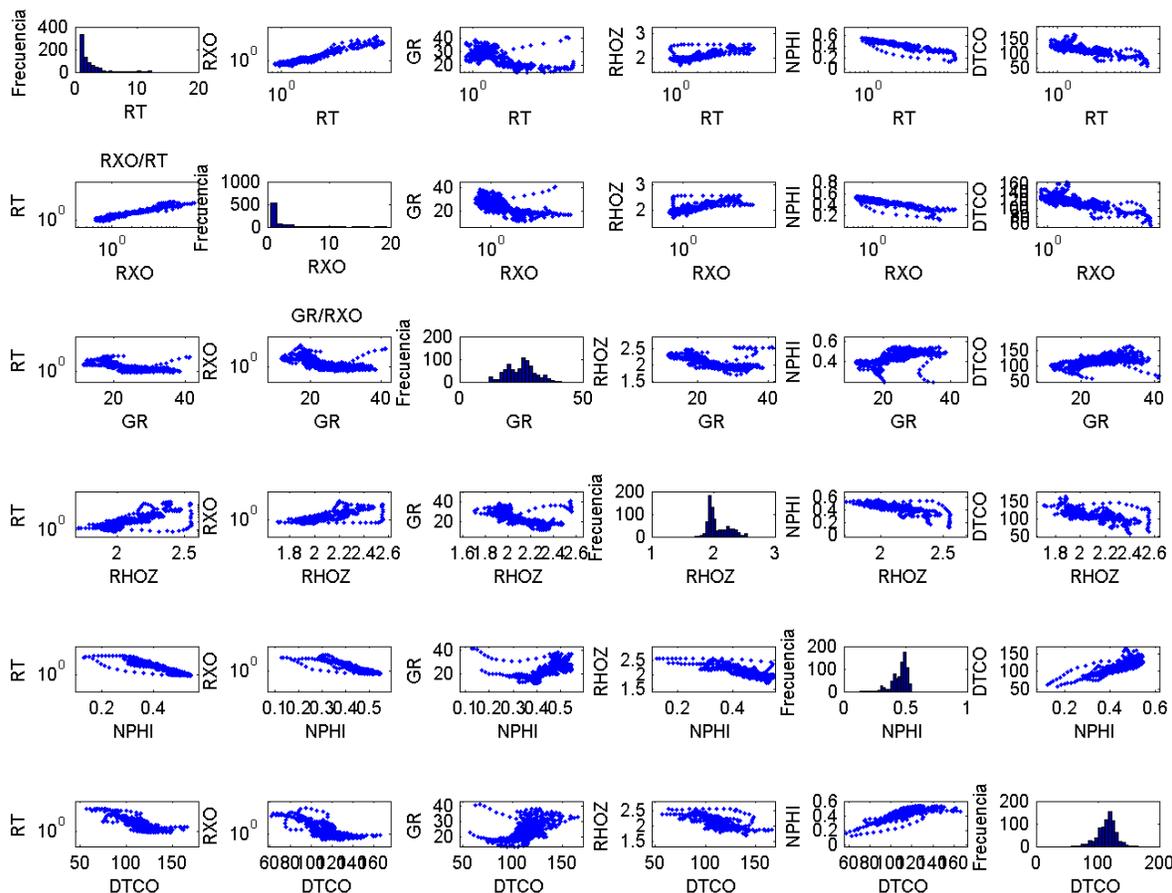


Figura 40.- Comportamiento característico de las cenizas (acuitardo) del pozo Mixhuca y que funciona como control para el resto de los pozos.

En el comparativo de los bloques, de color rojo se graficó las combinaciones para el pozo a analizar y de color azul se muestra el comportamiento del pozo que sirvió para la calibración (Mixhuca), la diagonal muestra las frecuencias para el pozo correspondiente y en cada descripción se hará énfasis en las coincidencias de comportamiento en los diferentes gráficos de dispersión.

V.III.II Pozo Agrícola Oriental

Para el caso de comprobar si las unidades tienen el mismo comportamiento que el pozo Mixhuca; de color rojo se graficó las combinaciones para el pozo Agrícola Oriental (de 1000 a 1150 m) y de color azul se muestra el comportamiento del pozo que sirvió para la calibración, la diagonal muestra los histogramas para el pozo correspondiente.

La Figura 38 muestra el comparativo entre el pozo Mixhuca y Agrícola Oriental. De manera general las combinaciones tienen comportamiento similar que la del pozo usado para calibrar, las variantes observadas (separación de puntos) puede ser ocasionada a la calibración utilizada durante la toma del registro, esto se puede comprobar cuando los gráficos RT/RXO muestran el mismo comportamiento observado que el Mixhuca, aunque con valores menores; para RHOZ se ve que empata muy bien cuando se compara con NPHI, llegando al punto de casi sobreponerse entre sí; los histogramas indican que la densidad y porosidad son bimodales, la porosidad se mantiene alta y el material es poco compacto, por lo anterior y por la descripción de las muestras de canal, se pudo determinar que la correlación es correcta y que se trata del mismo paquete.

