

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

SGAPDS-OCAVM-DF-16-241-FE-AD-CC

INFORME FINAL



FEBRERO 2017

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Por parte del OCAVM

***Subgerencia de Potabilización,
Saneamiento y apoyo a Organismos
Operadores***
Ing. Juan Daniel Mc Naught González
M.I. Patricia Flores Ordeñana
Residencia General PAI Zona Sur
Ing. Enrique Bautista Mejía
Ing. Claudio Arrieta Ordoñez

Por parte del IMTA

Subcoordinación de Potabilización
Dr. Martín Piña Soberanis
Dra. Silvia Lucila Gelover Santiago
M.I. Ma. de Lourdes Rivera Huerta
I. Tec. Amb. José Alberto Vara Salgado
Subcoordinación de Hidrología Subterránea
Dr. Miguel Ángel Mejía González
Fis. Luis González de Hita

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

CONTENIDO

A. ANTECEDENTES	1
1 Determinación del origen de la contaminación en pozos del Ramal Mixquic-Santa Catarina	7
1.1 Determinación de parámetros físico-químicos de campo en la vertical en cinco pozos del ramal Mixquic-Santa Catarina. 7	
1.1.1 Pozo Mixquic 1	8
1.1.2 Pozo Mixquic 5	9
1.1.3 Pozo Mixquic 10	11
1.1.4 Pozo Mixquic 8	12
1.1.5 Pozo Mixquic 9	13
1.2 Muestreo de agua en la vertical en cinco pozos seleccionados del ramal Mixquic-Santa Catarina. 16	
1.2.1 Muestreo del pozo Mixquic 1	16
1.2.2 Muestreo del pozo Mixquic 5	18
1.2.3 Muestreo del pozo Mixquic 10	19
1.2.4 Muestreo del pozo Mixquic 8	21
1.2.5 Muestreo del pozo Mixquic 9	22
1.3 Análisis en laboratorio de veinticinco muestras de agua tomadas de los pozos seleccionados del ramal Mixquic-Santa Catarina. 22	
1.3.1 Pozo 5	23
1.3.2 Pozo 10	27
1.3.3 Pozo 1	31
1.3.4 Pozo 8 y 9	37

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.4	Perfiles de calidad del agua en la vertical en cinco pozos del ramal Mixquic-Santa Catarina con base en los datos de campo y laboratorio. Identificación de horizontes saturados con agua de buena calidad, si los hay, que cumplan con la modificación del año 2000 a la NOM-127-SSA1-1994 e identificación de posibles fuentes de contaminación mediante análisis isotópico.	40
1.4.1	Perfil del pozo 1	40
1.4.2	Perfil del pozo 10.....	46
1.4.3	Perfil del pozo 5	49
1.4.4	Perfiles del pozo 8 y pozo 9	52
2	Diseño de pozos que favorezcan extraer agua de mejor calidad en los Ramales Tláhuac (Netzahualcóyotl) y Mixquic-Santa Catarina.	56
2.1	Sondeos geofísicos en 19 pozos del ramal Tláhuac (Netzahualcóyotl), 11 en la Laguna San Gregorio y 20 en el ramal Mixquic-Santa Catarina y perfiles de estratos geológicos que contienen agua de buena calidad en cumplimiento con la modificación del año 2000 a la NOM-127-SSA1-1994.	56
2.1.1	Sondeos geofísicos en el ramal Tláhuac y Laguna San Gregorio.....	56
2.1.1.1	Metodología	59
2.1.1.2	Resultados	61
	<i>Perfiles de Resistividad</i>	62
	Mapas de Resistividad Eléctrica.....	72
2.1.2	Sondeos geofísicos en el ramal Mixquic.....	81
2.1.2.2	Metodología	85
	TEM (Transitorio Electromagnético)	85
	Magnetotéluricos de Fuente Natural (MT)	87
2.1.2.3	Resultados	88
	<i>Perfiles de Resistividad</i>	89
2.2	Diseño de diez pozos, cinco del Ramal Tláhuac (Netzahualcóyotl), y cinco del Mixquic-Santa Catarina.	105

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

2.2.1	Diseño de cinco pozos del Ramal Tláhuac (Nezahualcóyotl).	105
2.2.2	Diseño de cinco pozos del Ramal Mixquic.	139
	ANEXO : MÉTODOS GEOFÍSICOS	187
	A: Método Magnetotelúrico de Fuente Natural	189
	Clasificación y variantes de los métodos electromagnéticos	190
	Principios Físicos del Método Magnetotelúrico de Fuente Natural	192
	Equipo de Adquisición MT	195
	B: Método Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo	199
	Principios Físicos del Método TEM	199
	Presentación de parámetros	200
	Procedimiento Interpretativo	201
	Equipo y Detalles de Adquisición TEM	202
	Procedimientos de campo	202
3	CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DEL AGUA EN PUNTO DE ENTREGA HOSPITAL PSIQUIÁTRICO	205
3.1	Punto de entrega Hospital Psiquiátrico	206
3.1.1	Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en punto de entrega Hospital Psiquiátrico.	206
3.1.2	Análisis de compuestos orgánicos volátiles.	211
3.1.3	Análisis de compuestos orgánicos semivolátiles.	212
3.2	PRUEBAS DE TRATABILIDAD PARA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN PUNTO DE ENTREGA HOSPITAL PSIQUIÁTRICO	215
3.2.1	PRUEBAS DE TRATABILIDAD EN PLANTA PILOTO PARA REMOCIÓN DE HIERRO, MANGANESO Y ARENAS EN PUNTO DE ENTREGA HOSPITAL PSIQUIÁTRICO.	231

Lista de tablas.

Tabla 2.1. Localización de los sondeos en el ramal Tláhuac y Laguna San

Gregorio 57

Tabla 3.1 Resultados de parámetros de calidad medidos en campo al agua con la que se abastece al Hospital Psiquiátrico208

Tabla 3.2 Compuestos orgánicos volátiles encontrados en el agua que llega al Hospital Psiquiátrico212

Tabla 3.3 Compuestos semivolátiles hallados en agua que recibe el Hospital Psiquiátrico.....213

Tabla 4.1 Características relevantes del agua del ramal Tláhuac Netzahualcóyotl, a la altura del pozo 6 (un poco antes del punto de entrega Viveros)......240

Lista de figuras

Figura 3-1 Muestreo de agua en el punto de entrega Hospital Psiquiátrico.....206

Figura 3-2 Toma de muestras en el Hospital Psiquiátrico.207

Figura 3-3 Determinación de parámetros de campo en el Hospital Psiquiátrico207

Figura 3-4 Anillos plásticos utilizados como soporte para el desarrollo de biopelícula, para realizar la nitrificación en agua que llega al Hospital Psiquiátrico.....216

Figura 3-5 Concentraciones de nitrógeno amoniacal a la entrada y salida del filtro percolador.....220

Figura 3-6 Concentraciones de nitrógeno amoniacal durante las pruebas realizadas en el Hospital Psiquiátrico.....223

Figura 3-7 Efecto de la carga de nitrógeno amoniacal sobre la remoción durante las pruebas realizadas en el Hospital Psiquiátrico.....224

Figura 3-8 Relación de la carga de nitrógeno amoniacal sobre la tasa de remoción de las pruebas realizadas en el Hospital Psiquiátrico.....225

Figura 3-9 Concentración de oxígeno disuelto en agua cruda, salida de aireación y salida de filtro de zeolita.....227

Figura 3-10 Concentraciones de nitrógeno amoniacal durante las pruebas realizadas en el Hospital Psiquiátrico.....228

Figura 3-11 Variación de la concentración de hierro durante las pruebas realizadas en sitio, en el agua cruda, aireada y a la salida del filtro de zeolita verde.....231

Figura 3-12 Variación de las concentraciones de manganeso durante pruebas en sitio, en el agua cruda, agua aireada, a la salida del filtro de zeolita verde y después del filtro de carbón activado.....	232
Figura 3-13 Valores de turbiedad determinados en el agua cruda, en el agua aireada y en el efluente del filtro de zeolita	234
Figura 3-14 Esquema que ilustra el tren de tratamiento propuesto para potabilizar agua en el Hospital Psiquiátrico.	237
Figura 4-1 Instalación de aireador de charolas y planta piloto con filtros de zeolita clinoptilolita virgen y recubierta de óxidos de manganeso, en el Vivero Netzahualcóyotl (Ramal Tláhuac).	244
Figura 4-2 Seguimiento de operación de los filtros.	245
Figura 4-3 Análisis en sitio de algunos parámetros de calidad del agua antes y después del tratamiento.	245
Figura 4-4 Variación de la concentración de nitrógeno amoniacal en agua de llegada (AC), agua aireada (TA) y efluente de filtros (F1 y F2) durante el periodo de prueba en el Vivero Netzahualcóyotl.....	246
Figura 4-5 Tendencias observadas en la concentración de hierro en agua de llegada (AC), agua aireada (TA) y efluente de filtros (F1 y F2), (Viveros).....	247
Figura 4-6 Concentraciones de manganeso encontradas en el influente (AC), en agua aireada (TA) y efluente de filtros (F1 y F2), en sitio de entrega Viveros.....	248
Figura 4-7 Esquema de tratamiento propuesto, Planta Potabilizadora Viveros-Cuenca Lechera.....	250

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

A. ANTECEDENTES

El Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, también atiende el suministro de agua dentro del Valle de México, a través del Sistema de Pozos denominado Plan de Acción Inmediata (PAI), el cual inició su operación en el año 1974 con el Sistema de Pozos del Sur. Actualmente este sistema se integra por siete baterías de pozos, ubicados en el Distrito Federal, Estado de México e Hidalgo.



Elaboración propia con base en la información del SIGA.

Batería de pozos del sistema Plan de Acción Inmediata (PAI)

Casi el 95% del caudal proporcionado por el Sistema PAI proviene de fuentes subterráneas, mientras que el otro 5% es suministrado por la planta potabilizadora Madín.

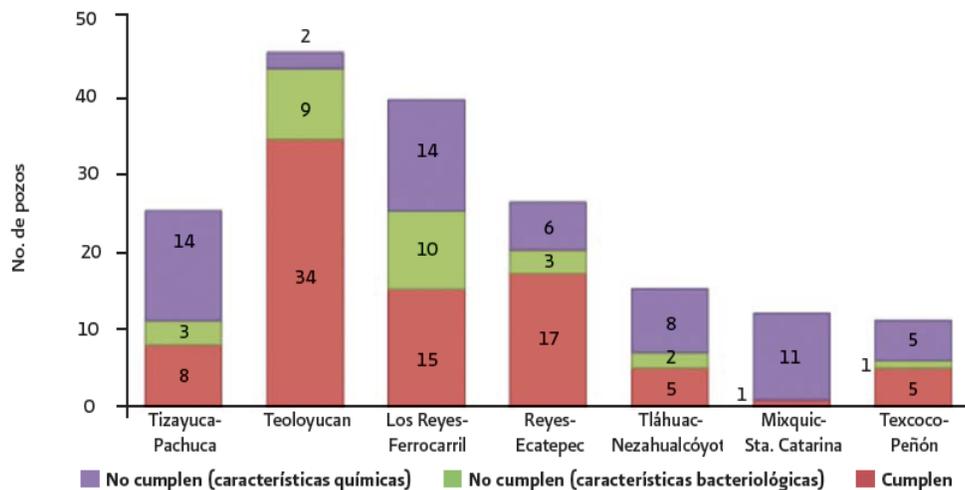
DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

No.	Ramal	No. de pozos	Gasto (m ³ /s)
1	Tizayuca-Pachuca	33	1.30
2	Teoloyucan	48	1.44
3	Los Reyes - Ferrocarril	49	1.88
4	Reyes-Ecatepec	34	1.15
5	Tláhuac - Nezahualcóyotl	20	0.59
6	Mixquic - Santa Catarina	19	0.36
7	Texcoco - Peñón	14	0.61
Total		217	7.34

Fuente: Dirección de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.

Gasto medio suministrado por los ramales del PAI en 2008

El Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, mensualmente lleva a cabo el análisis de la calidad del agua de los pozos de los ramales que integran el sistema Plan de Acción Inmediata, conforme a lo especificado en la NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000. De acuerdo a los resultados de 2011, un porcentaje importante de pozos del ramal Mixquic-Santa Catarina no cumplen con la norma.

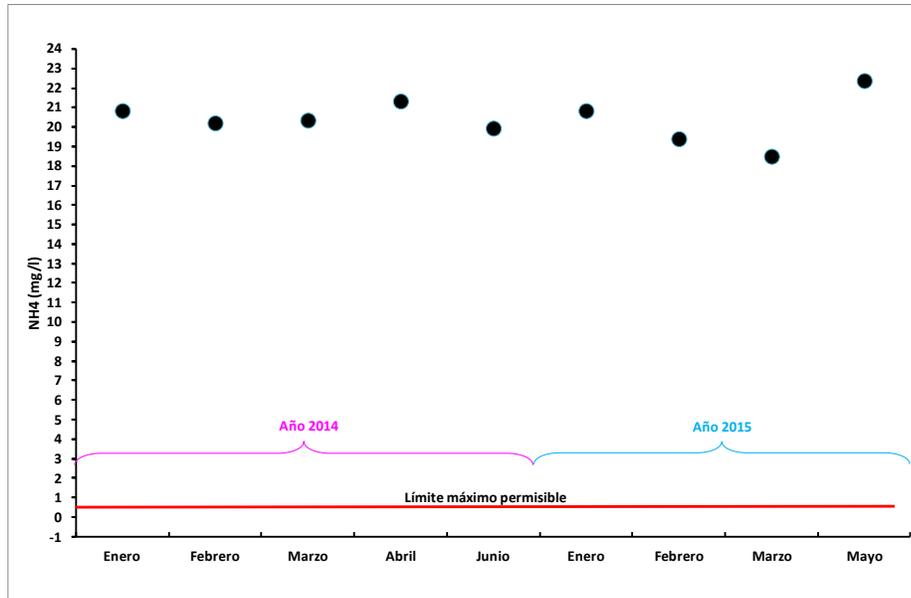


Fuente: Dirección técnica

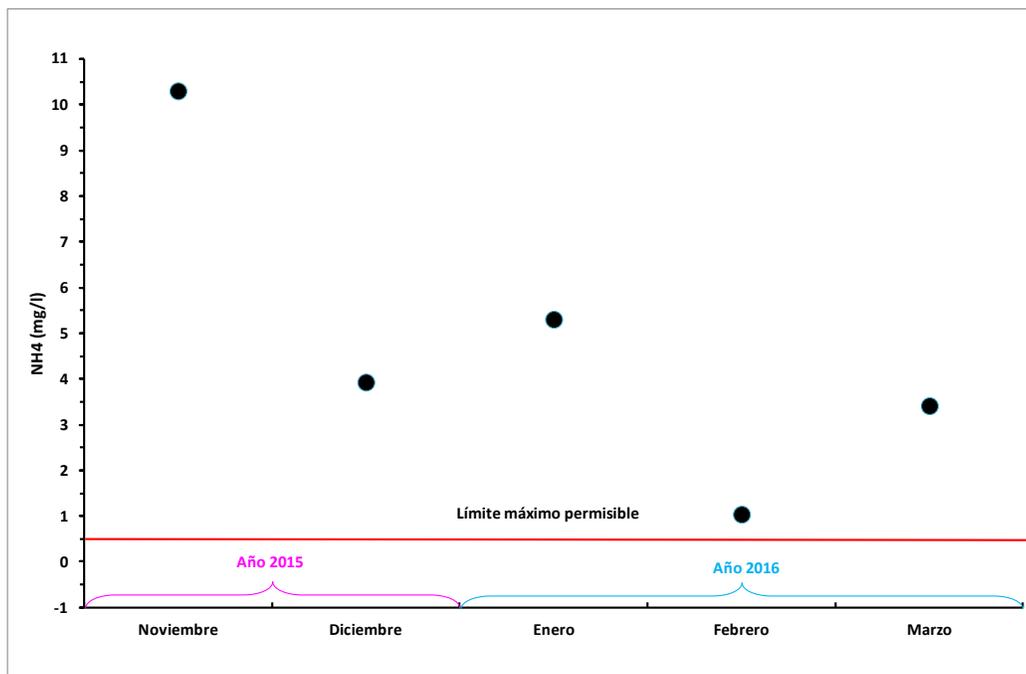
Cumplimiento a la NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000

En la actualidad, ninguno de los pozos del ramal Mixquic-Santa Catarina cumple con el Límite Máximo Permissible del nitrógeno amoniacal. Solamente los pozos 8 y 9 se encuentran cerca de este límite.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

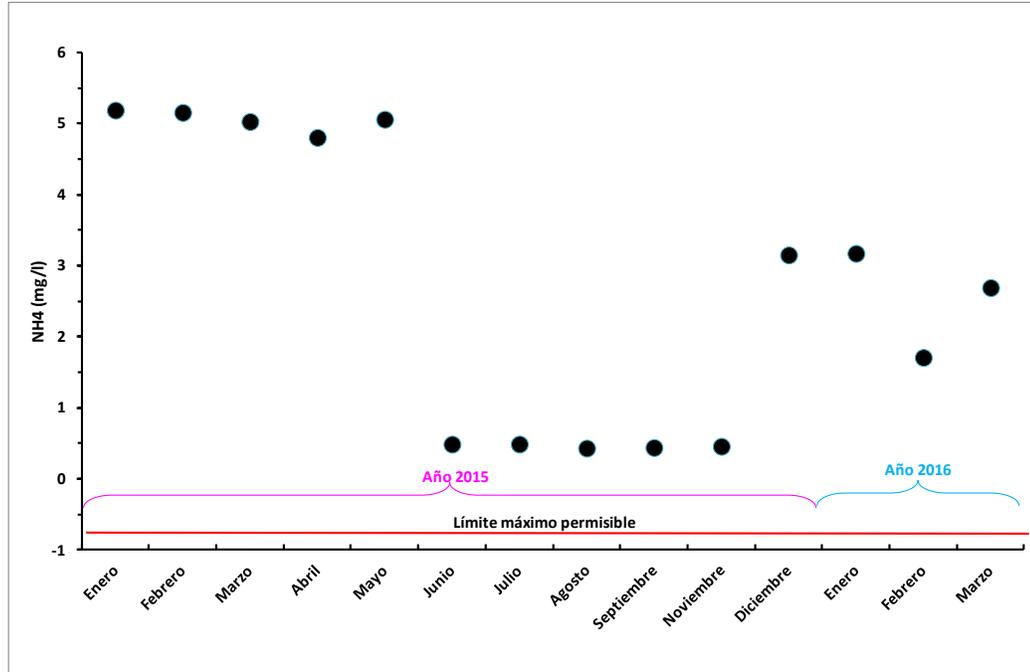


Variación de la concentración de Nitrógeno amoniacal en el tiempo, pozo Mixquic 1



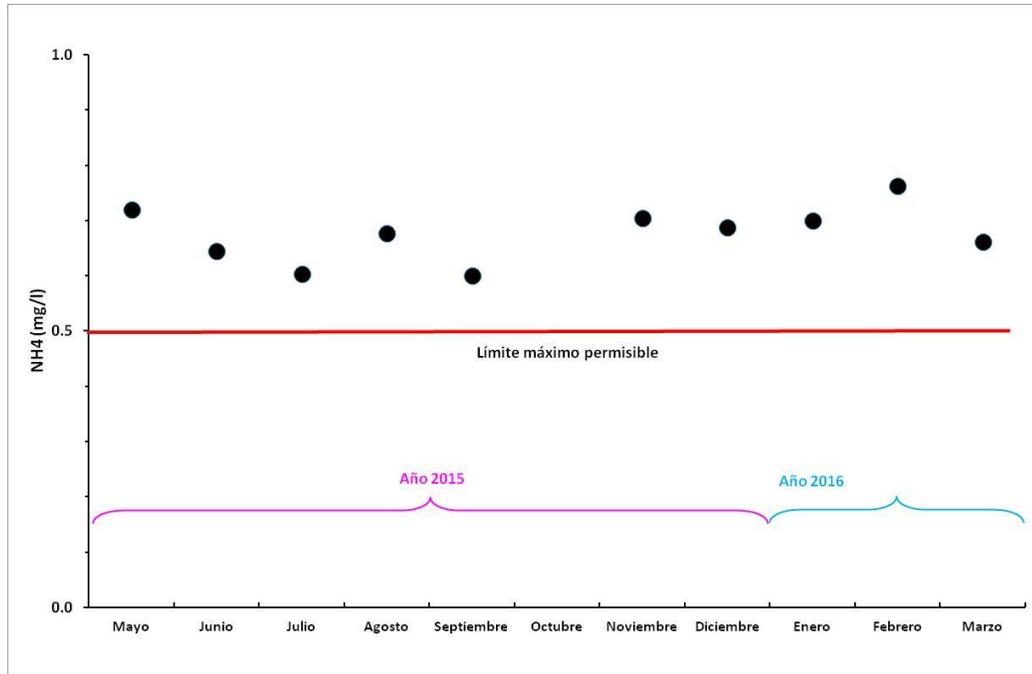
Variación de la concentración de Nitrógeno amoniacal en el tiempo, pozo Mixquic 5

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



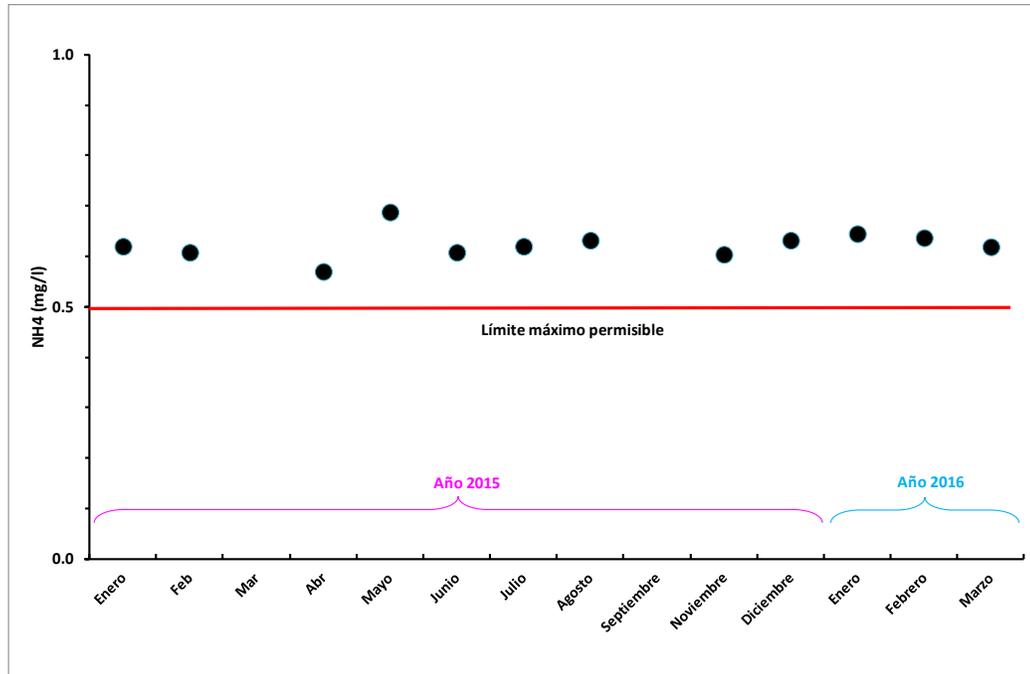
Variación de la concentración de Nitrógeno amoniacal en el tiempo, pozo Mixquic 10

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



Variación de la concentración de Nitrógeno amoniacal en el tiempo del pozo Mixquic 8

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



Variación de la concentración de Nitrógeno amoniacal en el tiempo del pozo Mixquic 9

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1 Determinación del origen de la contaminación en pozos del Ramal Mixquic-Santa Catarina

1.1 Determinación de parámetros físico-químicos de campo en la vertical en cinco pozos del ramal Mixquic-Santa Catarina.

La localización de la determinación de los parámetros físico-químicos se muestra en la figura 1.1.1.



Figura 1.1.1 Localización de la determinación de los parámetros físico-químicos.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.1.1 Pozo Mixquic 1



Figura 1.1.2 Medición de parámetros físico-químicos en campo del pozo Mixquic 1

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



Figura 1.1.3 Medición de parámetros físico-químicos en campo del pozo Mixquic 1

1.1.2 Pozo Mixquic 5



Figura 1.1.4 Medición de parámetros físico-químicos en campo del pozo Mixquic 5

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



Figura 1.1.5 **Medición de parámetros físico-químicos en campo del pozo Mixquic 5**

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.1.3 Pozo Mixquic 10



Figura 1.1.6 Medición de parámetros físico-químicos en campo del pozo Mixquic 10

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



Figura 1.1.7 Medición de parámetros físico-químicos en campo del pozo Mixquic 10

1.1.4 Pozo Mixquic 8



DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Figura 1.1.8 Medición de parámetros físico-químicos en campo del pozo Mixquic 8

1.1.5 Pozo Mixquic 9



Figura 1.1.9 Medición de parámetros físico-químicos en campo del pozo Mixquic 9

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

PARAMETROS FISICO-QUIMICOS EN CAMPO
POZO MIXQUIC 5

IDENTIFICACIÓN	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	TEMPERATURA MUESTRA (°C)	pH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (μS/cm)	OXIGENO DISUELTO (mg/L)	REDOX MUESTRA (mV)
Mixquic 5-115m	23.4	24.1	7.84	2750	0.35	-181
Mixquic 5-145m	25.2	24.2	7.49	2730	0.71	-203
Mixquic 5-175m	31.3	24.7	7.29	4560	0.84	-169
Mixquic 5-205m	24.3	23.8	7.26	5350	0.37	-126
Mixquic 5-248m	24.6	24.1	7.37	5460	0.29	-141

PARAMETROS FISICO-QUIMICOS EN CAMPO
POZO MIXQUIC 8

IDENTIFICACIÓN	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	TEMPERATURA MUESTRA (°C)	pH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (μS/cm)	OXIGENO DISUELTO (mg/L)	REDOX MUESTRA (mV)
Mixquic 8-70	24.3	26.3	7.95	351	2.9	157.2
Mixquic 8-100	24.4	24.7	8.04	343	2.4	116.4
Mixquic 8-125	23.5	25.6	7.97	351	4.5	173.4
Mixquic 8-150	23.9	25.9	8.05	341	1.9	124.9
Mixquic 8-200	22.8	25.5	7.82	347	6.4	55.2

PARAMETROS FISICO-QUIMICOS EN CAMPO
POZO MIXQUIC 9

IDENTIFICACIÓN	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	TEMPERATURA MUESTRA (°C)	pH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (μS/cm)	OXIGENO DISUELTO (mg/L)	REDOX MUESTRA (mV)
Mixquic 9-100	18.5	25.2	8.70	382	3.20	43
Mixquic 9-140	17.9	25.1	8.10	383	3.30	-33
Mixquic 9-180	18.8	24.8	8.10	381	3.46	-10
Mixquic 9-220	16.5	25.4	8.09	381	3.57	-49
Mixquic 9-245	23.0	25.9	8.01	413	3.59	-34

PARAMETROS FISICO-QUIMICOS EN CAMPO
POZO MIXQUIC 10

IDENTIFICACIÓN	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	TEMPERATURA MUESTRA (°C)	pH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (μS/cm)	OXIGENO DISUELTO (mg/L)	REDOX MUESTRA (mV)
Mixquic 10-150	27.4	22.4	8.15	514	1.42	-170
Mixquic 10-200	22.8	22.1	8.10	536	1.46	-306
Mixquic 10-250	27.2	23.2	8.39	549	1.01	-176
Mixquic 10-256	19.2	21.8	8.18	6100	0.44	-193
Mixquic 10-258	25.4	23.0	8.03	6270	0.38	-280

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

PARAMETROS FISICO-QUIMICOS EN CAMPO
POZO MIXQUIC 1

Identificación	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de la Muestra (°C)	pH	CE (µs/cm)	OD (mg/L)	Redox Muestra (mV)
Mixquic 1-100	26.9	24.5	7.36	2260	0.6	-201
Mixquic 1-150	26.5	24.1	7.42	2050	0.5	-201
Mixquic 1-200	26.6	24.7	7.40	1783	0.9	-185
Mixquic 1-220	20.3	24.0	7.46	1575	0.6	-188
Mixquic 1-245	26.2	24.7	7.52	1384	0.6	-202

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.2 Muestreo de agua en la vertical en cinco pozos seleccionados del ramal Mixquic-Santa Catarina.

1.2.1 Muestreo del pozo Mixquic 1



Figura 1.2.1 Toma de muestras de agua en el pozo Mixquic 1

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



Figura 1.2.2 Toma de muestras de agua en el pozo Mixquic 1

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.2.2 Muestreo del pozo Mixquic 5



Figura 1.2.3 Toma de muestras de agua en el pozo Mixquic 5



Figura 1.2.4 Toma de muestras de agua en el pozo Mixquic 5

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.2.3 Muestreo del pozo Mixquic 10



Figura 1.2.5 Toma de muestras de agua en el pozo Mixquic 10

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



Figura 1.2.6 Toma de muestras de agua en el pozo Mixquic 10

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.2.4 Muestreo del pozo Mixquic 8



Figura 1.2.7 Toma de muestras de agua en el pozo Mixquic 8

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.2.5 Muestreo del pozo Mixquic 9



Figura 1.2.8 Toma de muestras de agua en el pozo Mixquic 9

1.3 Análisis en laboratorio de veinticinco muestras de agua tomadas de los pozos seleccionados del ramal Mixquic-Santa Catarina.

Se realizaron análisis en laboratorio res a las muestras de agua de los pozos 5, 10, 8, 9 y 1 del ramal Mixquic-Santa Catarina.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.3.1 Pozo 5

Quality Analysis ...  Innovative Technologies

Date Submitted: 21-Jun-16
Invoice No.: A16-05827
Invoice Date: 11-Jul-16
Your Reference:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuahunajuc 8532
Col. Progreso
Jiutepec Mor C.P. 62550
Mexico

ATTN: Luis Gonzalez Hita

CERTIFICATE OF ANALYSIS

12 Water samples were submitted for analysis.
The following analytical package(s) were requested: Code 6 Natural Waters (1-50) Natural Waters with low TDS - Hydrogeochemistry (CPIMS;HYDRGEO)
Code 6B Ion Chromatography

REPORT A16-05827

This report may be reproduced without our consent. If only selected portions of the report are reproduced, permission must be obtained. If no instructions were given at time of sample submittal regarding excess material, it will be discarded within 90 days of this report. Our liability is limited solely to the analytical cost of these analyses. Test results are representative only of material submitted for analysis.

Notes:

Values which exceed the upper limit should be analysed by Code 6 ICPOES/MS. Samples showing dilution factor had to be diluted for analysis due to high total dissolved solids content. This dilution is taken into account. Detection limits will be elevated on these samples by the dilution factor. Effective October 2013 our Hydro-MS package has been modified with changes to the upper limits of some elements.

CERTIFIED BY:

Emmanuel Eseme, Ph.D.
Quality Control

ACTIVATION LABORATORIES LTD.
41 Bittern Street, Ancaster, Ontario, Canada, L9G 4V5
TELEPHONE +505 648-9611 or +1 888 325 8207 FAX +1 505 648 9613
E-MAIL Ancaster@actlabs.com ACTLABS GROUP WEBSITE www.actlabs.com

Page 1/7

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Results **Activation Laboratories Ltd.** **Report: A16-05827**

Analyte Symbol	Na	U	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Rb
Unit Symbol	µg/L																						
Lower Limit	5	1	0.1	2	200	30	700	1	0.1	0.1	0.5	0.1	10	0.005	0.3	0.2	0.5	0.01	0.01	0.03	0.2	0.005	
Method Code	ICP-MS																						
MIXQUIC 5-70	115000	48	< 0.3	32900	30	24100	7250	26400	< 3	< 0.3	< 0.3	< 2	494	5460	0.263	10.0	12.1	11.7	< 0.03	0.42	0.27	< 0.6	12.1
MIXQUIC 5-115	203000	44	< 0.5	58200	< 10	36100	11300	40200	< 5	< 0.5	< 0.5	< 3	490	7500	0.237	33.3	11.2	23.1	< 0.05	0.66	0.42	< 1	15.5
MIXQUIC 5-145	276000	38	< 1	78900	< 20	38300	16800	46600	< 10	< 1	< 1	< 5	715	9860	0.223	18.8	17.8	14.2	< 0.1	0.77	0.94	< 2	17.8
MIXQUIC 5-175	468000	29	< 3	130000	< 50	43000	32000	76700	< 30	< 3	< 3	< 10	1020	14200	0.368	23.3	8.7	24.9	< 0.3	1.04	1.19	< 5	29.0
MIXQUIC 5-205	668000	< 30	< 3	183000	< 50	40000	36400	84700	< 30	< 3	< 3	< 10	1010	3580	0.311	23.9	< 5	< 10	< 0.3	1.23	1.11	< 5	32.5
MIXQUIC 5-245	611000	28	< 3	169000	< 50	43100	38500	88900	< 30	< 3	< 3	< 10	1070	6460	0.424	25.0	5.6	15.7	< 0.3	1.25	0.94	< 5	33.0
MIXQUIC 5-70 6B																							
MIXQUIC 5-115 6B																							
MIXQUIC 5-145 6B																							
MIXQUIC 5-175 6B																							
MIXQUIC 5-205 6B																							
MIXQUIC 5-245 6B																							

Results **Activation Laboratories Ltd.** **Report: A16-05827**

Analyte Symbol	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
Unit Symbol	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Lower Limit	0.04	0.003	0.01	0.005	0.1	0.2	0.01	0.001	0.1	0.01	0.1	0.001	0.1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 5-70	222	< 0.009	< 0.03	< 0.01	1.9	< 0.6	30.5	< 0.03	< 0.3	0.15	< 0.3	0.112	98.9	0.034	0.083	0.008	0.036	0.006	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
MIXQUIC 5-115	439	< 0.01	0.31	< 0.03	1.4	< 1	74.2	< 0.005	< 0.5	< 0.05	< 0.5	0.174	206	0.040	0.116	0.010	0.049	0.007	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
MIXQUIC 5-145	594	< 0.03	< 0.1	< 0.05	1.1	< 2	77.8	< 0.01	< 1	< 0.1	< 1	0.201	347	0.011	0.069	< 0.01	0.018	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
MIXQUIC 5-175	890	< 0.07	0.39	< 0.1	< 3	< 5	62.9	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	0.311	584	< 0.03	0.068	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
MIXQUIC 5-205	1150	< 0.07	< 0.3	< 0.1	< 3	< 5	88.0	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	0.341	1030	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
MIXQUIC 5-245	1040	< 0.07	< 0.3	< 0.1	< 3	< 5	70.3	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	0.350	760	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
MIXQUIC 5-70 6B																							
MIXQUIC 5-115 6B																							
MIXQUIC 5-145 6B																							
MIXQUIC 5-175 6B																							
MIXQUIC 5-205 6B																							
MIXQUIC 5-245 6B																							

Results **Activation Laboratories Ltd.** **Report: A16-05827**

Analyte Symbol	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	F	Cl	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4
Unit Symbol	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Lower Limit	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.2	0.001	0.01	0.3	0.001	0.001	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC
MIXQUIC 5-70	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.06	< 0.003	0.67	< 0.9	< 0.003	0.006								
MIXQUIC 5-115	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.1	< 1	< 0.005	1.42	< 2	< 0.005	< 0.005							
MIXQUIC 5-145	0.011	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 2	< 0.01	2.34	< 3	< 0.01	< 0.01							
MIXQUIC 5-175	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.5	< 5	< 0.03	1.44	< 8	< 0.03	< 0.03							
MIXQUIC 5-205	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.5	< 5	< 0.03	1.26	< 8	< 0.03	< 0.03							
MIXQUIC 5-245	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.5	< 5	< 0.03	1.86	< 8	< 0.03	< 0.03							
MIXQUIC 5-70 6B														0.27	174	< 0.03	0.88	< 0.03	< 0.06	1.62
MIXQUIC 5-115 6B														0.42	381	< 0.05	2.35	< 0.05	< 0.1	0.49
MIXQUIC 5-145 6B														0.62	528	< 0.1	2.01	< 0.1	< 0.2	< 0.3
MIXQUIC 5-175 6B														< 0.3	961	< 0.3	3.45	< 0.3	< 0.5	1.78
MIXQUIC 5-205 6B														1.20	1210	< 0.3	4.56	0.26	< 0.5	1.80
MIXQUIC 5-245 6B														1.38	1220	< 0.3	4.78	< 0.3	< 0.5	1.99

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti
Unidad	µg/L									
Método de análisis	ICP-MS									
MIXQUIC 5-70	115000	48	< 0.3	32600	30	24100	7250	26400	< 3	< 0.3
MIXQUIC 5-115	203000	44	< 0.5	58200	< 10	36100	11300	40200	< 5	< 0.5
MIXQUIC 5-145	276000	38	< 1	78800	< 20	38300	16800	46600	< 10	< 1
MIXQUIC 5-175	468000	29	< 3	130000	< 50	43000	32000	76700	< 30	< 3
MIXQUIC 5-205	668000	< 30	< 3	183000	< 50	40000	36400	84700	< 30	< 3
MIXQUIC 5-245	611000	28	< 3	169000	< 50	43100	38500	88900	< 30	< 3

Elemento analizado	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
Unidad	µg/L									
Método de análisis	ICP-MS									
MIXQUIC 5-70	< 0.3	< 2	494	5460	0.263	10	12.1	11.7	< 0.03	0.42
MIXQUIC 5-115	< 0.5	< 3	490	7500	0.237	33.3	11.2	23.1	< 0.05	0.66
MIXQUIC 5-145	< 1	< 5	715	9860	0.223	18.8	17.8	14.2	< 0.1	0.77
MIXQUIC 5-175	< 3	< 10	1020	14200	0.368	23.3	8.7	24.9	< 0.3	1.04
MIXQUIC 5-205	< 3	< 10	1010	3580	0.311	23.9	< 5	< 10	< 0.3	1.23
MIXQUIC 5-245	< 3	< 10	1070	6460	0.424	25	5.6	15.7	< 0.3	1.25

Elemento analizado	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 5-70	0.27	< 0.6	12.1	222	< 0.009	< 0.03	< 0.01	1.9	< 0.6	0.305
MIXQUIC 5-115	0.42	< 1	15.5	439	< 0.01	0.31	< 0.03	1.4	< 1	0.742
MIXQUIC 5-145	0.94	< 2	17.8	594	< 0.03	< 0.1	< 0.05	1.1	< 2	0.778
MIXQUIC 5-175	1.19	< 5	29	890	< 0.07	0.39	< 0.1	< 3	< 5	0.629
MIXQUIC 5-205	1.11	< 5	32.5	1150	< 0.07	< 0.3	< 0.1	< 3	< 5	0.88
MIXQUIC 5-245	0.94	< 5	33	1040	< 0.07	< 0.3	< 0.1	< 3	< 5	0.703

Elemento analizado	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 5-70	< 0.003	< 0.3	0.15	< 0.3	0.112	96.9	0.034	0.083	0.008	0.036
MIXQUIC 5-115	< 0.005	< 0.5	< 0.05	< 0.5	0.174	206	0.04	0.116	0.01	0.049
MIXQUIC 5-145	< 0.01	< 1	< 0.1	< 1	0.201	347	0.011	0.069	< 0.01	0.018
MIXQUIC 5-175	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	0.311	584	< 0.03	0.068	< 0.03	< 0.03
MIXQUIC 5-205	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	0.341	1030	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
MIXQUIC 5-245	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	0.35	760	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 5-70	0.006	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003
MIXQUIC 5-115	0.007	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
MIXQUIC 5-145	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.011	< 0.01	< 0.01	< 0.01
MIXQUIC 5-175	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
MIXQUIC 5-205	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
MIXQUIC 5-245	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03

Elemento analizado	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	F
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	IC
MIXQUIC 5-70	< 0.003	< 0.003	< 0.06	< 0.6	< 0.003	0.67	< 0.9	< 0.003	0.006	0.27
MIXQUIC 5-115	< 0.005	< 0.005	< 0.1	< 1	< 0.005	1.42	< 2	< 0.005	< 0.005	0.42
MIXQUIC 5-145	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 2	< 0.01	2.34	< 3	< 0.01	< 0.01	0.62
MIXQUIC 5-175	< 0.03	< 0.03	< 0.5	< 5	< 0.03	1.44	< 8	< 0.03	< 0.03	< 0.3
MIXQUIC 5-205	< 0.03	< 0.03	< 0.5	< 5	< 0.03	1.26	< 8	< 0.03	< 0.03	1.2
MIXQUIC 5-245	< 0.03	< 0.03	< 0.5	< 5	< 0.03	1.86	< 8	< 0.03	< 0.03	1.38

Elemento analizado	Cl	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Método de análisis	IC	IC	IC	IC	IC	IC
MIXQUIC 5-70	174	< 0.03	0.88	< 0.03	< 0.06	1.62
MIXQUIC 5-115	381	< 0.05	2.35	< 0.05	< 0.1	0.49
MIXQUIC 5-145	528	< 0.1	2.01	< 0.1	< 0.2	< 0.3
MIXQUIC 5-175	961	< 0.3	3.45	< 0.3	< 0.5	1.78
MIXQUIC 5-205	1210	< 0.3	4.56	0.26	< 0.5	1.8
MIXQUIC 5-245	1220	< 0.3	4.78	< 0.3	< 0.5	1.99

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.3.2 Pozo 10

Quality Analysis ...  Innovative Technologies

Date Submitted: 19-Jul-16
Invoice No.: A16-06983
Invoice Date: 04-Aug-16
Your Reference:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuahunajuac 8532
Col. Progreso
Jiutepec Mor C.P. 62550
Mexico

ATTN: Luis Gonzalez Hita

CERTIFICATE OF ANALYSIS

10 Water samples were submitted for analysis.
The following analytical package(s) were requested: Code 6 Natural Waters (1-50) Natural Waters with low TDS - Hydrogeochemistry ICP/MS(HYDRGEO)
Code 6B Ion Chromatography

REPORT A16-06983

This report may be reproduced without our consent. If only selected portions of the report are reproduced, permission must be obtained. If no instructions were given at time of sample submittal regarding excess material, it will be discarded within 90 days of this report. Our liability is limited solely to the analytical cost of these analyses. Test results are representative only of material submitted for analysis.

Notes:

Values which exceed the upper limit should be analysed by Code 6 ICPOES/MS. Samples showing dilution factor had to be diluted for analysis due to high total dissolved solids content. This dilution is taken into account. Detection limits will be elevated on these samples by the dilution factor. Effective October 2013 our Hydro-MS package has been modified with changes to the upper limits of some elements.

CERTIFIED BY:

Elitsa Hirscheva, Ph.D.
Quality Control

ACTIVATION LABORATORIES LTD.
41 Bittern Street, Ancaster, Ontario, Canada, L9G 4V5
TELEPHONE +905 648-9611 or +1 888 228 2327 FAX +1 905 648 9613
E-MAIL Ancaster@actlabs.com ACTLABS GROUP WEBSITE www.actlabs.com

Page 1/7

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Results Activation Laboratories Ltd. Report: A16-06983

Analyte Symbol	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Rb
Unit Symbol	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Lower Limit	5	1	0.1	2	2	200	30	700	1	0.1	0.1	0.5	0.1	10	0.005	0.3	0.2	0.5	0.01	0.01	0.03	0.2	0.005
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 10-150	71900	33	< 0.2	10900	22	35200	5420	11500	< 2	1.2	0.2	< 1	93.2	2450	0.161	51.2	15.8	33.5	0.05	0.76	0.34	< 0.4	5.37
MIXQUIC 10-200	73000	31	< 0.2	10200	171	33800	5850	12200	< 2	11.7	0.5	< 1	123	11600	0.458	14.4	13.8	27.5	0.30	0.83	0.37	< 0.4	5.65
MIXQUIC 10-250	87200	36	< 0.2	12000	85	38100	6720	13000	< 2	4.3	0.4	1.4	141	6220	0.456	30.7	18.7	35.4	0.20	0.77	0.35	< 0.4	5.85
MIXQUIC 10-256	1210000	102	< 3	60500	86	34900	88800	25800	< 30	9.7	< 3	< 10	454	14000	2.06	19.2	7.5	41.5	< 0.3	3.07	2.62	< 5	57.3
MIXQUIC 10-258	1610000	102	< 3	68900	191	34900	105000	25100	< 30	12.2	< 3	< 10	627	33300	3.44	52.6	23.0	79.2	0.45	2.91	1.91	< 5	58.2
MIXQUIC 10-150 (B)																							
MIXQUIC 10-200 (B)																							
MIXQUIC 10-250 (B)																							
MIXQUIC 10-256 (B)																							
MIXQUIC 10-258 (B)																							

Results Activation Laboratories Ltd. Report: A16-06983

Analyte Symbol	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
Unit Symbol	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L							
Lower Limit	0.04	0.003	0.01	0.005	0.1	0.2	0.01	0.001	0.1	0.01	0.1	0.001	0.1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS							
MIXQUIC 10-150	76.2	0.039	0.22	0.015	1.7	< 0.4	175	< 0.002	< 0.2	0.05	< 0.2	0.134	22.7	0.022	0.075	0.011	0.054	0.012	0.002	0.007	< 0.002	0.007	< 0.002
MIXQUIC 10-200	47.4	0.443	2.92	0.029	1.7	< 0.4	95.2	< 0.002	< 0.2	0.05	< 0.2	0.384	15.4	0.311	0.740	0.105	0.464	0.198	0.020	0.095	0.015	0.090	0.016
MIXQUIC 10-250	81.7	0.096	0.42	0.035	1.3	< 0.4	113	< 0.002	< 0.2	0.09	< 0.2	0.182	27.0	0.086	0.221	0.031	0.156	0.027	0.005	0.023	0.004	0.020	0.005
MIXQUIC 10-256	258	0.417	9.50	< 0.1	3.0	< 5	70.6	< 0.09	< 3	< 0.3	< 3	1.74	129	0.071	0.605	0.091	0.422	0.123	< 0.03	0.042	< 0.03	0.062	< 0.03
MIXQUIC 10-258	244	0.685	9.62	0.132	< 3	< 5	209	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	1.79	134	0.255	0.986	0.141	0.650	0.158	0.031	0.090	< 0.03	0.124	0.027
MIXQUIC 10-150 (B)																							
MIXQUIC 10-200 (B)																							
MIXQUIC 10-250 (B)																							
MIXQUIC 10-256 (B)																							
MIXQUIC 10-258 (B)																							

Results Activation Laboratories Ltd. Report: A16-06983

Analyte Symbol	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	F	Cl	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4
Unit Symbol	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Lower Limit	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.2	0.001	0.01	0.3	0.001	0.001	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03
Method Code	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC
MIXQUIC 10-150	0.004	< 0.002	0.003	< 0.002	0.003	< 0.002	0.29	0.9	0.005	3.21	< 0.6	< 0.002	< 0.002							
MIXQUIC 10-200	0.052	0.007	0.045	0.005	0.016	< 0.002	0.18	0.9	0.029	9.50	< 0.6	0.112	0.031							
MIXQUIC 10-250	0.015	< 0.002	0.011	< 0.002	0.007	< 0.002	0.07	0.9	0.006	23.5	< 0.6	0.021	0.004							
MIXQUIC 10-256	0.077	< 0.03	0.045	< 0.03	0.049	0.060	1.55	10.9	0.047	17.2	< 8	0.082	< 0.03							
MIXQUIC 10-258	0.079	< 0.03	0.096	< 0.03	0.073	0.060	0.73	11.2	0.063	18.4	< 8	0.126	< 0.03							
MIXQUIC 10-150 (B)														0.46	41.8	1.31	0.10	< 0.02	< 0.04	0.68
MIXQUIC 10-200 (B)														0.60	33.7	1.34	< 0.06	0.04	< 0.04	3.04
MIXQUIC 10-250 (B)														0.48	44.2	1.37	0.11	0.03	< 0.04	1.13
MIXQUIC 10-256 (B)														2.81	658	< 0.3	1.99	< 0.3	< 0.5	< 0.7
MIXQUIC 10-258 (B)														4.19	828	< 0.3	2.49	< 0.3	< 0.5	11.4

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 10-150	71500	33	< 0.2	10900	22	35200	6420	11500	< 2	1.2
MIXQUIC 10-200	73000	31	< 0.2	10200	171	33800	5850	12200	< 2	11.7
MIXQUIC 10-250	87200	36	< 0.2	12000	85	38100	6720	13000	< 2	4.3
MIXQUIC 10-256	1210000	102	< 3	60500	86	34900	88800	25800	< 30	9.7
MIXQUIC 10-258	1610000	102	< 3	68900	191	34800	105000	25100	< 30	12.2

Elemento analizado	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
Unidad	µg/L									
Método de análisis	ICP-MS									
MIXQUIC 10-150	0.2	< 1	93.2	2450	0.161	51.2	15.8	33.5	0.05	0.76
MIXQUIC 10-200	0.5	< 1	123	11600	0.458	14.4	13.8	27.5	0.3	0.83
MIXQUIC 10-250	0.4	1.4	141	6220	0.456	30.7	18.7	35.4	0.2	0.77
MIXQUIC 10-256	< 3	< 10	454	14000	2.06	19.2	7.5	41.5	< 0.3	3.07
MIXQUIC 10-258	< 3	< 10	627	33300	3.44	52.6	23	79.2	0.45	2.91

Elemento analizado	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd
Unidad	µg/L									
Método de análisis	ICP-MS									
MIXQUIC 10-150	0.34	< 0.4	5.37	76.2	0.039	0.22	0.015	1.7	< 0.4	0.175
MIXQUIC 10-200	0.37	< 0.4	5.65	47.4	0.443	2.92	0.028	1.7	< 0.4	0.952
MIXQUIC 10-250	0.35	< 0.4	5.85	81.7	0.096	0.42	0.035	1.3	< 0.4	0.113
MIXQUIC 10-256	2.62	< 5	57.3	258	0.417	9.5	< 0.1	3	< 5	0.706
MIXQUIC 10-258	1.91	< 5	58.2	244	0.685	9.62	0.132	< 3	< 5	0.209

Elemento analizado	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 10-150	< 0.002	< 0.2	0.05	< 0.2	0.134	22.7	0.022	0.075	0.011	0.054
MIXQUIC 10-200	< 0.002	< 0.2	0.05	< 0.2	0.384	15.4	0.311	0.74	0.105	0.464
MIXQUIC 10-250	< 0.002	< 0.2	0.09	< 0.2	0.192	27	0.086	0.221	0.031	0.136
MIXQUIC 10-256	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	1.74	129	0.071	0.605	0.091	0.422
MIXQUIC 10-258	< 0.03	< 3	< 0.3	< 3	1.79	134	0.255	0.986	0.141	0.65

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 10-150	0.012	0.002	0.007	< 0.002	0.007	< 0.002	0.004	< 0.002	0.003	< 0.002
MIXQUIC 10-200	0.108	0.02	0.095	0.015	0.09	0.016	0.052	0.007	0.045	0.005
MIXQUIC 10-250	0.027	0.005	0.023	0.004	0.02	0.005	0.015	< 0.002	0.011	< 0.002
MIXQUIC 10-256	0.123	< 0.03	0.042	< 0.03	0.062	< 0.03	0.077	< 0.03	0.045	< 0.03
MIXQUIC 10-258	0.158	0.031	0.09	< 0.03	0.124	0.027	0.079	< 0.03	0.096	< 0.03

Elemento analizado	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	F
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	IC
MIXQUIC 10-150	0.003	< 0.002	0.29	0.9	0.005	3.21	< 0.6	< 0.002	< 0.002	0.46
MIXQUIC 10-200	0.016	0.002	0.18	0.9	0.023	9.5	< 0.6	0.112	0.031	0.6
MIXQUIC 10-250	0.007	< 0.002	0.07	0.9	0.006	23.5	< 0.6	0.021	0.004	0.48
MIXQUIC 10-256	0.049	0.06	1.55	10.9	0.047	17.2	< 8	0.082	< 0.03	2.81
MIXQUIC 10-258	0.073	0.06	0.73	11.2	0.063	18.4	< 8	0.126	< 0.03	4.19

Elemento analizado	Cl	NO ₂ (as N)	Br	NO ₃ (as N)	PO ₄ (as P)	SO ₄
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Método de análisis	IC	IC	IC	IC	IC	IC
MIXQUIC 10-150	41.8	1.31	0.1	< 0.02	< 0.04	0.68
MIXQUIC 10-200	33.7	1.34	<	0.04	< 0.04	3.04
MIXQUIC 10-250	44.2	1.37	0.11	0.03	< 0.04	1.13
MIXQUIC 10-256	658	< 0.3	1.99	< 0.3	< 0.5	< 0.7
MIXQUIC 10-258	828	< 0.3	2.49	< 0.3	< 0.5	11.4

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.3.3 Pozo 1

Quality Analysis ...  Innovative Technologies

Date Submitted: 15-May-16
Invoice No.: A15-07783
Invoice Date: 15-May-16
Your Reference:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuahunajua 8532
Col. Progreso
Jiutepec Mor C.P. 62550
Mexico

ATTN: Miguel Mejía González

CERTIFICATE OF ANALYSIS

10 Water samples were submitted for analysis.
The following analytical package was requested: Code 6B Ion Chromatography
Code 6 Natural Waters + B (1-50) Hydrogeochemistry (ICPMS)(HYDRGEO) & B

REPORT A15-07783

This report may be reproduced without our consent. If only selected portions of the report are reproduced, permission must be obtained. If no instructions were given at time of sample submittal regarding excess material, it will be discarded within 90 days of this report. Our liability is limited solely to the analytical cost of these analyses. Test results are representative only of material submitted for analysis.

Notes:
Values which exceed the upper limit should be analysed by Code 6 ICPOES/MS. Samples showing dilution factor had to be diluted for analysis due to high total dissolved solids content. This dilution is taken into account. Detection limits will be elevated on these samples by the dilution factor. Effective October 2013 our Hydro-MS package has been modified with changes to the upper limits of some elements.

CERTIFIED BY:

Emmanuel Esemie, Ph.D.
Quality Control

ACTIVATION LABORATORIES LTD.
41 Biltam Street, Ancaster, Ontario, Canada, L9G 4V5
TELEPHONE +905 648-9611 or +1.888.228.5227 FAX +1.905.648.9613
E-MAIL Ancaster@actlabs.com ACTLABS GROUP WEBSITE www.actlabs.com

Page 1/6



DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Activation Laboratories Ltd. Report: A15-07783

Results

Analyte Symbol	Li	Be	B	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Unit Symbol	µg/L																						
Lower Limit	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Method Code	ICP-MS																						
Mixquic 1- 100 6b																							
Mixquic 1- 150 6b																							
Mixquic 1- 200 6b																							
Mixquic 1- 220 6b																							
Mixquic 1- 245 6b																							
Mixquic 1- 100	113	< 1	652	166000	58900	27	31300	15800	85600	< 10	< 1	< 1	< 5	631	15900	0.858	9.8	19.8	26.7	< 0.1	0.39	0.66	< 2
Mixquic 1- 150	104	< 1	638	164000	57000	< 20	36300	15300	76900	< 10	2.0	1.3	< 5	518	12300	0.647	6.5	14.4	21.8	0.16	0.65	1.24	2.3
Mixquic 1- 200	96	< 1	596	134000	48500	< 20	40100	12600	62000	< 10	1.3	< 1	< 5	532	13600	0.493	6.1	11.8	18.3	< 0.1	0.78	0.39	< 2
Mixquic 1- 220	84	< 1	566	127000	45400	< 20	40100	12400	55000	< 10	1.1	< 1	< 5	510	14900	0.527	8.3	15.0	18.1	< 0.1	0.76	< 0.3	< 2
Mixquic 1- 245	75	< 2	500	146000	38300	< 40	37400	11000	59300	< 20	< 2	< 2	< 10	435	11900	0.412	< 6	10.3	12.3	< 0.2	0.65	< 0.6	< 4

Activation Laboratories Ltd. Report: A15-07783

Results

Analyte Symbol	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
Unit Symbol	µg/L																						
Lower Limit	0.005	0.04	0.003	0.01	0.005	0.1	0.2	0.01	0.001	0.1	0.01	0.1	0.001	0.1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Method Code	ICP-MS																						
Mixquic 1- 100 6b																							
Mixquic 1- 150 6b																							
Mixquic 1- 200 6b																							
Mixquic 1- 220 6b																							
Mixquic 1- 245 6b																							
Mixquic 1- 100	24.7	518	0.096	0.38	< 0.05	< 1	< 2	86.6	< 0.01	< 1	0.23	< 1	0.302	173	0.167	0.322	0.027	0.093	0.020	< 0.01	0.022	< 0.01	0.015
Mixquic 1- 150	22.9	507	0.647	0.48	< 0.05	3.7	< 2	42.1	< 0.01	< 1	0.36	< 1	0.358	195	0.164	0.282	0.102	0.416	0.084	0.023	0.087	0.012	0.053
Mixquic 1- 200	20.6	447	< 0.03	0.28	< 0.05	< 1	< 2	55.9	< 0.01	< 1	0.19	< 1	0.365	208	0.086	0.233	< 0.01	0.046	0.010	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Mixquic 1- 220	18.9	430	0.030	0.23	< 0.05	< 1	< 2	88.6	< 0.01	< 1	0.17	< 1	0.399	197	0.127	0.225	< 0.01	0.041	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Mixquic 1- 245	17.3	462	< 0.06	0.42	< 0.1	< 2	< 4	86.9	< 0.02	< 2	0.33	< 2	0.375	393	42.8	51.6	< 0.02	0.034	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02

Activation Laboratories Ltd. Report: A15-07783

Results

Analyte Symbol	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	F	Cl	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4		
Unit Symbol	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L												
Lower Limit	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.2	0.001	0.01	0.3	0.001	0.001	0.01	0.03	0.01		
Method Code	ICP-MS	IC	IC	IC	IC	IC												
Mixquic 1- 100 6b												< 0.1	420	< 0.1	2.20	< 0.1	< 0.2	< 0.3
Mixquic 1- 150 6b												< 0.05	388	< 0.05	1.39	< 0.05	< 0.1	< 0.1
Mixquic 1- 200 6b												< 0.05	271	< 0.05	1.00	< 0.05	< 0.1	< 0.1
Mixquic 1- 220 6b												< 0.04	236	< 0.04	0.88	< 0.04	< 0.08	< 0.1
Mixquic 1- 245 6b												< 0.04	228	< 0.04	0.76	1.20	< 0.08	< 0.1
Mixquic 1- 100	< 0.01	0.023	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 2	0.028	8.80	< 3	0.025	0.010				
Mixquic 1- 150	< 0.01	0.037	< 0.01	0.018	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 2	0.011	4.46	< 3	0.043	0.041				
Mixquic 1- 200	< 0.01	0.019	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 2	< 0.01	4.39	< 3	< 0.01	< 0.01				
Mixquic 1- 220	< 0.01	0.019	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 2	< 0.01	4.47	< 3	< 0.01	< 0.01				
Mixquic 1- 245	< 0.02	0.042	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.4	< 4	< 0.02	4.20	< 6	< 0.02	< 0.02					

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Li	Be	B	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti
Símbolo	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
Mixquic 1-100 m	113	< 1	652	16600 0	5890 0	27	3130 0	1580 0	8560 0	< 10	< 1
Mixquic 1- 150 m	104	< 1	635	16400 0	5700 0	< 20	3630 0	1530 0	7690 0	< 10	2
Mixquic 1- 200 m	96	< 1	586	13400 0	4850 0	< 20	4010 0	1260 0	6200 0	< 10	1.3
Mixquic 1- 220 m	84	< 1	566	12700 0	4540 0	< 20	4010 0	1240 0	5500 0	< 10	1.1
Mixquic 1- 245 m	75	< 2	500	14400 0	3830 0	< 40	3740 0	1100 0	5930 0	< 20	< 2

Elemento analizado	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As
Símbolo	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
Mixquic 1-100 m	< 1	< 5	631	1590 0	0.85 8	9.8	19. 8	28. 7	< 0.1	0.3 9	0.6 6
Mixquic 1-150 m	1.3	< 5	518	1230 0	0.64 7	6.5	14. 4	21. 8	0.1 6	0.6 5	1.2 4
Mixquic 1-200 m	< 1	< 5	532	1360 0	0.49 3	6.1	11. 8	18. 3	< 0.1	0.7 8	0.3 9
Mixquic 1-220 m	< 1	< 5	510	1490 0	0.52 7	8.3	15 1	18. 1	< 0.1	0.7 6	< 0.3
Mixquic 1-245 m	< 2	< 10	435	1190 0	0.41 2	< 6	10. 3	12. 3	< 0.2	0.6 5	< 0.6

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn
Símbolo	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
Mixquic 1-100 m	< 2	24.7	518	0.09 6	0.38	< 0.05	< 1	< 2	86.6	< 0.01	< 1
Mixquic 1-150 m	2.3	22.9	507	0.64 7	0.48	< 0.05	3.7	< 2	42.1	< 0.01	< 1
Mixquic 1-200 m	< 2	20.6	447	< 0.03	0.28	< 0.05	< 1	< 2	55.9	< 0.01	< 1
Mixquic 1-220 m	< 2	18.9	430	0.03	0.23	< 0.05	< 1	< 2	88.6	< 0.01	< 1
Mixquic 1-245 m	< 4	17.3	462	< 0.06	0.42	< 0.1	< 2	< 4	86.9	< 0.02	< 2

Elemento analizado	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
Símbolo	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
Mixquic 1-100 m	0.2 3	< 1	0.39 2	< 173	0.16 7	0.32 2	0.02 7	0.09 3	0.02	< 0.01	0.02 2
Mixquic 1-150 m	0.3 6	< 1	0.35 8	< 195	0.16 4	0.28 2	0.10 2	0.41 6	0.08 4	0.02 3	0.08 7
Mixquic 1-200 m	0.1 9	< 1	0.36 5	< 208	0.08 6	0.23 3	< 0.01	0.04 6	0.01	< 0.01	< 0.01
Mixquic 1-220 m	0.1 7	< 1	0.39 9	< 197	0.12 7	0.22 5	< 0.01	0.04 1	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Mixquic 1-245 m	0.3 3	< 2	0.37 5	< 393	42.8	51.6	< 0.02	0.03 4	< 0.02	< 0.02	< 0.02

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Hg
Símbolo	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
Mixquic 1-100 m	< 0.01	0.01 5	< 0.0 1	0.02 3	< 0.0 1	< 0.01	< 0.0 1	< 0.0 1	< 0.0 1	< 0.2	< 2
Mixquic 1-150 m	0.01 2	0.05 3	< 0.0 1	0.03 7	< 0.0 1	0.01 8	< 0.0 1	< 0.0 1	< 0.0 1	< 0.2	< 2
Mixquic 1-200 m	< 0.01	< 0.01	< 0.0 1	0.01 9	< 0.0 1	< 0.01	< 0.0 1	< 0.0 1	< 0.0 1	< 0.2	< 2
Mixquic 1-220 m	< 0.01	< 0.01	< 0.0 1	0.01 9	< 0.0 1	< 0.01	< 0.0 1	< 0.0 1	< 0.0 1	< 0.2	< 2
Mixquic 1-245 m	< 0.02	< 0.02	< 0.0 2	0.04 2	< 0.0 2	< 0.02	< 0.0 2	< 0.0 2	< 0.0 2	< 0.4	< 4

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Tl	Pb	Th	U	F	Cl	NO ₂ (as N)	Br	NO ₃ (as N)	PO ₄ (as P)	SO ₄
Símbolo	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC
Mixquic 1-100 m	0.028	8.8	0.025	0.01	< 0.1	420	< 0.1	2.2	< 0.1	< 0.2	< 0.3
Mixquic 1-150 m	0.011	4.46	0.043	0.041	< 0.05	388	< 0.05	1.39	< 0.05	< 0.1	< 0.1
Mixquic 1-200 m	< 0.01	4.39	< 0.01	< 0.01	< 0.05	271	< 0.05	1	< 0.05	< 0.1	< 0.1
Mixquic 1-220 m	< 0.01	4.47	< 0.01	< 0.01	< 0.04	236	< 0.04	0.88	< 0.04	< 0.08	< 0.1
Mixquic 1-245 m	< 0.02	4.2	< 0.02	< 0.02	< 0.04	228	< 0.04	0.76	1.2	< 0.08	< 0.1

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.3.4 Pozo 8 y 9

Quality Analysis ...  Innovative Technologies

Date Submitted: 14-Oct-16
Invoice No.: A16-10710
Invoice Date: 23-Nov-16
Your Reference:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuahunajuac 8532
Col. Progreso
Jiutepec Mor C.P. 62550
Mexico

ATTN: Luis Gonzalez Hita

CERTIFICATE OF ANALYSIS

10 Water samples were submitted for analysis.
The following analytical package(s) were requested: Code 6 Natural Waters (1-50) Natural Waters with low TDS - Hydrogeochemistry (CPIMS(HYDR/SEO)
Code 6B Ion Chromatography

REPORT A16-10710

This report may be reproduced without our consent. If only selected portions of the report are reproduced, permission must be obtained. If no instructions were given at time of sample submittal regarding excess material, it will be discarded within 90 days of this report. Our liability is limited solely to the analytical cost of these analyses. Test results are representative only of material submitted for analysis.

Notes:

Values which exceed the upper limit should be analysed by Code 6 ICPOESIMS. Samples showing dilution factor had to be diluted for analysis due to high total dissolved solids content. This dilution is taken into account. Detection limits will be elevated on these samples by the dilution factor. Effective October 2013 our Hydro-MS package has been modified with changes to the upper limits of some elements.

CERTIFIED BY:

Emmanuel Esemé, Ph.D.
Quality Control

ACTIVATION LABORATORIES LTD.
41 Bittern Street, Ancaster, Ontario, Canada, L9G 4V5
TELEPHONE +1(905) 648-9611 or +1(905) 229-2237 FAX +1(905) 648-9613
E-MAIL Ancaster@actlabs.com ACTLABS GROUP WEBSITE www.actlabs.com

Page 1/7

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti
Unidad	µg/L									
Método de análisis	ICP-MS									
MIXQUIC 8-100	44700	32	< 0.1	10800	72	31300	5840	9400	< 1	1.2
MIXQUIC 8-130	41100	31	< 0.1	10900	43	30500	5030	9800	< 1	0.3
MIXQUIC 8-160	44500	33	< 0.1	11000	122	31100	5260	9700	< 1	0.8
MIXQUIC 8-190	40900	31	< 0.1	11500	230	32100	5150	10400	< 1	2.1
MIXQUIC 8-220	39100	32	< 0.1	11000	14	30300	5710	10400	< 1	0.5
MIXQUIC 9-100	37700	38	< 0.1	14000	34	306000	5240	13700	< 1	1.2
MIXQUIC 9-140	40400	39	< 0.1	14900	20	326000	5580	13600	< 1	< 0.1
MIXQUIC 9-180	39600	38	< 0.1	14500	13	319000	5510	13400	< 1	0.4
MIXQUIC 9-220	39900	38	< 0.1	14500	23	320000	5720	13700	< 1	0.2
MIXQUIC 9-245	47400	42	< 0.1	15300	43	333000	6510	14400	< 1	2.4

Elemento analizado	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
Unidad	µg/L									
Método de análisis	ICP-MS									
MIXQUIC 8-100	0.6	0.9	66.4	840	0.267	6.1	93.4	119	0.14	0.38
MIXQUIC 8-130	0.3	< 0.5	90.9	980	0.235	4.4	38.4	52.5	0.09	0.39
MIXQUIC 8-160	0.6	< 0.5	73.8	1330	0.246	4.8	25.8	40	0.16	0.42
MIXQUIC 8-190	0.6	< 0.5	123	1310	0.228	31.3	47.3	69.7	0.1	0.44
MIXQUIC 8-220	0.1	< 0.5	72.5	580	0.127	53	45.8	112	0.05	0.42
MIXQUIC 9-100	0.2	< 0.5	91.4	540	0.06	0.4	12	15.1	0.07	0.56
MIXQUIC 9-140	0.1	< 0.5	87.4	310	0.036	0.4	9.9	13.9	0.03	0.55
MIXQUIC 9-180	0.2	< 0.5	83.4	160	0.055	0.4	9.7	14.8	0.04	0.54
MIXQUIC 9-220	0.2	< 0.5	83.3	160	0.053	0.5	11.5	20	0.04	0.56
MIXQUIC 9-245	0.3	< 0.5	103	950	0.182	1.3	25.7	51.8	0.07	0.6

Elemento analizado	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L						
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS						
MIXQUIC 8-100	0.56	< 0.2	5.85	77.5	0.016	0.07	< 0.005	2.4	< 0.2	0.609
MIXQUIC 8-130	0.43	< 0.2	5.61	77.2	0.008	0.03	< 0.005	2.3	< 0.2	0.223
MIXQUIC 8-160	0.51	< 0.2	5.6	76.1	0.012	0.09	< 0.005	2.4	< 0.2	0.134
MIXQUIC 8-190	0.29	< 0.2	5.56	85	0.043	0.03	< 0.005	2.3	< 0.2	0.211
MIXQUIC 8-220	0.26	< 0.2	5.71	79.3	0.009	0.07	< 0.005	2.3	< 0.2	0.326
MIXQUIC 9-100	0.36	< 0.2	7.23	109	0.011	0.04	< 0.005	2	< 0.2	0.104
MIXQUIC 9-140	0.32	< 0.2	7.26	114	0.007	0.03	< 0.005	2	< 0.2	0.639
MIXQUIC 9-180	0.32	< 0.2	7.19	111	0.008	0.21	< 0.005	1.9	< 0.2	0.943
MIXQUIC 9-220	0.32	< 0.2	7.19	110	0.008	0.04	< 0.005	2	< 0.2	0.112
MIXQUIC 9-245	0.46	< 0.2	7.04	123	0.039	0.11	< 0.005	2	< 0.2	0.2

Elemento analizado	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 8-100	< 0.001	0.2	0.51	< 0.1	0.084	15.1	0.019	0.039	0.003	0.019
MIXQUIC 8-130	< 0.001	< 0.1	0.25	< 0.1	0.056	17.4	0.008	0.017	< 0.001	0.006
MIXQUIC 8-160	< 0.001	0.1	0.47	< 0.1	0.063	13.2	0.011	0.025	0.002	0.011
MIXQUIC 8-190	< 0.001	0.2	0.09	< 0.1	0.054	25.7	0.031	0.074	0.008	0.04
MIXQUIC 8-220	< 0.001	0.1	0.09	< 0.1	0.048	23.7	0.007	0.015	< 0.001	0.006
MIXQUIC 9-100	< 0.001	< 0.1	0.02	< 0.1	0.062	30.8	0.014	0.029	0.004	0.014
MIXQUIC 9-140	< 0.001	< 0.1	0.02	< 0.1	0.061	32.7	0.008	0.017	0.002	0.011
MIXQUIC 9-180	< 0.001	< 0.1	0.02	< 0.1	0.063	32	0.007	0.018	0.003	0.008
MIXQUIC 9-220	< 0.001	< 0.1	0.02	< 0.1	0.062	32.4	0.006	0.014	0.002	0.008
MIXQUIC 9-245	< 0.001	0.1	0.13	< 0.1	0.076	38.4	0.053	0.126	0.015	0.055

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Elemento analizado	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
MIXQUIC 8-100	0.005	< 0.001	0.003	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
MIXQUIC 8-130	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
MIXQUIC 8-160	0.004	< 0.001	0.003	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
MIXQUIC 8-190	0.009	< 0.001	0.008	< 0.001	0.006	< 0.001	0.004	< 0.001	0.002	< 0.001
MIXQUIC 8-220	0.002	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
MIXQUIC 9-100	0.002	0.001	0.003	< 0.001	0.004	< 0.001	0.001	< 0.001	0.002	< 0.001
MIXQUIC 9-140	0.002	< 0.001	0.002	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001
MIXQUIC 9-180	0.002	< 0.001	0.002	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
MIXQUIC 9-220	0.002	< 0.001	0.002	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001
MIXQUIC 9-245	0.013	0.002	0.01	0.002	0.009	0.001	0.004	< 0.001	0.003	< 0.001

Elemento analizado	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	F
Unidad	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L
Método de análisis	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	IC
MIXQUIC 8-100	0.001	< 0.001	0.26	< 0.2	< 0.001	9.96	< 0.3	0.002	0.007	0.64
MIXQUIC 8-130	< 0.001	< 0.001	0.19	< 0.2	< 0.001	4.38	< 0.3	0.002	0.003	0.05
MIXQUIC 8-160	0.001	< 0.001	0.23	< 0.2	< 0.001	5.41	< 0.3	0.004	0.011	0.52
MIXQUIC 8-190	< 0.001	< 0.001	0.16	< 0.2	< 0.001	57.2	< 0.3	0.002	0.013	0.32
MIXQUIC 8-220	0.001	< 0.001	0.19	< 0.2	< 0.001	8.63	< 0.3	0.002	0.01	0.79
MIXQUIC 9-100	< 0.001	< 0.001	0.2	< 0.2	< 0.001	16.8	< 0.3	0.003	0.019	0.3
MIXQUIC 9-140	< 0.001	< 0.001	0.2	< 0.2	< 0.001	10.6	< 0.3	< 0.001	0.004	0.22
MIXQUIC 9-180	0.005	< 0.001	0.17	< 0.2	< 0.001	25.9	< 0.3	< 0.001	0.022	0.26
MIXQUIC 9-220	< 0.001	< 0.001	0.2	< 0.2	< 0.001	7.71	< 0.3	< 0.001	0.021	0.58
MIXQUIC 9-245	0.002	< 0.001	0.2	< 0.2	< 0.001	8.2	< 0.3	0.01	0.015	0.2

Elemento analizado	Cl	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Método de análisis	IC	IC	IC	IC	IC	IC
MIXQUIC 8-100	20.5	0.18	< 0.03	0.1	< 0.02	8.35
MIXQUIC 8-130	19.3	< 0.01	< 0.03	0.07	< 0.02	8.41
MIXQUIC 8-160	20.1	0.11	< 0.03	0.12	< 0.02	8.33
MIXQUIC 8-190	18.7	< 0.01	< 0.03	0.03	< 0.02	7.84
MIXQUIC 8-220	19.1	< 0.01	< 0.03	0.06	< 0.02	8.17
MIXQUIC 9-100	23.3	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	3.02
MIXQUIC 9-140	23.4	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	3.08
MIXQUIC 9-180	23.4	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	3
MIXQUIC 9-220	23.4	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	2.87
MIXQUIC 9-245	27.6	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	3.25

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

1.4 Perfiles de calidad del agua en la vertical en cinco pozos del ramal Mixquic-Santa Catarina con base en los datos de campo y laboratorio. Identificación de horizontes saturados con agua de buena calidad, si los hay, que cumplan con la modificación del año 2000 a la NOM-127-SSA1-1994 e identificación de posibles fuentes de contaminación mediante análisis isotópico.

1.4.1 Perfil del pozo 1

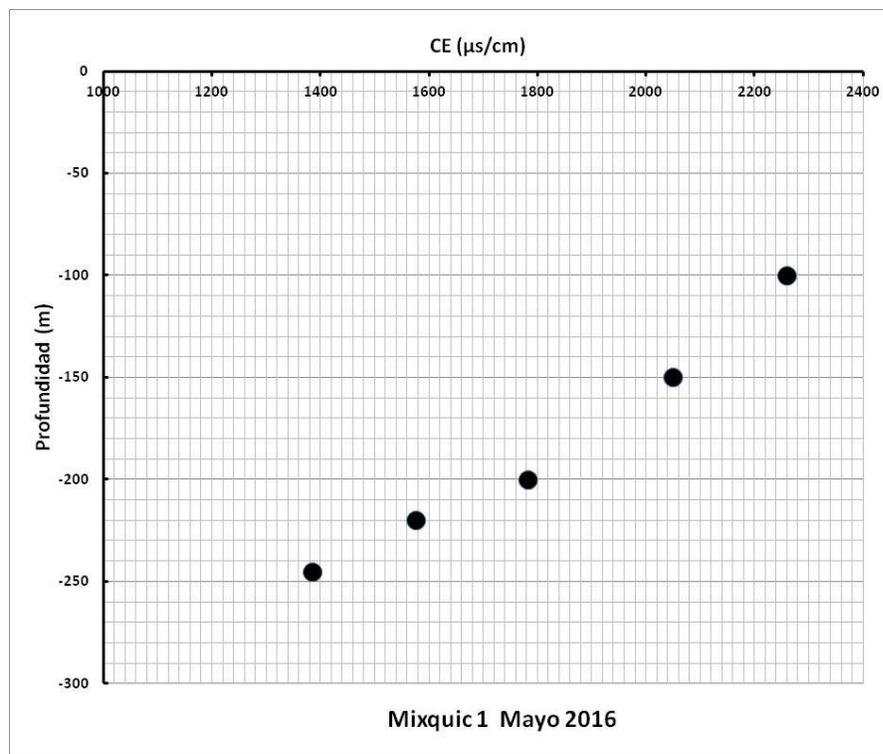


Figura 1.4.1 Perfil de conductividad

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

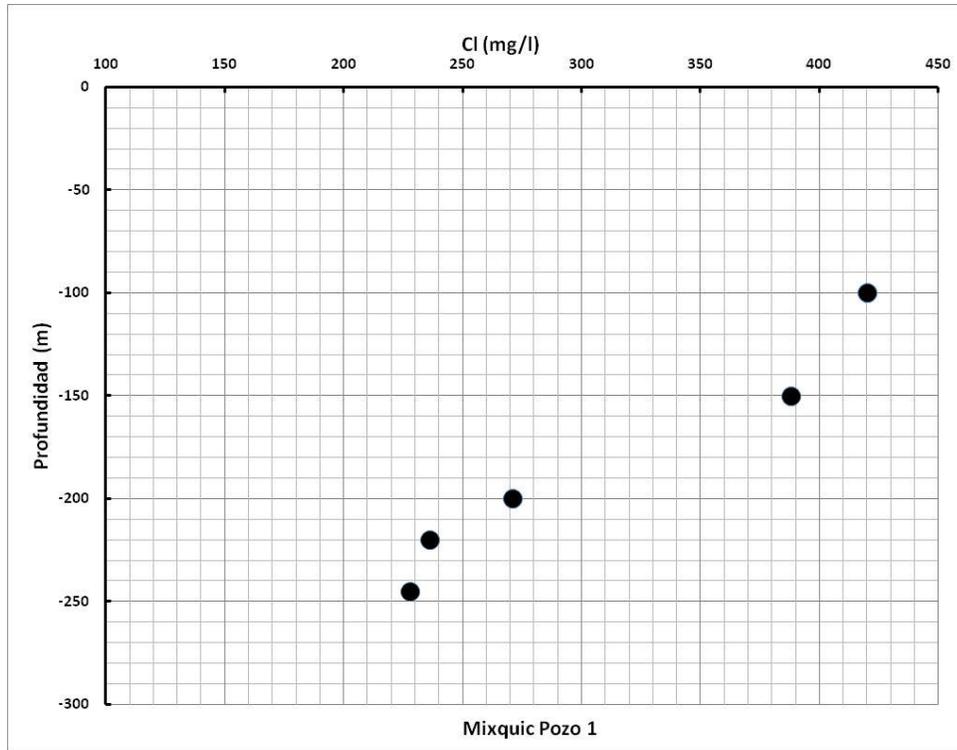


Figura 1.4. 2 Perfil de Cl

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

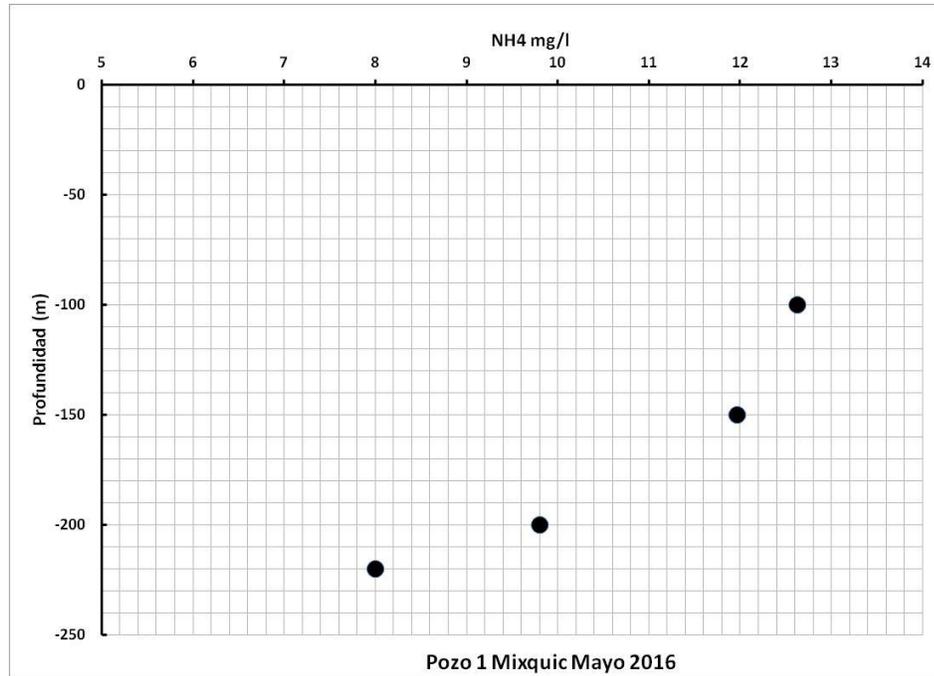


Figura 1.4.3 Perfil de Nitrógeno Amoniacal

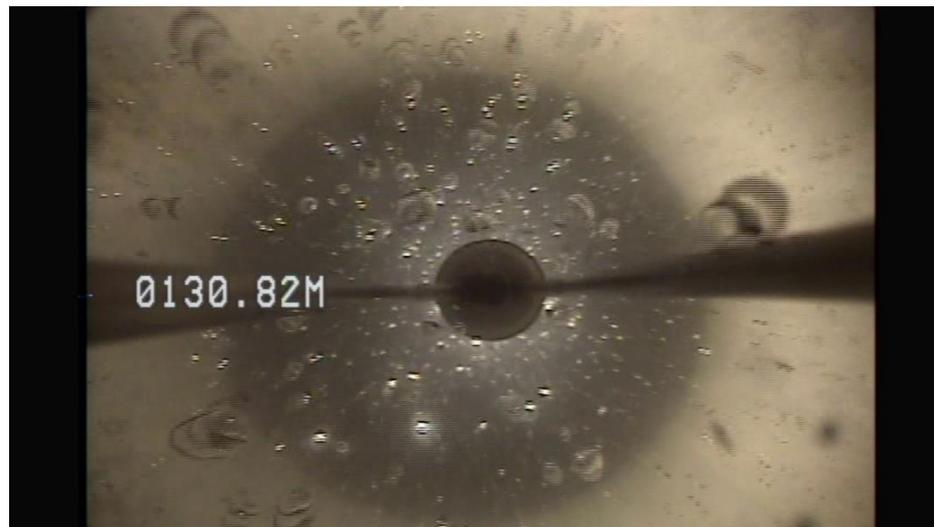
DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

El valor de cloruro de la muestra de la profundidad de 100 m es de 420 mg/l y el de la profundidad de 150 m es de 388 mg/l. Ambos rebasan el límite máximo permisible de 250 mg/l.

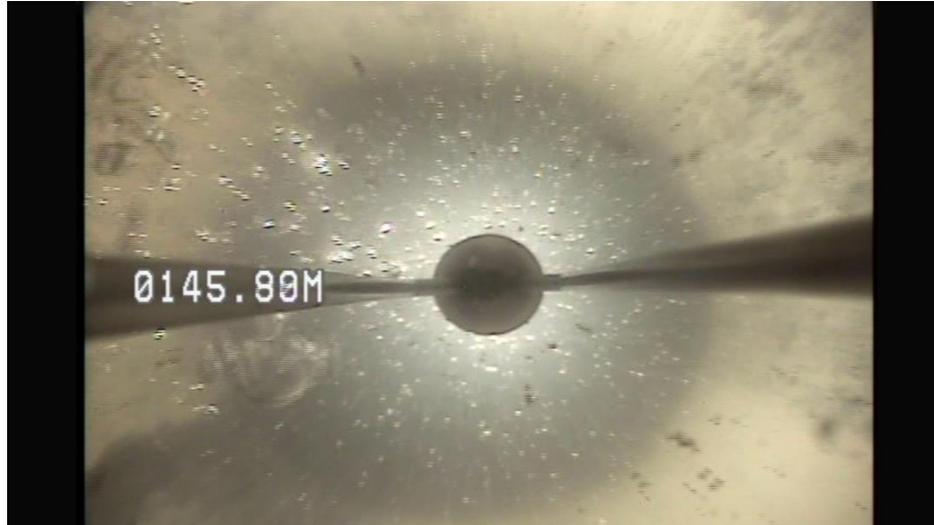
El valor de cloruro de la muestra de la profundidad de 220 m es de 236 mg/l y el de la profundidad de 245 m es de 228 mg/l. Ambos cumplen el límite máximo permisible de 250 mg/l.

Se observa un comportamiento similar con el nitrógeno amoniacal. Las mayores concentraciones se observan en los estratos superiores, disminuyen en los estratos inferiores.

Video del pozo



DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL



En el video se observa una gran cantidad de gases hasta aproximadamente una profundidad de 148 m. Después de esta profundidad ya no se observa la entrada de dichos gases. Cabe aclarar que la profundidad del ademe liso es de aproximadamente 300 m, por lo cual no se debería presentar entrada de gases hasta esta profundidad. Esto indica que el ademe liso se encuentra dañado, permitiendo la entrada de agua de mala calidad del acuífero, la cual contiene gran cantidad de sodio, cloruro, gases, etc.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Conclusión

Los datos existentes, el video del pozo y el perfil de calidad del agua del pozo, indican que el ademe está dañado hasta una profundidad aproximada de 150 m, permitiendo la entrada de agua de mala calidad del acuífero la cual contiene gran cantidad de sodio, cloruro, gases, etc.

1.4.2 Perfil del pozo 10

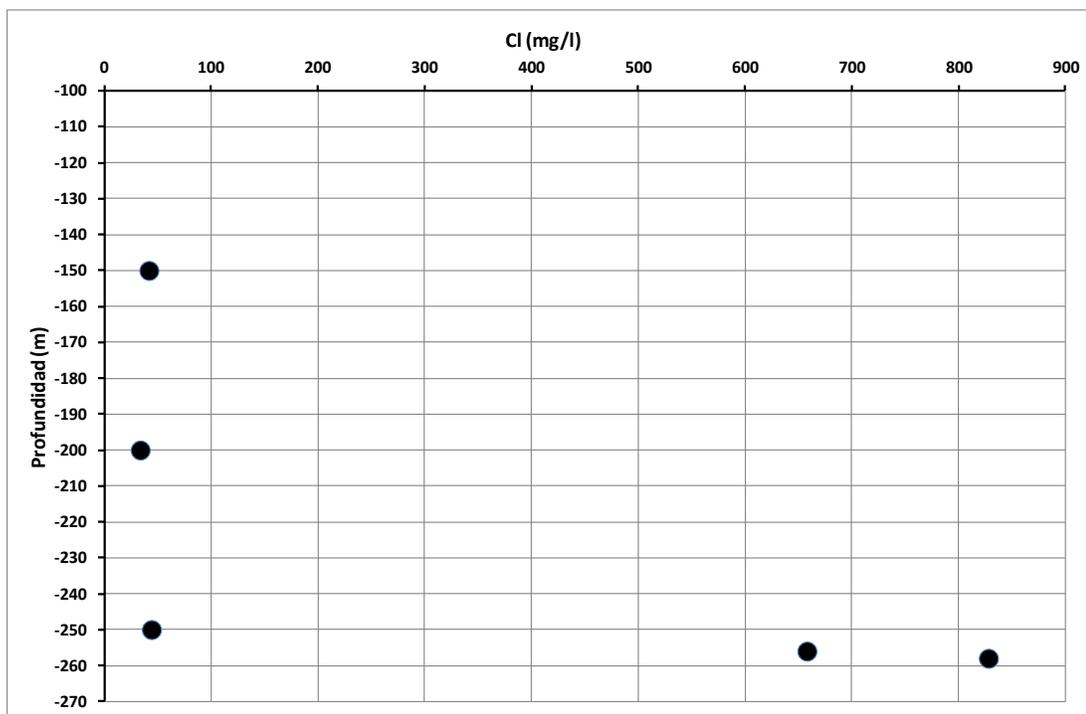


Figura 1.4.4 Perfil de cloruro

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

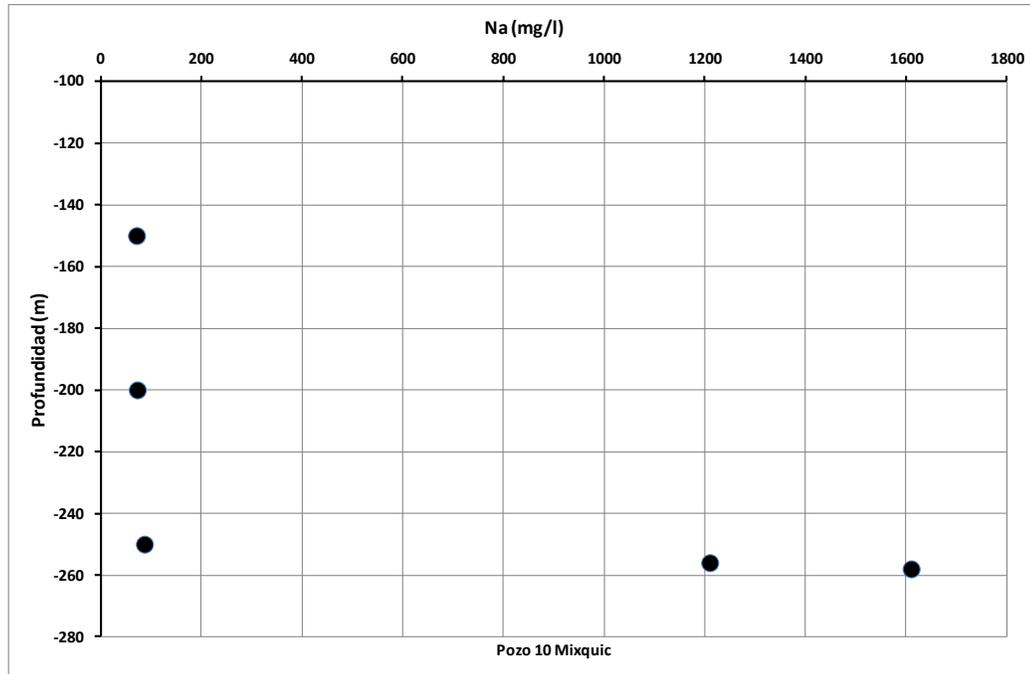


Figura 1.4.5 Perfil de Na

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

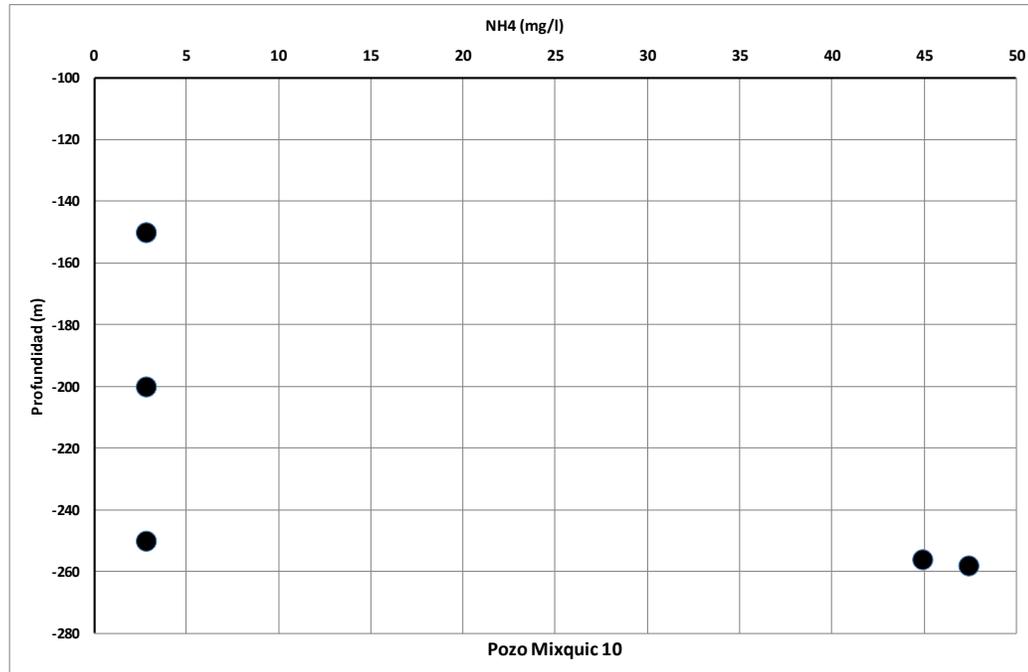


Figura 1.4.6 Perfil de NH4

Los valores de cloruro de las muestras de las profundidades de 150m, 200m, y 250m, son inferiores al límite máximo permisible de 250 mg/l. El valor de cloruro de la muestra de la profundidad de 256m es de 658 mg/l, y el de la profundidad de 258m es de 828 mg/l, ambos por arriba del Límite Máximo Permisible.

Los valores de sodio de las muestras de las profundidades de 150m, 200m, y 250m, son inferiores al límite máximo permisible de 200 mg/l. El valor de sodio de la muestra de la profundidad de 256m es de 1210 mg/l, y el de la profundidad de 258m es de 1610 mg/l, ambos por arriba del Límite Máximo Permisible.

El valor de nitrógeno amoniacal de la muestra de la profundidad de 256m es de 44.9 mg/l y el valor de la profundidad de 258m es de 47.4 mg/l, lo cual excede ampliamente el Límite Máximo Permisible de 0.5g/L.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Los diferentes parámetros geoquímicos indican entrada de agua del acuitardo a la profundidad de 256m.

1.4.3 Perfil del pozo 5

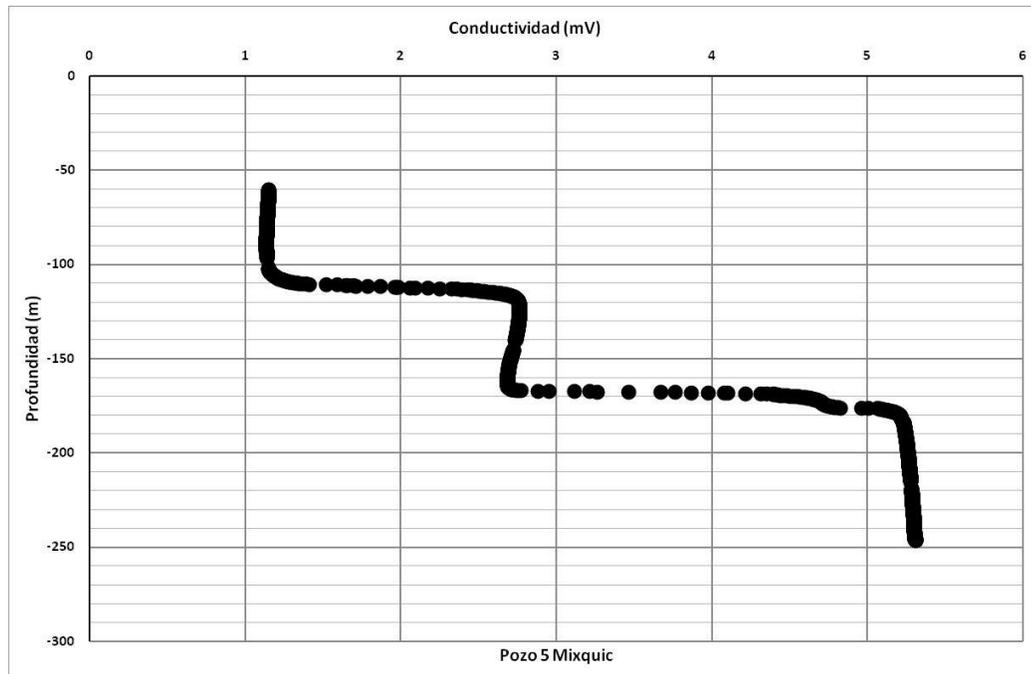


Figura 1.4.7 Perfil de conductividad

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

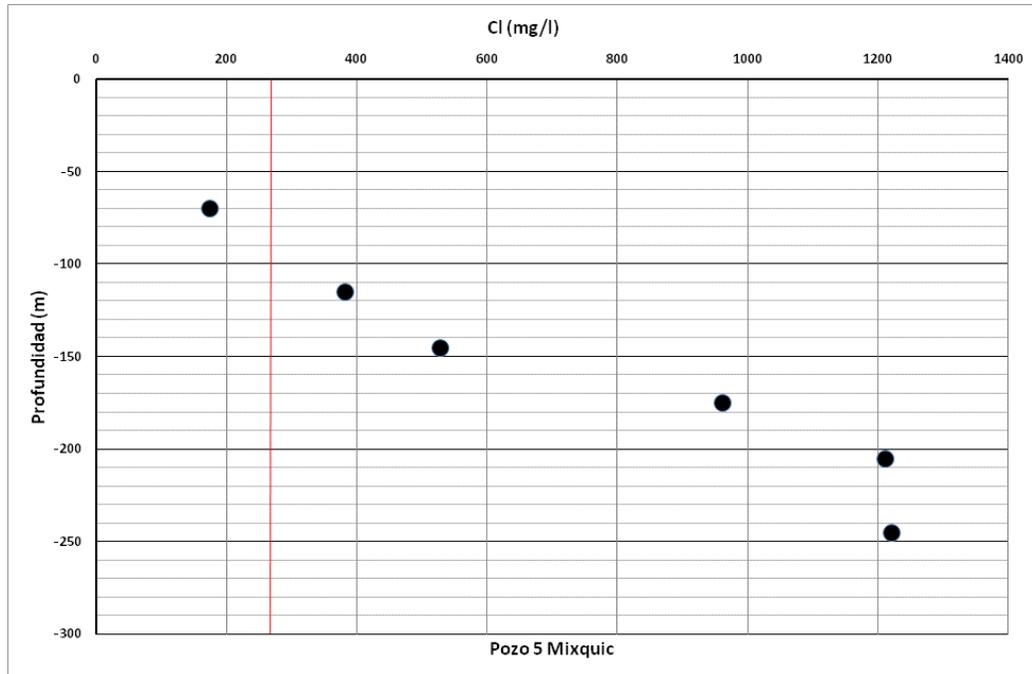
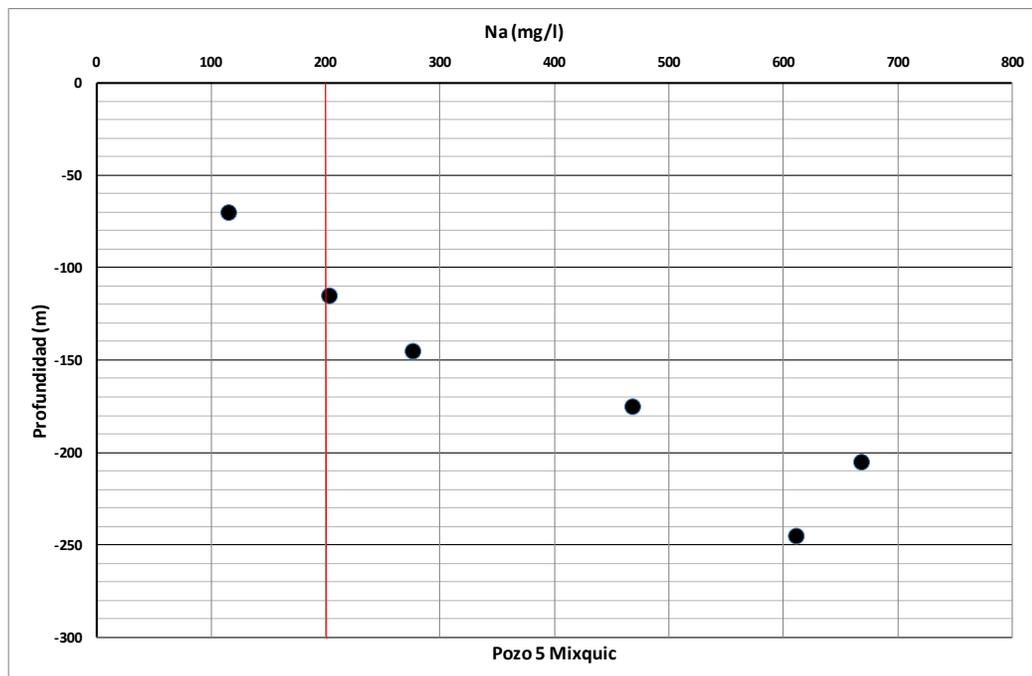


Figura 1.4.8 Perfil de cloruro



DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Figura 1.4.9 Perfil de sodio

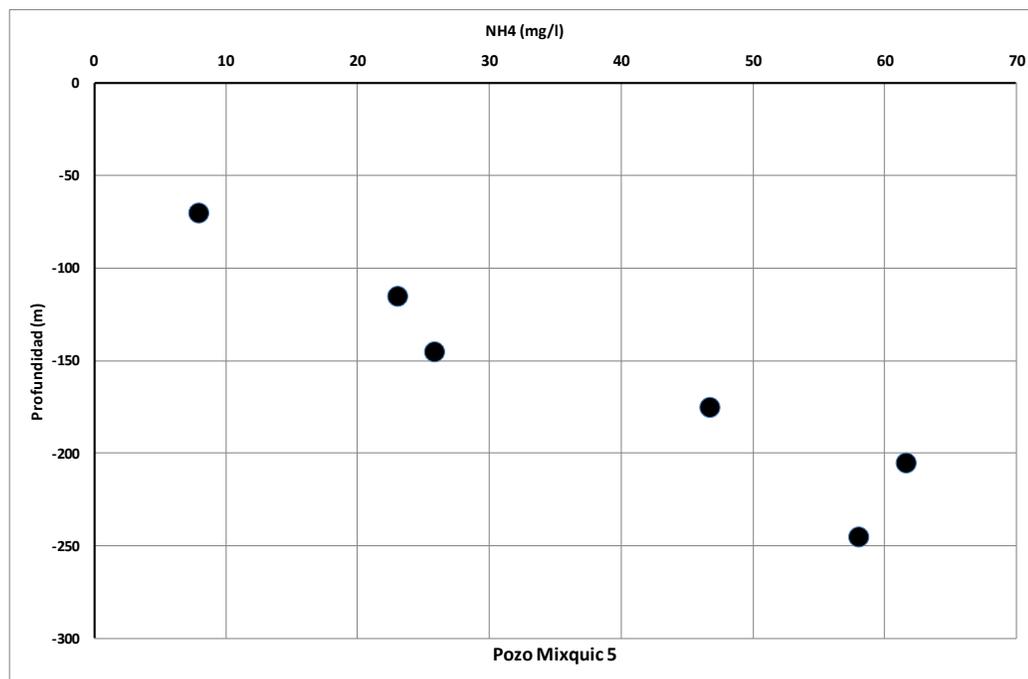


Figura 1.4.10 Perfil de NH4

En el perfil de conductividad se identifican tres zonas bien definidas; la primera entre 70m y 100m, con una conductividad de alrededor de 1 mV. Representa una mezcla entre el agua del pozo y el agua que ingresa del acueducto al apagar el pozo. La segunda entre 120m y 170m, con una conductividad de alrededor de 3 mV. Entre 160m y 180m se presenta un incremento muy grande de conductividad, lo cual indica que en esta sección posiblemente existe un ingreso del agua del acuitardo. La tercera zona entre 180m y 250m, con una conductividad muy alta de más de 5 mV.