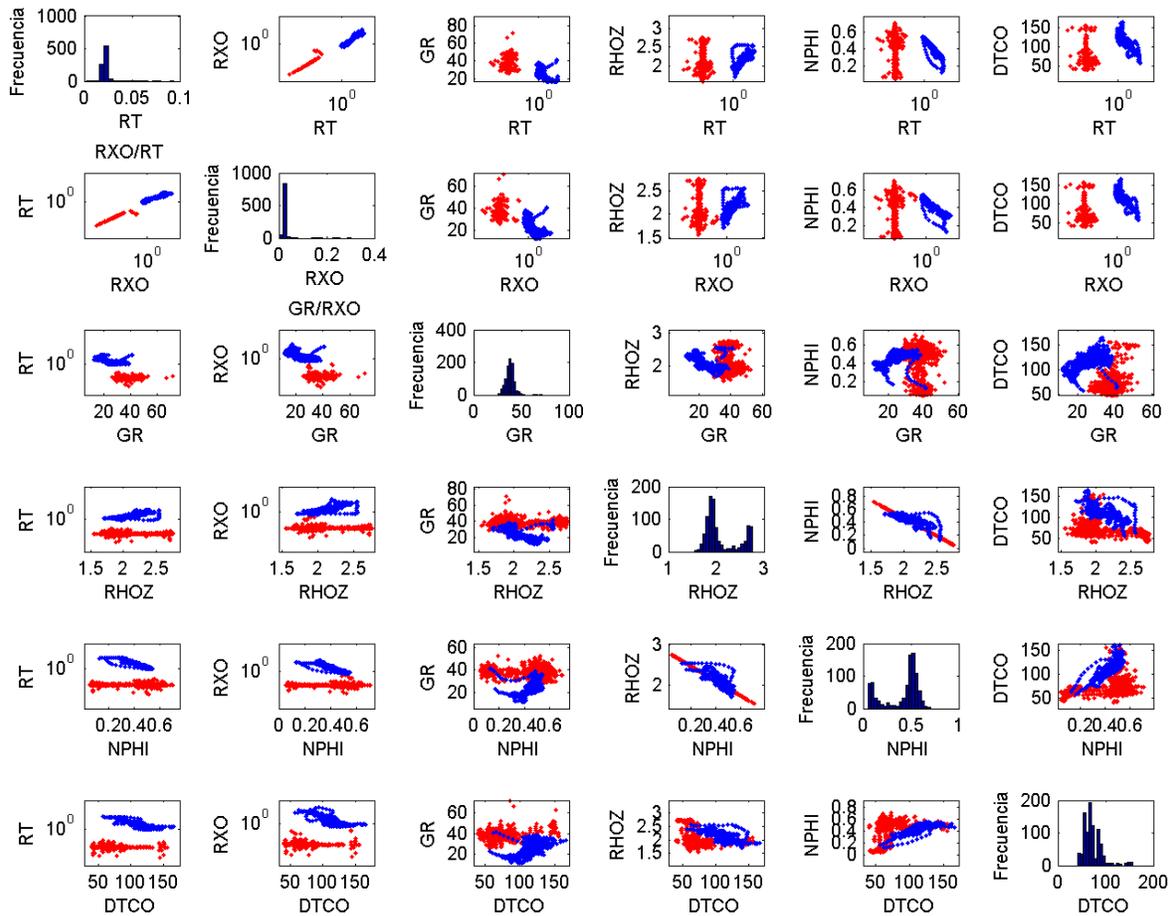


Figura 41.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Agrícola Oriental (rojo).

V.III.III San Lorenzo Tezonco

El pozo San Lorenzo Tezonco no cuenta con datos correspondientes al registro geofísico de los 991 a los 1135 m, por ello no se puede realizar la correlación con los gráficos de dispersión, esta unidad se determinó gracias a las unidades observadas en los pozos cercanos.

V.III.IV Santa Catarina

El pozo Santa Catarina, únicamente cuenta con las curvas GR, TR y RXO por lo tanto solo se puede hacer la combinación de esas 3 y sobre ponerlas con el pozo tipo, la Figura 39 muestra la combinación de los perfiles a la profundidad de 1100 a 1270 m; resulta atractivo generar curvas sintéticas, sin embargo, éstas dependen de los perfiles con los que son generadas, por ello, solo se realizó en con 3 de las curvas.

Al igual que el pozo anterior, se observa que la combinación entre RT y RXO conserva una correlación positiva, llegando al punto en el cual algunos de los puntos llegan a coincidir, al igual que en los paquetes anteriores se observa que es bimodal lo cual afirma que la unidad es correlacionable; para la combinación con GR los valores se mantienen constantes con variabilidad de las resistividades sin embargo la correlación es nula. Las variantes en la resistividad pueden ser ocasionadas por la calibración de la herramienta al tomar el registro.

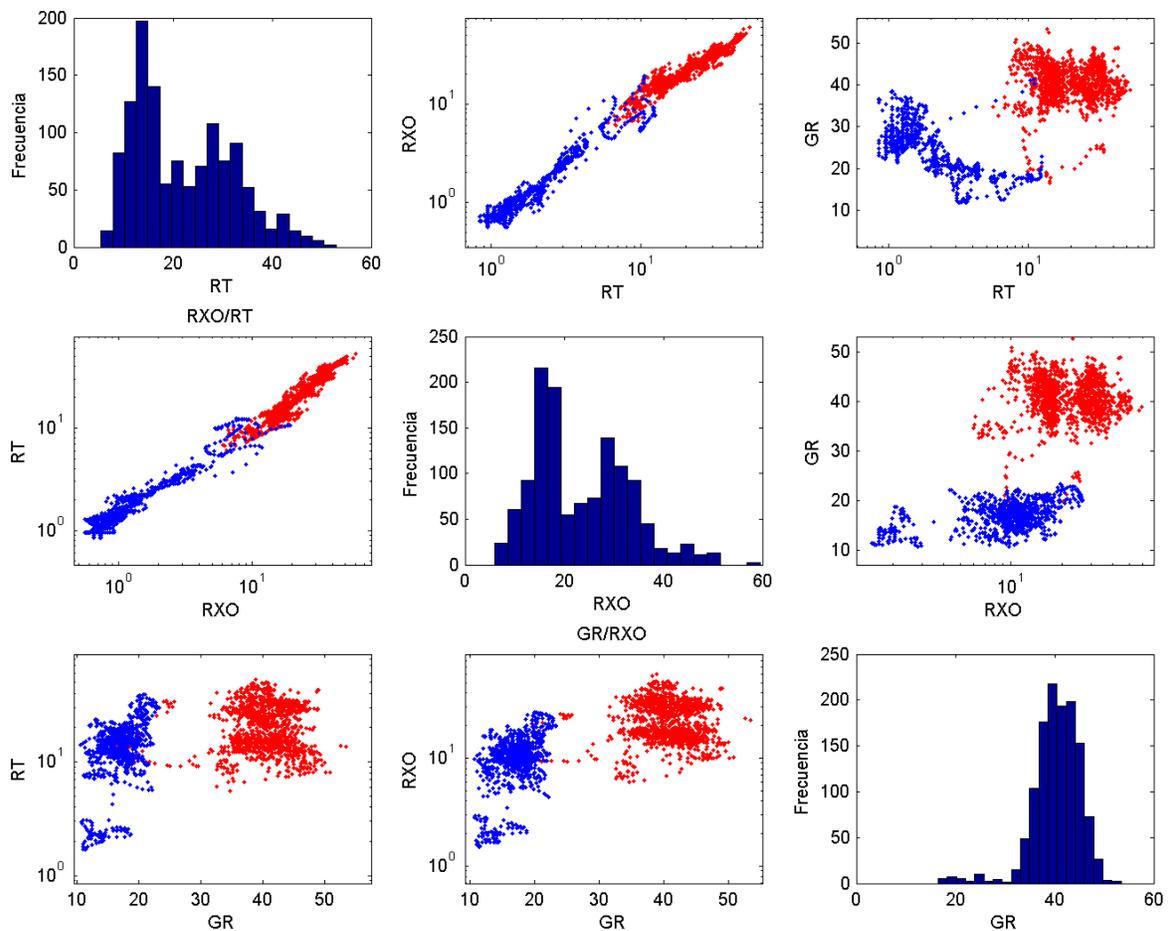


Figura 42.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Santa Catarina (rojo).