El valor de cloruro de la profundidad de 70m es de 174 mg/l, inferior al límite máximo permisible de 250 mg/l. Representa una mezcla entre el agua del pozo y el agua que ingresa del acueducto al apagar el pozo. El valor de la muestra de la profundidad de 145m es de 528 mg/l, arriba del Límite Máximo Permisible. El valor de la muestra de la profundidad de 205m es de 1210 mg/l, arriba del Límite

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Máximo Permissible. Se observa un incremento muy grande de cloruro entre la profundidad de 145m y 205m, lo cual indicaría un ingreso de agua del acuitardo.

Los valores de sodio y nitrógeno amoniacal presentan un comportamiento similar a los valores del cloruro.

1.4.4 Perfiles del pozo 8 y pozo 9

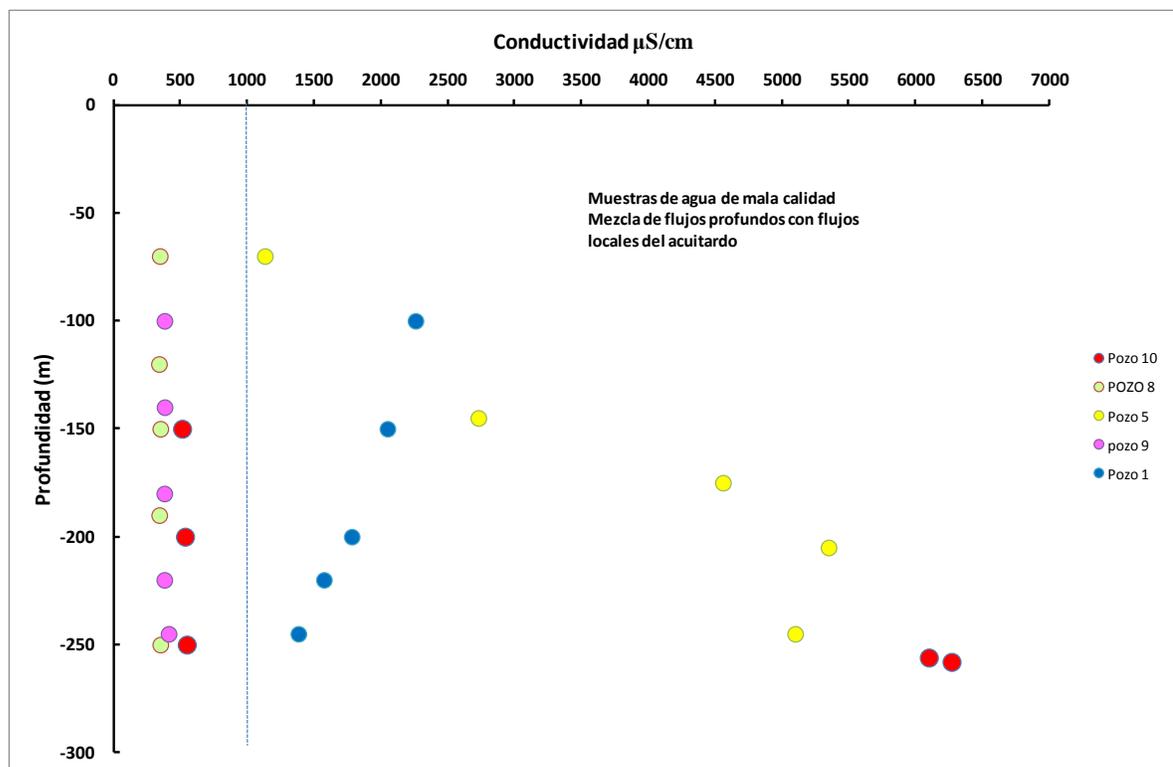


Figura 1.4.41 Perfil de conductividad

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

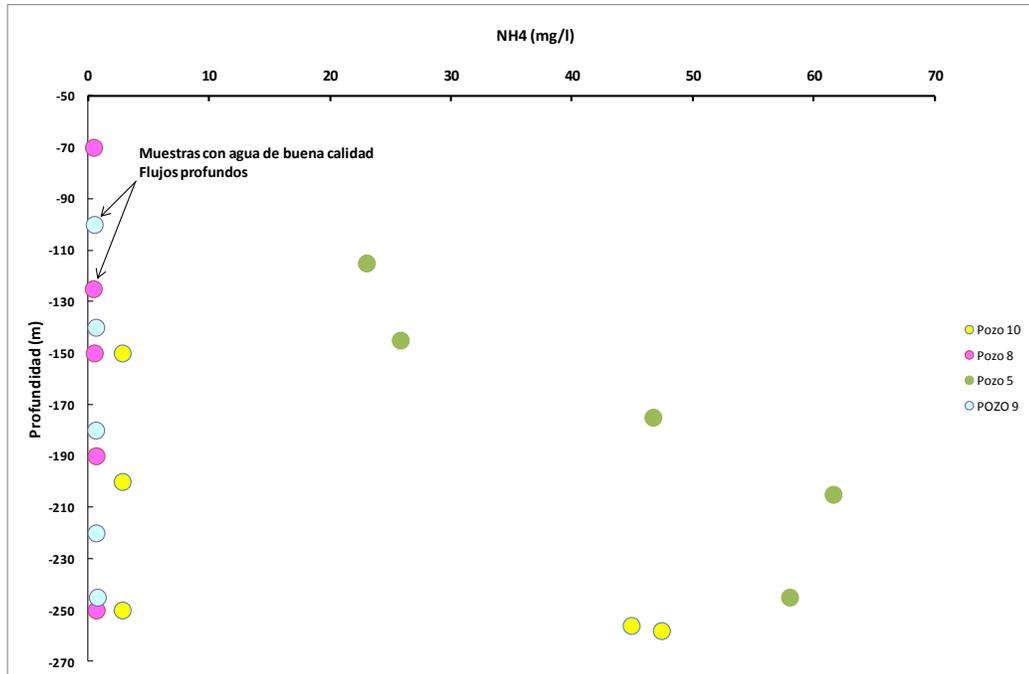


Figura 1.4.12 Perfil de NH4

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

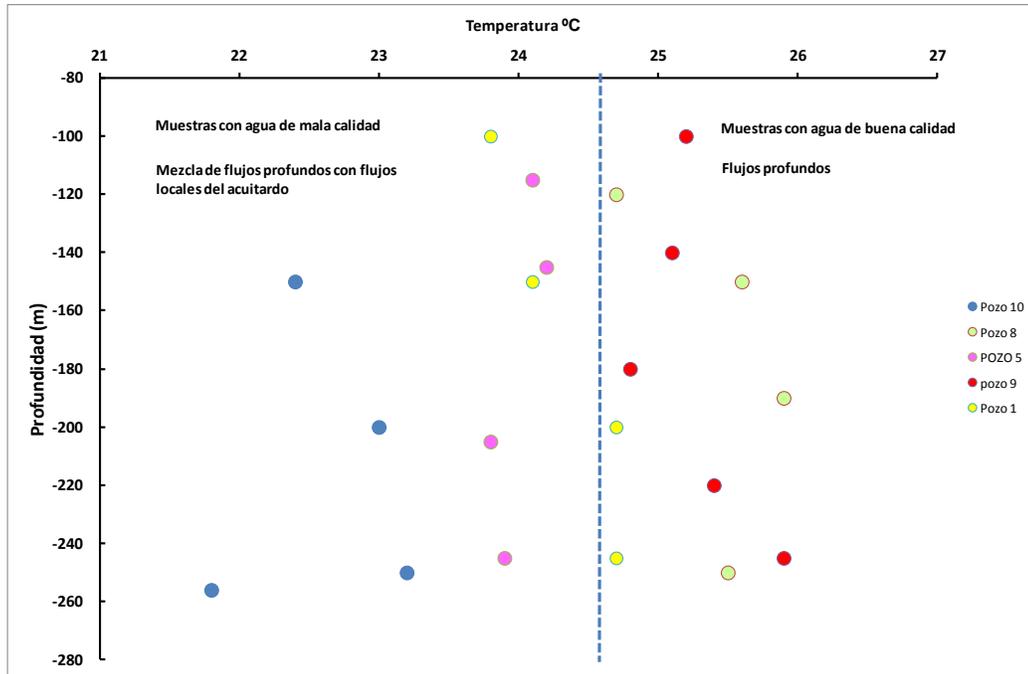


Figura 1.4.13 Perfil de temperatura

Perfil de conductividad

Todas las muestras en la vertical de los pozos 8 y 9 tienen valores de conductividad inferiores al límite máximo permisible que estable la NOM127 modificada ($1563 \mu\text{s}/\text{cm}$). Dichos valores son constantes a las diferentes profundidades que se tomaron las muestras, lo que indica que no hay entrada de agua del acuitardo a estos pozos.

Perfil de NH₄

Todas las muestras en la vertical de los pozos 8 y 9 tienen valores de nitrógeno amoniacal del orden del límite máximo permisible que estable la NOM127 modificada ($0.5 \text{ mg}/\text{l}$). Dichos valores son constantes a las diferentes profundidades que se tomaron las muestras, lo que indica que no hay entrada de agua del acuitardo a estos pozos.

Perfil de temperatura

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Las muestras con agua de buena calidad son las que presentan mayor temperatura. Las muestras con agua de mala calidad son las que presentan menor temperatura. Huizar-Alvarez et al. (2004) encontraron que el acuífero del Valle de México presenta un flujo local, un flujo intermedio y un flujo profundo. El flujo profundo circula a través de material volcánico y presenta la mayor temperatura, y el flujo intermedio circula a través de material granular y sedimentos del acuitardo y tiene una menor temperatura que el flujo profundo. Con base en la temperatura podemos suponer que: A) La recarga del pozo 8 y 9 se origina en la sierra del Chichinautzin y circula por el material volcánico que la conforma hasta descargar en dichos pozos, B) La recarga de los pozos 1, 5 y 10, se origina en la sierra del Chichinautzin y se mezcla con agua del acuitardo.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

2 Diseño de pozos que favorezcan extraer agua de mejor calidad en los Ramales Tláhuac (Netzahualcóyotl) y Mixquic-Santa Catarina.

2.1 Sondeos geofísicos en 19 pozos del ramal Tláhuac (Netzahualcóyotl), 11 en la Laguna San Gregorio y 20 en el ramal Mixquic-Santa Catarina y perfiles de estratos geológicos que contienen agua de buena calidad en cumplimiento con la modificación del año 2000 a la NOM-127-SSA1-1994.

2.1.1 Sondeos geofísicos en el ramal Tláhuac y Laguna San Gregorio

En la figura 2.1 se muestra la localización de los 19 sondeos geofísicos del ramal Tláhuac y 11 en la Laguna San Gregorio, y en la tabla 2.1 sus coordenadas.

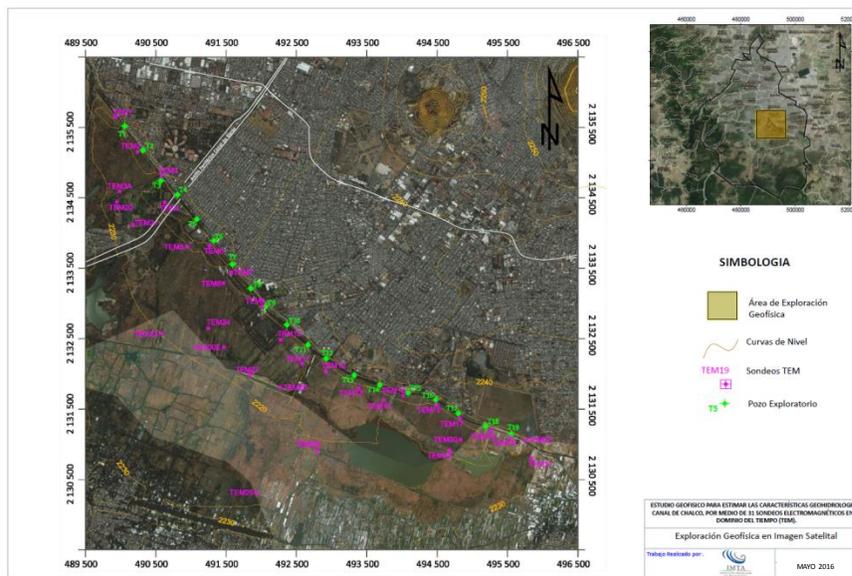


Figura 2.1. Ubicación de los sondeos en el ramal Tláhuac y Laguna San Gregorio

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Tabla 2.1. Localización de los sondeos en el ramal Tláhuac y Laguna San Gregorio

SONDEO	UTM		GEOGRAFICAS	
	X	Y	LONGITUD	LATITUD
TEM1	489925	2135645	-99- 5' 45.2624	19- 18' 52.7039
TEM2	490237	2135156	-99- 5' 34.5614	19- 18' 36.8001
TEM3A	489985	2134592	-99- 5' 43.1864	19- 18' 18.4462
TEM4	490623	2134436	-99- 5' 21.3212	19- 18' 13.3818
TEM5	490947	2133810	-99- 5' 10.208	19- 17' 53.0205
TEM6	491272.093	2133821.828	-99- 4' 59.0687	19- 17' 53.4105
TEM7	491570.203	2133438.566	-99- 4' 48.8476	19- 17' 40.9458
TEM8	491466	2133289	-99° 4' 52.4158	19° 17' 36.0782
TEM9	492019.453	2132959.024	-99- 4' 33.4469	19- 17' 25.3507
TEM10	492274.092	2132481.808	-99- 4' 24.7149	19- 17' 9.8282
TEM11	492574.556	2132138.726	-99- 4' 14.4153	19- 16' 58.6702
TEM12	492917.57	2132034.383	-99- 4' 2.6613	19- 16' 55.2799
TEM13	493384.082	2131799.871	-99- 3' 46.6746	19- 16' 47.6558
TEM14	493739.053	2131626.875	-99- 3' 34.5105	19- 16' 42.0315
TEM15	494018.086	2131692.353	-99- 3'	19- 16'

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

			24.9511	44.1649
TEM16	494496.878	2131562.893	-99- 3' 8.5455	19- 16' 39.9579
TEM17	494832.513	2131371.007	-99- 2' 57.0443	19- 16' 33.7181
TEM18	495261.571	2131190.855	-99- 2' 42.3427	19- 16' 27.8607
TEM19	495537.276	2131096.352	-99- 2' 32.896	19- 16' 24.7883
TEM20	489944	2134445	-99- 5' 44.5886	19- 18' 13.6629
TEM21	490172	2134116	-99- 5' 36.7696	19- 18' 2.963
SL300E	491474	2132377	-99- 4' 52.127	19- 17' 6.4067
TEM23	490582	2132572	-99- 5' 22.6931	19- 17' 12.7367
TEM24	491249.13	2132649.774	-99- 4' 59.8362	19- 17' 15.2778
TEM25	491937	2130310	-99- 4' 36.2319	19- 15' 59.1644
TEM26	492263	2131806	-99- 4' 25.0852	19- 16' 47.8409
TEM27	491841.924	2131984.631	-99- 4' 39.5148	19- 16' 53.6466
TEM28	492792	2130908	-99- 4' 6.9484	19- 16' 18.6318
TEM29	494677	2130919	-99- 3' 2.3678	19- 16' 19.0107
TEM30	494828	2131065	-99- 2' 57.1959	19- 16' 23.7622

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

2.1.1.1 Metodología

Para el levantamiento geofísico se utilizó la técnica del Transitorio Electromagnético (TEM), que consistió en utilizar una espira o bobina formada de un cuadro de cable del # 10 con dimensiones de 150*150 m (área de la bobina 22,500 m²), con el arreglo denominado "Loop coincidente", con una resistencia de 4 Ohm en el circuito. Con estas características del arreglo se logró una intensidad de corriente del orden de los 5 amperes, necesarios para cumplir con los 400 m de investigación propuestos (Figura 2.2).

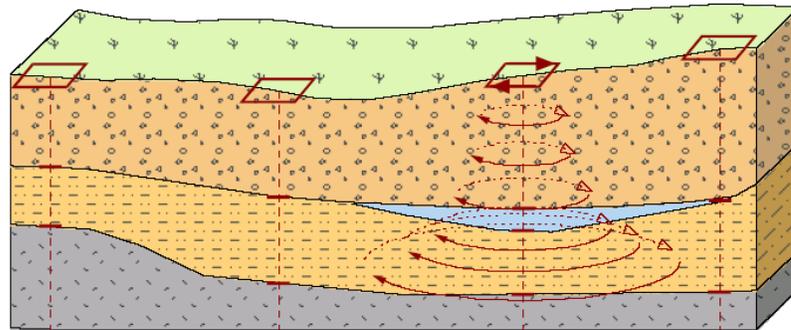


Figura 2.2 Arreglo de Loop coincidente

Con este arreglo se realizaron una serie de pruebas que consistieron en variar parámetros tales como:

- ✓ Pruebas de la resistencia del circuito de transmisión y recepción.
- ✓ Análisis de la intensidad de corriente circulante.
- ✓ Análisis de ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias.
- ✓ Análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación).
- ✓ Análisis de la repetibilidad de la respuesta medida por el equipo.
- ✓ Apilamiento de la señal con promedios de 256, 512, 1024 y 2048 muestras.

El tiempo de medición se fijó entre 35 y 40 ventanas, con la serie de tiempo denominada "Early Times" del equipo "Sirotem". Las mediciones se realizaron con ganancias de 1, 2, 4, 8, 16, 32 y 64, aumentando el número de lecturas en sitios donde el ruido geológico era mayor, esto con el fin de aumentar la calidad en la

estadística de los datos.

El proceso de los datos de campo se inicia mediante el análisis estadístico del compendio de registros obtenidos para cada sitio de TEM, con estos a su vez se define una curva de decaimiento de voltaje la cual es transformada a las tradicionales curvas de resistividad aparente, las cuales son comúnmente reconocidas en el medio geohidrológico. Posteriormente esta curva de resistividad aparente es procesada, obteniendo para cada sitio un modelo unidimensional; en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones. Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es aplicar un algoritmo mediante una regresión tipo Occam con lo cual se logra obtener un modelo multicapas (19 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección.

A continuación se resumen los pasos seguidos en el procesado de los registros de campo:

- ✓ Transferencia de los registros del equipo TERRATEM a la computadora.
- ✓ Edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de nV/AMP contra tiempo (curva de decaimiento).
- ✓ Conversión de la curva de decaimiento a Resistividad Aparente contra tiempo
- ✓ Cálculo del modelo estratificado
- ✓ Cálculo del modelo suavizado (inversión Occam)
- ✓ Impresión gráfica del modelo unidimensional
- ✓ Transferencia de las curvas y los modelos generados al paquete WINGLINK
- ✓ En Winglink, formación de la base de datos
- ✓ Elaboración de plantas y secciones de isorresistividad e impresión de resultados gráficos.

En el proceso de los datos se siguieron los estándares que se aplican para este fin, utilizando software y equipos de patente, las cuales se citan a continuación

- Equipo TERRATEM con número de serie 1503

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

- Programa TEMIXS para el proceso primario de los datos
- Programa WINGLINK para utilizarlo como base de datos y formar secciones y mapas de resistividad.

2.1.1.2 Resultados

La distribución de las resistividades obtenidas se agrupa en la Tabla 2.2. Para la zona de estudio, se definieron 3 Unidades Geoeléctricas o intervalos con algunas subdivisiones, que se describen en la siguiente tabla y se analizan más adelante.

Tabla 2.2 Zonificación georresistiva

UNIDAD GEOELÉCTRICA		INTERVALO RESISTIVO [OHM-M]	INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA
U1		1 - 35	Suelo residual y/o limos-arcillosos
U2		1 - 10	Tobas arcillo-arenosas alteradas con posible saturación
U3	U3a	10 - 30	Brechas basálticas alteradas con intercalación de lentes arcillosos, mediana permeabilidad
	U3b	30 - 100	Roca fracturada con mediana permeabilidad

Unidad U1

La unidad U1 se asocia a posibles intercalaciones de suelo residual con depósitos sedimentarios aluviales y lacustres ya que se observan intercalaciones marcadas de horizontes conductores con valores de resistividad entre 3 y 5 [Ohm-m] con valores entre 10 y 15 [Ohm-m] bastante diferenciados y en morfologías tabulares, esta unidad presenta un espesor promedio de 30 m a 40 m.

Unidad U2

La unidad U2, se asocia a materiales arcillosos correspondientes a los depósitos lacustres del Gran Lago, por correlación con el Pozo San Lorenzo Tezonco, los valores de resistividad de la unidad se encuentran entre 1 y 10 [Ohm-m], valores que indican la presencia de materiales altamente porosos pero posiblemente poco permeables que correlacionando con la estratigrafía local posiblemente compongan un acuitardo de espesores que varían entre 40 y 100 m.

Unidad U3

La unidad U3, se ha dividido en dos subunidades con base en los contrastes resistivos presentes en el perfil. La unidad **U3a**, presenta un espesor que varía entre 40 y 80 m con valores de resistividad que se encuentran en el intervalo de 10 a 30 [Ohm-m] y se asocia a materiales basálticos brechados con presencia de saturación, con una morfología tortuosa y variable en íntima relación con la unidad U3b.

La unidad **U3b**, se asocia a materiales volcánicos extrusivos cuya morfología es accidentada y tortuosa, se encuentra a profundidades variables entre 80 y 300 m, mostrándose más cercana a superficie en la porción Nor-Occidental. Presenta valores de resistividad entre 30 y 100 [Ohm-m], lo que se asocia a materiales posiblemente fracturados.

Perfiles de Resistividad

Para mostrar el comportamiento de los materiales en el subsuelo en el sentido vertical, se construyeron 5 perfiles geoelectricos que incluye 30 TEM's levantados en este proyecto, se muestra su distribución en la Figura 2.3.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

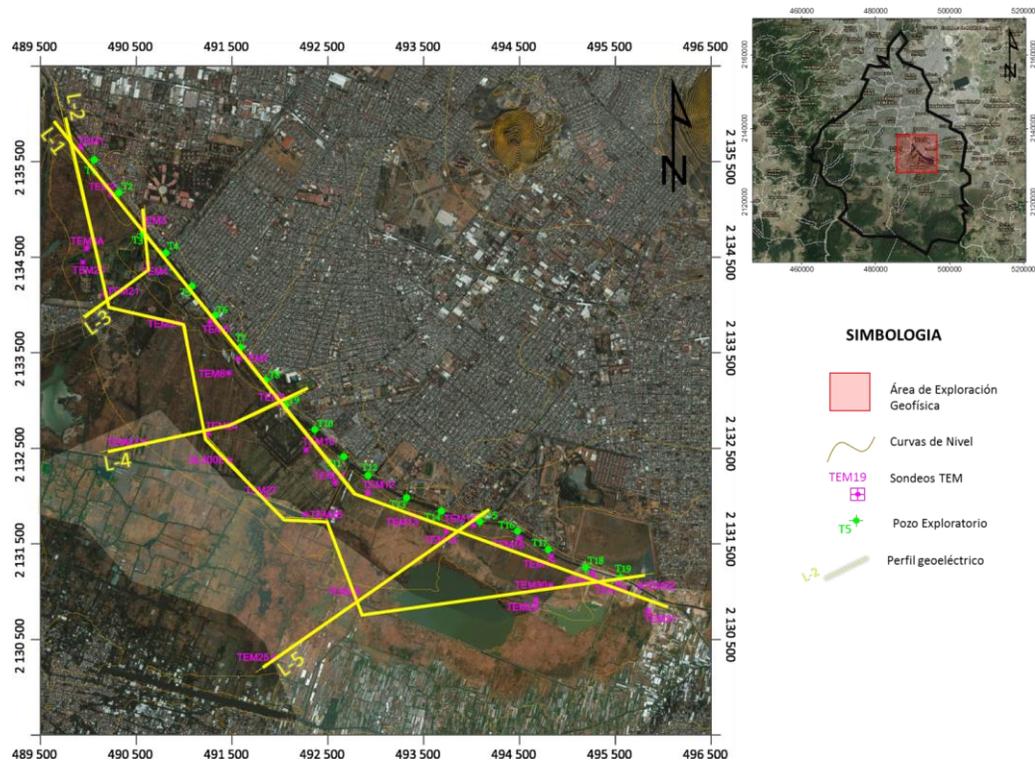


Figura 2.3 Perfiles Geoelectricos

Perfil Geoelectrico L-1 (Figura 2.4)

Este perfil se encuentra compuesto por 20 sondeos TEM, con una separación de aproximadamente 500 m promedio entre si y una longitud de 8.5 Km, su orientación general es NW-SE. Geológicamente, los sondeos se encuentran emplazados en materiales areno-arcillosos poco consolidados del cuaternario.

En términos generales se identifican 4 contrastes de resistividad. No se presentan elementos topográficos elevados. Superficialmente, se detecta la unidad U1, que ha sido definida con base en la secuencia estratigráfica y los afloramientos en el mapa geológico superficial con posibles intercalaciones o interdigitaciones de depósitos arcillosos y arenosos, los valores de resistividad son bajos, que van de 1 a los 30 [Ohm-m], se encuentran diferenciados materiales con resistividades menores a 10 [Ohm-m] y entre 10 y 30 [Ohm-m] en cuerpos tabulares bien definidos. Esta unidad se presenta con continuidad lateral, mostrando los valores

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

menores a los 10 [Ohm-m] entre los sondeos TEM9 y TEM14, que geológicamente podrían asociarse con estratos o laminaciones compuestas por arcillas lacustres.

La unidad subyacente es la U2 presenta resistividades entre 1 y 10 [Ohm-m], se ha caracterizado a partir de los 30 hasta los 100 [m] de profundidad, su espesor en este perfil es superior a los 25 [m] y se asocia a materiales arcillo-arenosos de origen lacustre, vinculados con la zona de lago, con posible presencia de saturación. Esta unidad presenta continuidad lateral en todo el perfil.

La Subunidad U3a se presenta con espesor variado, al mostrar incremento del inicio del perfil hacia el final, dicha unidad asociado a brechas basálticas alteradas con intercalación de arcillas, se exhiben valores resistivos entre 10 y 30 [Ohm-m].

Finalmente, como parte basal del perfil y predominando, se ha determinado la mayor presencia de roca fracturada a lo largo de los 6 Km del perfil, unidad correlacionada a la interpretación de los registros eléctricos los cuales delimitan ser zonas con presencia de brecha volcánica asociada a la parte superficial de una posible colada basáltica, los valores resistivos oscilan ser mayores a los 30 [Ohm-m].

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

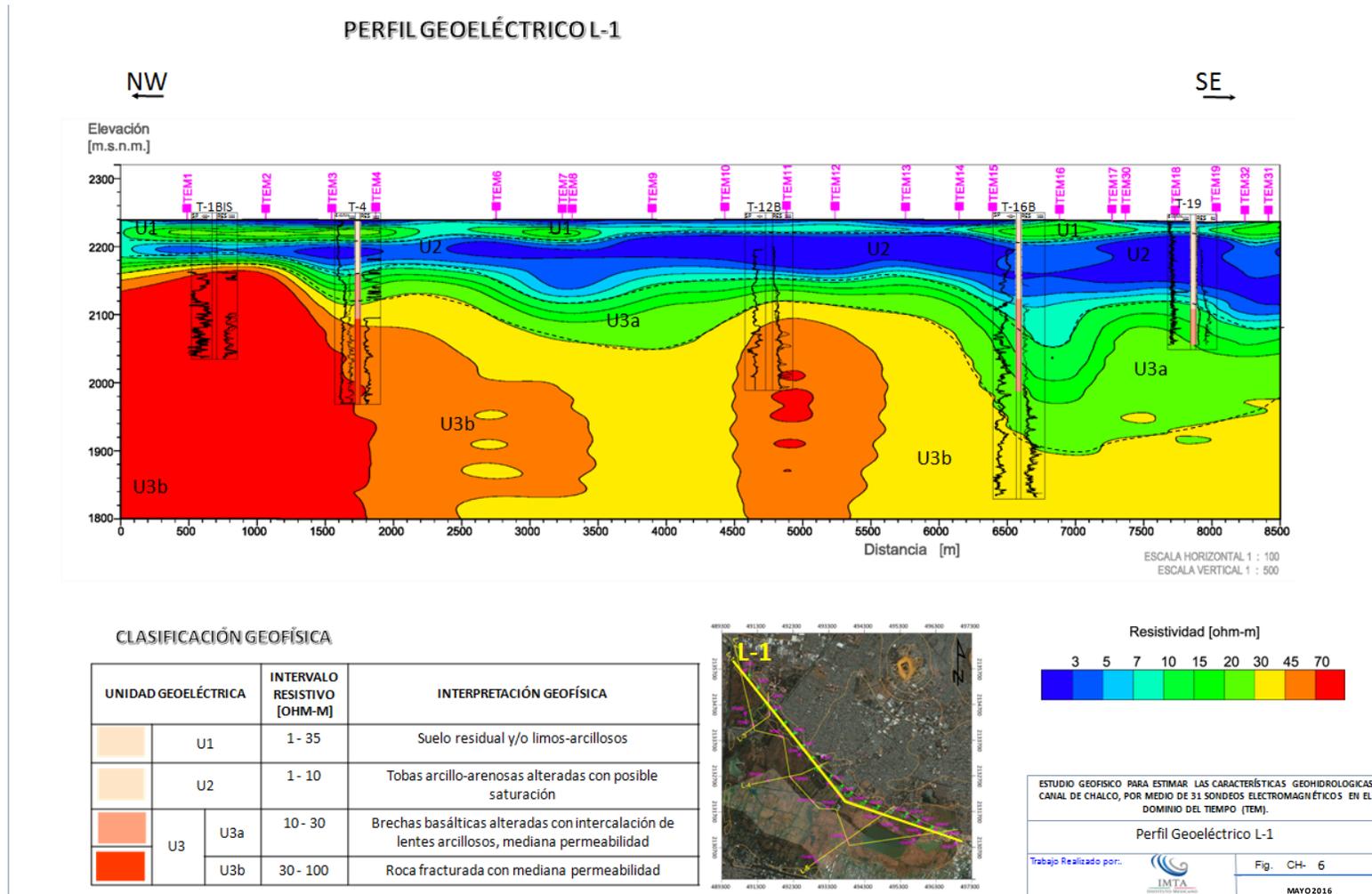


Figura 2.4 Perfil Geoelectrico L-1

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Perfil Geoeléctrico L-2. (Figura 2.5)

Paralelo al perfil anterior, esta línea se encuentra compuesta por 14 sondeos TEM y una longitud de 10.2 Km. Los sondeos de este perfil, se encuentran emplazados en materiales aluviales de relleno en la geología superficial.

Se determina la unidad U2 por debajo de los 35 m englobando valores de resistividad entre 1 y 10 [Ohm-m]. La morfología de esta unidad no presenta uniformidad respecto al espesor, mostrando espesores menores a los 30 m entre los sondeos TEM3A y TEM24 e incrementando hasta llegar a los 110 m por debajo del sondeo TEM32.

El resto del perfil a partir de la profundidad de 70 m, se ve caracterizado por valores de resistividad entre 10 y 100 [Ohm-m], estos valores se asocian a materiales ígneos intrusivos y extrusivos fracturados posiblemente saturados. Esta unidad U3 se encuentra subdividida, presentando valores menores a los 10 [Ohm-m] de la subunidad U3a por debajo de la unidad U2, aflorando los mayores espesores en el sector SE del perfil, debajo del sondeo TEM28 y TEM32.

Los valores de resistividad superiores a 30 [Ohm-m] se encuentran como basamento del perfil, siendo la porción NW la que tiene una presencia mayor de la subunidad U3b del perfil, y que presenta una mayor elevación estructural del TEM3A al TEM28. Esta unidad ha sido asociada con materiales fracturados y posible mediana permeabilidad.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

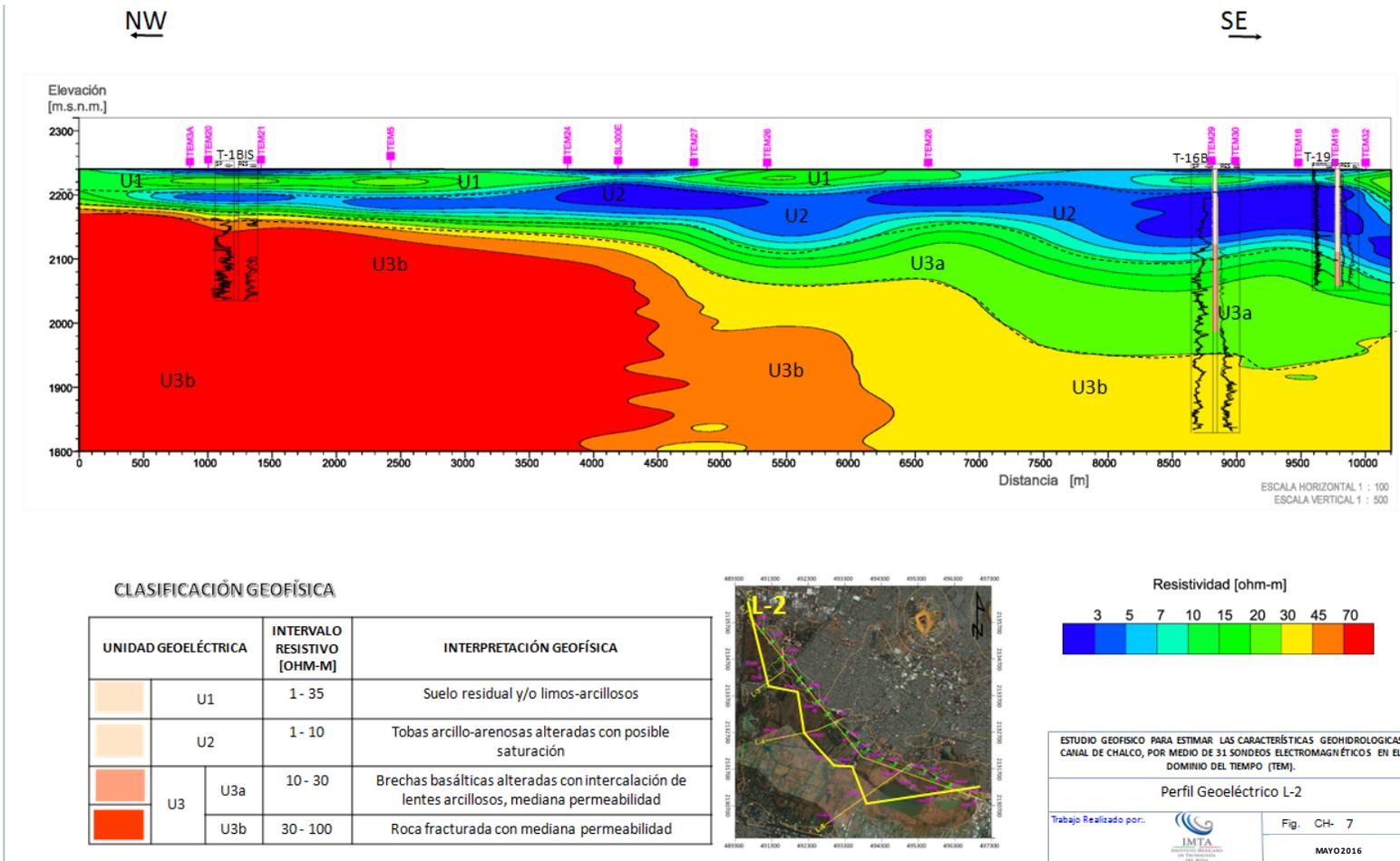


Figura 2.5 Perfil Geoelectrico L-2

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Perfil Geoeléctrico L-3. (Figura 2.6)

Con trayectoria SW-NE y 1.5 km de longitud, compuesto por los sondeos TEM21, TEM4 y TEM3.

La primer capa está formada por valores resistivos menores a los 35 [Ohm-m] asociada a intercalaciones de depósitos arenosos con depósitos lacustres perfectamente diferenciados en cuerpos tabulares resistivos y conductores respectivamente.

Subyace una segunda unidad de valores menores a los 10 [Ohm-m] de espesor aproximado a los 50 m, correlacionada con posibles depósitos lacustres con un espesor de aproximadamente 80 [m] que se acuña paulatinamente hacia el SW.

La tercer unidad se subdivide a partir del amplio rango de valores resistivos entre 10 y los 100 [Ohm-m], de materiales fracturados. Por debajo de los 60 [m] se exhiben valores entre los 10 y 30 [Ohm-m] de la subunidad U3a con un espesor entre 20 y 60 [m]; a partir de la correlación de las unidades geohidrológicas del Pozo No. 4, aproximadamente a los 80 m de profundidad se exhibe una zona de emplazamiento del acuífero, al presentar rocas fracturadas o aparentes brechas con una buena permeabilidad, lo que permite la circulación y almacenamiento del agua subterránea.

En este perfil domina la presencia de resistividades superiores a 45 [Ohm-m] debido a que los sondeos se encuentran emplazados sobre afloramientos del basamento fracturado de la subunidad U3b, predominando debajo del sondeo TEM21. La correlación con el pozo T-4 indica la presencia de roca volcánica fracturada, propiamente basáltica.

Perfil Geoeléctrico L-4 (Figura 2.1.1.6)

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Con una orientación suroeste-noreste y una extensión de 2.2 Km, el perfil geoelectrico L-4 se encuentra compuesto por 3 sondeos TEM que acorde con la geología superficial, se encuentran emplazados sobre materiales aluviales.

Se ha determinado una capa de cobertura, caracterizada por la unidad U1 cuyo espesor no supera los 20 m y engloba resistividades del orden de los 5 a 30 [Ohm-m], encontrándose las resistividades mayores en la porción oriental del perfil asociada a posibles contenidos mayores de arenas.

Debajo de esta unidad, se encuentra la unidad U2 con un espesor de 25 m, con valores de resistividad menores a los 10 [Ohm-m] que son característicos en arcillas asociadas a depósitos lacustres en esta porción del Valle de México.

La unidad U3a alcanza una profundidad máxima de 250 m debajo del sondeo TEM9, entre los sondeos TEM23 y TEM24 se presentan una profundidad de hasta los 120 [m]. La profundización de esta unidad, está asociada con la morfología del cuerpo resistivo representado por la unidad U3b por lo que esta respuesta se asocia a una posible brecha volcánica de flujo, de posible composición basáltica, este material puede estar fragmentado y con presencia de saturación.

El basamento del perfil está conformado por una zona de altos valores resistivos, debajo de los sondeos TEM23 y TEM24. Los valores que engloba esta unidad se encuentran entre los 30 y 100 [Ohm-m] de la subunidad U3b, valores que puede vincularse a materiales volcánicos fracturados.

Perfil Geoelectrico L-5 (Figura 2.6)

De orientación similar a los perfiles L-4 y L-3, alcanzando una longitud de 3 km. Formado por 4 sondeos TEM. Se encuentran emplazados sobre materiales aluviales. El registro de Pozo No. 16B se encuentra entre el sondeo TEM14 y TEM15, alcanzando una profundidad de 450 m con una clasificación litológica en los primeros 250 m.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Se ha diferenciado una capa de cobertura de 40 m en correlación con los demás perfiles y con la correlación litológica del sondeo 16B, se determina que dicha unidad corresponde con suelo residual y/o limos arcillosos. Debajo de esta unidad se encuentra la unidad U2 con un intervalo de resistividades entre 1 y 10 [Ohm-m], se ha asociado a tobas arcillo-arenosas alterada por correlación con la descripción litológica del mismo sondeo, sin embargo es posible que dicho cuerpo corresponda a materiales lacustres por el contexto geológico de la zona de estudio y por la información del pozo San Lorenzo Tezonco.

La unidad U2a presenta posible saturación, alcanzando los 50 m de espesor, debajo del TEM 15, donde también se observa la máxima profundidad, esta unidad se acuña paulatinamente hacia el poniente del perfil.

Debajo de esta unidad se encuentra la unidad U3a, se presenta con espesor promedio de 50 m, se exhibe a partir de los 70 m de profundidad hasta los 230 m. Las resistividades entre 20 y 40 [Ohm-m] predominan el perfil emplazando a valores mayores a los 45 [Ohm-m] por debajo del sondeo TEM25, se asocian a rocas fracturadas y factible permeabilidad.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

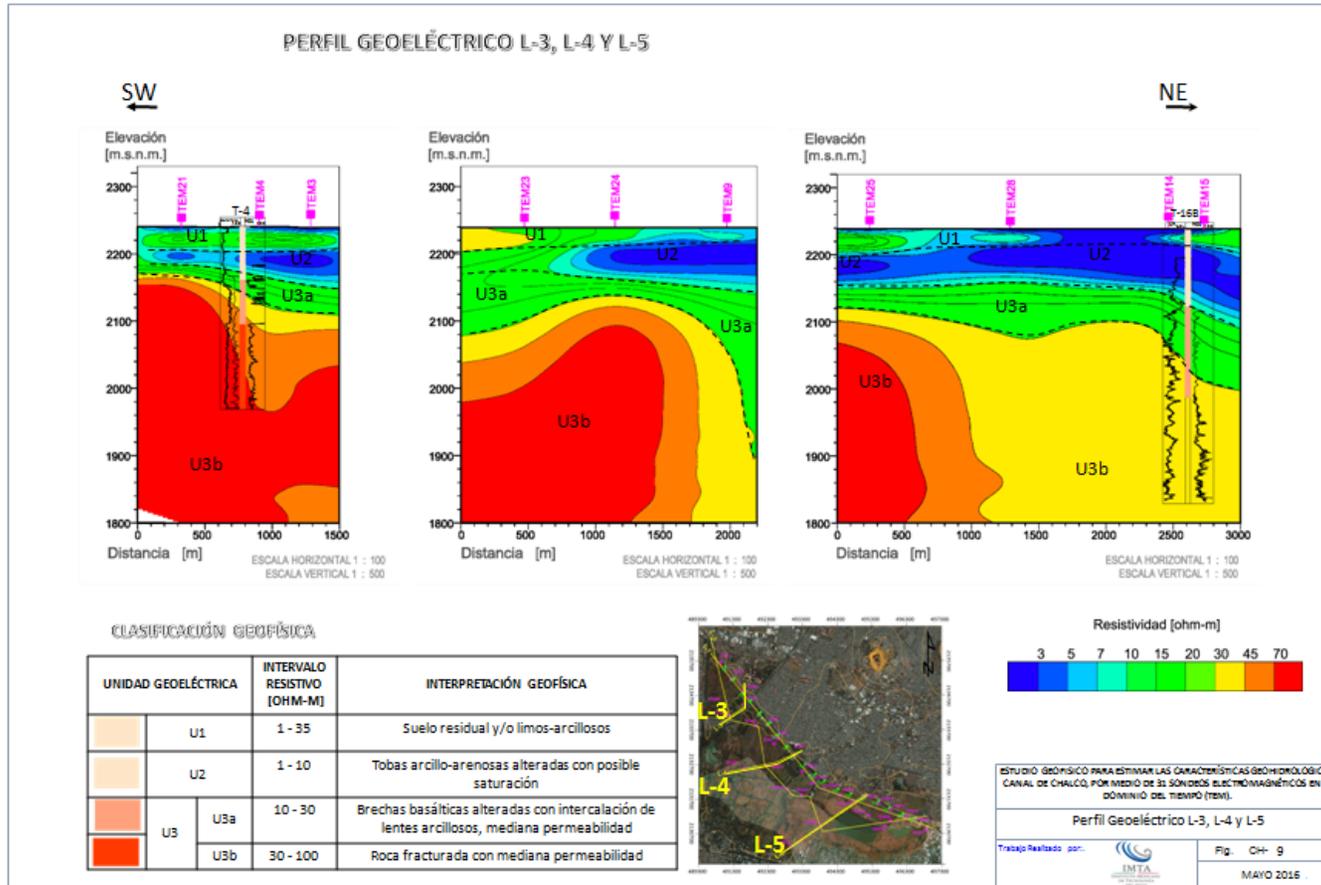


Figura 2.6 Perfil Geoelectrico L-3, L-4, L-5

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Mapas de Resistividad Eléctrica

Mapas de Resistividad para la profundidad de 25 m y 50 m (figura 2.7)

El mapa de resistividad a 25 m de profundidad, muestra un contraste de colores azules en la porción central con colores verdes en las porciones laterales, esto coincide con lo descrito en los perfiles L1 y L2 que en la porción central muestra un dominio en valores conductores en la unidad U1, por lo que se determina que la porción central presenta un mayor contenido de materiales arcillosos y hacia la porción NW el dominio es arenoso.

El mapa de resistividad a 50 m de profundidad, muestra un dominio netamente conductor, con un pequeño contraste lateral aislado en la porción oeste del predio de exploración. Estos valores conductores se asocian a un horizonte arcilloso englobado en la unidad U2 con una pequeña interdigitación arenosa que muestra valores de resistividad más elevados.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

MAPAS DE RESISTIVIDAD

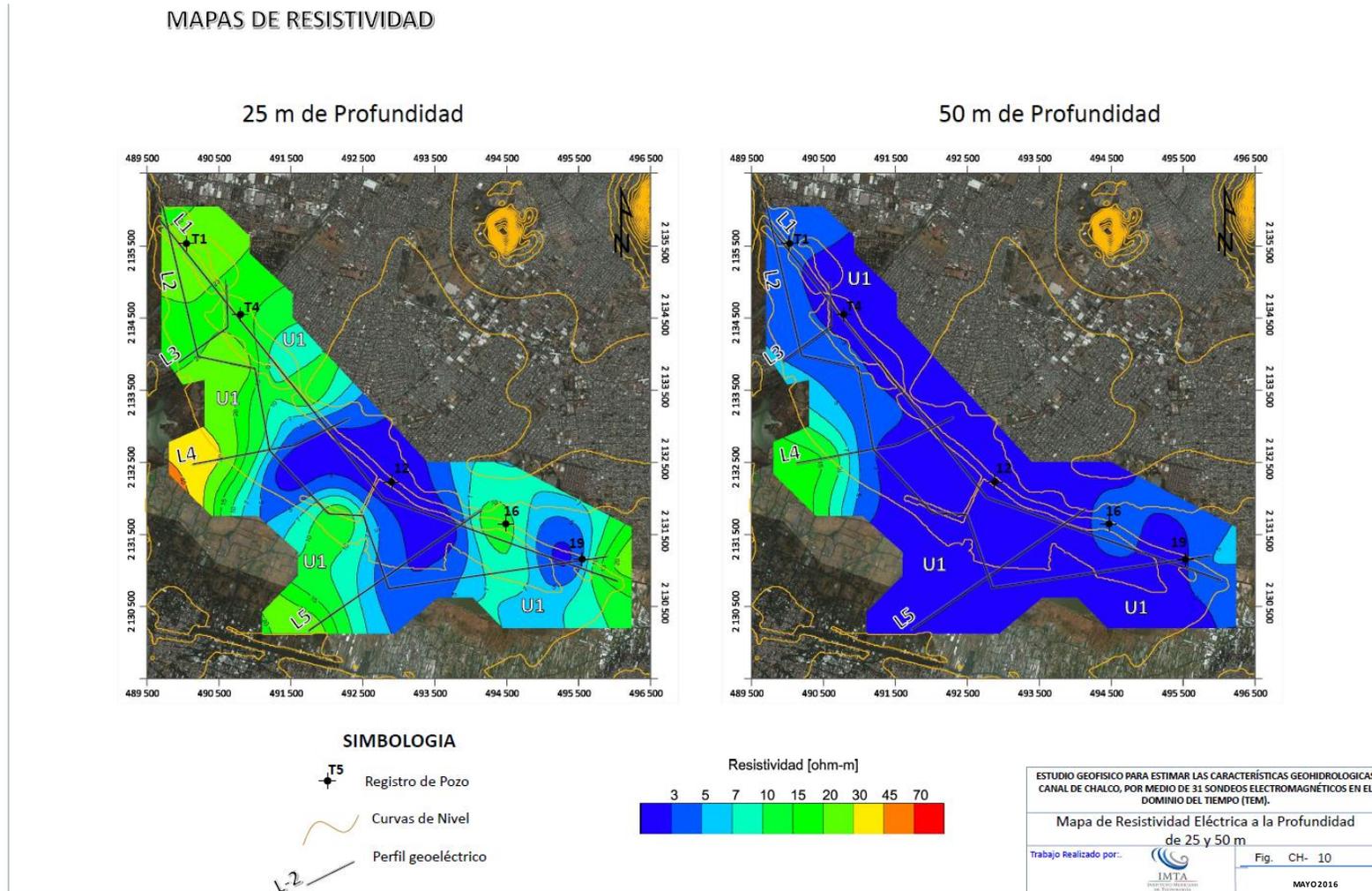


Figura 2.7 Mapa de resistividad eléctrica a la profundidad de 25 m y 50 m

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Mapas de Resistividad para la profundidad de 75, 100, 150 y 200 m (figuras 2.8-2.9)

Debido a la presencia del nivel estático en la zona de estudio que ha sido documentado entre los 70 y 85 m de profundidad, esta serie de mapas pueden representar interés en el comportamiento del acuífero en esta porción.

El mapa a 75 m de profundidad, revela un claro contraste de resistividad entre valores conductores y de mayor resistividad, localizándose los valores conductores de la unidad U2 en la porción suroeste, mientras en la porción noroeste los valores se aprecian con mayor resistividad, asociados a las unidades U3a y U3b. la distribución de los materiales arcillosos y los espesores de estos materiales dominantes en la porción Sureste del predio se asocian a variaciones en la morfología de las capas volcánicas subyacentes asociadas a la unidad U3 que en dicho sector se profundizan radicalmente.

El mapa a 100 m de profundidad indica la presencia de la unidad U3a en la porción central de la zona de exploración, lo que indica un espesor considerable de materiales brechados en dicha porción, presenta dos contactos laterales, hacia el este con valores conductores que se asocian a materiales arcillosos que a esta profundidad se encuentran presentes y que corresponden con la unidad U2, el segundo contacto se presenta al norte con materiales resistivos (entre 40 y 100 [Ohm-m]) asociados a la unidad U3b correspondiente a posibles materiales volcánicos fracturados. El espesor mayor de la unidad U2 en el sureste de la zona de estudio, se asocia a una profundización de la unidad U3 por cuestiones morfológicas o estructurales que favorece un incremento en las condiciones del espesor de los materiales arcillosos.

Los mapas a 150 y 200 m de profundidad, muestran únicamente una interacción lateral entre la unidad U3b y U3a presentándose los valores de menor resistividad hacia la porción sureste de la zona de estudio y los valores más resistivos asociados a materiales volcánicos fracturados englobados en la unidad U3b, al norte de la zona de estudio. Los valores englobados en la unidad U3a, se asocian a una posible zona de alteración o brechamiento de los cuerpos volcánicos y es por ello que mantiene la morfología del elemento resistivo U3b.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

MAPAS DE RESISTIVIDAD

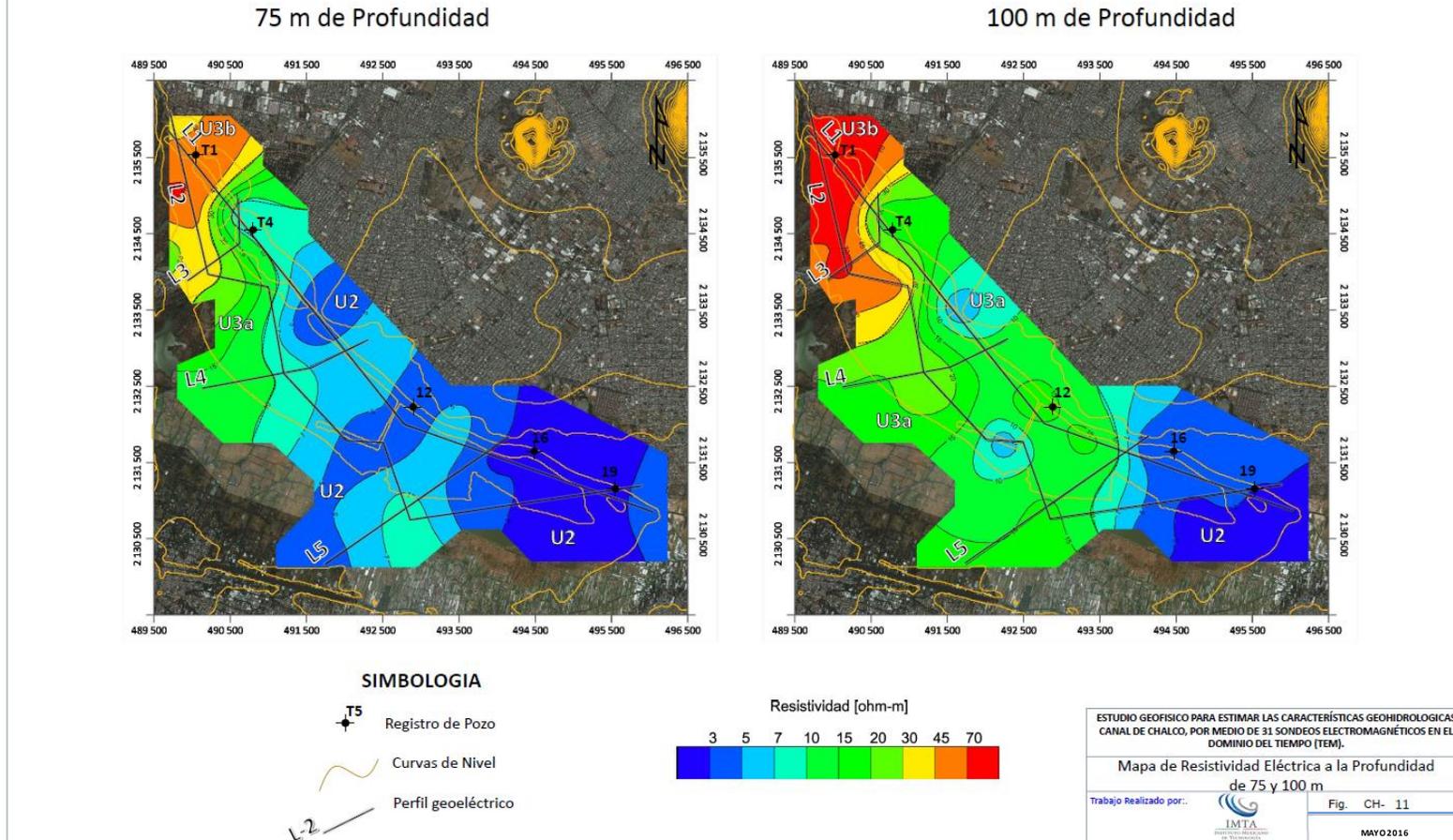


Figura 2.8 Mapa de resistividad eléctrica a la profundidad de 75 m y 100 m

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

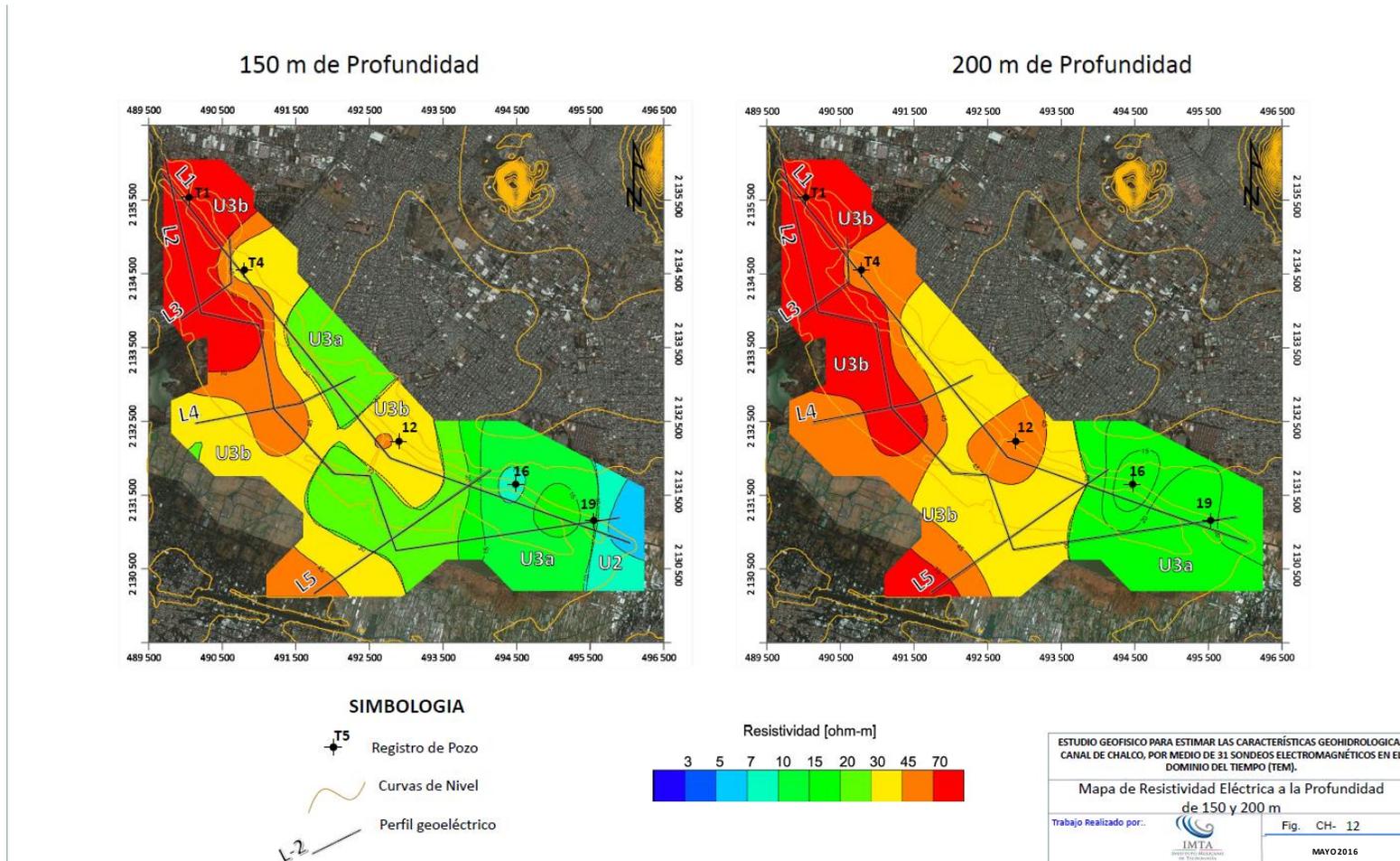


Figura 2.9 Mapa de resistividad eléctrica a la profundidad de 150 m y 200 m

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

Mapas de Resistividad para la profundidad de 250, 300 y 350 m (figura 2.10-2.11).

El mapa a 250 m de profundidad, muestra un contraste entre la unidad U3a y U3b, con un dominio particular de los elementos resistivos que componen a la unidad U3b, lo que indica que la mayor elevación estructural de dicho elemento es mayor al Noroeste del predio, localizándose a menor profundidad, mientras que en la porción suroeste, los valores de resistividad, indican la presencia de la unidad U3a que se asocia a materiales brechados en una aparente subcuenca, la cual se ve desplazada completamente por la unidad U3b entre 300 y 350 m de profundidad, de igual manera, se infiere que la roca volcánica representada por la unidad U3 se encuentra con mayor desarrollo de fracturamiento en la porción sureste de la zona de estudio.

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

MAPAS DE RESISTIVIDAD

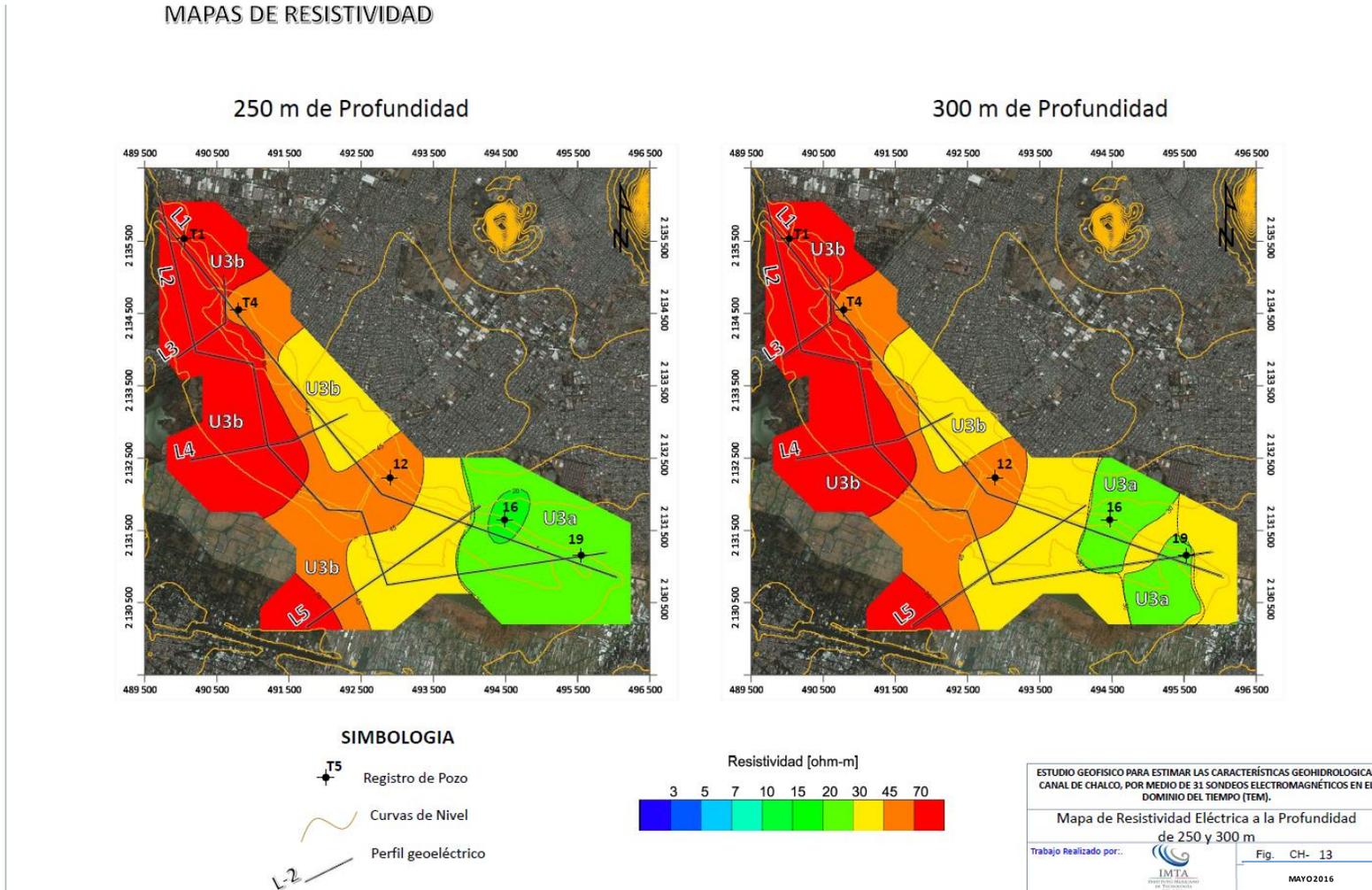


Figura 2.10 Mapa de resistividad eléctrica a la profundidad de 250 m y 300 m

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

MAPAS DE RESISTIVIDAD

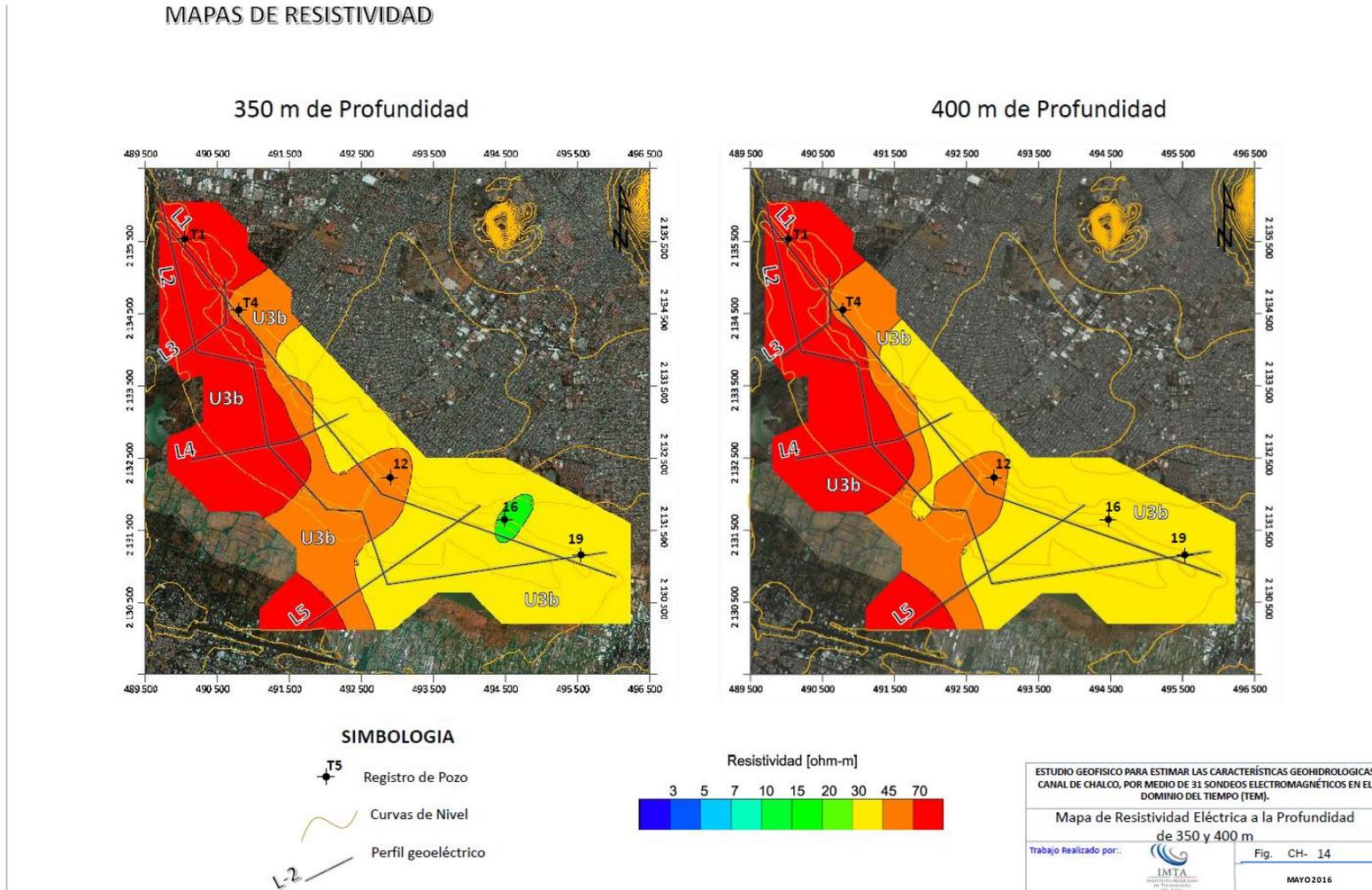


Figura 2.11. Mapa de resistividad eléctrica a la profundidad de 350 m y 400 m

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN EN POZOS DE LOS RAMALES TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) Y MIXQUIC-SANTA CATARINA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN LOS PUNTOS DENOMINADOS: VIVEROS-CUENCA LECHERA Y HOSPITAL PSIQUIÁTRICO, DISTRITO FEDERAL

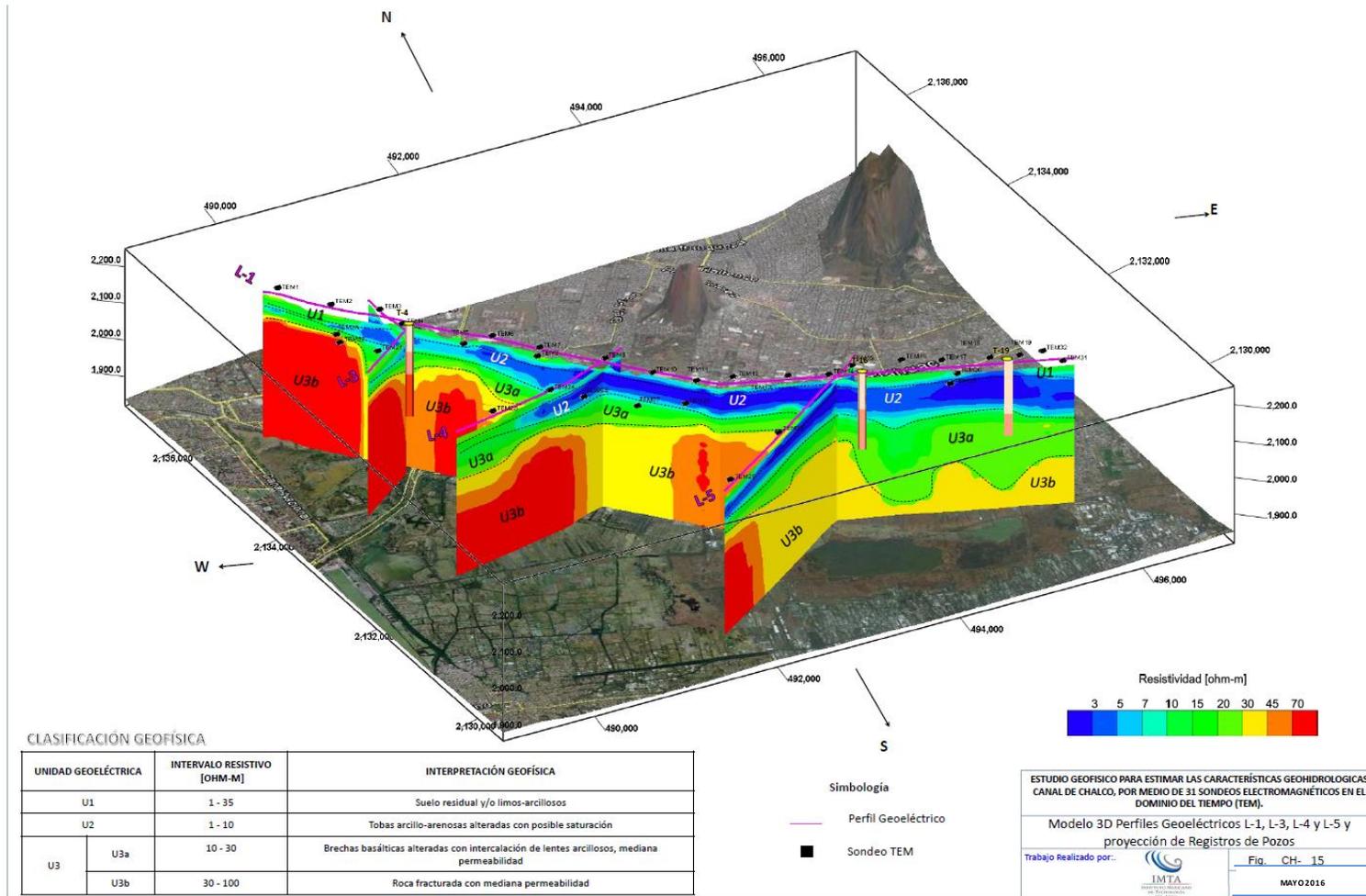


Figura 2.12. Modelo tridimensional de los perfiles geoléctricos

2.1.2 Sondeos geofísicos en el ramal Mixquic

2.1.2.1 Localización de la zona de estudio

El área de estudio se localiza en la zona de Santa Catarina Ayotzingo y se ubica geográficamente (sistema Mercator) entre las coordenadas 2129500 y 2135000 de Latitud Norte, y entre las coordenadas 502 000 y 506000 de Longitud Este, Figura 2.1.2.1.

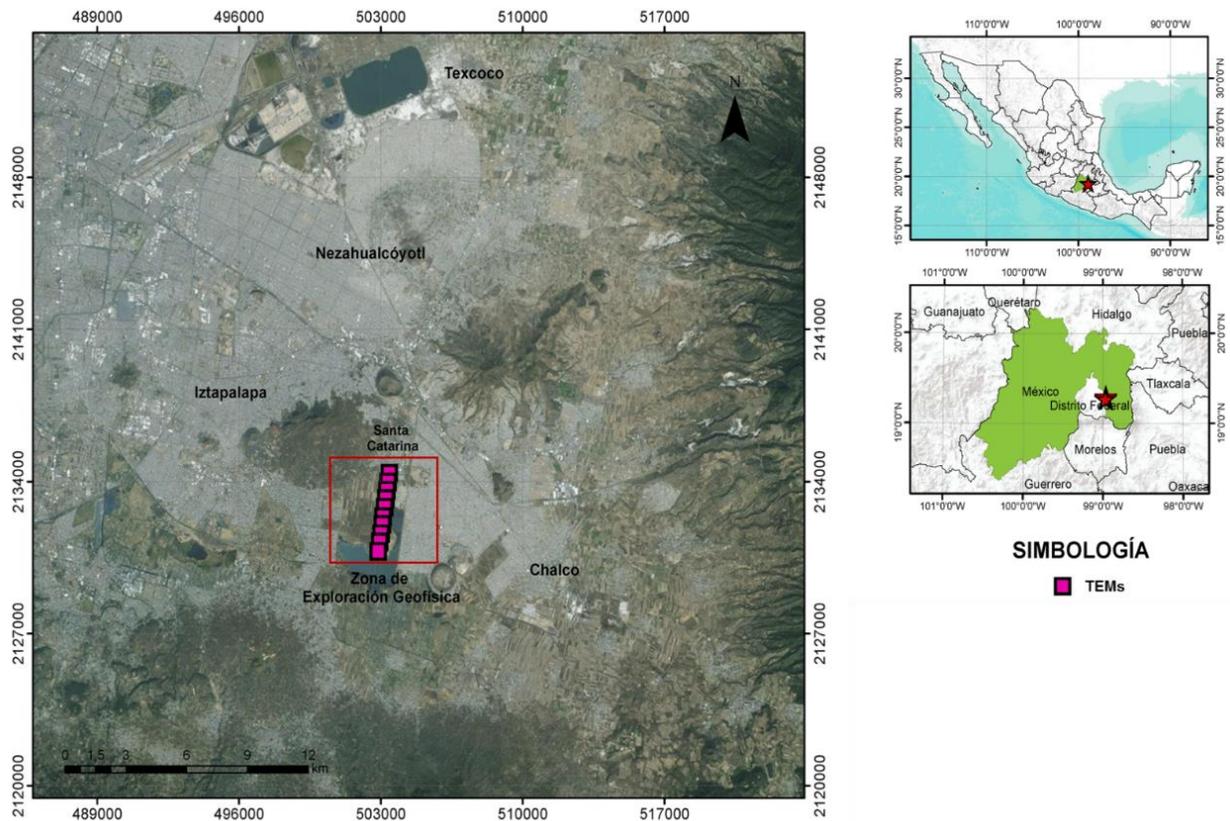


Figura 2.1.2.1 Localización de la zona de estudio

La zona se encuentra emplazada en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano. Los sondeos realizados se encuentran a una altura del orden de los 2200 [m.s.n.m]. Las mayores elevaciones cercanas al área de estudio se observan al noreste en el Volcán Xaltepec, al Sur hacia la Sierra del Chichinautzin y al Este hacia los volcanes Telapan y El Mirador. La Figura 2.1.2.2 muestra el muestra las elevaciones de la zona obtenidas del Continuo de Elevaciones Mexicano del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

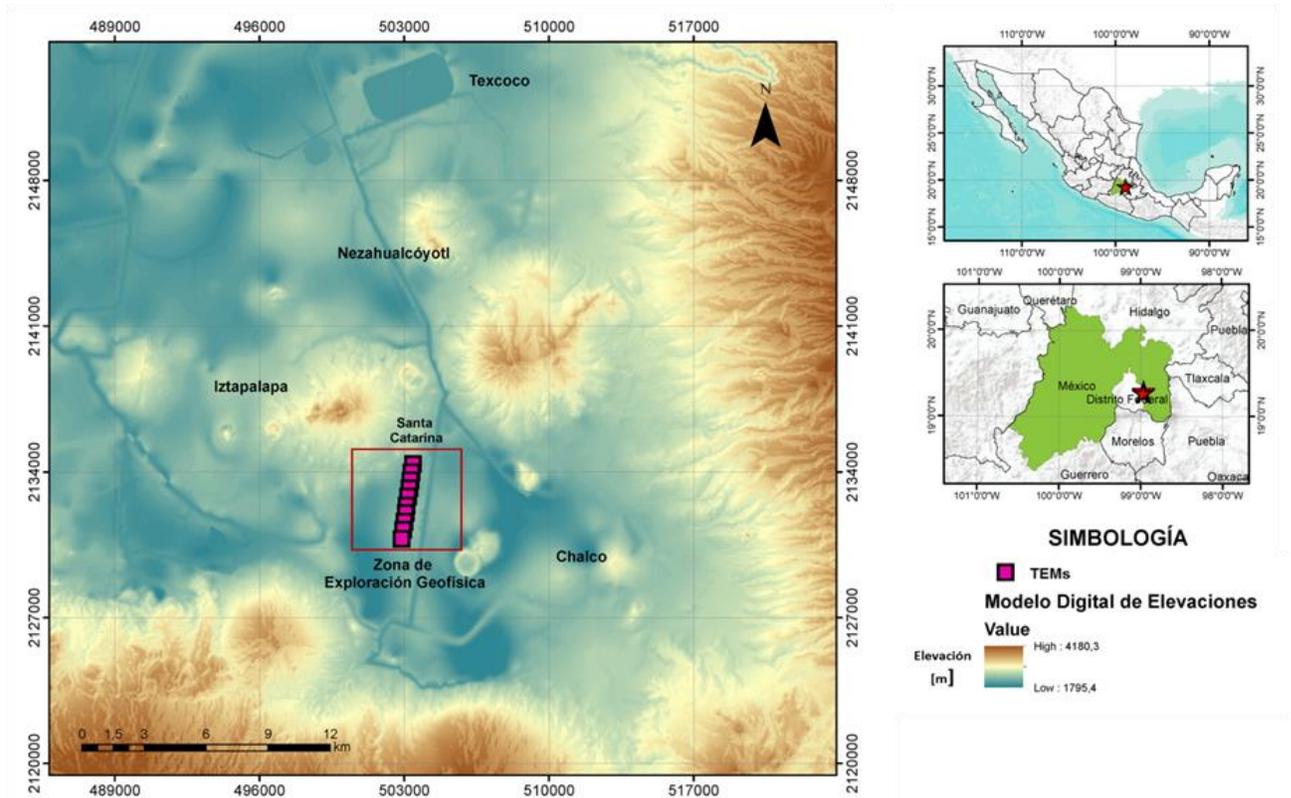


Figura 2.1.2.2 Modelo Digital de Elevaciones

En la Figura 2.1.2.3 se muestra la ubicación de los veinte sondeos Geofísicos realizados en el ramal Mixquic-Santa Catarina.



Figura 2.1.2.3 Localización de los Sondeos Geofísicos

Las coordenadas de cada sitio en el sistema UTM Datum WGS84 se muestran en la Tabla 2.1.2.1 y 2.1.2.2

Tabla 2.1.2.1 Coordenadas UTM de los sondeos Mayo 2016

Sondeo	UTM X [m]	UTM Y [m]	Elevación [m]	Longitud	Latitud
TEM1	503413	2134386	2246	-98 58' 03.32979"	19 18' 12.39290"
TEM2	503351	2133985	2244	-98 58'	19 17'

				05.03004"	59.36823"
TEM3	503298	2133602	2249	-98 58' 07.26851"	19 17' 46.12513"
TEM4	503252	2133226	2243	-98 58' 08.71838"	19 17' 33.37915"
TEM5	503189	2132827	2243	-98 58' 10.73704"	19 17' 21.11248"
TEM6	503112	2132391	2237	-98 58' 09.44464"	19 17' 16.44715"
TEM7	503067	2132036	2240	-98 58' 13.80068"	19 16' 55.20234"
TEM8	503006	2131616	2242	-98 58' 16.72154"	19 16' 40.92556"
TEM9	502942	2131231	2242	-98 58' 19.02970"	19 16' 28.47713"
TEM10	502868	2130792	2240	-98 58' 21.00855"	19 16' 15.17950"

Tabla 2.1.2.2 Coordenadas UTM de los sondeos Agosto 2016

	X	Y	Latitud	Longitud	Elevación [m]
MT 4	503117.319	2131867.11	19.28052	-	2238
MT 9	502894.084	2130487.25	19.26805	-	2236
MT 3	502758.247	2130049.61	19.264095	-	2231
Mix 1	503065.126	2134208.32	19.301679	-98.970825	2236
Mix 2	502984.697	2133589.41	19.296085	-98.971591	2243
Mix 5	502637.683	2131492.72	19.277137	-98.974897	2235
Mix 6	503356.523	2131432.29	19.27659	-98.968056	2238
Mix 7	502660.14	2130961.36	19.272335	-98.974684	2231
Mix 8	503217.942	2130875.28	19.271556	-98.969376	2232
Mix 10	502501.993	2132622.34	19.287346	-98.976187	2231

2.1.2.2 Metodología

TEM (Transitorio Electromagnético)

Para el levantamiento geofísico se utilizó la técnica del Transitorio Electromagnético (TEM), que consistió en utilizar una espira o bobina que está formada de un cuadro mediante cable del # 10 con dimensiones de 150*150 m (área de la bobina 22,500 m²), con el arreglo denominado "Loop coincidente", con una resistencia de 4 Ohm en el circuito, para lo cual se utilizó un cable especial. Con estas características del arreglo se logró una intensidad de corriente del orden de los 5 amperes, esto para cumplir con los 400 m de investigación propuestos (Figura 2.1.2.4).

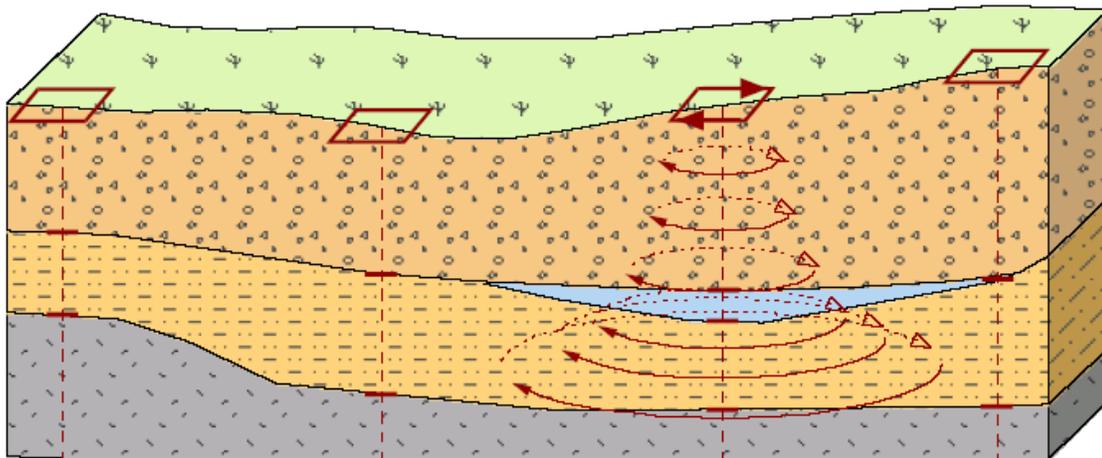


Figura 2.1.2.4 Arreglo de Loop coincidente

Con este arreglo se realizaron una serie de pruebas que consistieron en variar parámetros tales como:

- ✓ Pruebas de la resistencia del circuito de transmisión y recepción.
- ✓ Análisis de la intensidad de corriente circulante.
- ✓ Análisis de ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias.
- ✓ Análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación).
- ✓ Análisis de la repetibilidad de la respuesta medida por el equipo.
- ✓ Apilamiento de la señal con promedios de 256, 512, 1024 y 2048 muestras.

El tiempo de medición se fijó con una duración entre 35 y 40 ventanas, con la serie de tiempo denominada "Early Times" del equipo "Sirotem". Las

mediciones se realizaron con ganancias de 1, 2, 4, 8, 16, 32 y 64, aumentando el número de lecturas en sitios donde el ruido geológico era mayor, esto con el fin de aumentar la calidad en la estadística de los datos.

El proceso de los datos de campo se inicia mediante el análisis estadístico del compendio de registros obtenidos para cada sitio de TEM, con estos a su vez se define una curva de decaimiento de voltaje la cual es transformada a las tradicionales curvas de resistividad aparente, las cuales son comúnmente reconocidas en el medio geohidrológico. Posteriormente esta curva de resistividad aparente es procesada, obteniendo para cada sitio un modelo unidimensional; en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones. Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es aplicar un algoritmo mediante una regresión tipo Occam con lo cual se logra obtener un modelo multicapas (19 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección.

A continuación se resumen los pasos seguidos en el procesado de los registros de campo:

- ✓ Transferencia de los registros del equipo TERRATEM a la computadora.
- ✓ Edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de nV/AMP contra tiempo (curva de decaimiento).
- ✓ Conversión de la curva de decaimiento a Resistividad Aparente contra tiempo
- ✓ Cálculo del modelo estratificado
- ✓ Cálculo del modelo suavizado (inversión Occam)
- ✓ Impresión gráfica del modelo unidimensional
- ✓ Transferencia de las curvas y los modelos generados al paquete WINGLINK
- ✓ En Winglink, formación de la base de datos
- ✓ Elaboración de plantas y secciones de isorresistividad e impresión de resultados gráficos.

En el proceso de los datos se siguieron los estándares que se aplican para este fin, utilizando software y equipos de patente, las cuales se citan a continuación

- Equipo TERRATEM con número de serie 1503

- Programa TEMIXS para el proceso primario de los datos
- Programa WINGLINK para utilizarlo como base de datos y formar secciones y mapas de resistividad.

Magnetotelúricos de Fuente Natural (MT)

Para el diseño de adquisición de los sondeos MT se consideraron varios factores que pudiesen influir tanto en el tiempo de adquisición (duración del sondeo MT), así como en la relación señal-ruido (calidad de la información medida). Estos factores tales como: ubicación de líneas de alta tensión (fuentes de ruido electromagnético), niveles topográficos (espacios de 30 m² requeridos como mínimo), tipos de suelo (suelos secos, de composición granular gruesa o rocosos presentan mayor resistencia de contacto) y accesos o vías de comunicación (terrenos susceptibles a vibraciones producidas por el movimiento de vehículos), determinan los parámetros base de adquisición del sondeo MT.

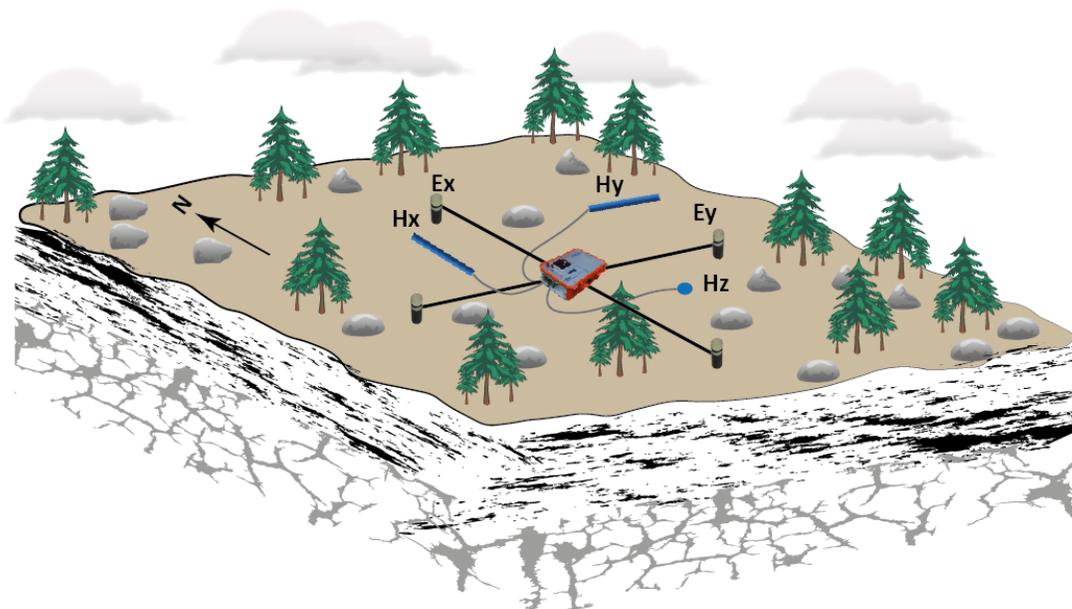


Figura 2.1.2.5 Esquema de arreglo de MT

El arreglo considerado para el método MT consiste en diseñar 2 dipolos eléctricos (Ex y Ey) de longitud de 30m a 40 m (en ocasiones con longitudes menores), con la colocación de 4 electrodos impolarizables (de sulfato de

plomo) equidistantes a un punto central (tierra física) orientados al N, S, E y W y; la colocación de 3 sensores magnéticos nivelados y orientados al Norte (Hx), al Este (Hy) y hacia el centro de la tierra (Hz). Una vez considerados los puntos anteriormente comentados se decidió utilizar un barrido espectral que comprende frecuencias del orden de los 10 kHz a 1 Hz; de esta forma fue posible obtener resolución suficiente para alcanzar profundidades de 400 hasta 600m de la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo. El tiempo de adquisición fue de 90 min con un tiempo de muestreo para la banda de 128 Hz de aprox. 60 min. Fue aplicado un filtro de 60Hz para evitar influencia de zonas susceptibles a mayor ruido electromagnético. La localización del área de estudio permitió trabajar sobre el terreno plano (evitando pendientes mayores a 15°), la longitud de los dipolos eléctricos fue de 20 a 30 (m). La adquisición de datos TEM se realizó con el sistema **ADU07e** de **Metronix**®.

2.1.2.3 Resultados

La distribución de las resistividades obtenidas se agrupa en la Tabla 2.1.2.3. Para la zona de estudio, se definieron 3 Unidades Geoeléctricas o intervalos con algunas subdivisiones, que se describen en la siguiente tabla y se analizan más adelante

Tabla 2.1.2.3 Unidades geoeléctricas

UNIDAD GEOELÉCTRICA		INTERVALO RESISTIVO [OHM-M]	INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA
U1		1 - 35	Suelo residual
U2		1 - 10	Acuitardo lacustre compuesto por granulometrías finas
U3	U3a	10 - 30	Intercalaciones de limos, arenas y horizontes de basalto que componen posibles zonas de potencial acuífero
	U3b	30 - 100	Intercalaciones de materiales volcánicos, piroclastos y horizontes de basalto posiblemente fracturados con posible presencia de saturación

Unidad U1

La unidad U1 se asocia a posibles intercalaciones de suelo residual con depósitos sedimentarios aluviales y lacustres ya que se observan intercalaciones marcadas de horizontes conductores con valores de resistividad entre 3 y 5 [Ohm-m] con valores entre 10 y 15 [Ohm-m] bastante diferenciados y en morfologías tabulares, esta unidad presenta un espesor promedio de 20 [m].

Unidad U2

La unidad U2, se asocia a materiales arcillosos correspondientes a depósitos lacustres, los valores de resistividad de la unidad se encuentran entre 1 y 10 [Ohm-m], valores que indican la presencia de materiales de granulometría fina pero posiblemente poco permeables que correlacionando con la estratigrafía local de la zona de estudio forman parte del acuitardo lacustre cuyos espesores varían de entre 100 y 150 [m].

Unidad U3

La unidad U3, se ha dividido en dos subunidades con base en los contrastes resistivos presentes en las secciones geoeléctricas compuestas. La unidad **U3a** presenta un espesor que varía entre 40 y 100 [m] con valores de resistividad que se encuentran en el intervalo de 10 a 30 [Ohm-m] y se asocia a intercalaciones de limos, arenas y horizontes de basalto que componen posibles zonas con potencial acuífero y una morfología irregular y variable en íntima relación con la unidad **U3b**. La unidad **U3b** se asocia a intercalaciones de materiales volcánicos extrusivos (piroclastos y basaltos) originarios posiblemente de la Sierra Chichinautzin, la morfología de esta unidad es accidentada y tortuosa, se encuentra a profundidades variables del orden de los 150 [m]. Presenta valores de resistividad entre 30 y 100 [Ohm-m], valores asociados a materiales posiblemente fracturados.

Perfiles de Resistividad

Para mostrar el comportamiento de los materiales en el subsuelo en el sentido vertical, se construyeron 3 perfiles geoeléctricos que incluye 7 TEM's y 3 MT levantados en este proyecto, se muestra su distribución en la Figura 2.1.2.6.



Figura 2.1.2.6 Perfiles geoelectricos (M1, M2 y M3)

Perfil Geoelectrico M1 (Figura 2.1.2.7)

Perfil con orientación N-S y prácticamente paralelo al ramal de pozos Mixquic-Santa Catarina fue configurado incorporando los sondeos TEM 1 al TEM 10 junto con los sondeos MT4, MT9 y MT3 para finalmente incluir un total de 13 sondeos electromagnéticos. La separación entre los sondeos se mantiene en aprox. 500m y la longitud total del perfil es de 5250 m extendiéndose hacia el Sur abarcando hasta los pozos P11 y P12 del ramal. De acuerdo con la geología superficial todos los perfiles generados se emplazan en materiales aluviales. Sobre el perfil es posible identificar un horizonte con valores de resistividad bajos a medios (1 a 35 Ohm-m) que se está asociando al suelo

residual con algunas intercalaciones de depósitos arcillosos y arenosos, con un espesor estimado de aproximadamente 20 a 25m. Por debajo de esta unidad es claro el comportamiento conductor (con valores que van desde 1 hasta 10 Ohm-m), denominada como Unidad U2 se asocia a materiales de granulometrías finas conformando el acuitardo lacustre de la planicie de Chalco con un espesor variable de aproximadamente 150m en sus extremos N y S, alcanzando un espesor prominente de más de 200m en la zona central del perfil, por debajo de los sondeos TEM4, TEM5, TEM6 y TEM7, lo que es coincidente con un mayor espesor de la secuencia lacustre. Debido a lo anterior es posible definir una zona de transición denominada Unidad U3a en valores de resistividad que van de 10 a 30 Ohm-m y asociada a intercalaciones de limos, arenas y horizontes de basalto que conforman parte del acuífero principal regional. En la zona central del perfil esta unidad se ha prolongado de acuerdo a sus valores de resistividad. Finalmente, como parte basal del perfil y predominando a profundidades en el rango de los 200 -250 metros encontramos valores de resistividad medios a altos (30-100 Ohm-m) que posiblemente estén identificando intercalaciones de materiales volcánicos, piroclastos y horizontes de basalto probablemente fracturados y saturados, el contacto de esta unidad es coincidente con las zonas N y S donde de acuerdo con la exploración directa de pozos, no fue recuperable muestras de basalto. Sobre el perfil se muestra la proyección del corte litológico referente al pozo No.4 y su correspondiente clasificación litológica, se muestra una recuperación de basalto a una profundidad de 385 a 404 metros; sin embargo, resulta difícil distinguirlo sobre el perfil geoelectrico y muy probablemente esto se deba al poco espesor de la intercalación y la limitada resolución del sondeo TEM en este punto. De acuerdo con el modelo hidrogeológico propuesto por Ortiz Zamora y Guerrero, 2010; el espesor de la unidad U2 es coincidente dicho modelo y por debajo de los sondeos TEM 7, TEM 8, TEM 9 y TEM 10 se logra apreciar un aumento de resistividad coincidente con el horizonte de basalto detectado en la exploración directa de pozos.

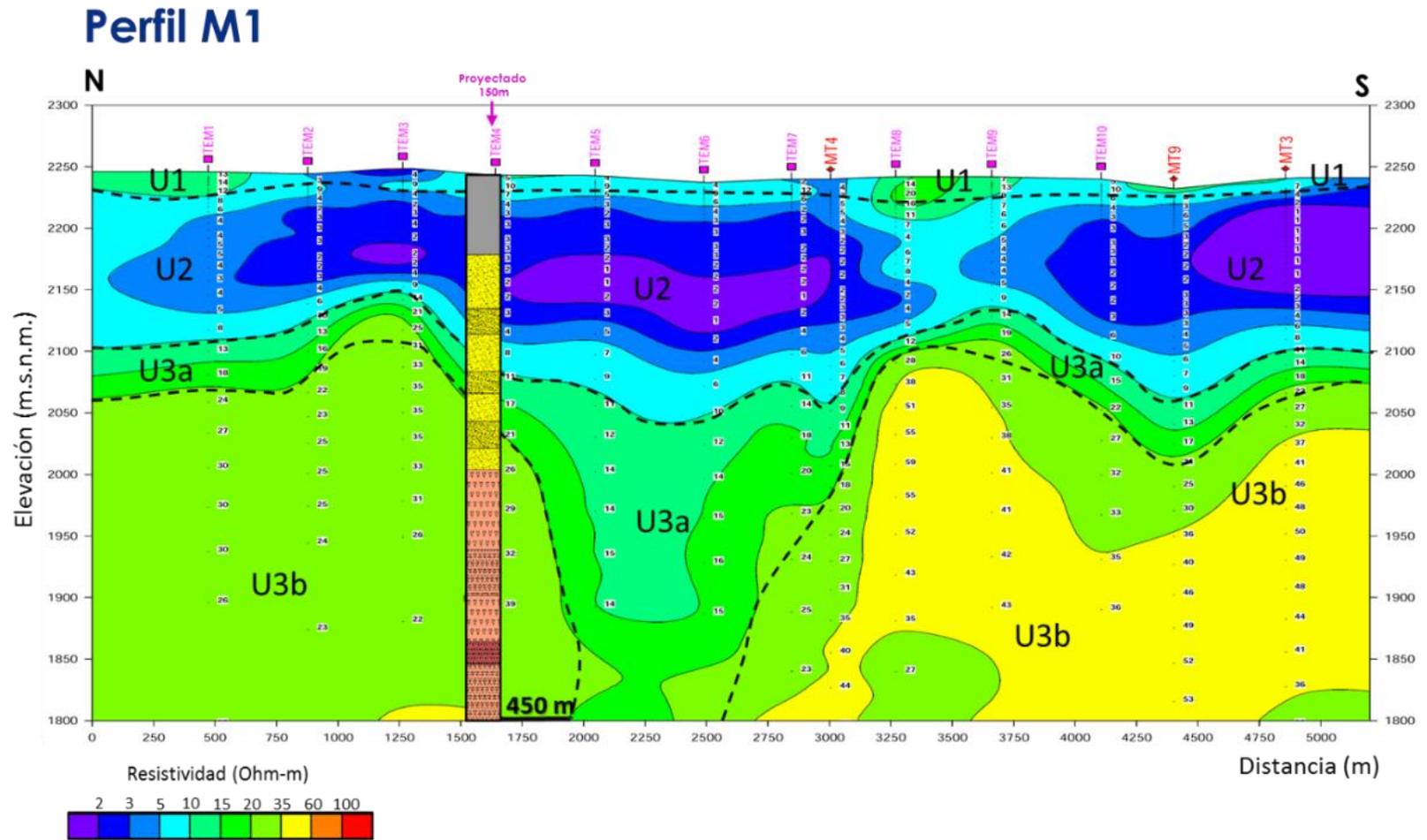


Figura 2.1.2.7 Perfil Geoeléctrico M1 y corte litológico de Pozo No. 4

Perfil Geoeléctrico M2 (Figura 2.1.2.8)

Este perfil mantiene la dirección N-S y agrupa los sondeos TEM (MIX1, MIX2, MIX10, MIX5, MIX7, TEM1 y TEM10) y los sondeos MT (MT9 y MT3). La configuración de geométrica de este perfil no es precisamente paralela sobre el ramal de pozos sino más bien se extiende entre 500 a 1000 metros hacia el NW de la planicie de Chalco sobre la zona central de estudio.

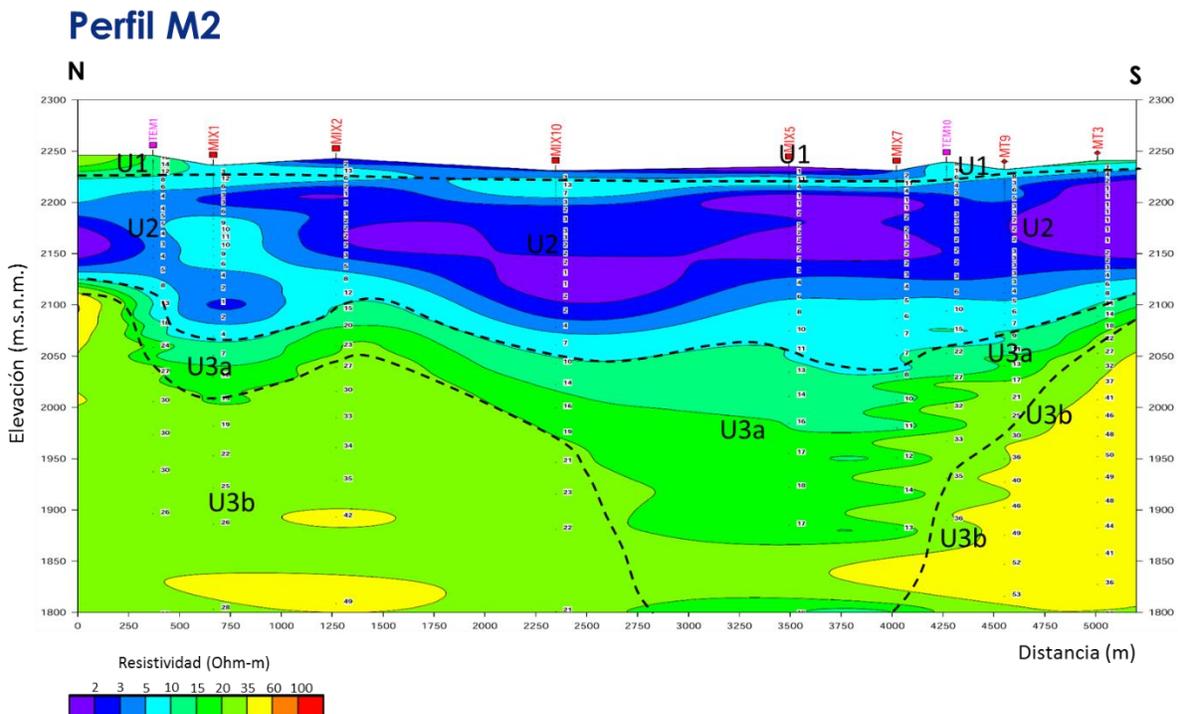


Figura 2.1.2.8 Perfil Geoeléctrico M2

La configuración de resistividad eléctrica a profundidad es muy similar a la mostrada en el Perfil M1 encontrándose básicamente la misma distribución de contrastes para definir a la unidad u1 como material de suelo residual; el horizonte conductor identificado como la Unidad U2 aparece a una profundidad aproximadamente de 25 metros y se mantiene prácticamente con un espesor constante a lo largo del perfil. Sobre la zona donde se dibujó el perfil y de acuerdo con las referencias obtenidas de Ortiz Zamora y Guerrero, 2010; los sondeos hacia la parte norte y central del perfil se encuentran emplazados sobre el flujo basáltico (inferior a la planicie lacustre) cuya geometría fue inferida a partir de datos litológicos y sobre todo en base en los contornos magnéticos anteriormente descritos; sin embargo refiriéndonos a la

información resistiva, no es posible distinguir un efecto marcado de estos horizontes de basaltos someros muy probablemente como consecuencia de su comportamiento laminar e intercalado con el material del acuitardo lacustre superior (Unidad U2) lo que da lugar por otra parte a suponer que el efecto magnético observado pueda estar respondiendo a estructuras basálticas más profundas, como se muestra al final de este perfil. La unidad U3a definida como intercalaciones de limos, arenas y horizontes de basalto muestra poco espesor a lo largo del perfil, pero por debajo de los sondeos MIX10, MIX5, MIX7, TEM10 y MT9 mantiene un espesor considerable indicando posiblemente una zona de materiales basálticos fracturadas e intercalados con limos y arenas. Sobre el perfil se identifican algunos incrementos en la resistividad, sobre todo al inicio del perfil (TEM 1) y al final (por debajo de los sondeos MIX7, TEM10, MT9, y MT3) para convertirse en profundidad en la unidad U3b asociada a intercalaciones de materiales volcánicos y coladas de basalto posiblemente fracturadas.