V.III.V Tulyehualco

Para el pozo Tulyehualco, la unidad que tiene un buen comportamiento se encuentra entre los 1230 a 1420 m de profundidad y es muy semejante al del pozo tipo, la Figura 40 muestra el comportamiento de los datos al ser comparados con el pozo Mixhuca, las coincidencias que se pueden observar en este grafico son las combinaciones RT/RXO donde los valores de ambos grupos se empatan muy bien; las similitudes para RHOZ contra RT y RXO coinciden muy bien con la unidad tipo, para el caso de RHOZ/NPHI se observa una correlación negativa aunque no muy evidente y coincidente entre unidades; el resto de las coincidencias se encuentran con DTCO contra RT, RXO, GR NPHI y DTCO donde se conserva el tipo correlación y los puntos se casi se sobreponen.

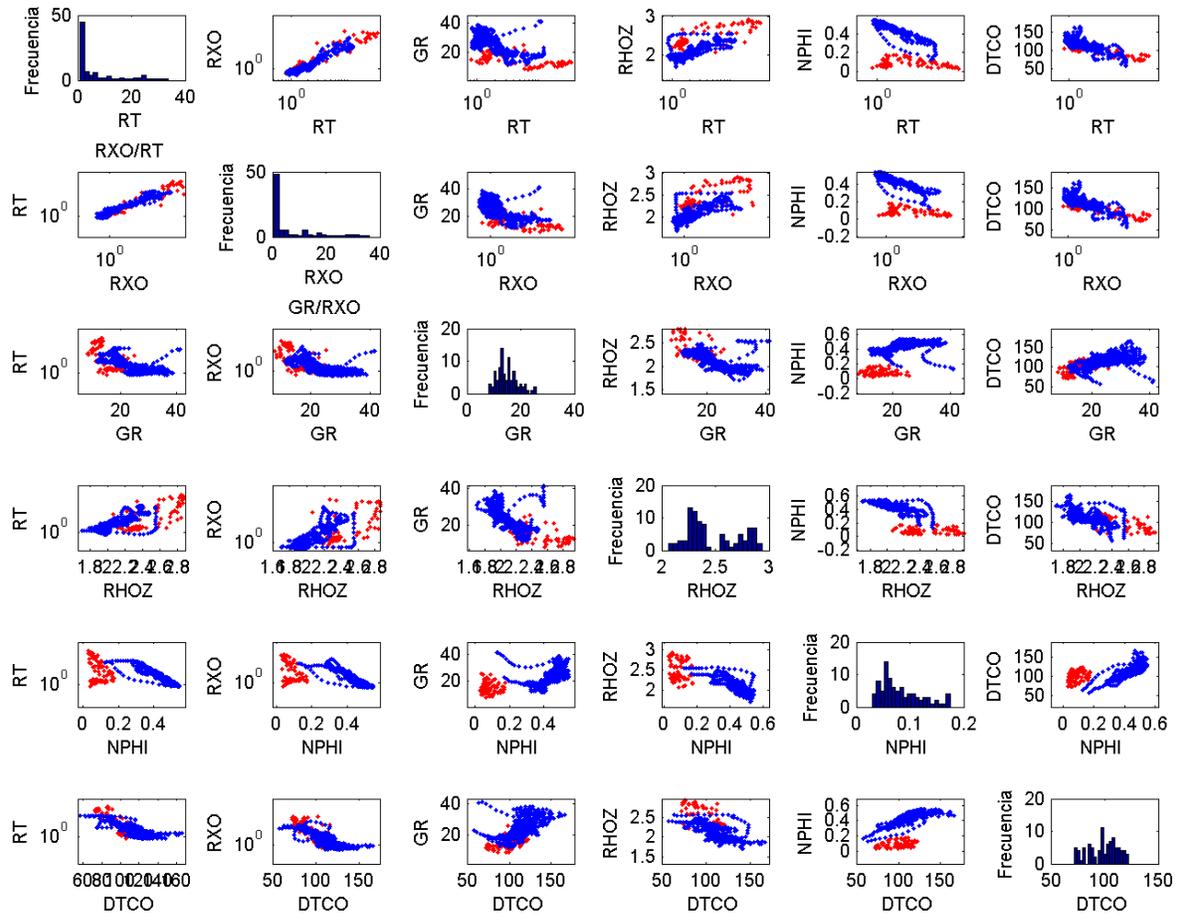


Figura 43.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Tulyehualco (rojo).

V.III.VI Roma

Las dataciones son un elemento importante para identificar las unidades, aunque no se conoce la edad de las cenizas se puede determinar que se encuentra entre unidades que van de los 13.5 y los 21.7 Ma. según datos del pozo Mixhuca, la datación permite identificar que unidades son las que se pueden usar para correlación.

Para el caso del pozo Roma la lejanía puede un factor importante que dificulta la identificación de la unidad, además el rango de dataciones limita el intervalo en las unidades ubicadas entre los 1300 y los 2000 m de profundidad, el material que más se adapta a las condiciones del Mixhuca se encuentra entre 1815 y 1973, la Figura 41 muestra el comparativo entre el pozo de control y el pozo Roma.

En este registro, las mayores coincidencias se encuentran en RT/RXO donde incluso se ve que las curvas tienen continuidad y poseen el mismo tipo de correlación; la relación que existe entre RHOZ y PHI conserva una gran correlación y casi se sobrepone a la del pozo Mixhuca, de esta forma se puede asumir que esta unidad es correlacionable.