Perfil Geoeléctrico M3 (figura 2.1.2.9)

El último de los perfiles mantiene una configuración muy similar al perfil geoeléctrico M1, pero en este se han incorporado los sondeos TEM (MIX4 y MIX8). La distribución de resistividad lateralmente muestra un comportamiento mucho más homogéneo para la Unidad U2 asociada al acuitardo lacustre compuesto por granulometrías finas con un espesor aproximadamente constante de 180 m a lo largo del perfil. La unidad U3a vuelve extenderse por debajo del TEM4 al TEM7 coincidiendo con la interdigitación del material basáltico con el aumento de la potencia de los materiales lacustres. Por debajo de esta unidad aparece la unidad U3b asociada a intercalaciones de materiales volcánicos, piroclastos y horizontes de basaltos posiblemente fracturados, al igual que en los otros perfiles (M1 y M2) los valores más altos en resistividad (en el orden de los 50 a 60 Ohm-m) se definen hacia el Sur de la zona de estudio coincidiendo con las anomalías magnéticas de mayor amplitud descritas en Ortiz Zamora y Guerrero, 2010. Sobre este perfil no se logra apreciar un contraste de resistividad asociado a basaltos someros hacia el sureste (a profundidades menores de los 150 metros) según lo reportado en Ortiz Zamora y Guerrero, 2010; esto puede ser consecuencia de los espesores relativamente pequeños en las intercalaciones de basaltos con material lacustre o bien, debido a que la morfología del flujo

basáltico por debajo de la planicie lacustre hacia esta zona varia ligeramente de la propuesta de estos autores. Lo anterior solo se podrá corroborar si se reconoce la profundidad a la cual se obtuvieron muestras de basaltos en los pozos de exploración y los espesores de los mismos a una profundidad de al menos 400 metros. Al momento de elaboración de este reporte únicamente contamos con información litológica proveniente del Pozo No. 4 de dicho ramal, el cual ha sido proyectado (aproximadamente 150 metros) de su posición original para ser incluido en este perfil (M3).

Perfil M3

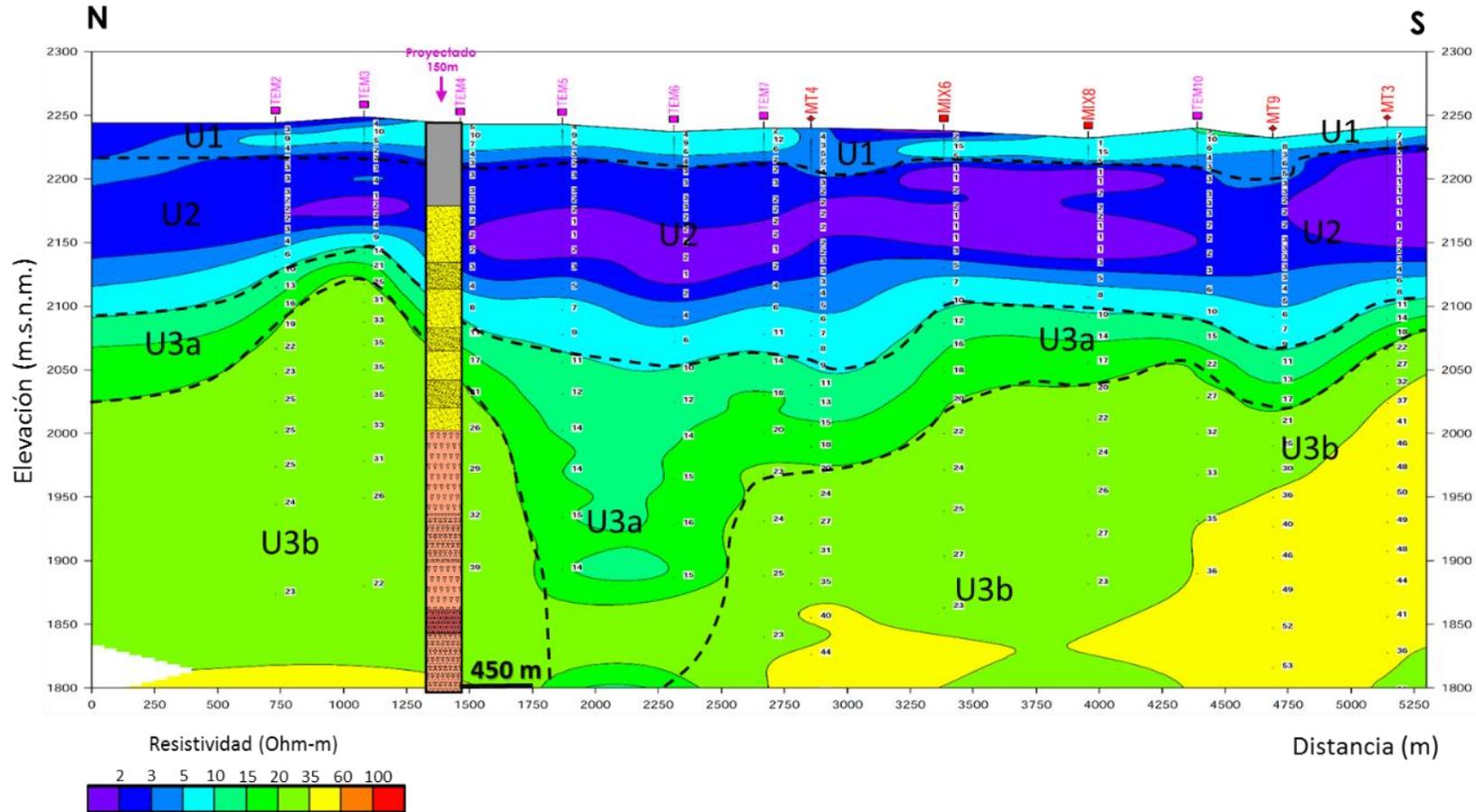


Figura 2.1.2.9 Perfil Geoeléctrico M3 y corte litológico del Pozo No. 4

Mapas de Resistividad para la profundidad de 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 m (figura 2.10-2.17).

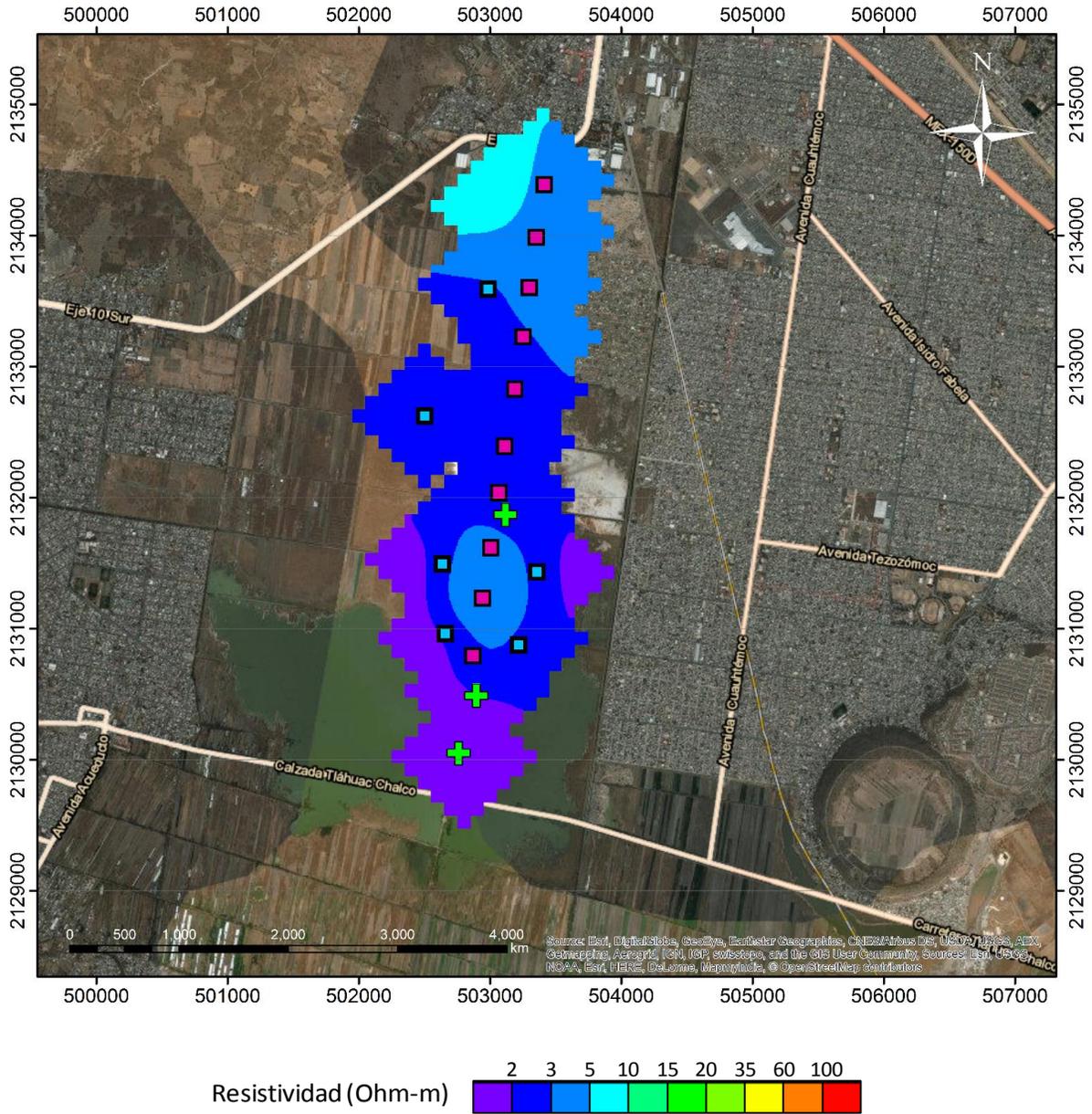


Figura 2.1.2.10 Mapa de resistividad a profundidad (50 m)

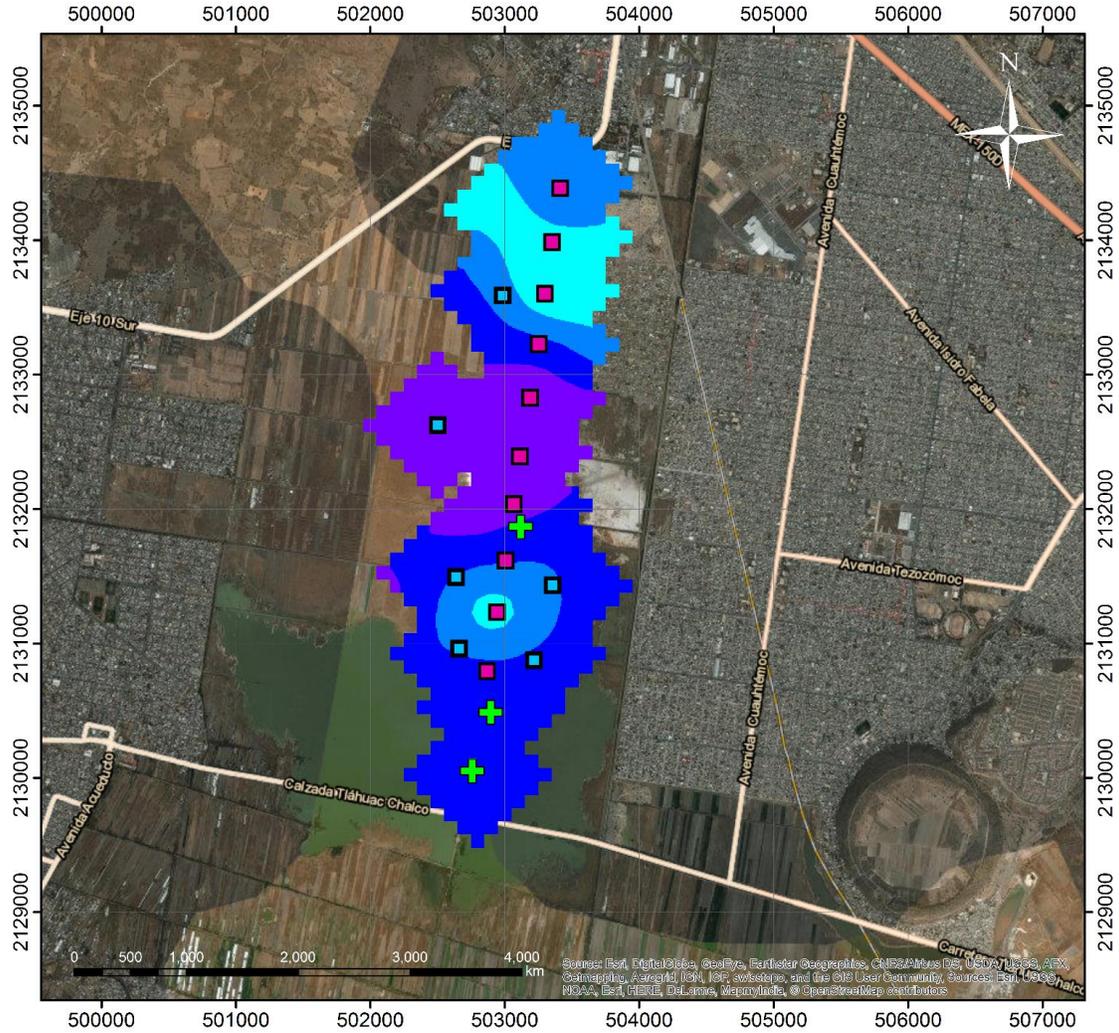


Figura 2.1.2.11 Mapa de resistividad a profundidad (100 m)

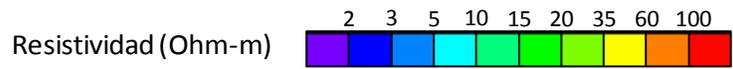
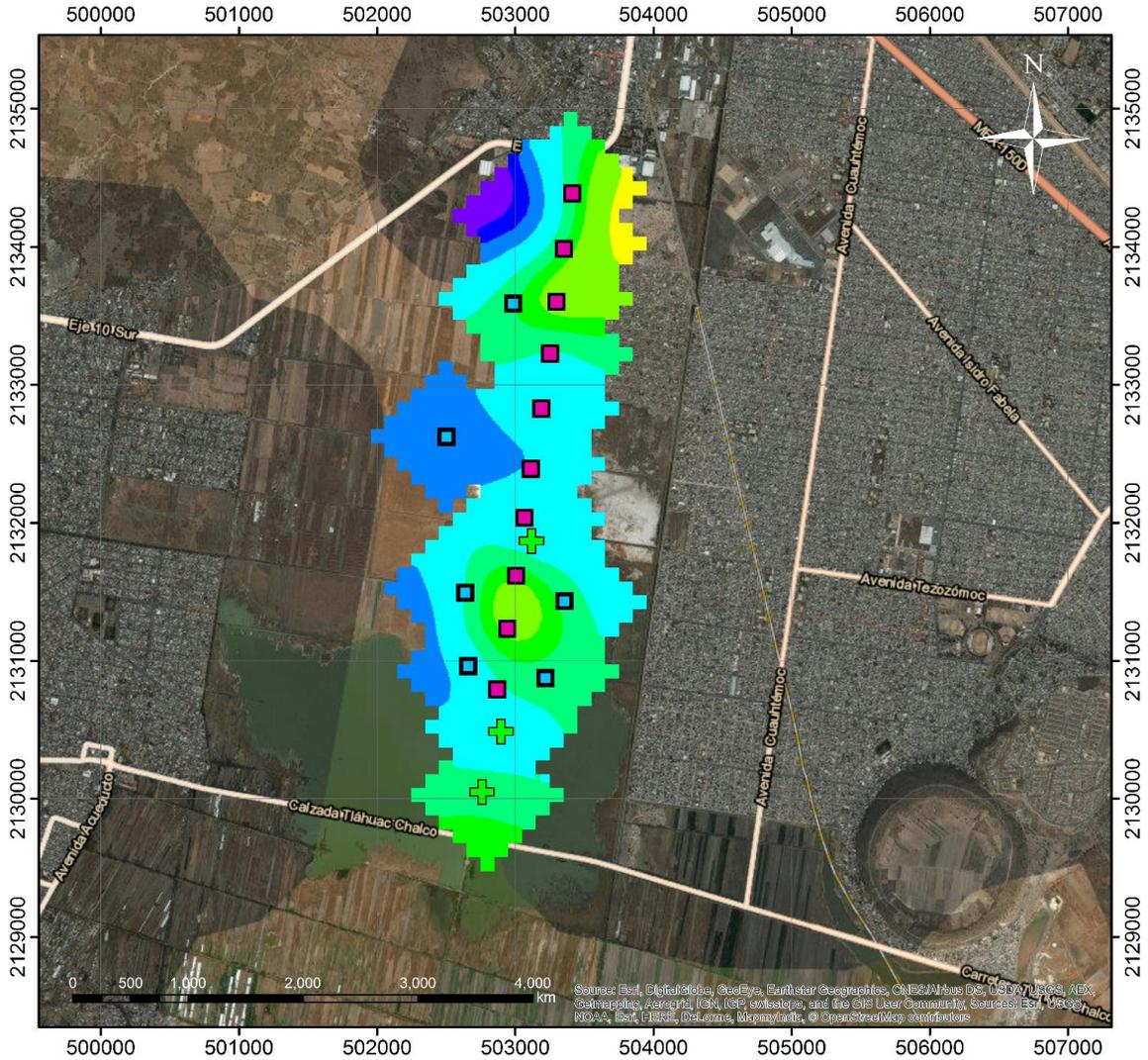


Figura 2.1.2.12 Mapa de resistividad a profundidad (150 m)

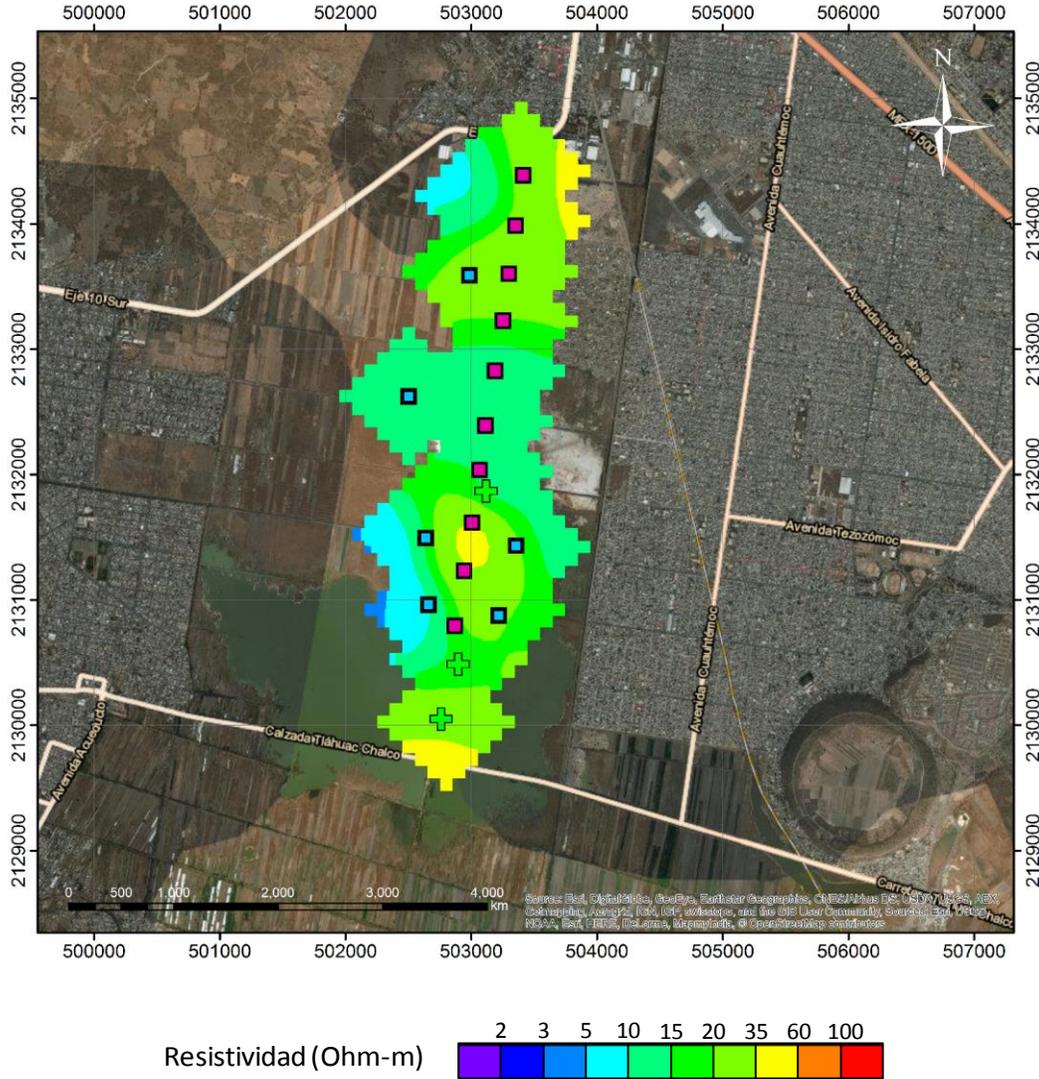


Figura 2.1.2.13 Mapa de resistividad a profundidad (200 m)

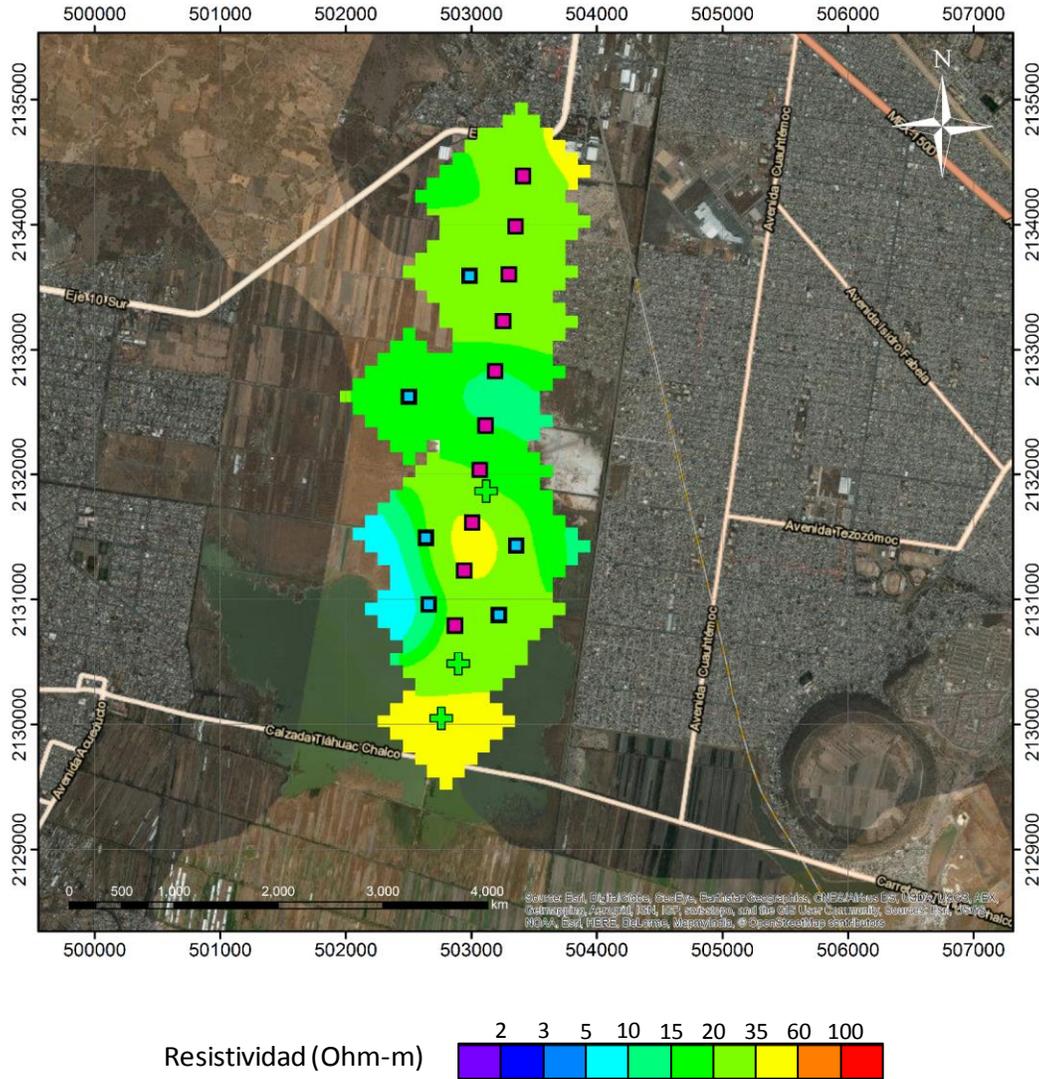


Figura 2.1.2.14 Mapa de resistividad a profundidad (250 m)

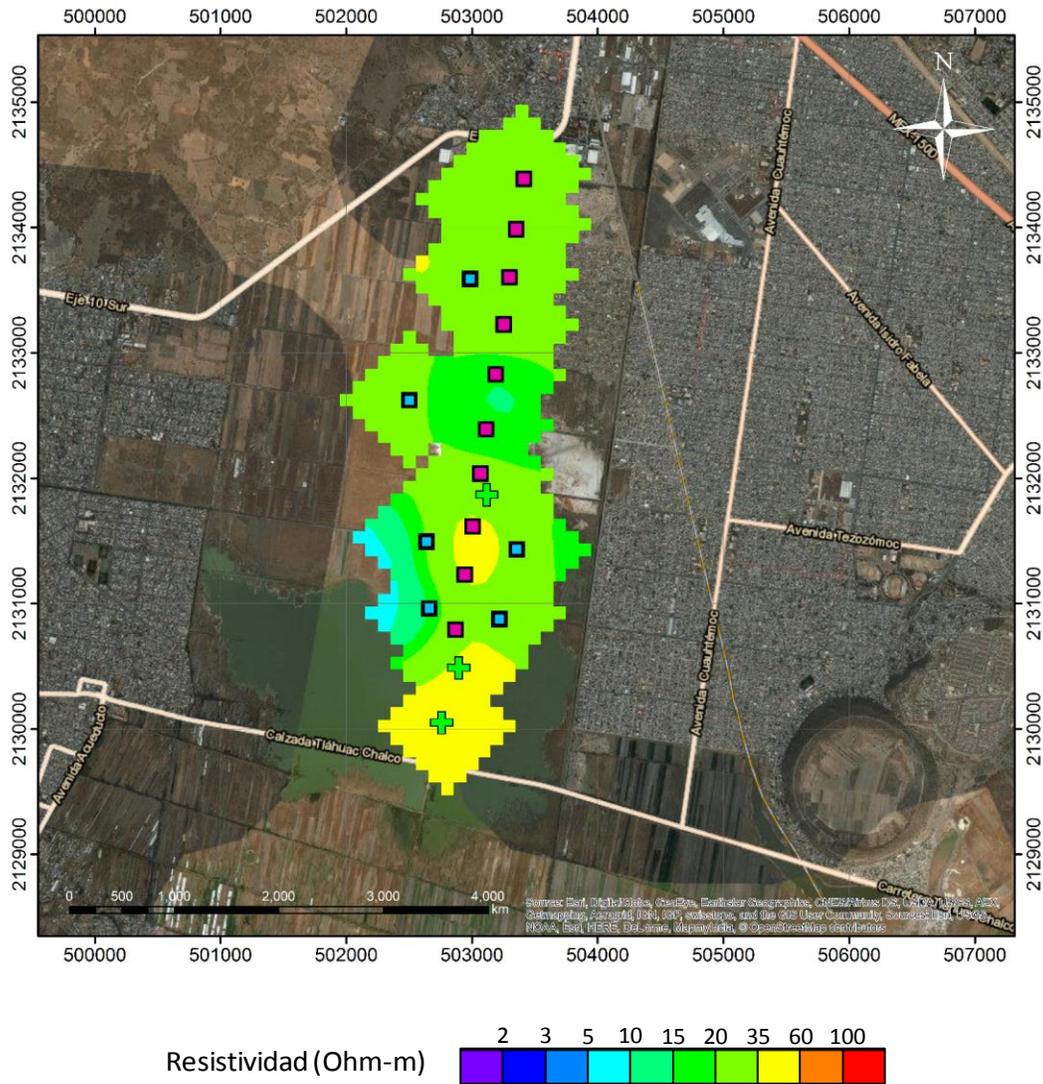


Figura 2.1.2.15 Mapa de resistividad a profundidad (300 m)

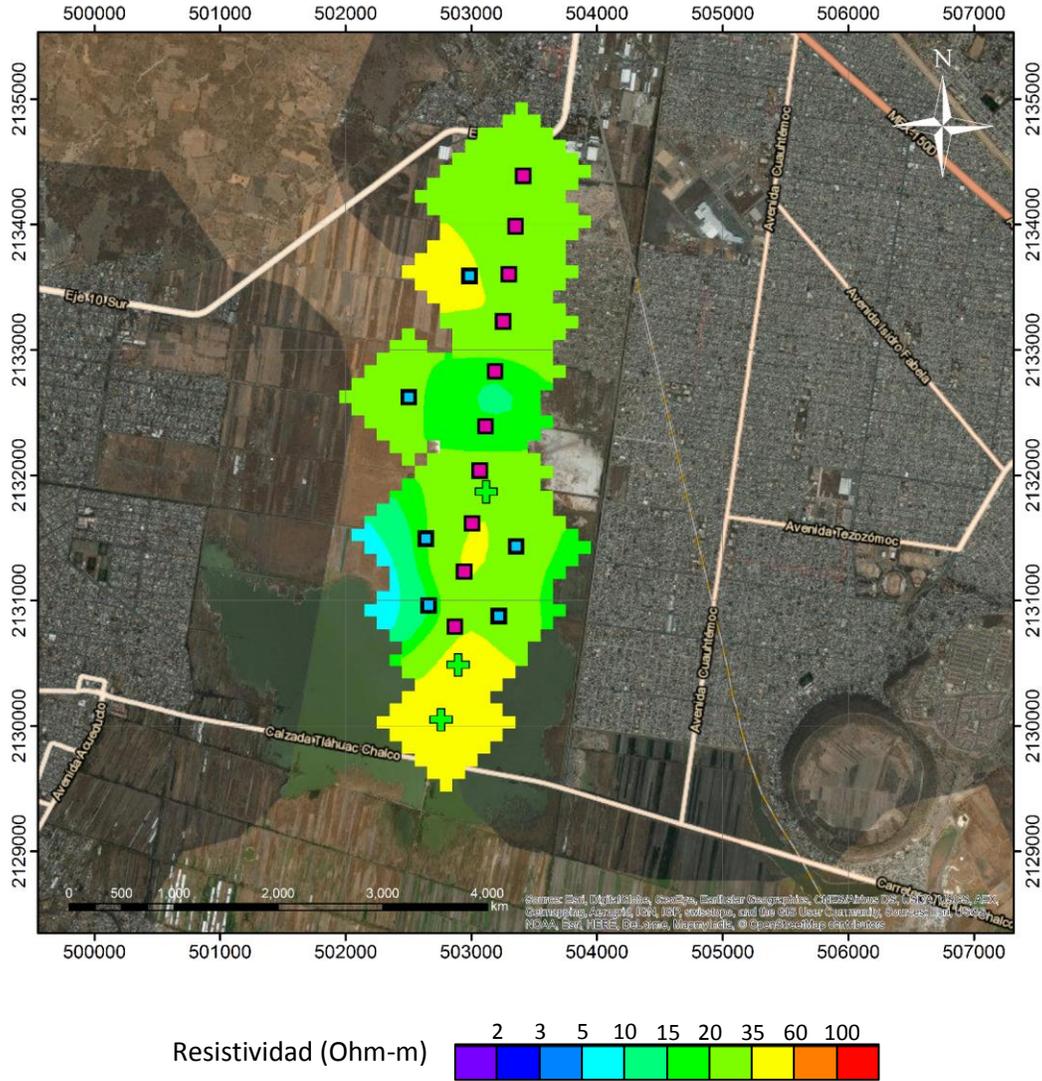


Figura 2.1.2.16 Mapa de resistividad a profundidad (350 m)

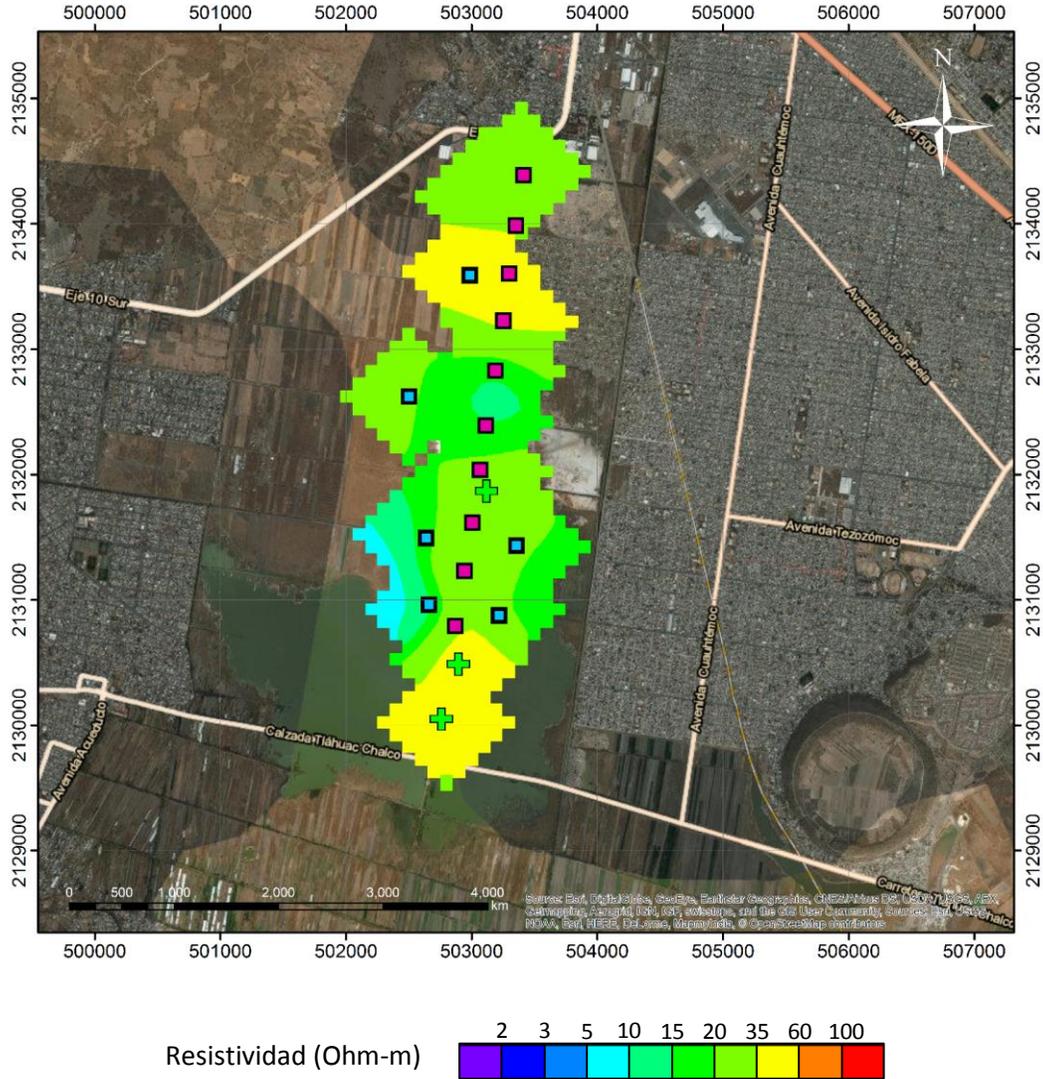


Figura 2.1.2.17 Mapa de resistividad a profundidad (400 m)

2.2 Diseño de diez pozos, cinco del Ramal Tláhuac (Nezahualcóyotl), y cinco del Mixquic-Santa Catarina.

2.2.1 Diseño de cinco pozos del Ramal Tláhuac (Nezahualcóyotl).

En la figura 2.2.1.1 se muestra en perfil los pozos del ramal Tláhuac existentes (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18 y P19), así como el diseño que se propone para los futuros pozos de reposición (PPT1, PPT2, PPT3, PPT4, PPT5 y PPT6).

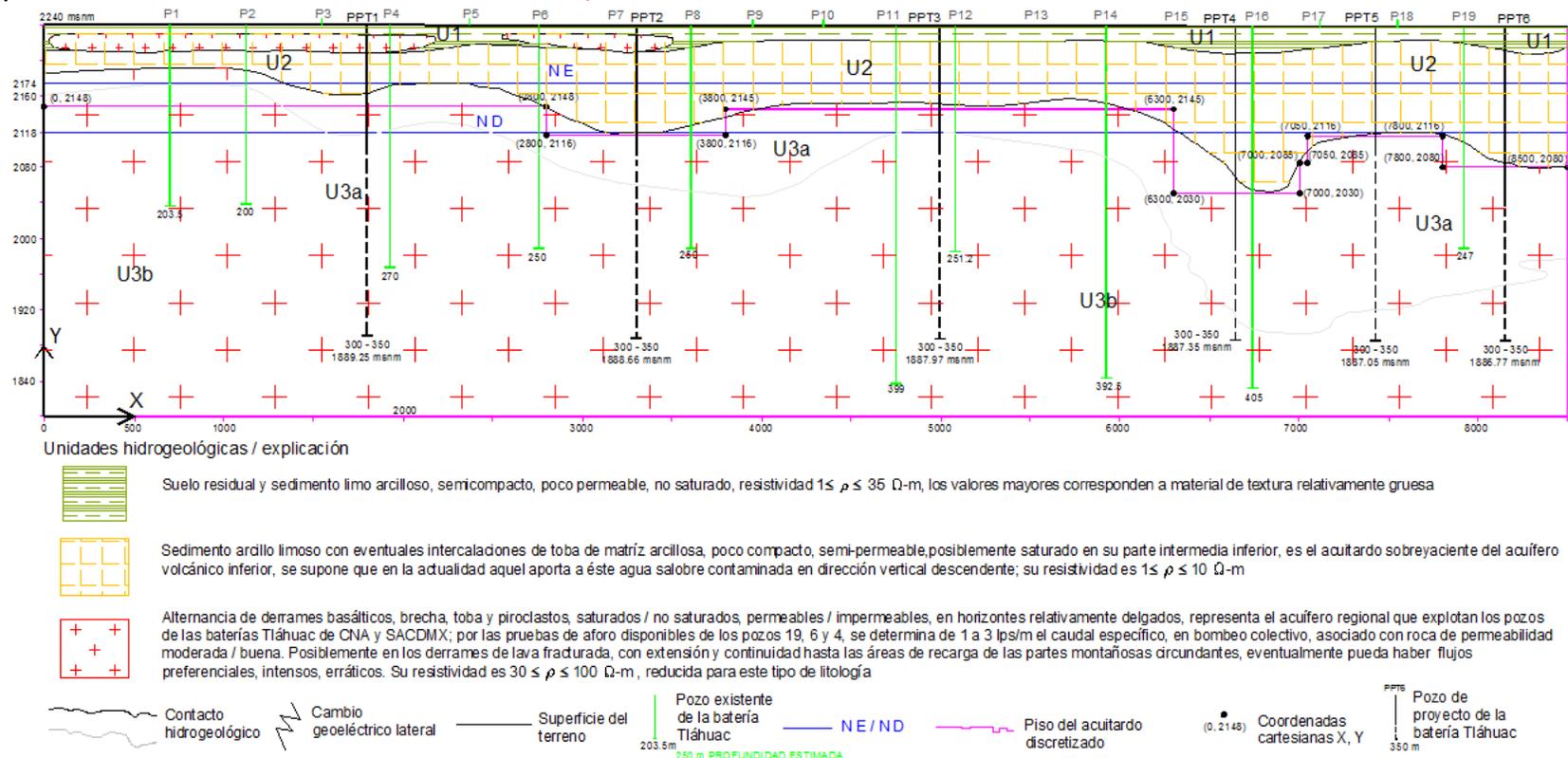


Figura 2.2.1.1 Perfil del diseño de cinco pozos del ramal Tláhuac

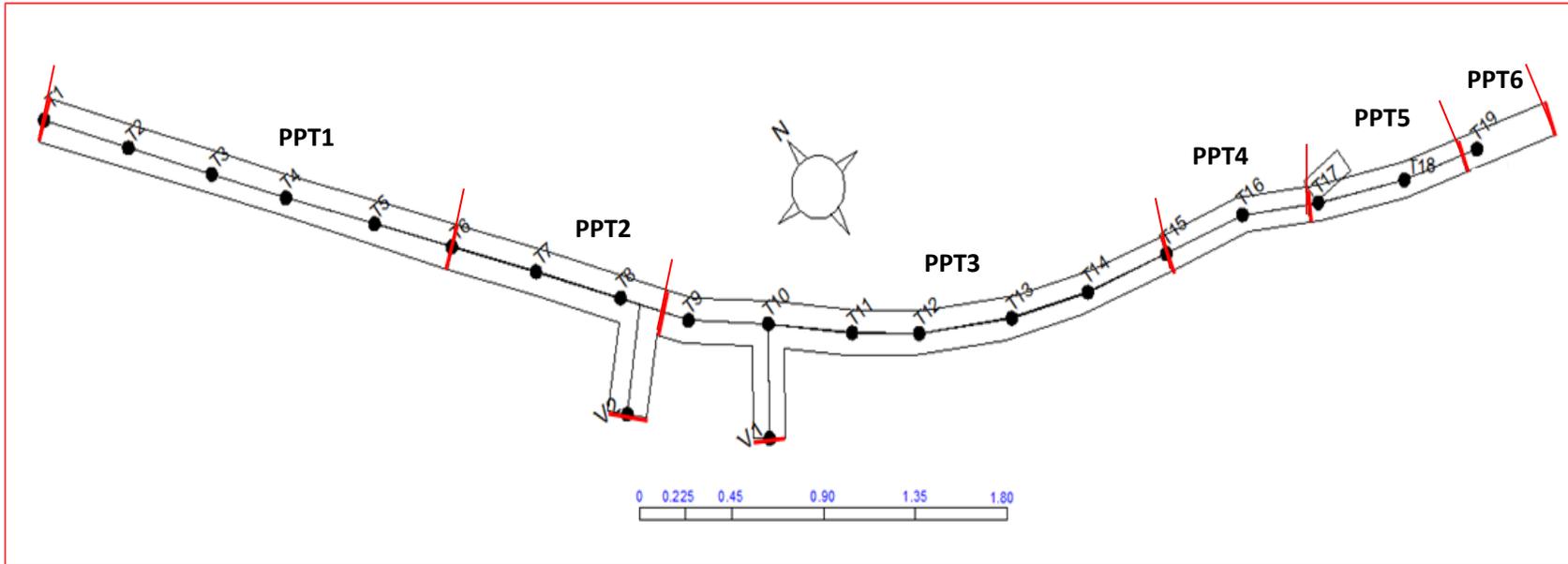


Figura 2.2.1.2 Vista en planta de la distribución de pozos del ramal Tláhuac e intervalos donde aplica el diseño de los futuros pozos de reposición.

La proyección de los pozos de reposición de la figura 2.2.1.2 corresponde a la parte central de cada intervalo de grosor constante de acuitardo donde aplica cada uno de los diseños propuestos; no representa su ubicación puntual.

De los registros geoeléctricos y de los registros eléctricos se tipifica por tramos de grosor uniforme del acuitardo discretizado, el diseño de seis pozos distribuidos del pozo 1 al 19, a lo largo de la batería Tláhuac.

Básicamente la modificación del diseño de los pozos de proyecto estandarizado se refiere al largo de la longitud cementada impermeable con la cual se pretende cancelar la interconexión por el espacio anular entre el acuífero inferior, con agua de buena calidad, y el acuitardo superior, con agua salobre y alto contenido de gases.

Memoria de cálculo

El diseño se enfoca en dos aspectos hidráulicos relevantes, cámara de bombeo y porción filtrante; el primero, es el adecuado intervalo ademado, preferentemente con tubería lisa, para alojar la bomba con suficiente holgura y evitar turbulencias. El segundo, corresponde a la zona filtrante a través de la cual el agua debe entrar con baja velocidad, sin arrastre de finos y mínima pérdida de energía. El análisis de la resistencia estructural del ademe y contra-ademe también se incluye.

Parámetros promedio de diseño adoptados	
Q_D , [lps] = 35	Caudal de diseño esperado
q , [lps/m] = 1	Caudal específico estimado
K , [m/s] \approx 1.0E-05	Conductividad hidráulica horizontal
a_Q , [m] = 35	Abatimiento por bombeo propio
a_{PT} , [m] = 10.50	Abatimiento permisible de traslape total Descensos provocados por pozos de producción ubicados a menos de 500 m de distancia. A mayor separación menor interferencia y abatimiento entre ellos
a_T , [m] = 56.00	Abatimiento total en cada pozo de bombeo
PPP(1-6) 350	Profundidad de proyecto de pozo 1 a 6
\bar{b}_{EF} , [m] = 191	Espesor efectivo saturado promedio
v , [cm/s] \leq 3	Velocidad de entrada del agua al pozo máxima
PNF, [m] = 66	Profundidad al nivel freático promedio
PND, [m] = 122.00	Profundidad al Nivel dinámico promedio. Pronóstico
$S_Y \approx$ 0.12	Rendimiento específico en bombeo

Determinación del nivel estático de diseño

Promedio aritmético de valores obtenidos.

Ramal Tláhuac		
Pozo	Fecha	Prof. del N.E.
2	23/10/2014	69.8
4	21/10/2014	73.5
8	22/10/2014	78.8
14	20/10/2014	60
19	10/10/2014	47.03
	Promedio	66

Determinación del ND de diseño

$$ND = NE + (a_Q + 2a_{PT}) = NE + a_T = 66 \text{ m} + 56 \text{ m} = 122, \text{ pronóstico}$$

Coordenadas X, Y, de los tramos para ubicación de pozos de reposición

Pozo de proy.	Espesor acuífero captado, b_{EF} , [m]	Coordenadas X, Y, del tramo en el que aplica el diseño		Diseño representativo entre los pozos existentes
		Inicio	Final	
PPT1	249.68	(0, 2148)	(2800, 2148)	PT1 - PT6
PPT2	227.33	(2800, 2116)	(3800, 2116)	PT6 - PT8
PPT3	256.93	(3800, 2145)	(6300, 2145)	PT8 - PT15
PPT4	175.82	(6300, 2030)	(7000, 2030)	PT15 - PT17
PPT5	228.94	(7050, 2116)	(7800, 2116)	PT17 - PT19
PPT6	193.19	(7800, 2080)	(8500, 2080)	PT19 -

$$\bar{X} = 191$$

Radio de influencia en estiaje, r_o , separación mínima entre pozos, d , y abatimiento, α

Se realiza el análisis hidráulico simplificado siguiente.

$$r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T * t}{S r}}$$

NE PROM DE PROY = 66.00 m, PROFUNDIDAD MEDIA AL NIVEL ESTÁTICO
ND PROM DE PROY = 122.00 m, PROFUNDIDAD MEDIA AL NIVEL DINÁMICO

SUSTITUYENDO VALORES Y OPERANDO TÉRMINOS

$r_0 =$	806.27 m,	RADIO DE INFLUENCIA DEL BOMBEO
$Q_D =$	0.035 m ³ /s,	GASTO DE DISEÑO
$q =$	1.0 lps/m,	GASTO ESPECÍFICO MEDIDO
$a_Q =$	35.00 m,	ABATIMIENTO POR BOMBEO PROPIO
$T =$	1.10E-03 m ² /s,	TRANSMISIVIDAD DEL ACUÍFERO MEDIDA, CONSTANTE
$K =$	5.76E-06 m/s,	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO MEDIDA
$t_{OP}, s =$	3.15E+07 1 año	BOMBEO CONTINUO, ESTIAJE - LLUVIA
$S_y =$	0.12	RENDIMIENTO ESPECÍFICO DEL ACUÍFERO, ADIMENSIONAL
$a_{PT} = (30\%)(a_Q) =$	10.50 m	DESCENSO DE POZOS UBICADOS A ≤ 800 M DE DISTANCIA
$a_T = a_Q + 2a_{PT} =$	56.00 m,	A MAYOR SEPARACIÓN MENOR INTERFERENCIA Y ABATIMIENTO

DISTANCIA d PARA LA CUAL SE TIENE 10.50 M DE ABATIMIENTO, ACUÍFERO EXTENSO SIN RECARGA

$$r(10.50) = 10^{(0.5((\log \frac{2.25Tt}{S_y}) - (\frac{4\pi T a_{PT}}{2.3Q})))}$$

SUSTITUYENDO VALORES Y OPERANDO TÉRMINOS

$$d = 2r(10.50) = 202.31 \text{ d se incrementa si } a_{PT} \text{ disminuye}$$

ABATIMIENTO a RELATIVO AL ESPACIAMIENTO PROMEDIO DE 400 M ENTRE POZOS DE LA BATERÍA TLAHI

$$a = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right)$$

SUSTITUYENDO VALORES Y OPERANDO TÉRMINOS

$a(r), m = 3.55 \ll 10.50$ M DE a_{PT} ; ABATIMIENTO PROVOCADO POR EL BOMBEO DE POZOS CON $d \approx 400$ M ACUÍFERO EXTENSO SIN RECARGA.
SIMILARMENTE, SE SUMAN LOS ABATIMIENTOS. DE LOS POZOS DE BOMBEO UBICADOS A MENOS DE 800 M DE DISTANCIA

Datos de aforo disponibles. Bombeo individual

Pozo	Prof., m	Fecha	Nivel, m		Q _{MAX} , lps	q, lps/m	Observación
			Estático	Dinámico			
4	270/450	?	73.5	123	86	1.7	Aforos individuales, no representan el caudal de extracción óptimo recomendable en bombeo colectivo, de menor intensidad
6	250	?	52.42	57.71	109.7	20.7	
14	392.5	Enero, 2010	60	98.81	73.23	1.9	
19	247.22	Dic., 2013	54.78	128.08	34.14	0.5	
		Prom.	60.2	101.9	75.8	6.2	

Se selecciona 1.0 lps/m de caudal específico promedio, representativo, a considerar en el diseño de pozos del campo Tláhuac, de geometría lineal.

Profundidad de proyecto de pozos de reposición, PPT

Está fundamentada en la información disponible relativa a la investigación geoelectrónica, de registros eléctricos y de la terminación constructiva de algunos de los pozos de la batería Tláhuac de CNA.

Se pretenden pozos de alto rendimiento, máxima eficiencia y producción razonable en el contexto de la operación simultánea del campo, extrayendo agua libre de azolve, congruente con la capacidad del acuífero.

Los pozos actuales tienen de 160 a 405 m de profundidad.

Los resultados geofísicos, el análisis lito-estratigráfico estructural, la interpretación de registros eléctricos y la posición de niveles de bombeo de los aforos del pozo 19, 6 y 4, revelan que las zonas acuíferas potencialmente productoras se encuentran en la parte intermedia inferior de la profundidad conocida, en la secuencia volcánica de naturaleza basáltica, del cuaternario; de este modo, los pozos de reposición de proyecto pueden tener entre 300 y 350 de profundidad media.