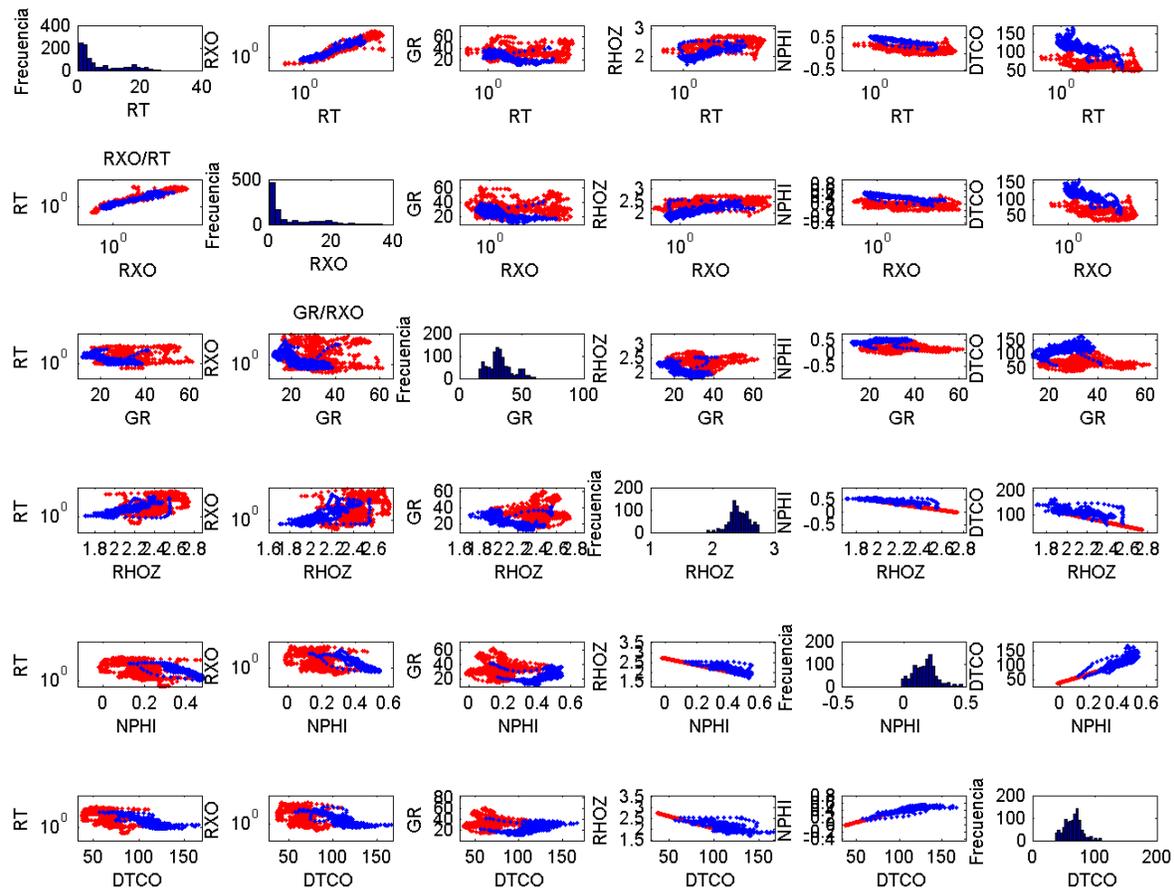


Figura 44.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Roma (rojo).

V.III.VII Mirador

La unidad que tiene coincidencia del pozo el Mirador es la que se ubica de 1147 a 1251 m de profundidad, en este pozo la unidad examinada, es la que mejor coincidencia ha tenido, pues como se observa sobre la diagonal, el comportamiento es muy similar y en la mayoría de los gráficos los puntos se superponen al esperado, este comportamiento es indicativo que la unidad seleccionada es coincidente con la de las cenizas del pozo Mixhuca, tal comportamiento se observa en la figura 42.