Para fines de diseño se selecciona la segunda.

$$PPT = 350m$$

La perforación exploratoria determina la profundidad y el dimensionamiento últimos.

Diámetro de perforación exploratoria, ϕPE

En los pozos profundos como los de proyecto es más práctico desde el punto de vista constructivo explorar en 12 ¼" de diámetro nominal, además de que se pueden utilizar estabilizadores de mayor peso en la sarta de perforación lo que ayuda a la alineación y verticalidad del pozo.

$$\phi PE = 12 \frac{1}{4}''$$

Diámetro de ademe, ϕAD

$$\phi AD = \phi EXT_{MAX-NOM}(B) + HR = 8 + 8 \approx 16''$$

Debe ser suficientemente grande y resistente para asegurar e instalar la bomba con la holgura y certidumbre adecuada para su operación eficiente y para evitar que la velocidad ascendente del agua en su interior rebase 1.5 m/s, y 3 cm/s la del flujo a la entrada de la rejilla, minimizando las pérdidas por fricción.

$$\phi AD = 16'' \times \frac{3}{8}''$$

Más adelante se justifica estructuralmente, con base en la teoría de la elasticidad, el espesor mínimo recomendado, de 3/8" o 7/16", en función de su diámetro, longitud y clase de acero, así como de su excentricidad y reducción de espesor admisibles.

$\phi EXT_{MAX-NOM}(B)$, es el diámetro nominal exterior máximo de la bomba seleccionada para el rendimiento esperado, [plg].

Las dimensiones de la bomba, en particular su diámetro, es el factor que controla el tamaño del ademe; en pozos profundos, idealmente, debe ser 2 a 3 veces más grande que el diámetro nominal máximo de la bomba.

Por la notable profundidad, las grandes y robustas columnas de bombeo, la extracción ininterrumpida y la eventual instalación de dispositivos desarenadores en los pozos de la batería Tláhuac, la holgura recomendada, HR , es ≈ 3 [plg].

El diámetro interior efectivo del ademe de 16" nominal, para 3/8" de espesor, ID , es 15 1/4", lo que resalta la importancia de cumplir la tolerancia de verticalidad en los pozos de proyecto.

Diámetro de perforación de ampliación para colocación de ademe, ϕAA

Tiene que ver con o depende del espacio anular recomendable para la adecuada colocación del filtro de grava, EFG .

Aquel debe ser amplio y suficiente para que el acomodo de éste resulte práctico, uniforme y eficaz, asegurando la completa envoltura del cedazo por el filtro, de manera que se impida el puenteo, la producción de sedimento, el desgaste prematuro de la bomba y un elevado costo de operación y mantenimiento.

El diseño de la gradación del filtro es factor crítico en la terminación eficiente constructiva de pozos; se basa en la retención mecánica de partículas de las capas acuíferas de textura más fina susceptibles de aprovechar, más que en el grosor del espacio anular; la experiencia de campo recomienda al menos:

$$EFG \geq 3" \rightarrow 4"$$

En pozos profundos eficientes, como los que nos ocupan, y por razones constructivas de instalación, se propone $EFG = 3''$.

$$\phi_{AA} = \phi_{AD} + 2 * EFG = 16'' + 2 * 3'' = 22''$$

Diámetro de contra-ademe, ϕ_{CA}

De acuerdo con la normas NOM-004-CNA-1996 y NOM-014-SSA1-1993, apartado 4.8 contra-ademe: "tubería, generalmente de acero al carbón ASTM A-53, Gr B, utilizada en la ampliación de la parte superior de pozos, cuya función es evitar derrumbes y entrada de agua superficial que dañen y contaminen al acuífero", debe ser instalado un casquillo sanitario adecuado.

Por razones de economía, se puede dejar 1" mínima de escalón entre la perforación de ampliación ϕ_{AA} , de 22", y la base del tramo cementado, para apuntalar el contra-ademe, resultando entonces de:

$$\phi_{CA} = 24'' \times \frac{1}{2}''$$

Su diámetro interior, ID , es 23".

Igual que para el diámetro de ademe, más adelante se comprueba estructuralmente el espesor mínimo recomendado, de 5/16", 3/8" o 7/16".

Diámetro de perforación de ampliación para colocación de contra-ademe, ϕ_{PCA}

Bajo el mismo criterio que para la colocación del filtro, la cementación debe también ser aplicada en un espacio anular capaz de garantizar la completa impermeabilización del casquillo.

Se asume convenientemente proporcionada la lechada cemento–arena–agua.

El espacio anular mínimo recomendable, EAR , es 3",

$$\phi_{PCA} = \phi_{CA} + 2 * EAR = 24 + 2 * 3 = 30''$$

Longitud de contra-ademe, LCA

Es mayor o igual que el *grosor del acuitardo contaminado, GPAD*, cuya interacción natural e inmediata con el acuífero subyacente a través del espacio anular del filtro permeable es preciso cancelar.

$$LCA \geq GPDA$$

Pozo de proy.	Espesor acuífero captado, b_{EF} , [m]	Coordenadas X, Y, del tramo en el que aplica el diseño		Diseño representativo entre los pozos existentes	Grosor promedio de acuitardo discretizado por tramos, $GPAD^*$, [m]	$LCA \geq GPAD$, [m]
		Inicio	Final			
PPT1	249.68	(0, 2148)	- (2800, 2148)	PET1 - PET6	92	120
PPT2	227.33	(2800, 2116)	- (3800, 2116)	PET6 - PET8	124	150
PPT3	256.93	(3800, 2145)	- (6300, 2145)	PET8 - PET15	95	120
PPT4	175.82	(6300, 2030)	- (7000, 2030)	PET15 - PET17	210	250 ¹
PPT5	228.94	(7050, 2116)	- (7800, 2116)	PET17 - PET19	124	150
PPT6	193.19	(7800, 2080)	- (8500, 2080)	PET19 -	160	200 ¹

$$\bar{X} \quad 191$$

*, corresponde al largo mínimo del contra-ademe, LCA , para sellar e impedir la conexión con el agua salobre contaminada del acuitardo a través del filtro del espacio anular de los pozos de proyecto

¹, Se encuentra agua contaminada por debajo del piso inferido del acuitardo; por tanto, se decide alargar $LCA > GPAD$ como protección adicional del acuífero subyacente; pero, por otra parte, ΔP se incrementa, condición que debe ser tomada en cuenta en la selección del espesor de la pared de la tubería del contra-ademe

La sección hidrogeológica ilustra la *terminación esquemática estandarizada* de los pozos de proyecto; el trazo continuo negro simboliza el contra-ademe y/o, en cada caso, el largo mínimo de la cámara de bombeo, $LCAB$, o del contra-ademe, LCA , cuando $LCA \geq LCAB$.

Calculadas las variables principales involucradas en el diseño, se presentan las figuras y los planos de los pozos tipo formando parte del informe.

Se insiste sobre la necesidad de ajustar el proyecto definitivo al término de la fase exploratoria, derivado del análisis de los datos de bitácora, del corte

litológico y del registro eléctrico de cada pozo, para lograr obras exitosas eficientes.

Los largos de contra-ademe, *LCA*, quedan:

Pozo de proy.	$LCA \geq GPAD$, [m]
PPT1	120
PPT2	150
PPT3	120
PPT4	250 ¹
PPT5	150
PPT6	200 ¹

¹, Análisis químicos recientes del IMTA (2016) revelan presencia de agua contaminada por debajo del piso inferido del acuitardo; por tanto, en PPT4 y PPT6 se decide alargar $LCA > GPAD$ como protección adicional del acuífero subyacente.

Por otra parte, ΔP se incrementa, condición que debe ser tomada en cuenta en el análisis estructural al seleccionar el espesor de la pared de la tubería de contra-ademe.

Longitud de ademe liso, *LAL*

Aparentemente existe artesianismo no brotante en el nivel piezométrico de los pozos actuales, a cotas superiores que las del piso del acuitardo superior, y parece ser que éste y los niveles de bombeo aproximadamente coinciden, excepto en los tramos de influencia de PPT4, PPT5 y PPT6, donde aún podría prevalecer flujo confinado.

Independientemente de cual sea la condición piezométrica, el largo de ademe liso, LAL , está subordinado al de la cámara de bombeo, $LCAB$, o al grosor del acuitardo, $GPAD$, o a la longitud del contra-ademe, LCA , cualquiera resulte la dimensión mayor.

$$LAL > PNE$$

$$LAL \approx b' (GPAD) \text{ o } \approx LCAB$$

$$LAL = LCA, \quad \text{si } LCA > LCAB$$

Se elige la dimensión mayor según corresponda en cada pozo de proyecto.

PNE , es la profundidad media del nivel estático; b' , el espesor medio del acuitardo; $LCAB$, la longitud de la cámara de bombeo.

En tramos discretos regulares de $GPAD$, LAL resulta:

Pozo de proy.	Grosor promedio de acuitardo discretizado por tramos, $GPAD^*$, [m]	$LAL \equiv LCAB$, O $LAL \equiv LCA$, O $LAL \equiv LCA$ [m] **
PPT1	92	150
PPT2	124	150
PPT3	95	150
PPT4	210	250
PPT5	124	150
PPT6	160	200

*, Corresponde al largo mínimo de contra-ademe, LCA , para sellar la conexión con el agua salobre contaminada del acuitardo a través del filtro del espacio anular de los pozos de proyecto.

**, $LAL = LCAB$ si $LCAB > GPAD$, o viceversa; o $LAL = LCA$, si $LCA > GPAD$

En el apartado de longitud de cedazo, *LCE*, se hace referencia al largo de la cámara de bombeo, *LCAB*.

Diámetro, longitud, tipo y abertura de ranura de cedazo, ϕCE , *LCE*, *TRA*, *bCE*

Porque la turbulencia que genera el bombeo promueve la corrosión e incrustación en las ranuras del cedazo, aunque es práctica común, no se recomienda colocar la bomba frente a la zona filtrante de la rejilla del pozo, principalmente si éste es de alta capacidad y se encuentra en operación constante.

Diámetro de cedazo, ϕCE

El diámetro de ademe y rejilla, ϕAD y ϕCE , debe ser seleccionado cuidadosa y eficazmente ya que afecta de manera significativa los costos de construcción y el desempeño hidráulico del pozo.

Cabría utilizar menor diámetro de cedazo para la porción filtrante que el dimensionado para el ademe liso de la cámara de bombeo, de 16" nominal; pero, desde el punto de vista práctico, su reducción solo puede quedar dentro de estrechos límites para no perder área de filtración ni eficiencia hidráulica.

De este modo, el diseño propone, por simplificación constructiva y por razones hidráulicas –minimizar la fricción, la incrustación, el abatimiento y la carga de bombeo–, sección prismática constante en toda la profundidad del pozo de proyecto; en resumen, se recomienda emplear igual diámetro de ademe y rejilla.

Así,

$$\phi CE = \phi AD = 16"$$

Su espesor se determina del análisis estructural, presentado más adelante.

Longitud de cedazo, *LCE*

En este proyecto es función de *GPAD*, *LCAB* o *LCA*

$$LCE = f(GPAD \& LCAB \& LCA)$$

Los cambios de diámetro de cedazo tienen menor impacto en el rendimiento del pozo, es más sensible el largo de la zona filtrante, uno y otra no guardan relación lineal.

El largo del cedazo depende del espesor saturado, abatimiento disponible y de la textura, estratificación y estructura del acuífero; en general, se busca aprovechar los horizontes más permeables y productores de agua dulce.

Tanto el largo de la cámara de bombeo, *LCAB*, cómo el grosor del acuitardo, *GPAD*, son factores dimensionales que en cierta forma también determinan la posición, distribución y longitud de la rejilla de los pozos; se selecciona la condición más desfavorable prevaleciente en cada diseño:

$$LCE = PPT - LCAB$$

O

$$LCE = PPT - GPAD$$

Si

$$GPAD > LCAB$$

O

$$LCE = LCA \quad \text{si} \quad LCA > GPAD$$

GPAD ya se conoce, entonces se precisa calcular la longitud de la cámara de bombeo, *LCAB*.

De los datos piezométricos e hidráulicos recabados *LCAB* se estima de 150 m, constante para los seis diseños estandarizados.

LCE queda:

Pozo de proy.	Grosor promedio de acuitardo discretizado por tramos, $GPAD^*$, [m]	$LAL \equiv LCAB$, O $LAL \equiv LCA$, O $LAL \equiv LCA$ [m] **	$LCAB$, [m]	LCE , [m]	PPT , [m]
PPT1	92	150	150	200	350
PPT2	124	150	150	200	350
PPT3	95	150	150	200	350
PPT4	210	250	150	100	350
PPT5	124	150	150	200	350
PPT6	160	200	150	150	350

** , $LAL = LCAB$ si $LCAB > GPAD$, o viceversa; o $LAL = LCA$, si $LCA > GPAD$

Tipo y abertura de ranura de cedazo, *TRA*, *bCE*

Las rejillas de mayor eficiencia hidráulica fabricadas en México son tipo puente, también llamadas de ranura sobresaliente o canastilla, están hechas de acero al carbón bajo las normas Carbon Steel Screen y Norma Mexicana para tubo ranurado NMX-B-050.

Son ampliamente conocidas y utilizadas y no se necesita mayor explicación.

TRA = Tipo puente (canastilla)

De línea se manufacturan clase I, II y III, de 1.5, 2.5 y 3.2 mm de abertura de ranura vertical y en traslape longitudinal, de 6.5 cm de largo estándar.

Por los antecedentes “areneros” de los pozos, se sugiere el cedazo de ranura tipo I (0.060” o #60):

$$bCE = 1.522 \text{ mm}$$

Bajo pedido especial se puede solicitar a Tubería Laguna la fabricación de rejilla de ranura #30 ($bCE = 0.75 \text{ mm}$), factible de usar siempre que disponga de suficiente área de filtración para mantener la velocidad de acceso del agua a no más de 3 cm/s.

El diseño final del filtro se realiza después de la etapa exploratoria; se dimensiona con base en análisis granulométricos de los materiales acuíferos de textura más fina susceptibles de explotar.

El ancho de ranura de rejilla, en rigor, se fija de la granulometría del filtro.

El filtro debe cumplir los requerimientos dimensionales y químicos exigidos de norma.

Revisión de la velocidad de entrada del agua al cedazo, *v*,

El cuadro de abajo muestra el área unitaria de filtración para cada tamaño de ranura tipo canastilla.

La tipo I tiene área de filtración, de

$$a = 697 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Diámetro Nominal / Nominal Diameter	Área de Infiltración / Infiltration area					
	Abertura / Slot size					
	I		II		III	
	cm ² /m	in ² /ft	cm ² /m	in ² /ft	cm ² /m	in ² /ft
8"	443	20.93	739	34.91	946	44.69
10"	542	25.61	903	42.66	1156	54.61
12"	542	25.61	903	42.66	1156	54.61
14"	542	25.61	903	42.66	1156	54.61
16"	697	32.93	1161	54.85	1486	70.20
18"	813	38.41	1355	64.02	1734	81.92
20"	891	42.09	1484	70.11	1899	89.72

a , área de filtración unitaria para 16" de diámetro de rejilla tipo I (especificación del fabricante).

De cada pozo de proyecto propuesto se muestra la longitud de cedazo LCE , el área perimetral de filtración unitaria y total, a_{PU} y APT , el porcentaje y la cantidad de área abierta de rejilla o filtración %AAC y CAA y la velocidad de acceso del agua v , para cada tamaño de ranura.

Pozo de proy.	LCE , [m]	a_{PU} , [cm ² /m]	APT , [cm ²]	%AAC			CAA, [m ²]			v , [cm/s]		
				I	II	III	I	II	III	I	II	III
PPT1	200	12767.46	2553492.48	5.46	9.09	11.64	13.94	23.22	29.72	0.25	0.15	0.12
PPT2	200	12767.46	2553492.48	5.46	9.09	11.64	13.94	23.22	29.72	0.25	0.15	0.12
PPT3	200	12767.46	2553492.48	5.46	9.09	11.64	13.94	23.22	29.72	0.25	0.15	0.12
PPT4	100	12767.46	1276746.24	5.46	9.09	11.64	6.97	11.61	14.86	0.50	0.30	0.24
PPT5	200	12767.46	2553492.48	5.46	9.09	11.64	13.94	23.22	29.72	0.25	0.15	0.12
PPT6	150	12767.46	1915119.36	5.46	9.09	11.64	10.46	17.42	22.29	0.33	0.20	0.16

El %AAC representa el porcentaje de superficie exterior libre de rejilla frente al acuífero, la clase I y II resultan inferiores al rendimiento específico S_Y , estimado en 12%, la abertura tipo III es la que mejor cumple porque su $\%AAC \cong S_Y$, situación deseable para optimizar el desempeño hidráulico del pozo al evitar la concentración de las líneas de corriente.

Por la notable longitud de cedazo LCE , establecida para cada diseño, cualquiera de las tres aberturas tipo canastilla fabricada en México cumple con mucho la desigualdad de diseño $v \ll v_D$.

Los pozos de la batería Tláhuac que fueron inspeccionados el 17 de agosto de 2016 están equipados con motobomba sumergible, y se entiende de los comentarios vertidos por el personal operario y supervisor de Conagua van a seguir utilizando este mismo tipo de bomba.

En sus orígenes los pozos fueron equipados con bombas verticales tipo turbina.

Requerimientos de resistencia del ademe liso y cedazo

El espesor de la tubería de ademe y cedazo necesita ser suficientemente grande para soportar la presión hidrostática, de la cementación y de la formación rocosa acuífera, la cual se ejerce durante la instalación, el desarrollo y el uso posterior del pozo; *particularmente, la resistencia debe considerar la agresividad corrosiva que tiene el agua subterránea que carcome y debilita el metal.*

La resistencia al colapso se obtiene de las ecuaciones de Timoshenko derivadas de la teoría de la elasticidad,

Por imperfecciones en la manufactura, se admite $\leq 1\%$ la excentricidad u ovalamiento entre los diámetros interior y exterior del tubo y $\leq 12.5\%$ la reducción del espesor del ademe.

Para acero, el módulo de elasticidad de Thomas Young, E , y el coeficiente de Simeon Poisson, u , es $3.00E07$ psi y 0.28 , respectivamente.

Su esfuerzo de fluencia Y_p o límite elástico es 35000 psi o 244000 kPa; 70000 psi o 413.7 MPa es la resistencia a la tensión última, St .

El factor de seguridad FS debe quedar entre

$$1.25 \leq FS \leq 1.50$$

En tubos 100% redondos la presión de colapso P_{cr} , es:

$$P_{cr} = \frac{1.04 E}{(1 - u^2) \cdot \left(\frac{D}{t} - 1\right)^3}$$

D es el diámetro nominal exterior y t el espesor del ademe.

Analizando espesores de $5/16"$, $3/8"$, $7/16"$ y $1/2"$, se obtienen valores de P_{cr} .

E, [psi]	u	D, [plg]	t, [plg]			
		16	5/16"	3/8"	7/16"	1/2"
			0.3125	0.375	0.4375	0.5000
		D, [cm]	t, [cm]			
40.64			0.7938	0.9525	1.1113	1.2700
			$\frac{D}{t}$			
			51.197	42.667	36.570	32.000
			P_{cr} , [psi]			
3.00E+07	0.28	40.64	267.7	468.0	752.3	1136.4

Por ejemplo, la presión de colapso teórica P_{cr} en el ademe de 16" *disminuye* 27%! tan solo con reducirse 12.5%. Como tolerancia máxima admisible, el espesor estándar de 3/8" o 0.375 plg a 0.3281 plg; baja de 468 psi a 187.3 psi. Este último valor dividido por un FS = 1.5 da 226 psi, que representa la presión de trabajo máxima de la tubería de ademe. Aproximadamente se mantiene la relación $P_{cr} \sim t^3$.

La excentricidad e es la distancia entre los centros del diámetro exterior e interior del ademe en sección transversal, no debe rebasar 1%, se establece en % del espesor de pared nominal; considerando este efecto la ecuación queda:

$$Pd^2 - \left\{ \frac{2Y_p}{\left(\frac{D}{t} - 1\right)} + \left[1 + 3 \left(\frac{D}{t} - 1 \right) e \right] P_{cr} \right\} Pd + \frac{2Y_p P_{cr}}{\left(\frac{D}{t} - 1\right)} = 0$$

Pd es la resistencia de colapso de diseño, en [psi] o [kPa].

Las presiones diferenciales y las tolerancias de fabricación deben ser revisadas cuidadosamente.

Resolviendo por tanteos la ecuación cuadrática anterior se obtienen los valores de Pd , resistencia de colapso de diseño, en unidades [psi].

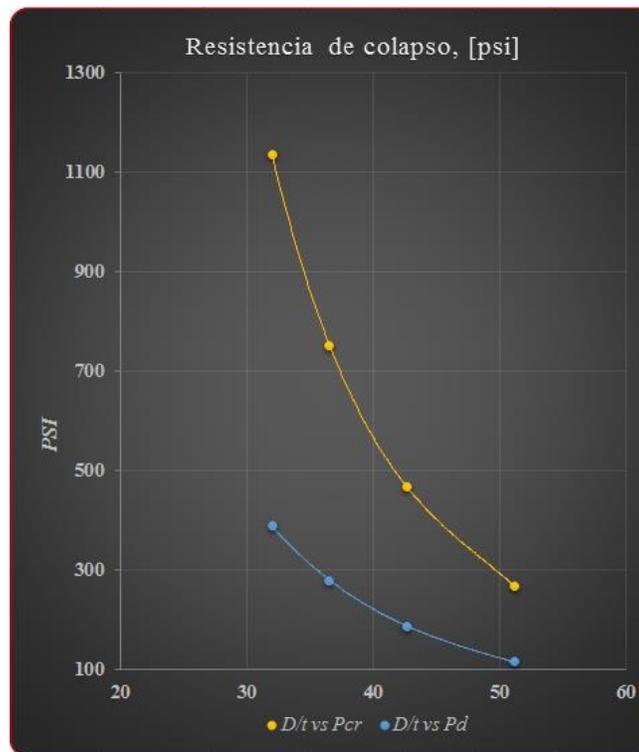
Y_p , [psi]	e , %	$t_R \leq t_S \leq 12.5\%$	t , [plg]			
			5/16"	3/8"	7/16"	1/2"
			0.3125	0.375	0.4375	0.5000
			t , [cm]			
			0.7938	0.9525	1.1113	1.2700
			$\frac{D}{t}$			
			51.197	42.667	36.570	32.000
			P_{cr} , [psi]			
			267.7	468.0	752.3	1136.4
Pd , [psi]						
35000	1%	12.5%	114.42	187.29	279.27	388.42
		1% t , [cm]	0.007938	0.009525	0.011113	0.0127

La representación gráfica de D/t vs P_{cr} y D/t vs P_d , línea anaranjada y azul, respectivamente, se muestra en la figura de abajo.

La ecuación de ambos gráficos, en realidad, se ajusta perfectamente a sendos polinomios de orden 3 con coeficiente de correlación r de 1.

Lo que se intenta resaltar, más que los valores de presión de falla, que por sí mismos son esenciales, es la fuerte pérdida de la resistencia de colapso de diseño cuando disminuye el espesor estándar de la pared del ademe y la excentricidad es importante.

En conclusión, la resistencia estructural fundamentalmente es función del grosor y redondez del tubo.



El exceso de presión diferencial por la densidad del fluido de perforación y de la lechada cementante es parte del cálculo de cargas; no obstante, la posibilidad de ocurrir un colapso podría ser disminuida porque el interior del ademe casi siempre tiene fluido.

Por otro lado, no tomar en cuenta la tolerancia mínima de reducción de espesor de la pared del tubo en la resistencia de falla, indicada por el fabricante, puede ocasionar la falla o el pronto deterioro de la estructura del pozo, con la consiguiente afectación de su vida productiva.

Por la naturaleza elasto-plástica del acuitardo sobreyacente de textura arcillo limosa, se incluye, como medida razonable precautoria, una sobrepresión de 1.0 psi/ft o 23 kPa/m de profundidad.

Esfuerzos dinámicos por movimientos súbitos debido a temblores, cavidades y subsidencia del terreno, o prácticas de desarrollo descuidadas o inapropiadas, pueden resultar en fuerzas de colapso mucho más grandes.

La presión hidrostática ejercida por agua dulce, en promedio, es 0.433 psi/ft o 3 kPa/m.

La presión hidrostática en el fondo de los pozos de proyecto se calcula como:

en el SI de unidades	$P = h \cdot 9.77 \text{ kPa/m}$
----------------------	----------------------------------

P	=	presión del fluido en profundidad, [psi] o [kPa]		
h	=	altura de fluido estático desde el fondo del pozo, [ft] o [m]		
0.433 / 3	=	gradiente de presión para agua dulce, [psi/ft] o [kPa/m]		

Si los niveles de agua dentro y fuera del ademe son iguales entonces las presiones hidrostáticas se compensan; sin embargo, usualmente, durante la cementación o el desarrollo, los niveles de fluido son diferentes y el espacio anular contiene cemento o lodo de perforación. Esta diferencia de niveles y la densidad más grande de los fluidos del espacio anular crea la presión diferencial, ΔP .

La densidad del fluido de perforación es 9 a 10 lb/gal o 1 a 1.2 kg/l, y la de la lechada de cemento, hasta 15 lb/gal o 1.8 kg/l.

La siguiente ecuación hace el ajuste considerando la densidad de los fluidos.

$$\Delta P = (H - h) \cdot 0.433 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \cdot \left(\frac{\rho_o}{\rho_w} \right)$$

ΔP	presión diferencial ejercida sobre el ademe o contra-ademe, [psi] o [kPa]		
H	altura del fluido fuera del ademe desde la profundidad total (desde el fondo), [ft] o [m]		
h	altura de fluido estático desde el fondo (y dentro) del pozo, [ft] o [m]		
ρ_o	densidad del fluido fuera del ademe, [lb/gal] o [kPa/m]		
ρ_w	8.33 lb/gal , o	1 kg/l,	densidad del agua dulce, [lb/gal] o [kPa/m]

Las magnitudes promedio de las variables involucradas en la ecuación anterior, en el sistema anglosajón de unidades, son:

NE	66 [m]	216.54 [ft]			
PPT	350 [m]	1148.29 [ft]			
ρ_c	13.5 [lb/gal]	1.60 [kg/l]	densidad del cemento		
ρ_w	8.33 [lb/gal]	1 [kg/l]	densidad del agua dulce		
ρ_m	10 [lb/gal]	1.2 [kg/l]	densidad del fluido de perforación		
	0.433 $\frac{\text{lb}^2}{\text{pie}}$		gradiente de presión para agua dulce		

La siguiente tabla muestra los valores esperados de ΔP , aplicada en los tramos cementados propuestos de cada pozo de proyecto.

Pozo de proy.	Espesor acuífero captado, b_{EF} , [m]	Grosor promedio de acuitardo discretizado por tramos, $GPAD^*$, [m]	$LCA \geq GPAD$, [m]	PPT, [m]	h , [m]**		ΔP [psi]
					PPT-PNE	PPT-LCA	
PPT1	249.68	92	120	350	284	230	276.28
PPT2	227.33	124	150	350	284	200	345.34
PPT3	256.93	95	120	350	284	230	276.28
PPT4	175.82	210	250 ¹	350	284	100	575.57
PPT5	228.94	124	150	350	284	200	345.34
PPT6	193.19	160	200 ¹	350	284	150	460.46

\bar{X}

191

***, se toma la dimension menor de h y la mayor de ρ_o por representar condiciones de servicio más desfavorables

¹, Se encuentra agua contaminada por debajo del piso inferido del acuitardo; por tanto, se decide alargar $LCA > GPAD$ como protección adicional del acuífero subyacente; pero, por otra parte, ΔP se incrementa, condición que debe ser tomada en cuenta en la selección del espesor de la pared de la tubería del contra-ademe

Si la altura de la columna de fluido, h , disminuye porque se profundiza la cementación del contra-ademe, ΔP se incrementa manteniendo invariable la densidad de los fluidos.

En realidad, la presión del fluido dentro del pozo, si tiene, impartida radialmente hacia afuera del ademe, por debajo del NE, contrarresta ΔP , favoreciendo su estabilidad.

Recordemos que la resistencia de colapso en una sección circular ideal de tubo de 16" de diámetro exterior y 3/8" de pared, en medidas estándar (teóricas), es 468 psi; pero, disminuye a 187.3 psi al tomar en consideración 12.5% de adelgazamiento permisible (real) del espesor del ademe.

Bajo los niveles de esfuerzo calculados, ΔP , en última instancia, el contra-ademe podría fracturarse, combarse o incluso colapsar durante la cementación o en un corto plazo de su vida útil; la forma de abatir riesgos es hacer la cementación de forma conveniente, por intervalos.

El incremento de esfuerzos por carga estática y dinámica también puede contribuir a la falla del ademe.

Es muy importante adoptar el adecuado factor de seguridad, por ejemplo $FS \geq 25\%$, al calcular la resistencia de colapso de diseño P_{cr} en ademes de A/C implicando las tolerancias reales comunes de manufactura.

Se muestran los datos constructivos de los pozos y más abajo el proyecto de cada uno.

DATOS CONSTRUCTIVOS DE POZOS DE PROYECTO DE LA BATERÍA TLAHUAC. 2016

CONCEPTO	PPT1	PPT2	PPT3	PPT4	PPT5	PPT6
ELEVACIÓN DE TERRENO NATURAL, ETN , (msnm)	2240.00	2239.25	2238.50	2237.75	2237.00	2236.25
PROFUNDIDAD MEDIA, PPT , (m)	350	350	350	350	350	350
NIVEL ESTÁTICO PROMEDIO, PNE , (m)	66	66	66	66	66	66
NIVEL DINÁMICO PROMEDIO, PND , (m)	122	122	122	122	122	122
DIÁMETRO DE PERFORACIÓN EXPLORATORIA, ΦPE , (plg)	12	12	12	12	12	12
ESPACIO ANULAR MAX. PARA COLOCACIÓN DE FILTRO DE GRAVA, EFG , (plg)	3	3	3	3	3	3
DIÁMETRO NOM. DE PERF. DE AMPL. DE CONTRA-ADEME, ΦPCA , (plg)	30	30	30	30	30	30
DIÁMETRO / ESPESOR NOM. DE CONTRA ADEME, ΦCA , (plg)	24 x 7/16					
LONGITUD DE CONTRA-ADEME, LCA , (m)	120	150	120	250	150	200
DIÁMETRO NOM. DE PERF. DE AMPL. DE ADEME, ΦAA , (plg)	22	22	22	22	22	22
DIÁMETRO / ESPESOR NOM. DE ADEME, ΦAD , (plg)	16 x 3/8					
LONGITUD DE ADEME LISO, LAL , (m)	150	150	150	250	150	200
LONGITUD DE ADEME RANURADO CANASTILLA, T-I, $bC = 1.522$ mm, LCE , (m)	200	200	200	100	200	150
DIÁMETRO / ESPESOR NOM. DE CEDAZO, ΦCE , (plg)	16 x 3/8*	16 x 3/8				

* , espesor sujeto a disponibilidad comercial, o podría pasar espesor 5/16"

Proyecto de Pozos Tláhuac (PPT)

PPT1

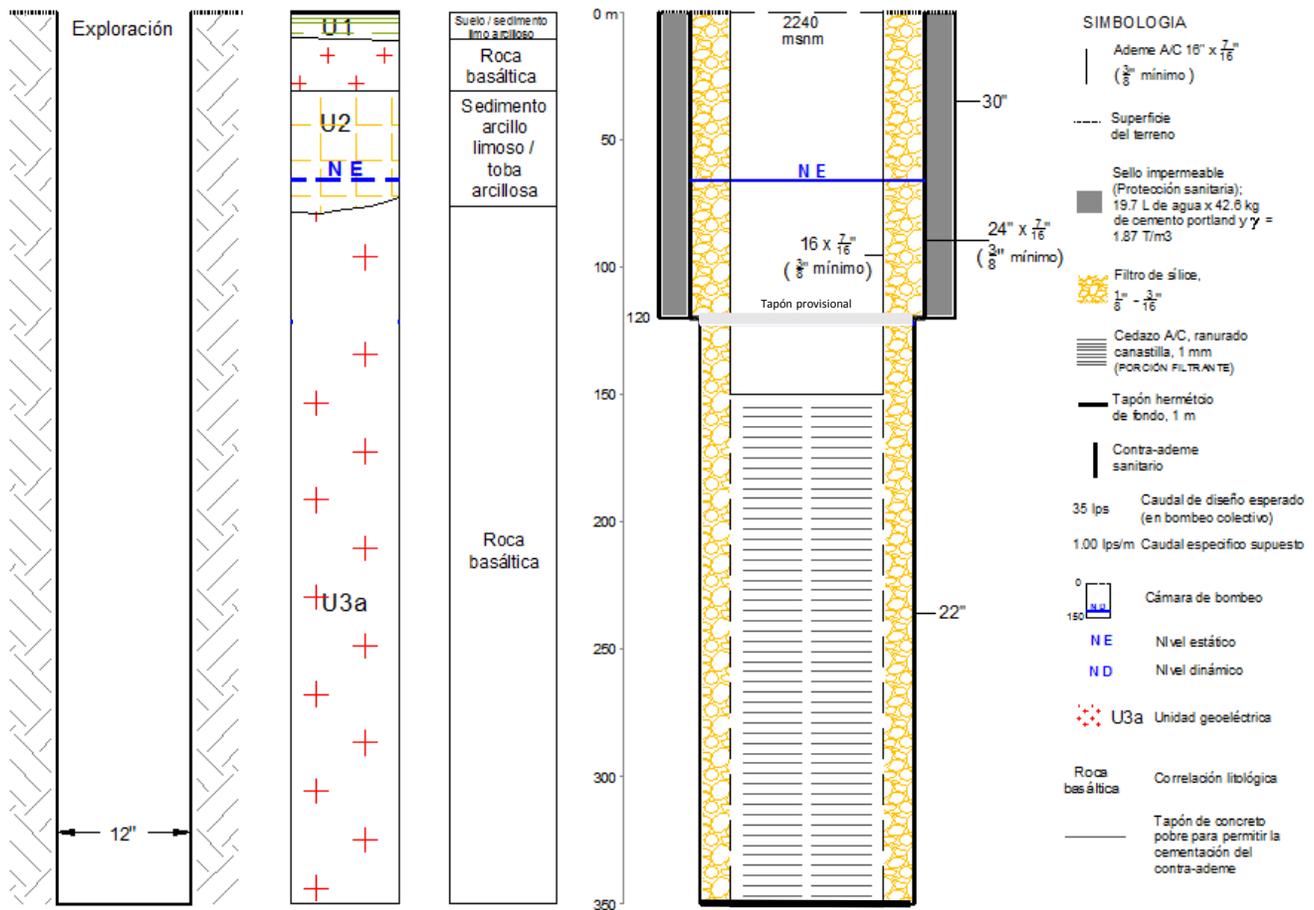


Figura 2.2.1.3 Proyecto de Pozo Tipo 1

PPT2

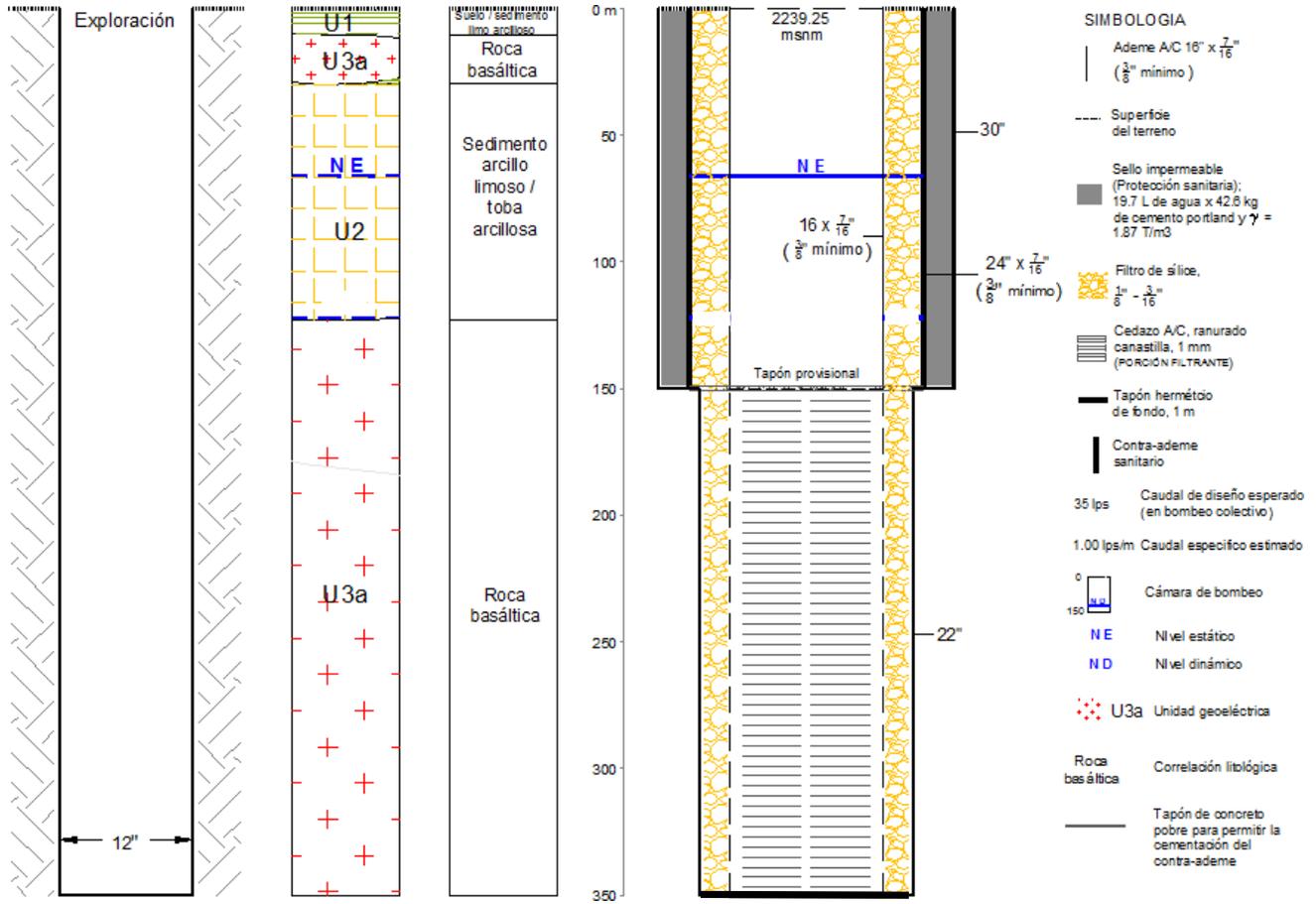


Figura 2.2.1.4 Proyecto de Pozo Tipo 2

PPT3

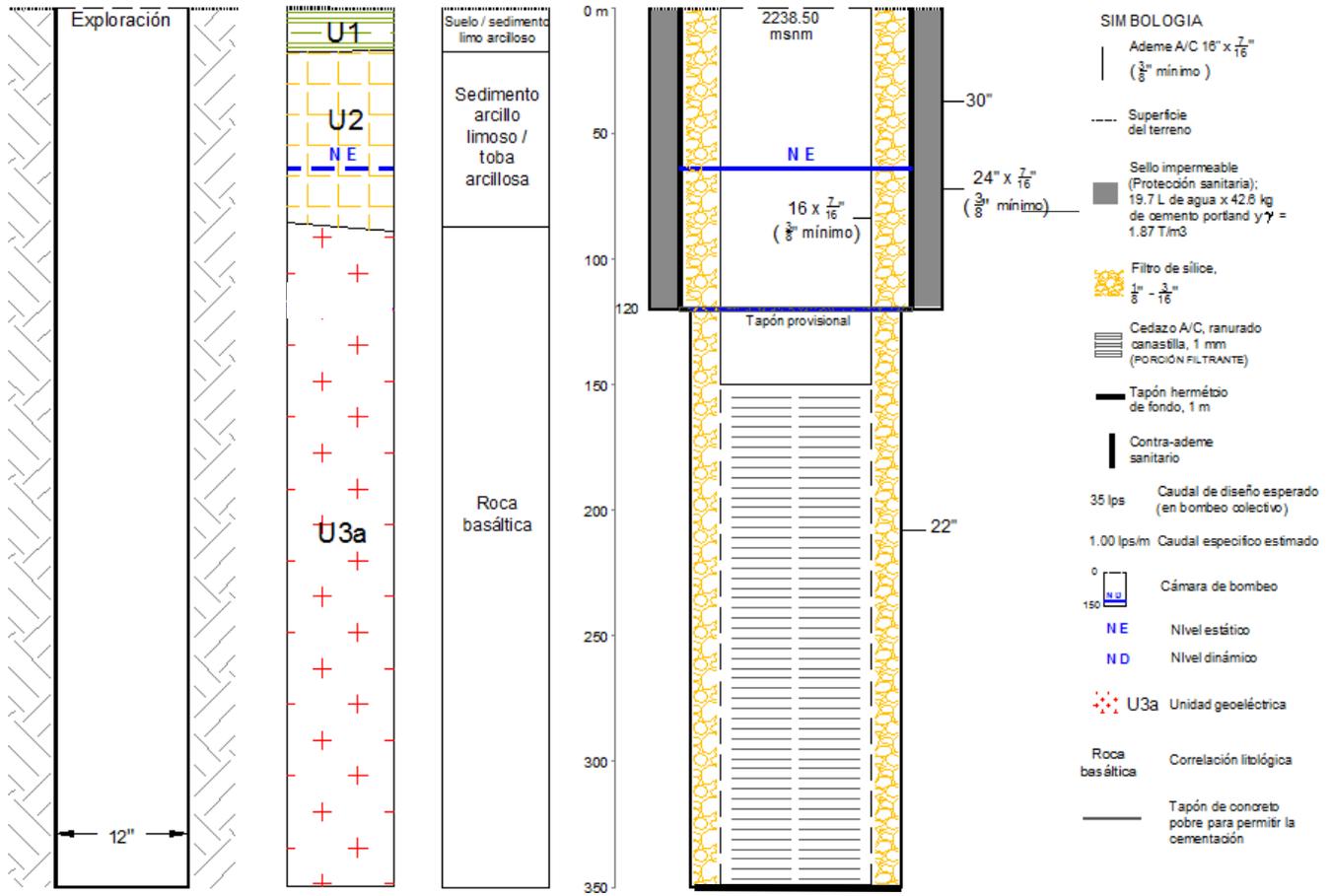


Figura 2.2.1.5 Proyecto de Pozo Tipo 3

PPT4

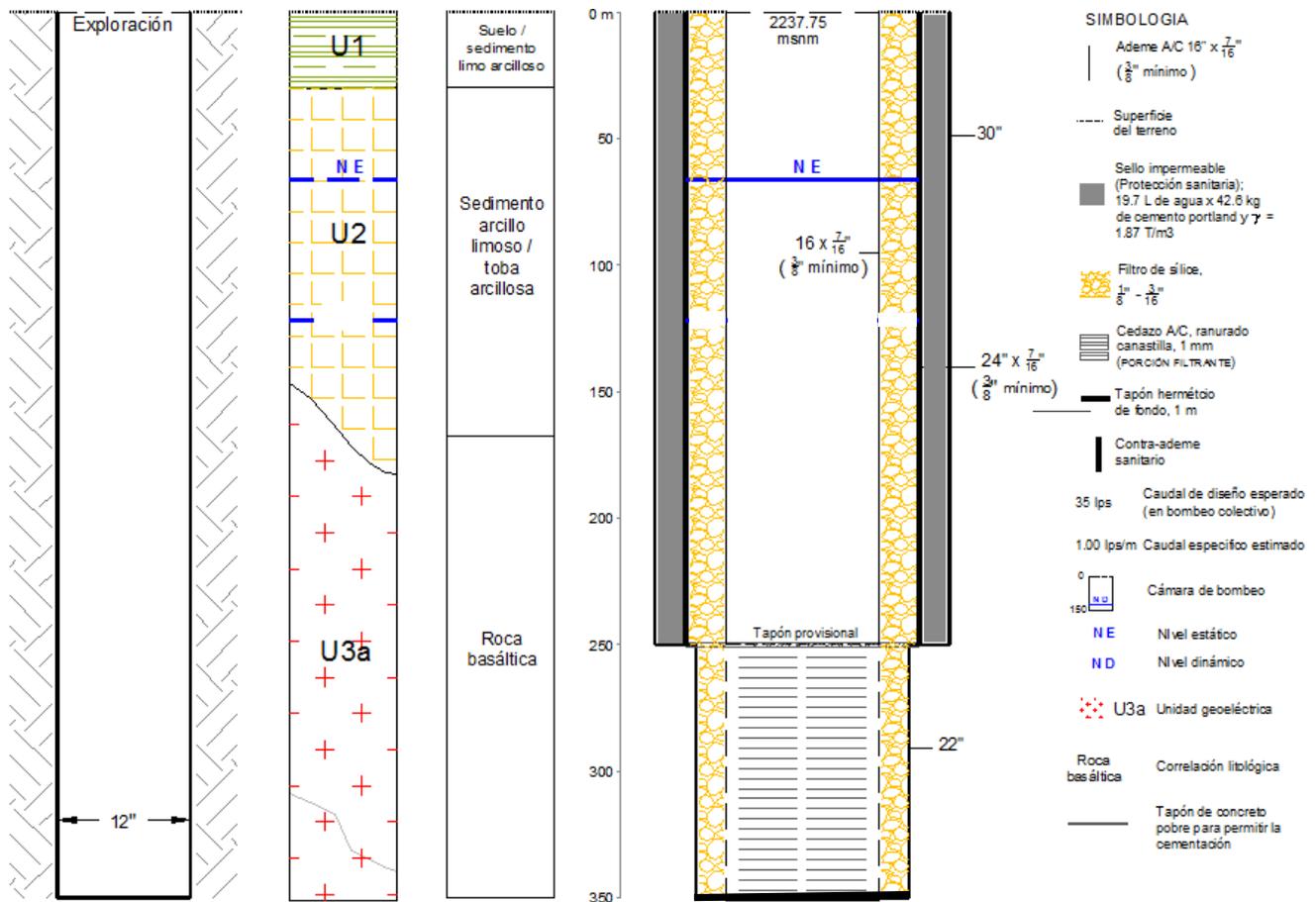


Figura 2.2.1.6 Proyecto de Pozo Tipo 4

Nota. Probablemente la longitud del contra-ademe, LCA, y de la cámara de bombeo, LCAB, se reduzca a 186 m si se interrumpe antes de 250 m de profundidad el grosor del acuitardo y la presencia de agua salobre, lo que permitiría ganar zona filtrante con flujo de agua dulce y aumentar la eficiencia y capacidad específica del pozo. En general, es deseable aprovechar el 80% de los acuíferos potentes, profundos.

PPT5

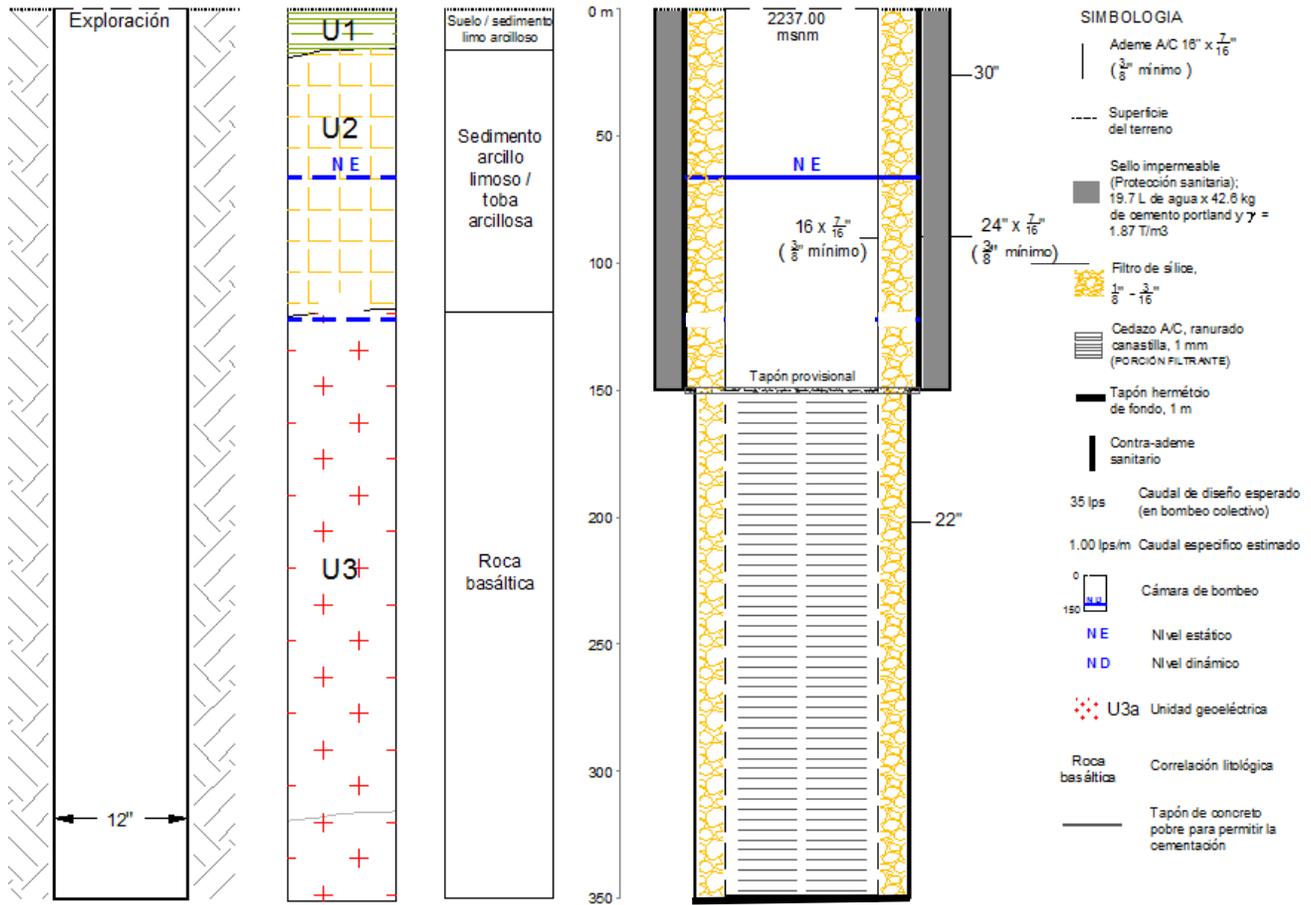


Figura 2.2.1.7 Proyecto de Pozo Tipo 5

PPT6

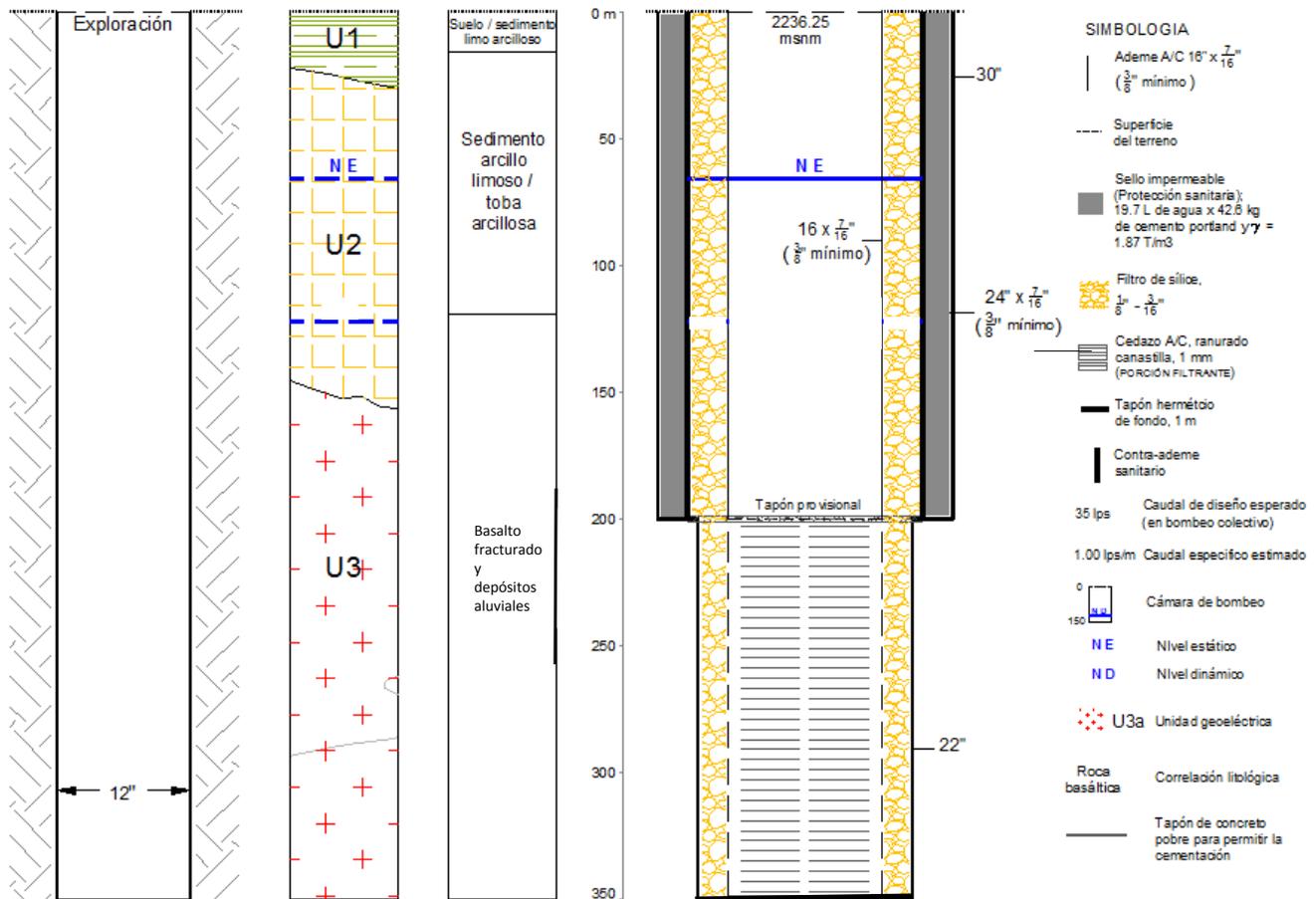


Figura 2.2.1.8 Proyecto de Pozo Tipo 6

Igual criterio usado en PPT4 aplica para PPT6 u otros en circunstancias hidrogeológicas similares: se puede reducir *LCA* y *LCAB* en la medida que se adelgace el acuitardo *GPAD* y desaparezcan las masas de agua salobre, condición que vendría a favorecer el desempeño hidráulico de los pozos siempre y cuando éstos se diseñen, construyan, desarrollen, equipen, operen y conserven de manera apropiada y permanente.

Son temas fuera del alcance de este proyecto:

- * El proceso de cementación del contra-ademe
- * La instalación de rejillas de liberación de presión diferencial
- * La descripción o las recomendaciones técnicas de instalación y soldadura para la colocación de ademes y rejilla
- * La apremiante evaluación y muy probablemente restauración de eficiencias electromecánica e hidráulica de los pozos, las cuales deben ser armónicamente interdependientes
- * La elaboración de catálogos de conceptos, presupuestos base y del programa de obra
- * El tratamiento para desinfección y prevención contra la corrosión de tuberías
- * El dimensionamiento del equipo y su encapsulado así como de la cámara y columna de bombeo
- * Y, en general, la formulación de especificaciones de los procedimientos de construcción.

Anexo

El ademe y cedazo canastilla T-I, de 14" x 3/8" de espesor mínimo (o 7/16") también resulta adecuado hidráulica y estructuralmente, aún para 45 o 50 lps de extracción, si es que el acuífero la soporta en bombeo simultáneo continuo de los pozos de la batería de CNA y SACDMEX.

Usando rejilla de 1.522 mm de abertura con 542 (725) cm²/m de área de filtración unitaria, la velocidad de acceso para 50 lps de extracción es 0.923 cm/s, mucho menor que la admisible, de 3 cm/s, aun para la zona filtrante de diseño de menor longitud, de 100 m, estimada para PPT4.

La rejilla de 14" x 3/8" (o 7/16") se puede instalar en agujero de 20" para tener 3 pulgadas nominales de espacio anular para la adecuada colocación del filtro.

El contra-ademe conveniente resulta de 22 pulgadas de diámetro y 7/16 pulgadas de espesor, y de 28 pulgadas la ampliación.

La cámara de bombeo de 14" y 13 3/8" de diámetro nominal exterior e interior acepta bombas hasta de 10" de diámetro máximo; aunque, comercialmente existen bombas sumergibles de 8" de diámetro para 50 lps o más.

La profundidad de 350 m de los pozos de proyecto no cambia.

El espesor de tubería sugerido de 5/16", 3/8" o 7/16", se determina del análisis estructural presentado, de la naturaleza corrosiva del agua y de los grandes e impredecibles esfuerzos dinámicos ocasionados por temblores y asentamientos del terreno principalmente, que en la actualidad ya se tienen y resienten.

El tiempo de servicio de los pozos debe ser amplio y de calidad, independientemente de su régimen y caudal de operación.

Tampoco se requiere ni se recomienda su sobre-dimensionamiento porque provoca disminución de área de filtración y altos e innecesarios costos constructivos, sin que además con ello se pueda asegurar o garantizar fehacientemente la duración razonable de la vida útil con niveles de eficiencia aceptables de los pozos.

Tratándose de pozos profundos como los de proyecto, es importante verificar con los fabricantes que cumplan estándares de calidad internacional las especificaciones de ademe y rejilla.

El caudal de diseño final real de cada pozo de reposición se especifica después de su prueba de aforo, preferentemente realizada en forma colectiva, de larga duración.

2.2.2 Diseño de cinco pozos del Ramal Mixquic

Introducción

Se reafirman los aspectos de diseño sobresalientes expresados en la memoria de cálculo y descriptiva de la batería de pozos Tláhuac; en general, se refieren a lograr el manejo sustentable del acuífero mediante el proyecto de pozos y la aplicación de métodos constructivos adecuados, utilizando materiales de calidad certificada –en particular la de las tuberías– y evaluando apropiadamente todos los elementos dimensionales para conservar la integridad estructural e hidráulica de dichos materiales de instalación propuestos.

Se analiza la información hidrogeológica específica de los pozos existentes de la batería Mixquic sobre las condiciones lito–estratigráficas de los acuíferos y acuitardos, la conductividad hidráulica y los espesores saturados, el coeficiente de almacenamiento y la tendencia a largo plazo de los niveles piezométricos, los análisis de mallas o granulométricos y/o sobre la identificación del tipo, grado de fracturamiento, composición mineralógica y calidad del agua de los acuíferos utilizables.

Se insiste en la necesidad de diseñar y construir captaciones eficaces que aplacen o eviten la obturación de la rejilla y la producción de arena, ya que estas condiciones de servicio indeseable restan eficiencia tanto a los pozos como a sus bombas, acortando la vida productiva de ambos.

Igualmente, la extracción de los nuevos pozos y los existentes tiene que ser regulada pensando en la preservación de los acuíferos y en la obtención de agua de buena calidad, con caudales y volúmenes de extracción individual y conjunta que impidan el abatimiento y la interferencia piezométrica inadmisibles, haciendo prevalecer condiciones de equilibrio estable entre los rendimientos de diseño esperados y la capacidad de los acuíferos.

Los costos de inversión inicial, mantenimiento y operación, asimismo, deben razonablemente quedar dentro de márgenes financieros recuperables a mediano plazo.

Hidrogeología

La figura 2.2.2.1 muestra la distribución en planta de los pozos de la batería Mixquic.

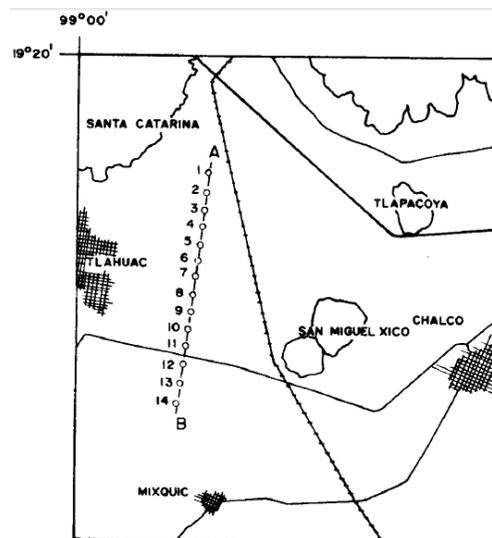


Figura 2.2.2.1

y la figura 2.2.2.2 el perfil vertical con los aspectos hidrogeológicos relevantes obtenidos de la interpretación de los cortes eléctricos y litológicos y de datos hidráulicos, piezométricos, constructivos y de calidad del agua recientes disponibles de los pozos de la batería Mixquic; los registros de resistividad y auto-potencial imprimen más confiabilidad que la descripción litológica general.

La misma sección ilustra *esquemáticamente* la posición y profundidad de cinco pozos de proyecto, con trazo grueso color negro continuo, el ademe liso, e interrumpido, la rejilla; los demás símbolos se explican abajo de la sección.

El sistema acuífero debe tener importantes reservas dinámicas y grandes dimensiones, lo que explica la gran resistencia por tiempo prolongado a su explotación local; es de tipo mult capas semiconfinado, como muestra de forma muy expresiva el pozo PM4.

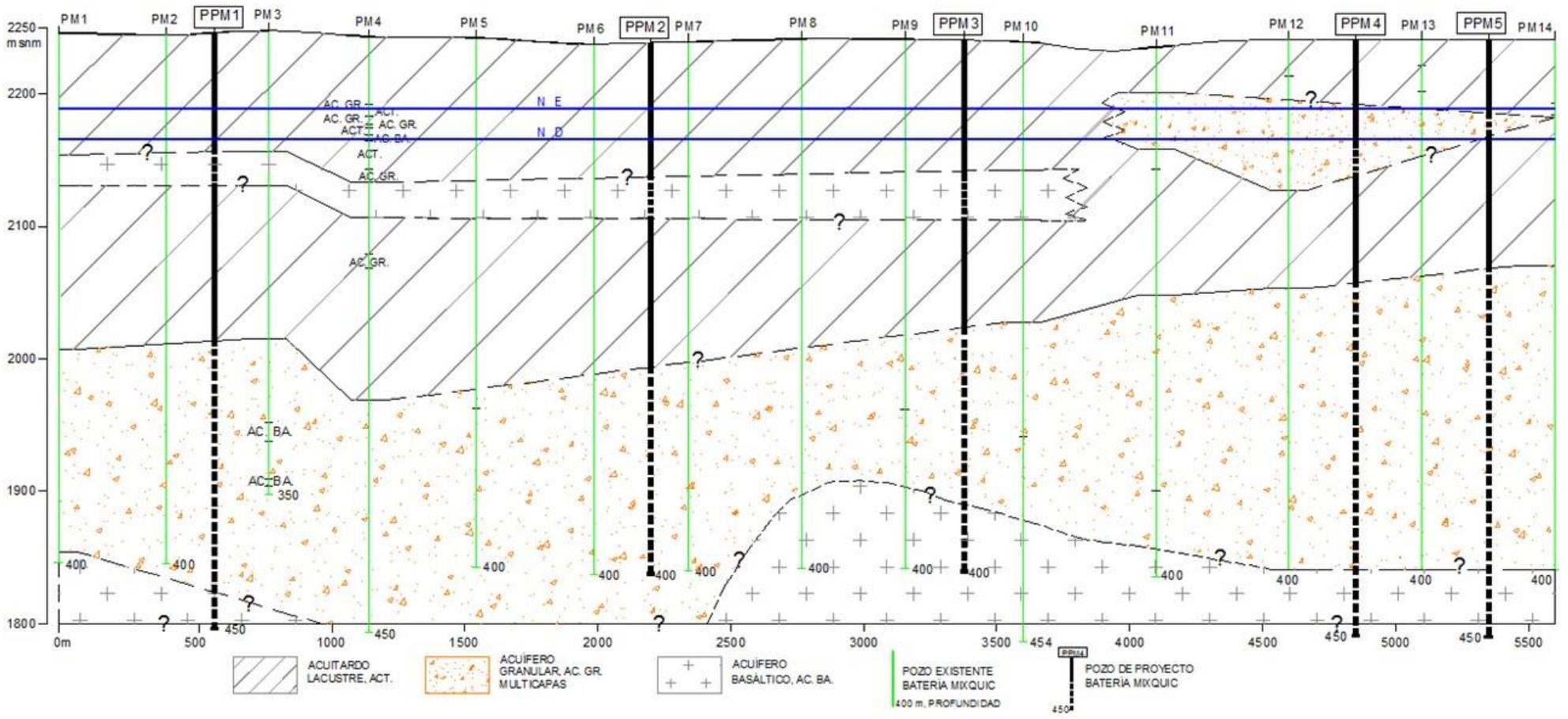


Figura 2.2.2.2 Perfil vertical a lo largo de la batería de pozos Mixquic

Los acuíferos que explotan los pozos de Mixquic están constituidos por la secuencia alternante de aluvión y material fluvial, arriba, y por depósitos lacustres finos a medios, derrames volcánicos, piroclastos, tobas, brechas y conglomerados, en la zona intermedia e inferior, del cuaternario/terciario.

El conjunto de esta enorme masa rocosa saturada, permeable, acuífera, se comporta en el entorno relativamente inmediato de cada pozo como medio granular heterogéneo, anisótropo, respecto a sus características estratigráficas e hidrológicas.

El acuífero volcánico de mayor grosor, aparentemente queda dentro de la parte central del acuitardo, entre los pozos PM1 a PM10; también se encuentra en la parte inferior de los extremos de la sección, e igual se detecta en capas delgadas en forma alternante a los largo de la profundidad conocida. Se supone de elevada conductividad hidráulica en sus irregulares superficies de contacto, aunque en realidad éste y el acuífero granular sub y sobreyacente forman un sistema de flujo multicapas, semiconfinado.

En la parte somera del perfil, a unos 40 m de profundidad media, los pozos PM11 a PM14 definen un acuífero granular colgado de unos 70 m de espesor promedio.

Hasta 200 m de profundidad en PM1, la concentración de cloruro y SDT rebasa el límite permitido para consumo humano, tramo que viene a representar el largo de contra-deme cementado mínimo, *LCA*, para evitar que el agua de buena calidad de los acuíferos más profundos se contamine.

El pozo 10 fue cementado 297 m; el pozo 5, 262 m; el pozo 11, 260 m; y el pozo 7, 259 m, distancias que en cierta medida corresponden con el desfase relativo a la parte izquierda del gráfico de auto-potencial de los registros eléctricos, indicando *cualitativamente* presencia de agua salobre.

Los pozos existentes de la batería Mixquic están separados 500 m de distancia media y tienen 350 a 450 m de profundidad donde se ha encontrado

roca basáltica con buen atributo acuífero; su caudal medio varía de 35 a 45 lps de caudal en *operación simultánea*.

Se utilizan los conceptos, la simbología y secuencia de cálculo equivalente a la de los pozos de reposición de Tláhuac.

Con fin el de construir pozos eficientes, en particular el largo del tramo de contra-ademe cementado, se recomienda conocer bien la estructura, litología y textura de los horizontes acuíferos explotables.

Datos promedio de diseño

De aforos individuales *iniciales* se obtienen los siguientes datos,

Tabla 2.2.2.1 Caudal de diseño
Aforos individuales

Pozo	\bar{Q} , lps	\bar{a} , m	q , lps/m
3	75	19.41	3.86
5	75	9.86	7.61
7	75	11.97	6.27
8	75	6.93	10.82
9	75	4.42	16.97
\bar{X}	75	12.62	9.11
ok, valor conservador de q			7.44
Q por pozo, op. simult.			45

K, m/s	5.45E-05
T, m ² /s	1.80E-02
η_{ef} , adim	1.44E-01

η_{ef} es la porosidad efectiva o rendimiento específico S_Y de los acuíferos freáticos, las otras variables son conocidas y no es necesario explicar.

Tabla 2.2.2.2 Parámetros de diseño adoptados

Parámetros promedio de diseño adoptados. Pozos de la batería Mixquic, DF	
Q_D , [lps] = 45	Caudal de diseño esperado/recomendado, individual, bombeo colectivo
q , [lps/m] = 7.44	Caudal específico estimado, INICIAL
K , [m/s] = 5.45E-05	Conductividad hidráulica horizontal
a_Q , [m] = 12.62	Abatimiento por bombeo propio, medido/estimado, mínimo
a_{PT} , [m] = 5.00	Abatimiento permisible de traslape total 40% Descensos provocados por pozos de producción ubicados a 500 m de distancia. A mayor separación menor interferencia y abatimiento entre ellos
a_T , [m] = 23	Abatimiento total en cada pozo de bombeo
PPM(1, 4, 5) 450	Profundidad de proyecto, pozos 1, 4, 5
PPM(2, 3) 400	Profundidad de proyecto, pozos 2 y 3
v , [cm/s] \leq 3	Velocidad de entrada del agua al cedazo del pozo, máxima
PNE, [m] = 57.38	Profundidad al nivel estático promedio, 2016
PND, [m] = 80.00	Profundidad al nivel dinámico promedio. Pronóstico
S_Y (I_{ef}) = 0.144	Rendimiento específico

Determinación del NE y ND de diseño

Se presentan en la tabla 2.2.3 mediciones de 2016 de nivel estático, abatimiento y nivel dinámico de algunos de los pozos de Mixquic.

Tabla 2.2.2.3 Niveles estáticos 2016

PNE, Ramal Mixquic. 2016		
Pozo	Fecha	P.N.E. (m)
1	25-may-16	62.07
5	10-jun-16	58.36
8	07-oct-16	55.82
9	12-oct-16	55.36
10	27-jun-16	55.32

NE promedio	57.38
a promedio, m	12.62
ND promedio \approx	70.00

El nivel estático representa la carga hidráulica promedio o la resultante piezométrica de la zona filtrante de los pozos relativa a las cargas individuales de cada capa acuífera captada; no necesariamente corresponde a la superficie freática del acuitardo o de los acuíferos colgados.

Ya sabemos que el ND de diseño se determina como:

$$\overline{ND} = \overline{NE} + (\overline{a_Q} + 2\overline{a_{PT}}) =$$

$$\overline{ND} = 57.38 + 12.62 + (2 \times 5.00) = 80.00 \text{ m}$$

Tramo de validez y profundidad de proyecto de pozos de reposición, PPM

La tabla 2.2.4 siguiente muestra la profundidad de proyecto y los intervalos del dominio donde aplica cada uno.

Tabla 2.2.2.4. Profundidad de proyecto e intervalos de dominio

POZO DE PROYECTO	VÁLIDO ENTRE	PROF. DE PROY., m
PPM1	PM1 - PM3	450
PPM2	PM3 - PM8	400
PPM3	PM8 - PM10	400
PPM4	PM10 - PM13	450
PPM5	PM13 - PM14	450

Más adelante se presenta su terminación constructiva específica detallada, derivada del cálculo de las variables de diseño involucradas.

A las profundidades perforadas, se explicó, se han encontrado rocas acuíferas con flujos importantes de agua dulce, sobre todo en el contacto irregular de las coladas volcánicas con material sedimentario. Tal parece, la secuencia acuífera volcánica/lacustre continúa a mayor profundidad de la explorada; así,

$$PPM\ 1 = PPM4 = PM5 = 450m$$

$$PPM2 = PM3 = 400m$$

Diámetro de perforación exploratoria, $\Phi PE(M)$

Porque la intención es construir pozos robustos, profundos, durables, se recomienda explorar en diámetro nominal de 12 $\frac{1}{4}$ " facilitando utilizar estabilizadores grandes para dar mayor peso a la sarta que ayude a mantener su verticalidad y alineación y para realizar en menor número posible de etapas las ampliaciones hasta su terminación final; de cualquier forma, no hay recetas ni fórmulas rígidas que determinen el diámetro exploratorio. Aplica a todos los PPM's.

$$\Phi PE(M) = 12 \frac{1}{4}''$$

Diámetro de ademe, $\Phi AD(M)$

Se proponen secciones prismáticas de diámetro constante suficiente en toda su profundidad con el fin de alojar holgadamente la bomba adecuada y permitir velocidades de acceso del flujo de agua por la porción filtrante de los pozos inferior a $v \leq 3\text{ cm/s}$ para generar pérdidas de energía pequeñas.

Bombas y columnas de 8 pulgadas son eficientes y capaces de extraer los caudales diseño esperados, de 45–50 lps o incluso mayores, y de tres pulgadas la holgura efectiva, *HR*, entre el ademe de la cámara de bombeo y el diámetro exterior máximo del equipo, está más que mejor.

$$\Phi_{AD}(M) = \Phi_{EXT-MAX-NOM}(B) + 2(HR) = 8 + 2(3) = 14"$$

HR, holgura recomendable, de 3 pulgadas.

$$\Phi_{AD}(M) = 14" \times \frac{3}{8}"$$

El espesor del ademe de 3/8", o 7/16", es el adecuado estructuralmente para soportar con un $FS \geq 1.5$ los esfuerzos activos del terreno y las presiones del fluido de formación y perforación, así como los de naturaleza dinámica, inesperados, –sismos, subsidencia, otros–, y para tomar en cuenta la pérdida de resistencia debida al desgaste del metal de las tuberías provocado por la agresividad electrolítica de aguas corrosivas/incrustantes.

La memoria de cálculo de los pozos de proyecto de la batería Tláhuac presenta el desarrollo del análisis estructural para determinar los espesores de diseño, demostrando cómo la excentricidad o el ovalamiento y la reducción del espesor, llevados a magnitudes inadmisibles reducen drásticamente la resistencia de la presión de colapso de las tuberías, p_{cr} .

Diámetro de perforación de ampliación para colocación de ademe, ϕ_{AA}

Si el espacio anular recomendable, *EFG*, para la colocación uniforme, sin puentes, del filtro de grava, cuya granulometría puede resultar no mayor de 3/16" – 1/4", es:

$$EFG(M) = 3"$$

Entonces ϕ_{AA} queda:

$$\Phi_{AA}(M) = \Phi_{AD} + 2(EFG) = 14" + 2(3) = 20"$$

$$\Phi_{AA}(M) = 20"$$

Diámetro de contra-ademe, $\Phi_{CA(M)}$

Respetando las normas pertinentes de Conagua y procurando obtener diseños y procedimientos constructivos sencillos, funcionales, prácticos, eficientes, donde también entra en juego la economía de las obras, y dejando una pulgada de escalón, ES , para asentar bien el contra-ademe en la base de su ampliación, resulta que:

$$\Phi_{CA(M)} = \Phi_{AA} + 2(ES) = 20" + 2(1) = 22"$$

$$\Phi_{CA(M)} = 22" \times \frac{3}{8}"$$

O $\frac{7}{16}"$, lo que de mejores resultados.

Diámetro de perforación de ampliación para colocación de contra-ademe, Φ_{PCA}

Igual criterio que para la colocación del filtro, se establece de 3" el hueco anular, EAC , para la correcta cementación con fluido preparado de la calidad conveniente exigida por la norma respectiva, dispuesta entre el agujero y la superficie exterior del casquillo, $\Phi_{CA(M)}$.

$$\Phi_{PCA(M)} = \Phi_{CA} + 2(EAC) = 22" + 2(3) = 28"$$

$$\Phi_{PCA(M)} = 28"$$

Longitud de contra-ademe, $L_{CA(M)}$

De acuerdo con datos de calidad de 2016, el agua subterránea indeseable probablemente llega hasta 200 m de profundidad media; por ello, durante la exploración de los pozos se aconseja obtener el registro continuo de su salinidad o, independientemente de la litología e hidrología que se corte, sellar completa e impermeablemente al menos este tramo; es preferible seguir lo primero.

El espacio clausurado a su vez equivale al largo mínimo de la cámara de bombeo, *LCAB*.

A diferencia de los pozos de proyecto de Tláhuac, en los de Mixquic sí se sugiere captar con enfoque práctico los horizontes acuíferos que se encuentren dentro de o intercalados en los acuitardos; la única restricción para ello es que contengan agua de buena calidad y sean suficientemente permeables para su útil aprovechamiento.

Recordemos lo dicho en el tema hidrogeológico previo acerca de que el acuífero de Mixquic es tipo semi-confinado multi-capas.

Por tanto, mientras los resultados de la exploración y de las pruebas de campo en esta etapa de los pozos de proyecto no demuestren cuantitativamente lo contrario, se tiene

$$LCA (PPM1) = 250 \text{ m}$$

$$LCA (PPM2) = 250 \text{ m}$$

$$LCA (PPM3) = 225 \text{ m}$$

$$LCA (PPM4) = 200 \text{ m}$$

$$LCA (PPM5) = 200 \text{ m}$$

Y, el largo de la cámara de bombeo, *LCAB* es

$$LCAB(M) \geq LCA(M)$$

LCA(M) es el largo global o seccionado, constante, para los cinco pozos de proyecto, e independiente de los tramos de ademe ciego que el diseño final demande.

Longitud de ademe liso, *LAL(M)*

$$LAL(M) = LCAB \geq LCA$$

$$LAL(PPM1) = 250 \text{ m}$$

$$LAL(PPM2) = 250 \text{ m}$$

$$LAL(PPM3) = 225 \text{ m}$$

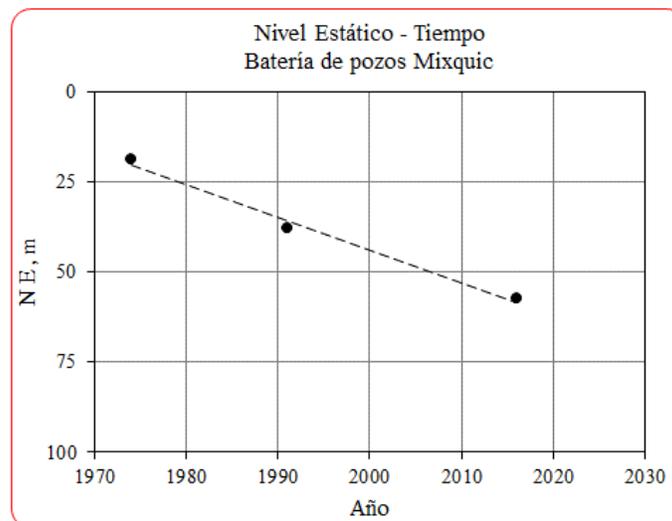
$$LAL(PPM4) = 200 \text{ m}$$

$$LAL(PPM5) = 200 \text{ m}$$

El ademe liso, igual que el contra-ademe se puede instalar en forma continua o alternada dependiendo de la potencial presencia de capas acuitardo/acuífero conteniendo agua salobre/dulce.

Por la posición vigente en la que están los niveles estáticos y dinámicos y por los rendimientos medidos en los pozos existentes, se estima poco probable que LCAB pueda resultar superior a 200 m de largo durante la vida económica de los de proyecto, aun considerando la tendencia piezométrica descendente que ilustra la figura 2.2.2.3,

Figura 2.2.2.3 Elevación media del nivel estático del campo de pozos Mixquic



Entre 1974 y 2016, el abatimiento promedio del nivel estático es 1.12 m/año y parece no va a estabilizarse en tanto no se equilibre la extracción con la recarga del campo de pozos en su conjunto.

Diámetro, longitud, tipo y abertura de ranura de cedazo, Φ_{CE} , LCE, TRA, bCE

Es importante evitar instalar la bomba frente al cedazo del pozo.

Diámetro de cedazo, $\Phi_{CE}(M)$

El diseño que se describe considera pozos de sección constante en toda su profundidad de proyecto; por tanto, el diámetro de cedazo debe ser igual que el diámetro del ademe liso, Φ_{AD} :

$$\Phi_{CE}(M) = \Phi_{AD} = 14" \times \frac{3}{8}"$$

Con ello, se persigue maximizar el área de filtración y la eficiencia hidráulica de los pozos de reposición pero sin caer en extremos constructivos de sub o sobredimensionamiento y en elevados e innecesarios costos de inversión inicial, operativos y mantenimiento.

El espesor de la rejilla debe ser el mismo que el seleccionado para el ademe liso; desde el punto de vista estructural ya se comprobó que el de 3/8", 7/16" o mayor, resulta mejor.

Longitud de cedazo, LCE(M)

$$LCE(M) = PPM - LAL$$

$$LCE(PPM1) = 200 \text{ m}$$

$$LCE(PPM2) = 150 \text{ m}$$

$$LCE(PPM3) = 175 \text{ m}$$

$$LCE(PPM4) = 250 \text{ m}$$

$$LCE(PPM5) = 250 \text{ m}$$

Corresponde al largo global igual o mayor que puede ser instalado con distribución alternada o en forma continua, dependiendo de la estructura del acuífero multicapas encontrada en cada pozo de reposición.

Para fines ilustrativos y de cuantificación de volúmenes de los conceptos de obra se presenta el diseño de pozos, elaborado a partir del análisis hidrogeológico explicado antes, el cual toma en cuenta la lito–estratigrafía de los cortes litológicos y registros eléctricos, en el entendido que es la perforación exploratoria quien va a dar la pauta para el diseño final óptimo del ademado, enrejillado y cementado, el cual puede o no presentar pequeñas variaciones.

Tipo y abertura de ranura de cedazo, TRA, bCE

Igual que para los pozos de proyecto de Tláhuac y tomando en cuenta que los existentes tienen graves problemas de producción de arena, la abertura de ranura propuesta es #30 o 0.75 mm de ancho, sin rebasar la #60, o 1.5 mm; es decir,

$$TRA(PPM) = \text{Cedazo tipo canastilla I}$$

$$\#30 = 0.75 \text{ mm} \geq bCE(PPM) \leq \#60 = 1.554 \text{ mm}$$

Si se fija el ancho de abertura de cedazo, en función del área de filtración, entonces mediante el proceso inverso se determinan las mallas del filtro de grava, aunque técnicamente aquel se define de éste, cuya granulometría, a su vez, se dimensiona de ensayos de mallas de los acuíferos que resulten aprovechables.

Bajo ninguna circunstancia la velocidad de entrada de agua por el cedazo debe rebasar 3 cm/s; mientras más pequeña resulte es mejor.

Los dispositivos desarenadores son útiles de momento, pero un diseño ingenieril cuidadoso competente no los considera ni los requiere pues elevan

los costos de operación y mantenimiento y no es solución eficaz a mediano ni a largo plazo. Los pozos areneros se azolvan rápido y acortan drásticamente la vida de los pozos y equipos de bombeo.

El análisis estructural e hidráulico presentado para los pozos de proyecto de Tláhuac evidentemente aplica a los de Mixquic.

Las características y los croquis constructivos dibujados a escala de los pozos de proyecto se muestran en la tabla y las figuras siguientes.

Tabla 2.2.2.5 Datos constructivos de pozos de proyecto de la Batería Mixquic

DATOS CONSTRUCTIVOS DE POZOS DE PROYECTO DE LA BATERÍA MIXQUIC. 2016

CONCEPTO	PPM1	PPM2	PPM3	PPM4	PPM5
PROFUNDIDAD MEDIA, <i>PPM</i> , (m)	450	400	400	450	450
NIVEL ESTÁTICO PROMEDIO, <i>PNE</i> , (m)	57	57	57	57	57
NIVEL DINÁMICO PROMEDIO, <i>PND</i> , (m)	80	80	80	80	80
DIÁMETRO DE PERFORACIÓN EXPLORATORIA, <i>ΦPE</i> , (plg)	12 1/4"	12 1/4"	12 1/4"	12 1/4"	12 1/4"
ESPACIO ANULAR MÍN. PARA COLOCACIÓN DE FILTRO DE GRAVA, <i>EFG</i> , (plg)	3	3	3	3	3
DIÁMETRO NOM. DE PERF. DE AMPL. DE CONTRA-ADEME INTERMEDIO, <i>ΦPCAI</i> , (plg)	28	28	28	28	28
DIÁMETRO / ESPESOR NOM. DE CONTRA ADEME INTERMEDIO, <i>ΦCAI</i> , (plg)	22 x 7/16				
LONGITUD DE CONTRA-ADEME INTERMEDIO, <i>LCAI</i> , (m)	250	250	225	200	200
DIÁMETRO NOM. DE PERF. DE AMPL. DE CONTRA-ADEME EXTERIOR, <i>ΦPCE</i> , (plg)	36	36	36	36	36
DIÁMETRO / ESPESOR NOM. DE CONTRA ADEME EXTERIOR, <i>ΦCAE</i> , (plg)	30 x 7/16"				
LONGITUD DE CONTRA-ADEME EXTERIOR, <i>LCAE</i> , (m)	100	100	100	100	100
DIÁMETRO NOM. DE PERF. DE AMPL. DE ADEME, <i>ΦAA</i> , (plg)	20	20	20	20	20
DIÁMETRO / ESPESOR NOM. DE ADEME, <i>ΦAD</i> , (plg)	14 x 3/8				
LONGITUD DE ADEME LISO, <i>LAL</i> , (m)	250	250	225	200	200
LONGITUD DE ADEME RANURADO CANASTILLA, T-I, bC = 1.522 mm, <i>LCE</i> , (m)	200	150	175	250	250
DIÁMETRO / ESPESOR NOM. DE CEDAZO, <i>ΦCE</i> , (plg)	14 x 3/8				

PPM2

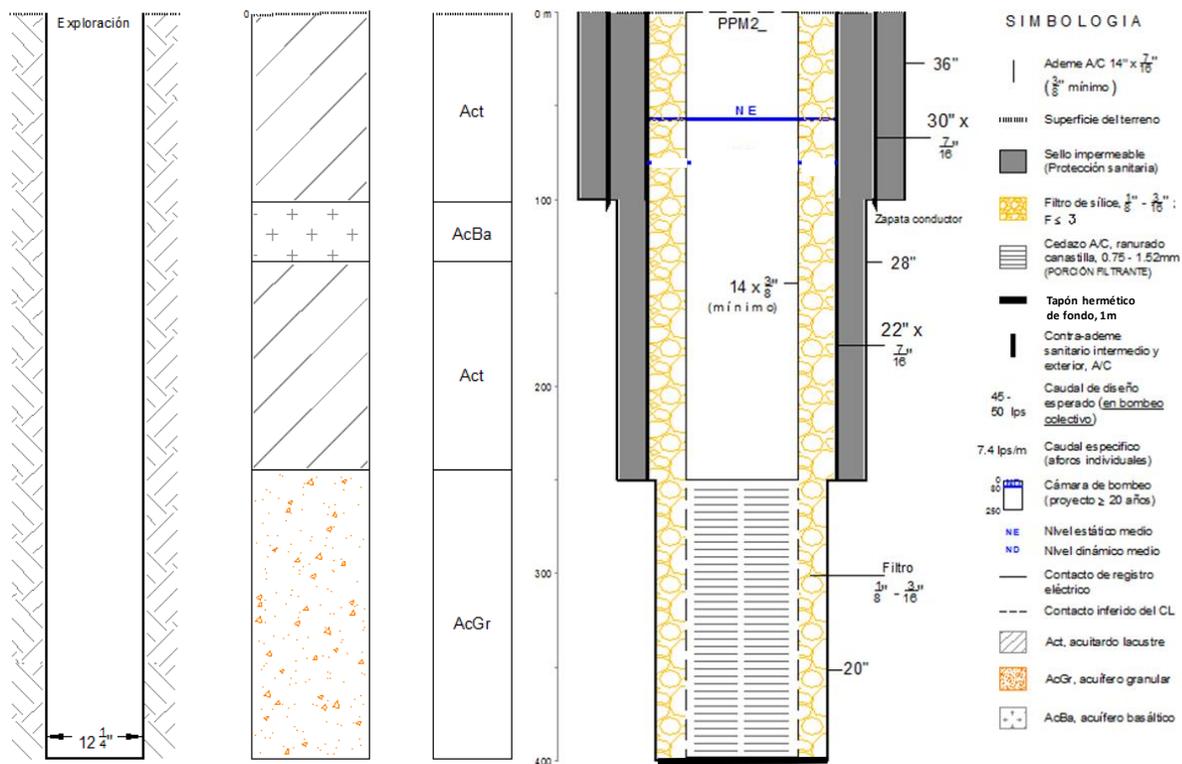


Figura 2.2.2.5 Proyecto de Pozos Mixquic 2

Notas relativas a la terminación constructiva:

El diseño propone aprovechar los *virtuales acuíferos volcánicos si y solo si contienen agua dulce y capacidad aprovechable*; aparentemente están ubicados en la parte intermedia superior, rodeado por el acuitardo. El contra-ademe cementado se alarga 6 m o un tramo de tubo liso completo por debajo y por arriba de su techo y piso, respectivamente; en la longitud neta central resultante, de unos 20 m o tres tramos enteros, se coloca contra-ademe ranurado tipo IV y filtro exterior de 1/2" de granulometría. Del mismo modo se hace para el ademe de 14", situando el cedazo canastilla de igual longitud y posición que el anterior; en el espacio anular interior definido entre ambas tuberías, el engravado de 1/8" a 3/16" va hasta el fondo del pozo, uniformemente dispuesto frente al acuífero granular profundo.

PPM3

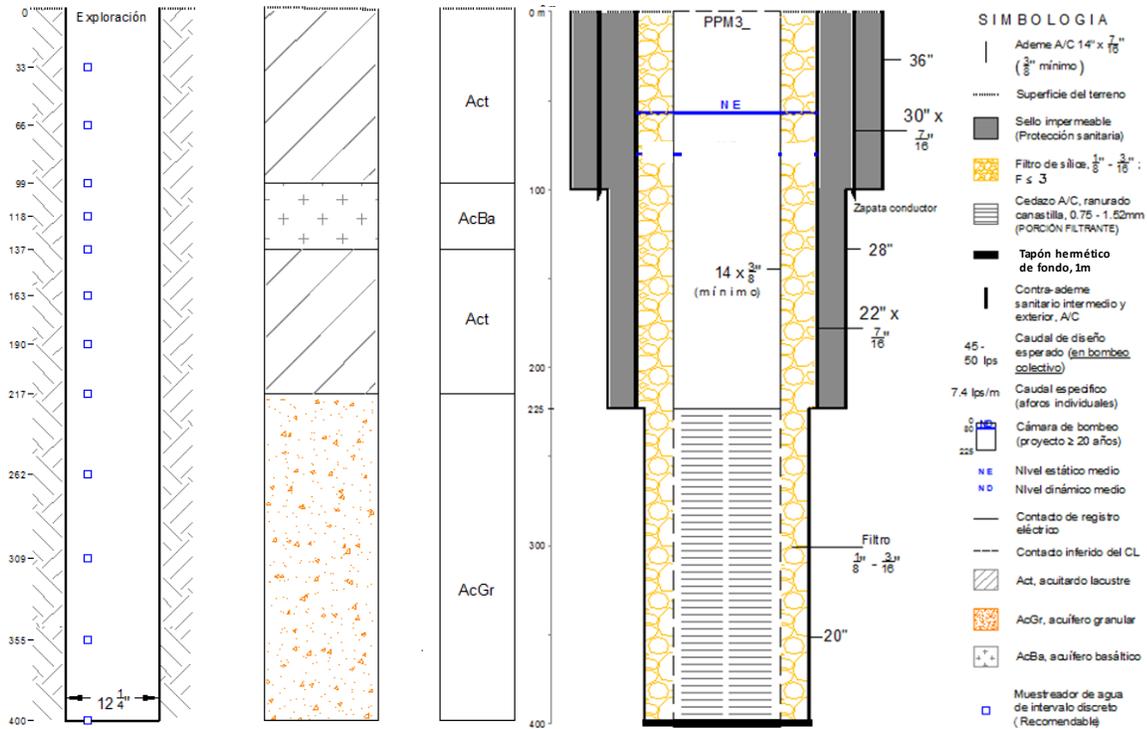


Figura 2.2.2.6 Proyecto de Pozos Mixquic 3

Notas.

Con el fin de comprobar la calidad del agua se recomienda coleccionar muestras representativas, con mínima alteración o mezcla, en los niveles de profundidad indicados, en la fase exploratoria del pozo (dibujo izquierdo); el muestreo de intervalo discreto permite obtener muestras y la perfilación química confiables de los pozos. Al determinar la calidad del agua también se precisa qué tramos de acuífero se deben evitar y cuáles no en función de su capacidad de producción. Sin duda, esto es parte fundamental del diseño exitoso de las obras.

PPM4

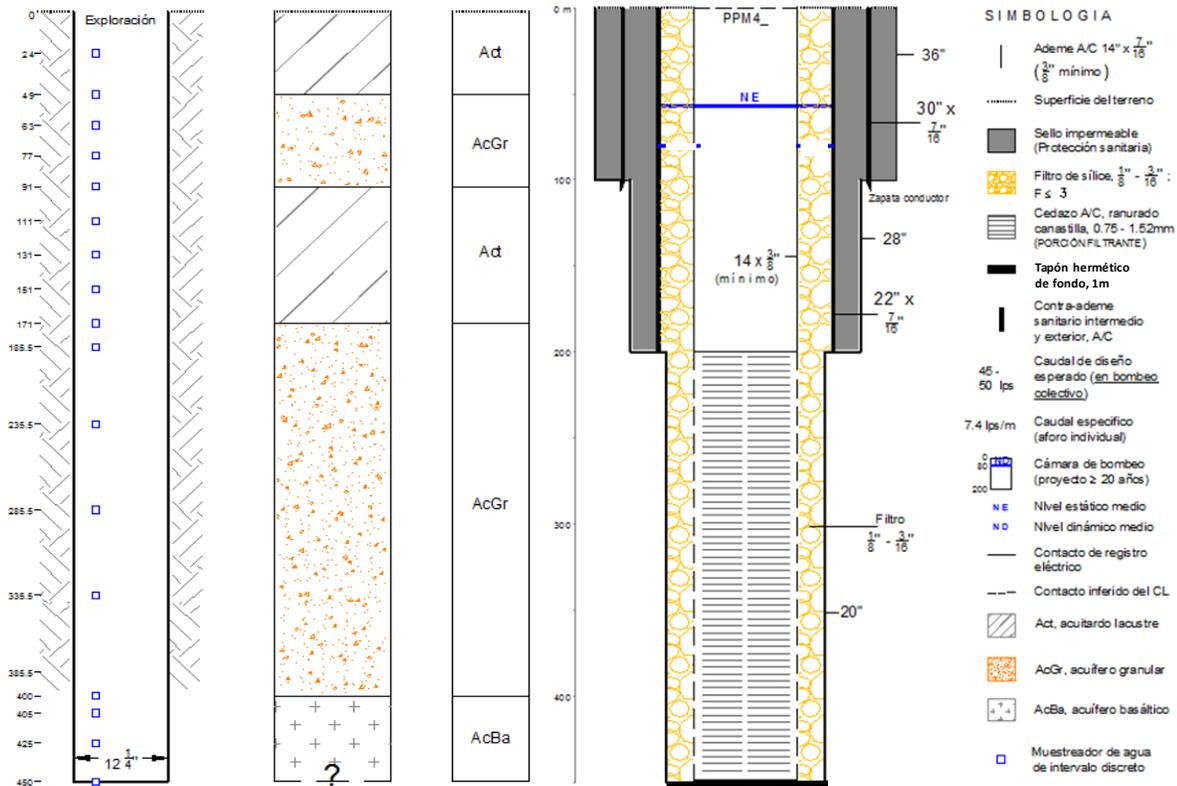


Figura 2.2.2.7 Proyecto de Pozos Mixquic 4

Nota: El muestreo y análisis del agua en el contacto superior e inferior entre acuitardo/acuífero granular–volcánico se recomienda hacerlo en un intervalo más corto, digamos 5 a 9 m. De la exploración y del registro eléctrico de nuevos pozos a construir se decide si frente al acuitardo también se coloca cedazo y filtro para su aprovechamiento, una vez se asegure contiene agua de buena calidad y está interdigitado con horizontes de arena acuíferos. La perfilación del agua indicada en la figura de la exploración es sugerida; la experiencia de campo va establecer las profundidades de muestreo últimas, igual que la terminación constructiva de los pozos de reposición.

PPM5

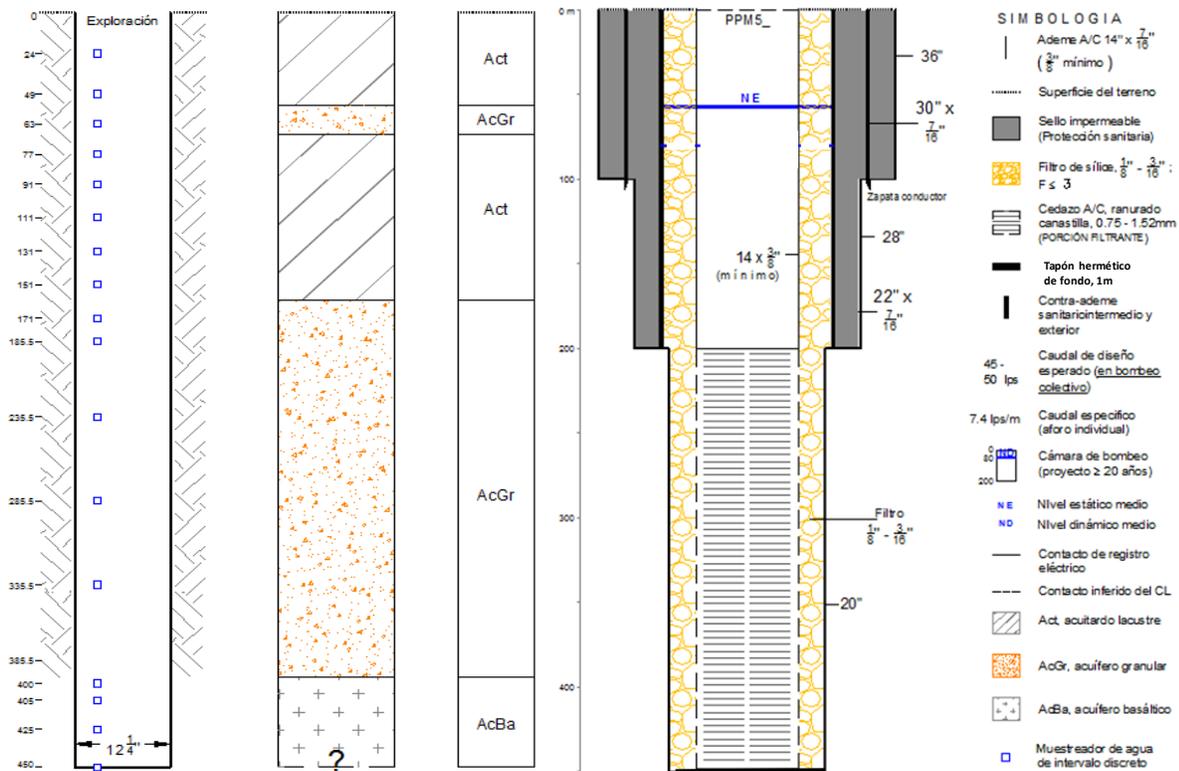


Figura 2.2.2.8 Proyecto de Pozos Mixquic 5

Notas:

El acuífero granular colgado se adelgaza hacia PPM5, en dirección SW, desapareciendo prácticamente en PM14; igual que en PPM4, en la parte intermedia del perfil, está rodeado por el acuitardo, a quien subyace el acuífero granular regional. El acuífero volcánico se detecta en la parte inferior profunda, en los extremos del perfil, y en la parte superior, de PM1 a PM10. En los pozos de reposición es útil analizar la calidad del agua en forma continua o por intervalos característicos y a lo largo de la profundidad explorada para saber desde este punto de vista qué tramos de acuífero-acuitardo deben ser cementados, evitando sus flujos de agua al pozo.

Epílogo

En general, la perforación exploratoria bien desarrollada y supervisada, cuyo proceso integral debe quedar claramente asentado en la bitácora de obra, junto con los registros y ensayos de campo realizados en esta fase de los pozos, representan la actividad crítica inicial a partir de la cual todos los requisitos dimensionales, hidráulicos y de terminación constructiva de los pozos de bombeo de proyecto se pueden y se deben determinar con la mayor precisión posible.

Al terminar la exploración de los pozos es recomendable correr además del registro eléctrico el de rayos gama ya que los minerales de las arcillas de los acuitardos suelen contener como constituyente común natural detectable partículas radioactivas de potasio 40, cuyo decaimiento libera radiación de rayos gama; a mayor emisión de éstos más abundancia de arcilla.

La adherencia incompleta o deficiente entre la lechada cementante y el contra-ademe, fracturado o no, a través de los cuales puede estar ingresando agua contaminada a los pozos existentes, se puede determinar mediante registros sínicos segmentados con dispositivos receptores-transmisores de alta frecuencia.

Si una y otro están bien pegados, herméticos, casi toda la energía de la onda sonora es llevada por el cementante atrás del contra-ademe, siendo débil la señal en éste, con tiempo de llegada mayor o más lenta al receptor. En caso contrario, contra-ademe mal cementado, la mayor parte de las ondas sínicas se transportan por la tubería, causando una intensa señal inicial con tiempo de llegada menor o más rápido al receptor.

ANEXOS



ANEXO FOTOGRÁFICO GEOFÍSICA MIXQUIC











ANEXO FOTOGRÁFICO GEOFÍSICA TLÁHUAC













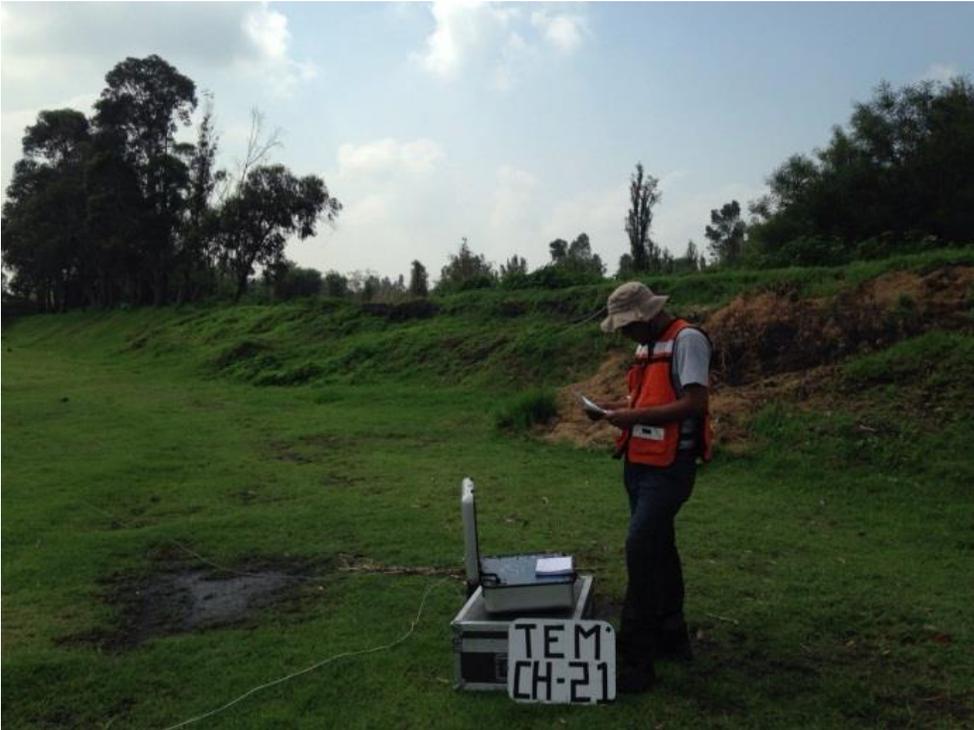




















ANEXO : MÉTODOS GEOFÍSICOS

A: Método Magnetoteléurico de Fuente Natural

Los métodos eléctricos exploran los potenciales eléctricos naturales y las propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales como son la conductividad, la permeabilidad y la permitividad. Entre estos métodos cabe destacar el de potencial espontáneo, el telúrico y Magnetoteléurico, electromagnético, el resistivo y el de polarización inducida.