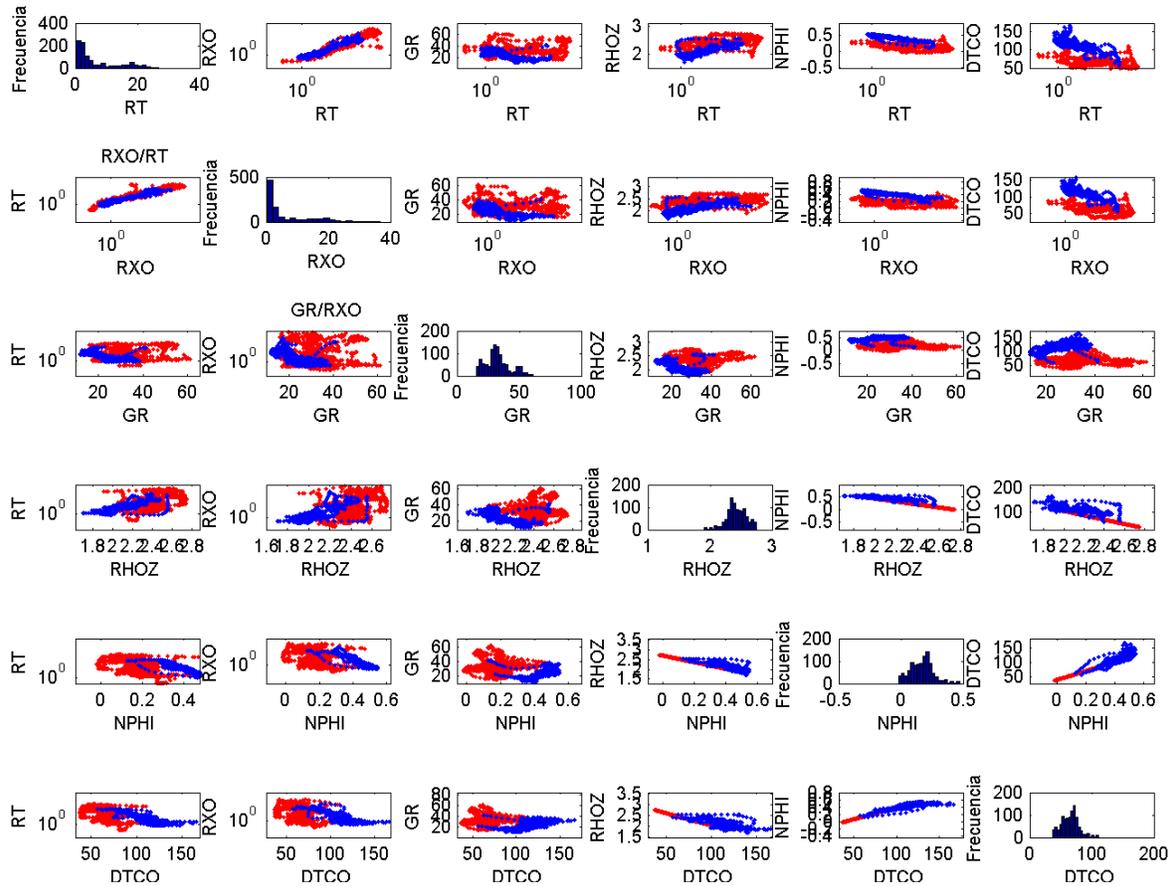


Figura 45.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Mirador (rojo).

V.III.VIII Copilco

Las edades entre las que la cenizas se encuentran son de los 13.5 a los 21.7 Ma. en los pozos Mixhuca y San Lorenzo Tezonco, el pozo Copilco tiene 3 dataciones (8.9, 15.3 y 17.2) que pueden ser utilizadas como límite superior, sin embargo, cabe la posibilidad que la profundidad alcanzada por el pozo, no haya sido la suficiente para identificar el bloque correspondiente a las cenizas, para fines de este trabajo, se presenta la unidad que mejor coincidencia tuvo que se encuentra entre los 1976 y los 2090 metros, la Figura 43 muestra el bloque con mayor coincidencia con la unidad tipo, al punto en que los datos se sobrepone entre sí, por ello y por falta de datos a mayor profundidad se asume que esta unidad es correspondiente a las cenizas.

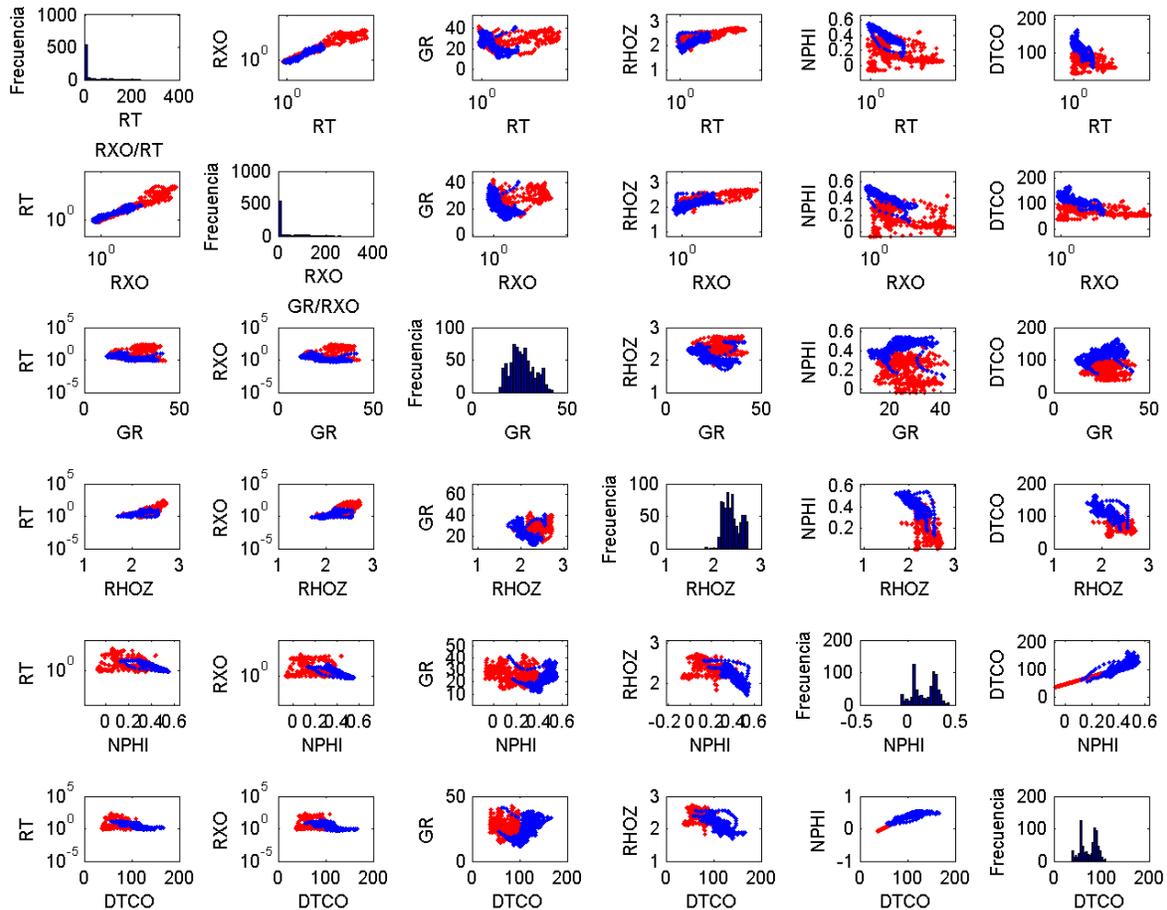


Figura 46.- Comparativo entre el pozo Mixhuca (azul) y Copilco (rojo).

V.III.IX Texcoco

Para el caso del pozo Texcoco, solo se cuenta con las curvas de GR, NPHI y RT, estas curvas no guardan relación entre sí, por ello no se realizó la correlación con el pozo Mixhuca.

De manera general, existe una cierta relación entre las unidades acuíferas y su composición química, las rocas intermedias son almacenadoras y transmiten bien el agua a través de ellas; las rocas que van de andesita a dacita funcionan como rocas que dificultan el flujo; finalmente las rocas máficas representan material fracturado; sin embargo, esta clasificación no es totalmente excluyente pues, cualquier roca puede funcionar como unidad acuífera.

- Para el pozo Texcoco, no se pudo determinar continuidad lateral debido a lo alejado que se encuentra respecto a los otros pozos.
- Para el pozo Tulyehualco se determinó que unidad X es la que puede relacionarse y su descripción litológica esta descrita como intercalaciones de toba gris claro y verde olivo semicompacta con basalto gris oscuro y café oscuro de estructura maciza con fracturas rellenas de toba verde olivo y cuarzo blanco, con profundidad de 1230 a 1400.
- Para el pozo Roma se determinó que la unidad IX con profundidad de 1815 a 1975 m tiene un comportamiento muy similar al esperado, este bloque fue descrito como una toba gris oscuro y café rojizo semicompacta con presencia de basalto gris y limolita café rojizo.
- Para el pozo Copilco se determinó que la unidad II con profundidad de 1976 a 2090 m es la que mayor coincidencia posee respecto a la unidad comparada; su descripción consiste en basalto con toba (alterada de composición andesítica) de estructura compacta, piroclástica con fragmentos andesíticos en matriz de ceniza.
- La unidad del pozo SLT fue determinada por correlación de los pozos cercanos y se presume que tiene un intervalo que va de los 1000 a los 1130 m.
- El pozo Agrícola Oriental, es congruente en la unidad X que va de 1000 a 1130 m y su descripción litológica está dada como ceniza gris alterada y arcillosa.
- Para el pozo Santa Catarina, se supone que el intervalo de correlación es el VII y va de 1000 a 1260 m, cabe destacar que esta descripción fue hecha a partir de la calibración del registro y su descripción es considerada como una unidad homogénea de alta permeabilidad, de granulometría intermedia quizá cenizas, de composición andesítica.
- El pozo Mirador tiene como unidad identificada la VII que va de 1147 a 1251 m y su descripción está dada como material de color gris oscuro y estructura porfídica con presencia de material piroclástico poco alterado.

El modelo de Pérez-Cruz., 1988., se enfoca en definir cinco unidades y calcular los diferentes valores de densidad y respuesta sónica; de esa manera es como se realiza y caracteriza el modelo. La distancia que existe entre pozos permite identificar cinco unidades, lo que provoca que se pierda resolución para seguir capas más pequeñas. Sin embargo, la clasificación es crucial pues identifica contactos entre rocas de diferentes propiedades a través de métodos indirectos. Los trabajos más recientes ayudan a llenar ese vacío con unidades que no son visibles, tal es el caso de las arcillas alteradas que funcionan como separación entre los acuíferos superiores y el profundo.

El modelo de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera., 1989., consistió en una clasificación basada en la división de Pérez-Cruz., 1988., de donde toman principalmente las fallas, espesores y los unifica con las descripciones litológicas, llegando a tener un modelo geológico estructural que permite visualizar las formaciones presentes y supone continuidad. Al igual que en el caso anterior, este modelo no permite identificar capas de espesor menor, impidiendo así que se pueda definir unidades que funcionen con un interés hidrogeológico.

El modelo de Unda-López., 2016., identifica a través de la sísmica 7 unidades. De esta forma se hace una división que toma como base y cima las edades radiométricas y permite seguirlas a través de la respuesta sísmica. Esa tesis clasifico las unidades a partir de las cimas y bases que fueron definidas a través de la respuesta de los registros geofísicos de los pozos existentes hasta ese momento.

Mooser F., et al. (1993, 2005 y 2014), ha construido diversas secciones que identifica formaciones geológicas y a los acuíferos los separa por medio de una unidad que él denomina "Taxhimay", que se acuña en el norte y al sur de la cuenca, con espesor cercano a los 500 m y de origen lacustre; sin embargo, al analizar las muestras con las que cuenta el Instituto de Geología se determinó que, si bien la unidad se encuentra en un intervalo similar, no posee un espesor tan potente (de 100 a 250 m) y que su origen es volcánico, correspondiente a cenizas alteradas y no a depósitos lacustres como él lo propone.

En las secciones de Arce et al., 2018., se puede observar que existe mucho parecido, con los modelos presentados en este trabajo. Algunas de las diferencias que se encuentran son las posiciones de las fallas, los espesores (que en este trabajo son calibrados con los registros geofísicos de los pozos), además Arce et al., 2013, 2015 y 2018 identifica unidades correspondientes al Oligoceno y al Eoceno en el pozo Tulyehualco mientras que en este trabajo en ese mismo pozo esas unidades no se identifican, probablemente debido a que en este trabajo no se contó con datos geocronológicos recientes de ese sitio.

V.V Conclusiones

La falta de información de las capas provoca que no existan criterios que permitan medir la influencia de la extracción desde acuíferos profundos a acuíferos superiores mediante modelos de simulación de flujo. Por lo que el aporte principal de esta tesis consiste en la identificación de la conductividad hidráulica en los diferentes pozos profundos a través de los registros geofísicos tomados desde los 1960's hasta 2010's, donde se identificó unidades con conductividad similar y que no necesariamente están limitadas por los contactos litológicos descritos en las columnas geológicas.

Debido a la escasa dimensión de los núcleos extraídos durante las últimas campañas de perforación se identificó fracturas típicas de zonas de cizalla pertenecientes al sector norte del graben de Santa Catarina. La orientación del núcleo fue definida a partir de un norte arbitrario asignando una orientación ENE-WSW y con rumbos con dirección NW. Las unidades fracturadas concuerdan principalmente con zonas permeables ubicadas entre los 1500 y 1550 metros de profundidad. La presencia de fracturamiento se observó en varios núcleos y se infirió a partir de la respuesta de los registros resistivo, densidad y acústico, pues el comportamiento de altos valores de resistividad combinado con densidades bajas y tiempos de tránsito altos favorecen la suposición de que el material litológico se encuentra afectado por algún tipo de esfuerzo. Muchas o la mayoría de las fracturas se encuentran rellenas de calcita epigenética lo que puede significar que cristalizaron y/o recrystalizaron por procesos hidrotermales, limitando y reduciendo la conductividad hidráulica, aquellas fracturas que no han sido rellenas pueden construir vías preferenciales de flujo de agua subterránea.

La petrofísica en la industria petrolera abarca el cálculo de varias propiedades de los diferentes materiales litológicos, sin embargo, en este trabajo, la principal aportación radica en la estimación de conductividad hidráulica (K) a lo largo de las diferentes unidades de los pozos profundos, definiendo así la distribución de propiedades con características similares e identificando cambios de propiedades a lo largo del área estudiada; la estimación de conductividad permitió definir unidades y direcciones de flujo como las que se observan en las figuras 33 y 37 donde se identifican 3 unidades casi impermeables a los 800, 1300 y 2000 metros de profundidad, además de unidades permeables que pueden considerarse como acuíferos a los 500, 1000 y 2100 metros de profundidad.

Las secciones geológicas fueron construidas a partir de las descripciones litológicas, correlacionadas a través de la petrofísica y verificadas con dataciones a diferentes profundidades, permitiendo así, delimitar los alcances de las formaciones presentes y cerrando los espacios vacíos que existían con anterioridad, esto se puede verificar en las Figuras 29 y 30 donde al generar 2 columnas geológicas (Santa Catarina y el Mirador) construidas a partir de la técnica de mineralogía compleja (frecuentemente en la industria petrolera) permitió llenar el vacío que existía entre los pozos San Lorenzo Tezonco y el Tulyehualco (13 km), arrojando nueva información de la arquitectura del subsuelo en el graben de Santa Catarina, incluso en los intervalos donde no se encuentran muestras de canal; adicionalmente, se reduce el vacío entre el Copilco y el pozo San Lorenzo Tezonco de 13 km a 8 km con el Mirador, de esta forma, se puede identificar los límites estratigráficos entre el Mirador y Copilco, teniendo así una corrección entre unidades sincrónicas.

A pesar de que las unidades hidrogeológicas propuestas aparecen continuas en la sección de la Figura 34, una sección detallada entre los pozos Agrícola Oriental, Mixhuca y San Lorenzo Tezonco muestra que las unidades son altamente heterogéneas, y sus propiedades hidrogeológicas, tales como fracturamiento y conductividad hidráulica pueden variar en algunos cientos de metros. La propuesta de configuración del flujo subterráneo a través de las unidades hidrogeológicas se basó en la información de los pozos profundos perforados después del 2011. Esta nueva distribución permite identificar la variabilidad de conductividad hidráulica a diferentes profundidades, logrando así la identificación una secuencia de unidades permeables y casi impermeables de los 300 a 1000 m de profundidad y mayor presencia de zonas de mayor conductividad a partir de los 1000m y hasta los 2000; presentando unidades atractivas a los 800 y 1300 m además de 1200 y 1700 m de profundidad en los pozos Mixhuca y San Lorenzo Tezonco respectivamente y zonas casi impermeables a los 700 y 1100 m de profundidad en Mixhuca y Agrícola Oriental, 900, 1100 y 1500 m en el pozo San Lorenzo Tezonco.

La estratigrafía de la Cuenca de México necesita estudiarse más, especialmente la continuidad lateral, así como acuitardos y acuíferos de entre los 500 a los 2000 m para tener un modelo fiable de la cuenca.

REFERENCIAS

- Alarcón Martínez Miguel A., 2005., Aplicación de Registros de Resistividad Orientados a ARI para la detección de Horizontes Productores de Hidrocarburos., Tesis IPN.
- Arango Gómez S. 2002. Fuentes vol. 2 pg. 40 - 56, Estado del arte de las técnicas indirectas para la identificación de potenciales zonas fracturadas.
- José Luis Arce, Paul W. Layer, José Luis Macías, Eric Morales-Casique, Armando García-Palomto, Fernando J. Jiménez-Domínguez, Jeff Benowitz & Alberto Vásquez-Serrano., 2019, Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt: Journal of maps.
- 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 México 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, 34-49.
- Arce, J.L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J.I., Macías-Romo, M.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.
- Arce, J.L., Macías, R., García-Palomo, A., Capra, L., Macías, J.L., Layer, P., Rueda, H., 2008, Late Pleistocene flank collapse of Zempoala volcano (Central Mexico) and the role of fault reactivation: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 177, 944–958.
- Billingham M. et al, 2011, transporte de herramientas en pozo abierto y entubado. Oilfield Review, vol. 23 no2 pg. 20 – 36, Schlumberger.
- De Cserna Z., De la Fuente D. M., Palacios N. M., Triay L., Mitre S. L. M. y Mota P. R., (1987). Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México. UNAM, Instituto de Geología, Boletín 104, 71.
- Eric Morales Casique, José Luis Arce Saldaña, José Luis Lezama Campos, Oscar A. Escolero Fuentes, 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, diciembre de 2018; (121), 113.
- Escobar Piña Luis A., 2011, Los registros geofísicos realizados en el campo agua fría de Poza Rica, Veracruz. Tesis Ing. petrolera., IPN.
- Estudio geológico del subsuelo, basado en los datos obtenidos de la perforación del pozo profundo Texcoco-1; Amador Oviedo de León, 1967, IMP, Depto. de geología de exploración.
- Fabela-Rodríguez, R., O., 2009., Modelado tridimensional de las estructuras geológicas de la cuenca de México y su influencia en la propagación de ondas sísmicas usando el método de las diferencias finitas., p 39 – 46.

Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central México: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican volcanic belt. *Geology*, p. 27, 303-306.

Ferrari, L., López-Martínez, M., González-Cervantes, N., Jacobo-Albarrán, J., Hernández-Bernal, M. S., 2003. Volcanic record and age of formation of the México city basin. *Reunión Anual 2003, Resúmenes: GEOS*, p. 23(2), 120.

García-Palomo, A., Zamorano, J.J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., Macías J.L. 2008. El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central Morphostructural arrangement of the Sierra de las Cruces, central México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. V.25 N.1

Garduño Vergara José Uriel., Aplicación de métodos avanzados de interpretación de registros geofísicos de pozos. Tesis licenciatura., geofísica.2016. Facultad de Ingeniería UNAM.

González-Torres E.A., Morán D.A., Mori L., Martiny B.M. 2015, Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 67, núm. 2, 2015*, p. 285-297.

Guzmán Andrews M. et al., 2014, clasificación de basaltos utilizando métodos radiactivos en la región de Atlixco, Cholula y Huejotzingo en el estado de Puebla, México. Tesis Licenciatura. IPN

Hernández Bernal., Patricia., Guía de técnicas utilizadas en el procesado de muestras de canal para el análisis bioestratigráfico con nano fósil calcáreo. *Petróleos Mexicanos, Subgerencia de Operación Geológica, Edif. 3, Centro Técnico Administrativo. PEMEX, Campo Sitio Grande 2000, Frac. Carrizo/Villahermosa, 86035, Tab.*

Hernández Martínez Ana K., 2012., Caracterización estática mediante registros de pozos de un campo petrolero, Ubicado en la región sur de México. Tesis licenciatura., IPN.

Informe del Pozo Mixhuca – 1, IMP; Departamento de petrología y geo cronometría. 1987.

Informe geológico final del pozo Tulyehualco – 1; Ramírez Martínez Isidro. PEMEX, Departamento de Geología de subsuelo, 1987.

Informe geológico final, Pozo Copilco – 1; PEMEX, Departamento de geología de subsuelo, Jacome Ortega Gustavo, Hernández de la F Raúl, 1987.

Informe geológico final, Pozo Roma – 1; PEMEX, Departamento de geología de subsuelo, Najera Rivas Felipe, 1987.

Lezama-Campos, J.L., Morales, E., Castrejón, R., José L. Arce, J.L., Oscar A. Escolero, O.A., 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*, v. 33, núm. 2, 2016, p. 198-208.

Lugo-Hubp José, Salinas Montes A., Geomorfología de la sierra de Guadalupe (Al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales.

Macías, J.L., Arce, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P.W., Rueda, H., Reyes-Agustín, G., Avellán, D. (2012) Geología y geocronología de los volcanes Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl, Sierra Nevada, México central. En JJ Aranda-Gómez, G. Tolson, y RS Molina-Garza (Eds.), La cordillera del sur y más allá: Guía de campo 25 (pp. 163–193). Querétaro, México: Sociedad Geológica de América.

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.

Padilla de los Santos Magaly A., 2010., Evaluación del campo 08, mediante la aplicación de registros geofísicos con los Software Power Log y S-GeMS, Tesis Geofísica, IPN.

Pérez-Cruz G., Tesis, 1988, Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México.

Santoyo E., Ovando-Shelley E., Mooser F., y León P., (2005). Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México.

Selley Richard., 2016., Elementos de la geología del petróleo., Segunda edición., Elsevier.

Senergy., 2016, User manual., interactive Petrophysics.

Siebe, Abrams y Macías, 1995 Siebe, C., Abrams, M. y Macías, J. L. (1995). Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del cono real del Volcán Popocatepetl. Comité Científico Asesor UNAM-CENAPRED: Volcán Popocatepetl, estudios realizados durante la crisis de 1994–1995 (pp. 195–220). Edición Especial Secretaría de Gobernación, México.

Unda-López, J.A., tesis, 2016, Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del valle de México.

Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México: Geofísica Internacional, 28, 133–174.

Alberto Vázquez-Serrano, Rebeca Camacho-Rangel, José Luis Arce-Saldaña y Eric Morales-Casique, Análisis de fracturas geológicas en el pozo Agrícola Oriental 2C, Ciudad de México y su relación con fallas mayores, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, abril de 2019; 36(1), 38-53.

Fries, C. Jr., 1960, Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, Región central Meridional de México: Boletín del Instituto de Geología, 60, 236 p.

ANEXO 1 Cálculo de Porosidad

La porosidad es la relación que existe entre el espacio poroso dividido entre el volumen total de la muestra. Con el propósito de generar una curva sintética de porosidad, se utilizaron diferentes ecuaciones que al ser despejadas proporcionan porosidad o porosidad efectiva la cual fue comparada con los datos de núcleo y con los datos recabados en el perfil NPHI.

$$\text{Simandoux} \quad \mathbf{PHIE} = \left(\sqrt{\frac{aRw}{RtSw^2 + VCLRCL}} \right)$$

$$\text{Waxman-Smits} \quad \mathbf{PHIE} = \sqrt{(1 + RwXBXQv) * \frac{XRt}{Rw}}$$

$$\text{Indonesia} \quad \mathbf{PHI} = \left(\frac{1}{\sqrt{RT * Sw}} - \frac{VCL^{(1-\frac{VCL}{2})}}{\sqrt{RCL}} \right) * \sqrt{aRw}$$

$$\text{Doble agua} \quad \mathbf{PHI} = \sqrt{\frac{Rw}{Sw^2 \left(Rt + \frac{Swb}{Sw} * (Rwb - Rw) \right)}}$$

$$\text{Archie} \quad \mathbf{PHI} = \sqrt{\frac{aRw}{RtSw^2}}$$

Donde:

Sw: = 1

Rw = 4.34 Ohm/m.

Rt = Resistividad total.

Φ = Porosidad.

a = Constante (1).

Establecidos los métodos, se programaron las ecuaciones correspondientes y se compararon con la muestra de núcleo, dicha comparación se visualizó en el software y se muestra en la Figura 9, tabla 9.

ANEXO 2 Cálculo de Permeabilidad (K).

Las variables para conocer previo al cálculo de la K es el volumen de agua irreducible (S_{wi}) y la porosidad (Φ), el cálculo del agua irreducible es:

$$S_{wi} = NPFI - PHIE$$

Los diferentes métodos de cálculo son los siguientes:

Tixier

$$K^{1/2} = 250 \frac{\Phi^3}{S_{wi}}$$

Timur

$$K^{1/2} = 100 \frac{\Phi^{2.25}}{S_{wi}}$$

Coates-Dumanoir

$$K^{\frac{1}{2}} = \frac{300 \Phi^w}{w^4 S_{wi}^w}$$

Coates

$$K^{\frac{1}{2}} = 70 \frac{\Phi_e^2 (1 - S_{wi})}{S_{wi}}$$

Ecuación del software

$$K = 8581 \frac{\Phi^{4.4}}{S_{wi}^2}$$

Donde:

K = Permeabilidad en md.

Φ = Porosidad.

S_{wi} = Agua irreducible.

w = Parámetro relacionado con el exponente de cementación, $m \sim n \sim w$.

Establecidos los métodos, se realizaron los perfiles correspondientes a las diferentes ecuaciones y presentadas con la muestra de núcleo, dicha comparación se visualizó en el software y se muestra en la Figura 33, tabla 10.

Posterior a estimar permeabilidad (K) en milidarcy (md) se realizó el cálculo de conductividad hidráulica (K) que se expresa en m^2 y se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Millidarcy (md)} = 9.86923266716E - 16 m^2$$