Los métodos, tales como los Transitorios Electromagnéticos (TEM), el Magnetoteléurico (MT) y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), son de gran utilidad para la prospección del subsuelo. Los SEV se han utilizado para diferentes objetivos, en la prospección del subsuelo, se puede decir que, en ausencia de información directa, los SEV son imprescindibles, ya que en muchos casos permiten detectar la elevación del nivel freático, la presencia de agua en estratos geológicos porosos, y una idea las características litológicas.

En la investigación de un modelo Geológico, en el cual las condiciones topográficas son irregulares, y las profundidades de investigación que se requieren son del orden de los 1000m, podemos hacer los siguientes señalamientos logísticos y técnicos.

La aplicación de métodos de corriente continua como el SEV, por la dificultad que presentan las líneas de corriente en medios de topografía irregular, se considera que para alcanzar del orden de los 1000m de profundidad, se requeriría hacer tendidos de cable de hasta 5 km, con las dificultades logísticas de tener una buena corriente (ya sea por la resistencia de contacto o el uso de motogeneradores potentes con motores que pesan hasta 250kg), esto hace de esta técnica que la operación logística e instrumental sea compleja. La tecnología actual permite el uso de los Métodos Electromagnéticos en Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM) y Sondeos Magnetoteléuricos (MT), los cuales utilizan un fenómeno de inducción electromagnética y campos naturales respectivamente, y con ello se tiene una señal más localizada, evitando promediar grandes volúmenes de roca, lo cual ayuda a tener resultados más representativos del subsuelo.

El principio físico de los métodos electromagnéticos está sustentado en el fenómeno de inducción. Es decir, si una fuente electromagnética o campo primario induce corrientes secundarias en el subsuelo, estas corrientes inducidas generan a su vez campos electromagnéticos secundarios, que pueden ser medidos por sensores adecuados sobre la superficie. En resumen, lo que se pretende con los métodos EM es analizar la interacción entre los campos y el subsuelo para deducir las propiedades eléctricas, que pueden corresponder con estructuras geológicas y cambios en la litología. Así pues, los métodos eléctricos han experimentado en la década de los 90 un fuerte impulso tanto en la instrumentación como en los métodos de interpretación, lo que avala aún más la utilización de esta técnica.

Clasificación y variantes de los métodos electromagnéticos

La clasificación de los métodos electromagnéticos es diversa. Dependiendo del tipo de fuente que utilicen pueden ser de fuente natural o fuente artificial. En la tabla 1.1 se presenta una clasificación de algunos métodos EM siguiendo este criterio. En ella se incluye también una estimación de la profundidad de estudio que evidencia una amplia escala de aplicación.

Métodos	Profundidad de estudio
Fuente natural	
Sondeo Geomagnético Vertical (GDS)	10-1000 km
Magnetotelúrico <ul style="list-style-type: none"> ➤ Magnetotelúrico (MT) ➤ <u>Audiomagnetotelúrico (AMT)</u> 	1-250 km <u>0.1-5 km</u>
Fuente controlada	
Muy bajas frecuencias (VLF)	0-5 km

Corriente Directa (DC)	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sondeo Eléctrico Vertical (VES) ➤ Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) 	0-5 km
Audiomagnetotelúrica con fuente artificial (CSAMT)	10 m-1.5 km
Polarización inducida (IP)	
Electromagnéticos en el dominio de tiempo (TEM)	10 m-1.5 km
Electromagnéticos en el dominio de frecuencias (FEM)	10 m-1.5 km

Como se observa en la tabla anterior, el método Magnetotelúrico tiene algunas variantes en función del rango de frecuencias adquiridas y analizadas. Así, la clasificación particular para el MT se presenta en la siguiente tabla:

Variante	Rango de frecuencias	Rango de periodos	Tipo de fuente
MT	10 ⁻⁴ Hz – 10 Hz	10 ⁻¹ – 10 ⁴ s	Natural
AMT	10 Hz – 10 kHz	10⁻⁴ – 10⁻¹ s	Natural
CSAMT	10 Hz – 100 kHz	10 ⁻⁵ - 10 ⁻³ s	Controlada
RMT	100 kHz – 1 MHz	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵ s	Antenas radiotransmisoras

El método Magnetotelúrico se puede considerar como la conjunción de dos métodos preexistentes. El primero, denominado sondeo geomagnético, utiliza

las variaciones de las componentes horizontal y vertical del campo magnético medido en los observatorios magnéticos para obtener información de la conductividad eléctrica y el espesor de las capas del subsuelo a gran profundidad. La otra técnica es el método telúrico, donde sólo se miden las componentes eléctricas del campo electromagnético en dos sitios diferentes simultáneamente. Así, se deduce que las variaciones medidas en los campos eléctricos medidas en ambos sitios proporcionan información acerca de la estructura geoelectrica del subsuelo.

Así mismo la realización de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) en conjunto con los sondeos MT, uno de los objetivos tiene que ver con el poder corregir las curvas de resistividad aparente del AMT ya que estas sufren corrimiento hacia arriba cuando las mediciones se hacen directamente sobre una superficie con cuerpos resistivos.

Principios Físicos del Método Magnetotelúrico de Fuente Natural

De una serie de ecuaciones se establece la relación entre los campos eléctrico y magnético, que incluye las propiedades eléctricas y magnéticas del subsuelo. Es decir, se tiene:

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x \quad 1.1$$

Y también puede expresarse la ecuación anterior en:

$$-(-\beta + i\alpha) H_y e^{(-\beta + i\alpha)z} = \sigma E_x e^{(-\beta + i\alpha)z} \quad 1.2$$

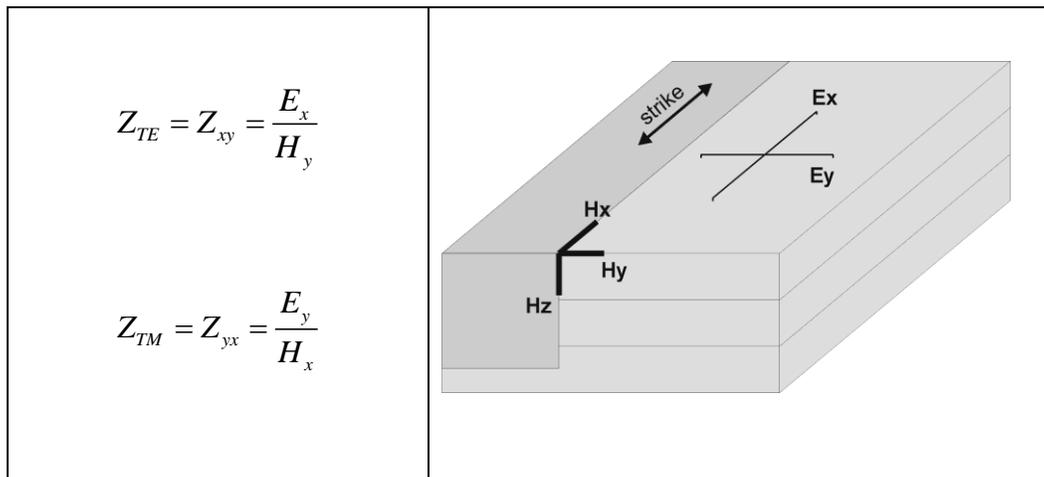
De esta manera, es posible establecer la relación entre el campo eléctrico y el campo magnético, que se define como impedancia Z, es decir como se muestra en la siguiente ecuación.

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{(\beta - i\alpha)}{\sigma} \quad 1.3$$

Sustituyendo los valores de α y β se tiene:

$$\left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \left| \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} (1-i) \right|^2 = \frac{\omega\mu}{\sigma} \quad 1.4$$

Debe notarse que existen dos posibilidades de relacionar las componentes perpendiculares de los campos eléctrico y magnético. Es decir, relacionando E_x y H_y o E_y y H_x . En el caso de un subsuelo estratificado sin variaciones laterales, teóricamente ambos valores de impedancia serán iguales. Cuando exista una distribución bidimensional de la resistividad eléctrica, la relación entre la dirección principal del campo primario y la dirección de la estructura (strike) generará una diferencia entre dichos valores. Cada una de las relaciones entre los campos perpendiculares se denomina modo o polarización y dependerá de ciertos criterios.



Modos de polarización electromagnética

Así, el modo o polarización TE (transverso eléctrico) se presentará cuando la componente del campo eléctrico sea paralela a la dirección de la estructura. El modo TM (transverso magnético) se presentará cuando el campo magnético sea paralelo al strike (rumbo de la estructura).

Resistividad

Escribiendo la ecuación en términos del inverso de la conductividad, es posible obtener la resistividad del medio a partir de los campos registrados en la superficie. Es decir:

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 \quad 1.5$$

Donde la respuesta Z_{xy} que relaciona linealmente el campo eléctrico y magnético es denominada impedancia y ρ es la resistividad del subsuelo. Así también existirá una resistividad para cada uno de los modos en el caso bidimensional.

Skin depth

Un concepto que se introduce para evaluar la atenuación de la onda electromagnética en el subsuelo es la penetración o skin depth δ , es decir, la distancia recorrida por la onda electromagnética hasta que la amplitud del campo se atenúa un factor de $1/e$. En términos del número de onda se escribe como:

$$k = \sqrt{i\sigma\mu\omega} = \frac{1+i}{\delta} \quad 1.6$$

Para un medio que tiene la permeabilidad magnética del vacío y en función de la resistividad se escribe como:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu_0}} \quad 1.7$$

Si se sustituye la frecuencia angular por $\omega = 2\pi f$, la ecuación queda:

$$\delta \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [km] \quad 1.8$$

$$\rho[\Omega \cdot m] \quad f[Hz]$$

Esta expresión del skin depth justifica la relación entre la frecuencia, la resistividad y la profundidad de penetración. A relativamente altas frecuencias, la impedancia proporciona información sólo de las capas superiores, mientras que a bajas frecuencias la profundidad de penetración del campo electromagnético se incrementa y es posible caracterizar la resistividad a una profundidad mayor. Así, la selección del rango apropiado de frecuencias dependerá de la profundidad de estudio requerida, rasgo que convierte al método Magnetotelúrico en una técnica muy versátil. A resistividades altas la penetración de los campos es mayor que a resistividades bajas.

Fuente natural

Las técnicas MT y AMT consideran como fuente un campo electromagnético natural y variable en el tiempo, ocasionado principalmente por la interacción de la actividad solar con las partículas que componen la ionosfera y por las tormentas tropicales, cuya perturbación se propaga en la atmósfera de manera resonante. Esta fuente induce en el subsuelo densidades de carga y corrientes eléctricas, que se ven modificadas por las propiedades del medio de propagación. El campo electromagnético natural usado habitualmente como fuente abarca un rango de frecuencias amplio (10⁻⁴ – 10⁴ Hz). El origen del campo en el rango de frecuencias superiores a 1 Hz es atribuible principalmente a la actividad meteorológica, mientras que a frecuencias menores de 1 Hz, el origen de la señal es debido a los flujos de materia en la magnetosfera ocasionados por la actividad solar y la radiación de partículas (Kaufman y Keller, 1981).

Equipo de Adquisición MT

Metronix ADU07e (Analog/Digital Signal Conditioning Unit)

Resultado de 30 años de investigación el ADU-07e es un equipo que colecta oscilaciones naturales del campo magnético terrestre y del campo eléctrico. Es un sistema de radio frecuencia, donde se conectan sensores eléctricos y magnéticos al acondicionador de señal que sirve para adquirir datos magnetotelúricos.

Rango de Frecuencia	DC @ 250 kHz
Número de Canales	Desde 1 a 10 por ADU07e
Banda de Frecuencia	3 Bandas (LF DC512Hz; MF DC16kHz; HF 1 Hz250kHz) Sub-banda es creada por filtros digitales Ambas Bandas pueden grabar simultáneamente.
Conversión A/D	24 Bit (max. data rate max. 2048 muestras/sec) LF Tarjeta 24 Bit (max. data rate max. 65536 muestras/sec) MF Tarjeta 24 Bit (max. data rate 524,288 muestras/sec) HF Tarjeta
Almacenamiento de Datos	Interna Compact Flash 4GB o más, dispositivos USB.
Pruebas de Inicio	Encendido automático y Self Test Pruebas de inicio del sistema, de inicio de todas sus funciones y de los sensores. Creación automática de un historial de las tareas asignadas al equipo.
Calibración	Calibración Automática
Puertos	Standard 100 Mbit Twisted Pair, USB 1.1, 2.0, (wireless/Bluetooth)
Sincronización	GPS clock +/-30ns al Satélite de Referencia, la posición de la estación es almacenada
Interface	Network, Magnetómetros, Líneas de campo Eléctrico, entradas para dos baterías, Antena GPS, USB, Wireless, Bluetooth.

Sensores Magnéticos MFS-06e

El magnetómetro de bobina de inducción e banda ancha MFS-06e ha sido desarrollada para medir variaciones del campo magnético terrestre, cubre un amplio rango de frecuencia desde 0.0001 Hz hasta 10 kHz. Muestra características de ruido bajas, deriva de temperatura extremadamente baja del voltaje de compensación de entrada y corriente de compensación y una función de transferencia muy estable en temperatura y tiempo.

Sensores Magnéticos MFS-07e

El magnetómetro bobina de inducción de alta frecuencia MFS-07e ha sido desarrollada para aplicaciones en Audio Magnetotelúrica (AMT) y Audio Magnetotelúrica de fuente controlada (CSAMT). Cubre un amplio rango de frecuencias desde 0.001 Hz hasta 50 kHz; presenta características de ruido bajas, debido a una temperatura extremadamente baja del voltaje de compensación de entrada y corriente de compensación y una función de transferencia muy estable en temperatura y tiempo.

Rango de frecuencia	0.00025Hz ...10kHz
Bandas de frecuencia	0.00025Hz ...500Hz (chopper encendido) 10Hz ...10kHz (chopper apagado)
Ruido del sensor	$1.1 \cdot 10^{-2} \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.01 Hz $1.1 \cdot 10^{-4} \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz $1.0 \cdot 10^{-6} \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1000 Hz (chopper apagado)
Sensibilidad de salida	$0.2 \text{ V}/(\text{nT} \cdot \text{Hz})$ $f \ll 4 \text{ Hz}$ $0.8 \text{ V}/\text{nT}$ $f \gg 4 \text{ Hz}$ valores exactos en archivo de calibración individual
Rango de voltaje de salida	+/- 10 V
Suministro de voltaje	+/- 12 V to +/- 15 V estabilizado y filtrado
Suministro de corriente	+/- 25 mA
Peso	aprox. 9 kg
Dimensiones externas	largo 1150 mm, diámetro 75mm
Rango de temperatura	-25°C + 70°C

Especificaciones técnicas sensores MFS-06e

Rango de frecuencia	0.001Hz ...50kHz
Bandas de frecuencia	0.001Hz ...500Hz (chopper encendido) 10Hz ...50kHz (chopper apagado)
Ruido del sensor	$3 \cdot 10^{-2} \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.01 Hz $3 \cdot 10^{-4} \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz $5 \cdot 10^{-7} \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1000 Hz (chopper apagado)

Rango de frecuencia	DC 100 kHz
Resistencia de Contacto	50 – 500 Ω (para suelos normales)
Superficie Efectiva	27 cm ²
Rango de Temperatura	+5 a +50 °C
Peso	appr. 0.7 kg
Tiempo de Vida Útil	12 - 16 meses con un cuidado adecuado
Sensibilidad de salida	0.02 V/(nT*Hz) f << 32 Hz 0.64 V/nTf >> 32 Hz Valores exactos en archivo de calibración individual
Rango de voltaje de salida	+/- 10 V
Suministro de voltaje	+/- 12 V to +/- 15 V estabilizado y filtrado
Suministro de corriente	+/- 25 mA
Peso	aprox. 6.1 kg
Dimensiones externas	largo 700 mm, diámetro 75 mm
Rango de temperatura	-25°C + 70°C

Especificaciones técnicas sensores MFS-07e

Sensores Eléctricos EFP-06

Electrodo que se usa para medir el campo eléctrico, está compuesto por PbPbCl₂ y no requiere ser rellenado con algún líquido, colocado en un recipiente de plástico reutilizable lo mantiene siempre húmedo para su transportación y lo conserva en buenas condiciones.

Especificaciones técnicas sensores EFP-06

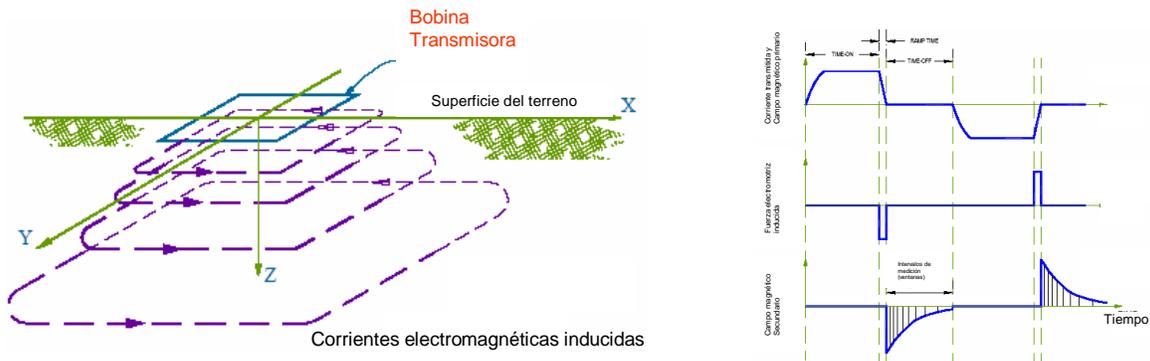


Sistema de adquisición MT de Metronix[®]

B: Método Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo

Principios Físicos del Método TEM

Un transmisor envía un pulso de corriente cuadrado repetido en una bobina de alambre (mostrado en la siguiente figura). A la terminación de cada pulso, un campo magnético al mismo tiempo se genera de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell. A su vez, este campo primario induce corrientes transitorias inmediatamente en la tierra por debajo de la bobina del transmisor las cuales se difunden hacia abajo a una velocidad proporcional a la resistividad de la tierra (Nabighian, 1979). Un receptor en la superficie puede medir las variaciones del campo magnético secundario asociado con esta corriente.



Fenómeno de inducción electromagnética

La fuerza del campo disminuye (rápidamente) con el tiempo, y el análisis de estos cambios da la distribución de resistividad con la profundidad en la tierra. En la mayoría de los casos, incluyendo en este estudio, lo que es medido es la razón temporal de cambio del campo magnético secundario (el dH/dt) en la dirección vertical, Esto se logra midiendo los voltajes inducidos en una bobina receptora colocada al centro de la bobina transmisora (configuración de bobina (loop) central), o en la misma bobina (configuración de bobina (loop) coincidente). En el caso anterior, aunque la bobina del receptor tiene un diámetro pequeño (aprox. 1.2 m), su área efectiva (momento) se aumenta con el número de vueltas en la bobina, aumentando de esta manera la sensibilidad. El receptor graba el decaimiento en los voltajes en forma discreta en varios canales, produciendo una curva de decaimiento de voltaje contra el tiempo.

Presentación de parámetros

En el caso de la configuración de la bobina central (SIROTEM), los voltajes del tiempo tardío (a diferencia de las medidas del tiempo temprano dentro de la rampa Turn off) se convierte a la resistividad aparente:

$$\rho = (a^4/V)^{2/3} t^{-5/3} * 6.32 * 10^{-12} \quad \Omega m$$

Dónde ρ es la resistividad aparente, "a" es la longitud del Loop del transmisor, y V es el voltaje normalizado medido al t de tiempo después de la rampa del Turn off. La aproximación es válida para tiempos de retrasos mayores que $\pi a^2 / 10000 \rho_e mS$. dónde "a" es la dimensión del Loop y ρ_e es la resistividad de

la tierra está en Ωm . La intención aquí es subrayar el hecho que la forma de las curvas de resistividad aparentes, no se relacionan claramente a la distribución de resistividad; esto es bastante diferente a la interpretación de las curvas de Sondeos Schlumberger, por ejemplo. Más que otra cosa, las resistividades aparentes del TEM son una normalización de los parámetros relativos, y por esta razón las interpretaciones son hechas usando normalmente los parámetros medidos (I dH/dt, voltaje).

Procedimiento Interpretativo

La conductividad eléctrica de cualquier medio es una combinación de dos parámetros distintos: la conductividad iónica donde los flujos actuales vía el movimiento del ion libre en un estado fluido, y la conductividad electrónica donde los flujos actúan por el intercambio del electrón en un estado sólido. Excepto en la presencia de porcentajes grandes de minerales conductivos vinculados, como los depósitos del sulfuro macizos, la conducción iónica es dominante. La litología controla la conductividad en virtud de la permeabilidad (no simplemente la porosidad). Una excepción parcial es la presencia de minerales de arcilla saturados donde la conducción iónica es importante. Esto es particularmente importante en la exploración de los recursos geotérmicos donde en la práctica el objetivo es el (conductivo) el encape de alteración arcilloso.

Dado que existe una cierta permeabilidad, la conductividad del fluido en los poros controla la resistividad volumétrica del medio. En el caso ideal la relación es simple, como esta descrito en la Ley de Archie:

$$= a\phi^{-m} \rho_w \Omega m$$

Dónde ρ_a resistividad volumétrica, ϕ = la porosidad ρ_w = la resistividad del fluido en los poros y “a” y “m” son constantes relacionadas a la composición de la roca.

Donde la litología es simple, uno esperaría detectar el contraste de resistividad debido al límite no saturado/saturado en el nivel freático, a los cambios grandes en la permeabilidad, o a la conductividad del fluido, y el volumen de mineral de arcilla. Por consiguiente, una interpretación útil sólo es posible si se

dispone de medios independientes de evaluar la importancia relativa de cada uno de estos factores. Normalmente, esto se logra a través de la comparación de resultados de TEM con los registros de pozos (del nivel freático, de arcilla registros gamma, de densidad para derivar la porosidad, la conductividad del fluido). En el ambiente volcánico, contrastes adicionales suceden de la heterogeneidad extrema de la litología; desde rocas resistivas intrusivas y lavas coherentes a depósitos vulcanoclásticos pobremente consolidados y porosos (relativamente conductores). Los fluidos geotérmicos controlan la resistividad en virtud de la correlación positiva con salinidad y temperatura. En la práctica el efecto de la alteración argilítica asociada con los sistemas hidrotermales extintos son el rasgo dominante. Otras consideraciones a tomar en cuenta son que la profundidad de penetración, la cual está limitada por las sucesiones conductivas (las corrientes inducidas permanecen someras) y la profundidad al nivel freático no está resuelta cuando los datos de tiempo tempranos están limitados por el tiempo Turn off.

Equipo y Detalles de Adquisición TEM

Los sondeos en el dominio del tiempo (TEM) se realizaron con un equipo; TerraTEM el sistema cuenta con la capacidad del acelerador Turn off rápido, y loop de 150x3150 m en la modalidad de loop coincidente.

Procedimientos de campo

La estructura de la bobina del transmisor se tendió desde de dos esquinas; los cuatro lados de la bobina se tendieron con cable medido y se alinearon utilizando GPS. Después de conectar el transmisor y verificar la continuidad de la bobina, y después de verificar que el sistema estaba funcionando, a través del uso de calibración y los chequeos nulos, se grabaron los conjuntos de datos a una proporción de repetición de transmisor especificada, a varias ganancias para perfeccionar las respuestas temprana y tardía relativas al Turn off.

Control de calidad:

El funcionamiento correcto del receptor se verificó por la calibración interna diaria y los chequeos nulos. Éstos no producen ningún archivo, sino un mensaje en pantalla que indica que el sistema está funcionando correctamente. Además,

se grabaron conjuntos de datos múltiples a cada ganancia a cada sitio, haciendo un total de ocho grabaciones por el sitio.



Sistema de adquisición TerraTEM de MONEX Geoscope®

Rango de Frecuencia	500kHz en tres canales simultáneos
Intervalo de Registro	8 microsegundos – 2 segundos
Corriente	10 Amperes
Batería	24 Volts corriente DC
Ganancias	2,4,8,32,64,100
Resolución de Voltaje	1 micro volt
Ruido Instrumental	12 nV
Peso	13 Kg.
Señal primaria	Cuadrada Dipolar

Especificaciones Técnicas del sistema TerraTEM®

3 CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DEL AGUA EN PUNTO DE ENTREGA HOSPITAL PSIQUIÁTRICO

El Hospital Psiquiátrico Dr. Samuel Ramírez Moreno se encuentra ubicado en la esquina del Eje 10 y la Autopista México Puebla. Está en la línea divisoria entre el Estado de México y la Ciudad de México.



El hospital atiende a 60,000 personas (más sus acompañantes, generalmente 1 o más personas) que acuden a consulta externa anualmente. Según datos del director del Hospital, Dr. César Bañuelos Arzac, esta cifra muestra un incremento histórico anual de 6.5%.

En el hospital trabajan 495 empleados considerados fijos , además de 100 empleados (subcontratados) para las áreas de intendencia y seguridad.

En este sitio viven 114 internos y 60 pacientes más que se consideran flotantes.

3.1 Punto de entrega Hospital Psiquiátrico

El agua que llega al sitio presenta evidente mal olor, color amarillento y se ve turbia. El agua que llega al Hospital Psiquiátrico es una mezcla compuesta por contribuciones de los Ramales Santa Catarina (aislados), Tláhuac (Netzahualcóyotl) y Mixquic-Santa Catarina. Para determinar su calidad se realizaron cuatro muestreos a la entrada de este punto de entrega y se procedió al análisis de las muestras.

3.1.1 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en punto de entrega Hospital Psiquiátrico.

Las muestras fueron tomadas en cuatro fechas diferentes, preservadas de acuerdo con los procedimientos establecidos en el Manual de Control de Calidad del Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA, los cuales son consistentes con la normativa para muestreo de agua (NOM-230-SSA1-2002, NMX-AA-003-1980) y enviadas al laboratorio para su análisis. En el sitio se midieron los siguientes parámetros: pH, conductividad, temperatura y oxígeno disuelto. También en campo se realizaron determinaciones rápidas de nitrógeno amoniacal, ácido sulfhídrico, hierro y manganeso.



Figura 3-1 Muestreo de agua en el punto de entrega Hospital Psiquiátrico.



Figura 3-2 Toma de muestras en el Hospital Psiquiátrico.



Figura 3-3 Determinación de parámetros de campo en el Hospital Psiquiátrico

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados de los parámetros de calidad del agua realizados en campo.

Tabla 3.1 Resultados de parámetros de calidad medidos en campo al agua con la que se abastece al Hospital Psiquiátrico

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
pH	7.64	7.69	6.96	6.92
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	870	1007	1204	998
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	23.7	23.2	23	22.3
Oxígeno disuelto (mg/L)	2.1	2.1	3.2	2.8
Ácido sulfhídrico (como $\text{S}^=$, mg/L)	0.089	0.080	0.106	0.126
Hierro (mg/L)	0.23	0.22	0.333	0.332
Manganeso (mg/L)	0.371	0.396	0.343	0.341
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	3.66	3.54	5.67	3.71
Cloro residual (mg/L)	NM	NM	0.04	0.05

*En rojo aparecen los valores de los parámetros que excedieron el límite permisible establecido en la normatividad vigente.

NM.- valor no medido.

La concentración de oxígeno disuelto es baja. Aunque este no es un parámetro que se encuentre indicado en la norma es importante medirlo.

La concentración de hierro rebasó en dos ocasiones el límite que establece la NOM-127 SSA1 Modificación 2000. Las concentraciones rebasan apenas el límite de 0.30 mg/L de la normatividad.

La concentración de manganeso se encuentra a más del doble del límite permisible establecido en la norma. Su presencia en el agua es indeseable porque tiende a manchar la ropa y muebles con los que tiene contacto, causando molestia entre los usuarios.

La concentración de nitrógeno amoniacal excede de siete a más de diez veces el límite permisible establecido en la norma, por lo que es el contaminante

inorgánico que requiere mayor atención durante la etapa de diseño del tratamiento.

En la Tabla 3.22 se muestran los resultados obtenidos en el laboratorio de Calidad del IMTA, de las muestras tomadas en el punto de llegada del agua al Hospital Psiquiátrico. La caracterización se restringió a los parámetros relevantes que incluyen aquellos fuera de norma y aquellos importantes para el tratamiento.

Tabla 3.2 Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua (Hospital Psiquiátrico).

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Límite permisible (mg/L) Modificación 2000 de la NOM 127 SSA1 1994
Alcalinidad	324	332	386	312	N/A
Color verdadero	10 (pH=7.65)	12.5 (pH=8)	20 (pH=8.38)	20 (pH=8.29)	20
Dureza Total	173	170	182	193	500
Fosfatos	<1.25	1.44	0.47	<0.30	N/A
N-NH ₃	3.05	3.37	5.67	3.71	0.5
N-NO ₃	0.504	0.294	4.41	<0.118	10
N-NO ₂	<0.0213	5.343	1.655	<0.0213	0.05
Hierro	0.23	0.23	0.333	0.332	0.30
Manganeso	0.399	0.382	0.343	0.341	0.15
Turbiedad	6.1	0.56	0.40	0.46	5
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<3	<3	<3	<3	Ausencia o no detectable
Coliformes totales (NMP/100 ml)	<3	7	<3	4	Ausencia o no detectable
COT	5.03	-----	7.09	4.80	N/A

A continuación se presentan breves comentarios sobre los valores que se encontraron.

Nitrógeno amoniacal. Se confirma la presencia de nitrógeno amoniacal, a concentraciones que rebasan la normatividad vigente entre 6 y 10 veces. Durante el trabajo realizado en campo se han observado valores de 6 mg/L e incluso hasta 7 mg/L, por lo que se requiere aplicar un tratamiento para eliminar este contaminante que imparte olor y sabor desagradable al agua y cuya presencia, en caso de clorar el agua, implica un importante consumo del agente desinfectante y con ello un gasto excesivo que no se justifica.

Nitritos. Es de resaltar que se haya detectado la presencia de nitritos, cien veces por arriba de la norma en una de las muestras. Al menos en las mediciones sucesivas realizadas en el periodo que se informa, no volvió a presentarse una concentración tan alta como la que se encontró en esa muestra. Un factor importante a considerar es que el tratamiento propuesto involucra la oxidación de especies nitrogenadas como son el nitrógeno amoniacal y los nitritos. Estas especies serán transformadas a nitratos durante las etapas del tratamiento propuesto ya que implican el incremento en la concentración de oxígeno disuelto y la transformación biológica del nitrógeno amoniacal a nitratos, siendo justamente los nitritos una especie intermedia en dicha oxidación.

Hierro y manganeso. Se confirma la presencia de hierro y manganeso en el agua, a concentraciones por encima de la normatividad. La concentración de hierro rebasa a penas la normatividad, aproximadamente un 10 %, en tanto que el manganeso rebasa en 2.6 veces el límite permisible establecido en la norma.

Alcalinidad. Presenta valores por encima de los 300 mg/L, lo que es muy conveniente, toda vez que el tratamiento propuesto para la remoción del

nitrógeno amoniacal es la nitrificación mediada por microorganismos, una de cuyas características es el consumo de alcalinidad.

Color y turbiedad. El agua presenta color más no turbiedad. Una parte de este color se puede asociar a la presencia de los iones de hierro y manganeso, y otra más, posiblemente, a la presencia de materia orgánica (posiblemente ácidos húmicos y fúlvicos, aunque no se esperarían considerando que la fuente de abastecimiento es una batería de pozos, sin embargo puede haberlos).

Coliformes fecales y totales. En cuanto a los parámetros microbiológicos, en dos muestras se detectó la presencia de coliformes totales, aunque en un número pequeño. Este dato no es motivo de preocupación toda vez que el agua, después de ser tratada para retirar las especies reductoras como son el hierro, manganeso, nitrógeno amoniacal y materia orgánica, será clorada, garantizando así su calidad microbiológica.

Comentarios adicionales. En el Anexo Técnico se había establecido que la cuarta muestra se tomaría después de la cloración. Sin embargo, ya que en el Hospital no se ha aplicado cloro desde hace varios meses, se optó por tomar la muestra tal cual llega al Hospital.

En caso de aplicar cloro sin la eliminación previa del nitrógeno amoniacal, el consumo sería altísimo ya que la presencia de nitrógeno amoniacal, consume del orden de 10 mg/L de cloro por cada miligramo de nitrógeno presente en el agua. Además el agua contiene hierro (0.33 mg/L), manganeso (0.34 mg/L) y trazas de ácido sulfhídrico, lo que la hace una mezcla que requiere una altísima cantidad de cloro antes de que se detecte una porción adecuada de cloro libre residual, requerida para la protección microbiológica del agua. Adicionalmente, la presencia de materia orgánica, medida como COT, cuyos valores se han observado entre 4.8 y 7 mg/L, representa un riesgo de formación de trihalometanos y otros subproductos de la cloración, cuyas propiedades tóxicas, al menos de los primeros, se encuentran bien documentadas y no es nada deseable propiciar su formación.

3.1.2 Análisis de compuestos orgánicos volátiles. Respecto al análisis de compuestos volátiles, los resultados fueron variables. Mientras en dos de los

muestreos sólo se detectó la presencia de cloroformo, en otro se pudieron cuantificar 6 compuestos volátiles y en otro sólo se detectó acetato de etilo (análisis cualitativo).

Tabla 3.2 Compuestos orgánicos volátiles encontrados en el agua que llega al Hospital Psiquiátrico

Muestra	Contaminante	Concentración encontrada (µg/L)
1	1,1,2-tricloroetano	0.20
	Cloroformo	0.67
	1,2-diclorobenceno	0.70
	1,2-dicloroetano	1.13
	Trans-1,2-dicloroetano (1,2-dicloroetileno)	0.64
	1,2-dicloropropano	2.15
2	Acetato de etilo	detectado
3	Cloroformo	3.91
4	Cloroformo	1.8

*Valor máximo para la suma de Cloroformo y los otros tres trihalometanos.

** 70 (µg/l) para el cis y 100 µg/l para el trans-1,2-dicloroetano

Las concentraciones encontradas son en realidad bajas, y en la mayoría de los casos bastante bajas, por lo que no representan riesgo para la salud.

3.1.3 Análisis de compuestos orgánicos semivolátiles. Con respecto al barrido de semivolátiles, se debe precisar que es un análisis cualitativo y no cuantitativo. Para realizar un análisis cuantitativo se requiere de contar con los estándares de las sustancias que se quieren cuantificar. El análisis que se realizó es exploratorio ya que se desconoce el número y tipo de compuestos que puedan estar presentes en las muestras. El uso de la espectrometría de masas como herramienta de identificación, permite determinar de manera cualitativa la presencia de compuestos orgánicos que se han podido obtener mediante el proceso de extracción que se realiza a las muestras. En la tabla 3.2 se presenta la lista de todos los compuestos que fueron encontrados en el

agua cruda, en las cuatro campañas de muestreo realizadas. La composición del agua fue diferente en cada caso, por lo que sólo se presenta la lista completa.

Tabla 3.3 Compuestos semivolátiles hallados en agua que recibe el Hospital Psiquiátrico

1-butoxi-2-propanol
Trans-1,2-ciclohexano
2,6-bis(1,1-dimetiletil)-4- metilfenol
Butil fenil metil propional
Isopropilmiristato
Tetradecano
Hexilcinamal
Fenol
Bis 2-etilhexil-ftalato
Alcoholes e hidrocarburos de cadena larga (C12, C14 y hasta C20)
1,2-dicloro-trans, ciclohexano
2-etenil-2-butenal
2-ciclohexen-1-ona
2-clorociclohexanol
Dibutil ftalato
Diisooctil ftalato
bis(2-etilhexil) éster del ácido hexanedioico
Tolueno
7-oxabiciclo[4.1.0]heptano
Difenilamina

Varias de estas moléculas son empleadas como materias primas en la industria, en la elaboración de productos de limpieza, por lo que su presencia es un indicativo de infiltraciones que están contaminando el agua.

Los ftalatos, son agentes plastificantes muy distribuidos en el ambiente, por lo que no es sorpresa haberlos encontrarlos en estas muestras.

El ftalato de dibutilo, o dibutil ftalato también conocido como DBP (Dibutilftalato), es un compuesto orgánico usado en la industria como plastificante. También se utiliza como un aditivo en adhesivos, tintas para

impresoras y en productos cosméticos. Es soluble en varios solventes orgánicos como por ejemplo, alcohol, éter y benceno.

El bis(2-etilhexil) éster del ácido hexanodioico, también conocido como DEHA o dietilhexil adipato, es un producto químico industrial. DEHA se utiliza como un fluido hidráulico funcional, y un componente de lubricantes de aviación. A veces también se utiliza como ingrediente en envolturas de plástico a base de PVC.

Otros compuestos detectados corresponden a moléculas orgánicas tipo disolvente, empleadas en general como materias primas de diversos productos. La presencia de hidrocarburos posiblemente se debe a alguna contaminación por residuos de derivados del petróleo.

Todos estos compuestos, de origen antropogénico presentes en bajas concentraciones en el agua, indican que existen infiltraciones de aguas residuales contaminadas que a su vez están alterando la composición química del agua de los ramales.

La presencia de todos estos compuestos si bien es indeseable, no representa riesgos gracias a las bajas concentraciones en las que fueron encontrados. De cualquier manera se garantiza no estarán presentes en el agua después del tratamiento propuesto.

La EPA estableció una dosis de referencia oral (equivalente a una ingesta diaria admisible) de 20 microgramos por kilogramo por día ($20 \mu\text{g}/\text{kg} / \text{día}$) para el Bis-2-(etilhexil) ftalato (US EPA , 1995). Eso quiere decir que para alcanzar este nivel de ingesta admisible, una persona tendría que beber más de 20 L de agua al día, lo cual en la realidad no sucede. Es decir que, como en el caso de los compuestos orgánicos volátiles, las concentraciones encontradas son bajas. De cualquier manera su presencia se ha descartado, mediante el análisis por cromatografía de gases-espectrometría de masas, en el agua ya tratada.

En relación a los contaminantes inorgánicos, en las tablas 3.1 y 3.2, se observa que el valor promedio para el nitrógeno amoniacal es mayor a diez veces el límite de la norma. De acuerdo con lo anterior el parámetro que requiere mayor atención es el nitrógeno amoniacal. Este parámetro mostró como valor promedio $5.67 \text{ mg}/\text{L}$, pero en numerosas ocasiones rebasó los $6 \text{ mg}/\text{L}$.

3.2 PRUEBAS DE TRATABILIDAD PARA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN PUNTO DE ENTREGA HOSPITAL PSIQUIÁTRICO

La presencia de nitrógeno amoniacal orientó las pruebas de tratabilidad hacia un tratamiento biológico. Después de revisar la literatura, en donde se identificaron como principales opciones la adsorción, intercambio iónico y oxidación con cloro para retirar el nitrógeno amoniacal, se seleccionó un filtro percolador como primer paso para la depuración del agua.

De acuerdo con van den Akker *et al.*, 2008, la implementación de filtros percoladores de alta tasa al inicio de un tren de tratamiento reducirá la demanda de cloro asociada a la presencia de amoniaco.

Estos autores trabajaron con un filtro piloto de 4 m de alto y 1.5 m de diámetro y dentro de él acomodaron una cama de 3 m de altura de un medio filtrante de polipropileno (TKP 312) con una relación área a volumen de $240 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$. En su trabajo el flujo de entrada se mantuvo en $8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ lo que resultó en una carga hidráulica de $173.3 \text{ Lm}^{-2}\text{d}^{-1}$ (por metro cuadrado de empaque).

Estos autores encontraron que el filtro pudo disminuir la concentración de nitrógeno amoniacal de 1.6 mg/L a prácticamente no detectable después de un periodo de acondicionamiento del filtro de aproximadamente 60 días. Una vez acondicionado su filtro, lo usaron para tratar concentraciones de hasta 5 mg/L en el influente. Consistentemente con la disminución en la concentración de nitrógeno amoniacal observaron el incremento de la concentración de nitratos a la salida del filtro. Además pudieron observar la aparición de bajas concentraciones de nitritos y la disminución de la concentración de alcalinidad en el filtro. El filtro mostró buen desempeño sin verse afectado por la presencia de sólidos en suspensión. Los autores encontraron que no hubo correlación de la eficiencia de nitrificación con los cambios estacionales de temperatura, para el intervalo de $10.7 \text{ }^\circ\text{C}$ a $23.9 \text{ }^\circ\text{C}$.

De acuerdo con estos autores, es posible mantener la remoción de nitrógeno amoniacal por arriba del 90% si la carga de amonio superficial se mantiene por debajo de $1 \text{ g de NH}_4\text{-N m}^{-2}\text{d}^{-1}$. También encontraron que valores de flujo altos pueden ser favorables, ya que facilitan la transferencia de oxígeno,

inducen el desprendimiento de biomasa permitiendo la formación de biopelículas más delgadas lo que maximiza la transferencia de oxígeno hacia los organismos nitrificantes.

Basados en sus resultados afirman que la carga másica referida al área superficial del medio es el parámetro más importante de diseño y operacional para este tipo de filtros percoladores.

Filtro percolador

En el laboratorio del IMTA se instaló un filtro percolador empleando un material plástico de relleno. Para ello se empleó una columna de acrílico de 14 cm de diámetro y 45 cm de altura, dentro de ella se acomodó una cama de 37 cm de altura del material de relleno, consistente en múltiples tubos en un arreglo tipo anillo (Figura 3-4) con área superficial específica de $410 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$, con lo que el filtro ofrece un área total de 2.335 m^2 .



Figura 3-4 Anillos plásticos utilizados como soporte para el desarrollo de biopelícula, para realizar la nitrificación en agua que llega al Hospital Psiquiátrico.

Consideraciones:

Concentración de nitrógeno amoniacal a la entrada= 6.5 mg/L

Se calcula el caudal necesario en el filtro percolador, para tener una Carga Másica de amonio de $0.5 \text{ g N-NH}_3/ \text{ m}^3 \text{ día}$,

$$Q = \frac{0.5 \text{ g N-NH}_3}{\text{m}^3 \text{ día}} \times \frac{2.335 \text{ m}^2}{6.5 \times 10^{-3} \text{ g/L}} = 179 \text{ L/día} \approx 125 \text{ ml/min}$$

Etapa de inducción del desarrollo de microorganismos nitrificantes.

Para iniciar la inducción del desarrollo de microorganismos nitrificantes, se empleó una mezcla de una disolución sintética conteniendo 2 mg/L de nitrógeno amoniacal y agua proveniente de los retrolavados de los filtros de zeolita que se venían operando para remover el nitrógeno amoniacal (porque en el retrolavado se encuentran microorganismos nitrificantes desprendidos de los filtros). El filtro se operó en modo lote, es decir se cerró en la parte de abajo y se dejó inundado el material filtrante en la mezcla de nitrógeno amoniacal ya descrita. Se utilizó un difusor de aire para proporcionar aire (oxígeno) al sistema durante cinco días. Después de esto se renovó la mezcla de alimentación al filtro y se midió la concentración de nitrógeno amoniacal dos días después, encontrando que varió de 2.46 mg/L a 0.04 mg/L. Se repitió el proceso tres veces más, dejando operar el filtro en modo lote dos días consecutivos, corroborando que la concentración de nitrógeno bajaba hasta \approx 0.05 mg/L

Después de aproximadamente 15 días de operación en lote con agua sintética, se realizó una prueba con agua del Hospital (agua que se transportó desde Santa Catarina al IMTA). El filtro se operó en modo lote empleando agua del Hospital con un contenido de nitrógeno amoniacal de 6.25 mg/L, después de ocho horas el contenido de nitrógeno amoniacal se abatió en dos unidades, para una concentración final de 4.25 mg/L. La alcalinidad varió en este mismo periodo 90 mg/L, disminuyendo de 460 mg/L a 370 mg/L. Después de operarlo tres días más, aireado, en modo lote, fue posible observar un decremento en la concentración de nitrógeno amoniacal hasta 0.1 mg/L. Se decidió realizar una prueba en continuo para evaluar la remoción, en condiciones similares a las que se tendrán realmente para este sistema.

Las concentraciones en el filtro percolador fueron las siguientes:

Concentración inicial = 6.25 mg/L

Concentración después de 1 h de arranque = 5.8 mg/L

Concentración después de 2 h de arranque = 5.8 mg/L

Concentración después de 3 h de arranque= 5.7 mg/L

Se concluyó que en ese estado, el filtro percolador sólo era capaz de remover unos 0.4 mg/L, valor bajo para el desempeño que se desea para el filtro. Se concluyó que el periodo de inducción del crecimiento microbiano aún no era suficiente, por lo que se decidió mantenerlo operando en modo lote, y posteriormente en continuo, con el medio inundado, buscando con ello el desarrollo de la biopelícula nitrificante.

Aproximadamente 15 días después de la evaluación descrita, se repitió la evaluación del biofiltro en modo lote empleando como influente agua sintética con 7.1 mg/l de nitrógeno amoniacal, se encontró que la concentración bajó a 0.01 mg/L en aprox. 24 horas, por lo que se decidió evaluarlo en modo continuo. Se cambió a modo percolador (flujo continuo), encontrándose lo siguiente:

Concentración inicial = 8.2 mg/L

Concentración después de 1h 30 min después del arranque= 7.65 mg/L

Concentración después de 4 h 30 min de arranque= 7.35 mg/L

Concentración después de 6 h de arranque= 7.23 mg/L

Se concluye que después de 6 semanas de acondicionamiento, el biofiltro percolador es capaz de remover aproximadamente 1 mg/L del nitrógeno amoniacal. Se concluyó que se debía continuar con el acondicionamiento. Se decidió disminuir el caudal a la mitad y trabajarlo en continuo en modo percolador, aunque recirculando el agua, para optimizar recursos.

A la semana 8 (dos meses de su instalación) se evaluó el filtro en modo lote. Una primera corrida se realizó con aireación, mediante un difusor, y otra eliminando el difusor; diez días después se inoculó el filtro empleando un paquete comercial de bacterias nitrificantes empleadas en acuarios, se obtuvo lo siguiente:

Concentración inicial = 8.2 mg/L

Tiempo (horas)	con difusor	con difusor (réplica)	sin difusor	Filtro (10 días después de inoculado)
0	8.2	7.9	8.3	8
1	6.75	6.5	7	7.05
2	5.9	5.9	6.15	5.85
3	5.4	4.35	5.9	4.8
4	4.7	4.5	5.6	3.65
5	4.15	4	5.5	2.9
6	---	3.1	5.4	1.45
7	---	2.05	5.3	0.18
8	---	1.25	5.1	0.03
9	---	0.3		
10	---	0.02		
20	0.01			
21	ND			

Se observa que el percolador (sin difusor) puede disminuir en tres unidades la concentración del nitrógeno amoniacal. Que el uso de un difusor mejora la eficiencia del filtro, permitiendo la remoción de prácticamente 8 unidades de nitrógeno amoniacal. Y que, al parecer, el uso de un inóculo de bacterias nitrificantes resulta beneficioso.

Seguimiento del filtro estabilizado.

A continuación se presenta una gráfica Figura 3-5 con los valores de nitrógeno amoniacal cuantificados a la entrada y salida del filtro percolador, que se mantuvo activo mediante la alimentación de agua sintética (agua del pozo IMTA, a la que se añadía cloruro de amonio). El periodo es posterior a la etapa de estabilización que se describió en los párrafos anteriores. Se muestra el desarrollo del filtro a lo largo de más de 40 días.

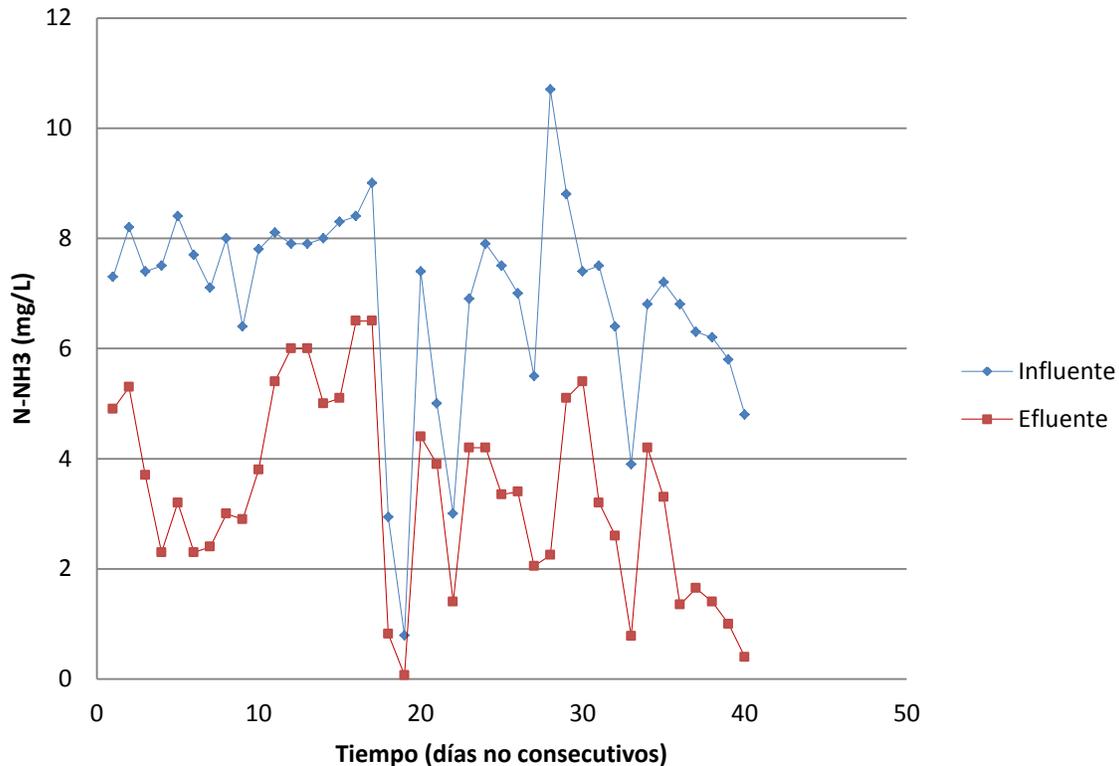


Figura 3-5 Concentraciones de nitrógeno amoniacal a la entrada y salida del filtro percolador.

En esta gráfica los últimos 6 valores corresponden a los observados al alimentar al filtro con agua del Hospital, que fue transportada a las instalaciones del IMTA.

Observaciones relevantes del proceso de nitrificación en filtro percolador en continuo

De lo observado durante el periodo que estuvo funcionando el filtro percolador de manera continua, una vez que se estabilizó, se destaca lo siguiente:

1. Una vez desarrollada la biota nitrificante, es posible que se observe alguna baja en la eficiencia de nitrificación, es decir que la concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente empiece a incrementar, es decir que la concentración del efluente se parece a la del influente. En ese caso, es necesario realizar un lavado del medio filtrante. Se recomienda

un enjuague suave con agua limpia, no clorada. El lavado hace que se recupere la capacidad de nitrificación. Si un enjuague no es suficiente, se puede repetir la operación

2. Durante el periodo de prueba, el caudal en el filtro se varió entre 84 y 150 ml/min, e incluso llegó a mantenerse sin influente por periodos de cuatro y hasta ocho horas, sin detrimento considerable en el nivel de nitrificación al reiniciar la operación. Esto permite garantizar que en planta, el desempeño del filtro no se verá comprometido por fluctuaciones en el caudal e incluso si por alguna razón la planta quedara sin influente (detenida) por algunas horas.
3. En ocasiones, en el tinaco usado como reservorio de la disolución de alimentación se observó una disminución en la concentración de nitrógeno amoniacal en días consecutivos (influyente). Asimismo, al determinar la concentración en el tinaco y en la salida de la manguera que conectaba al reservorio con la entrada del filtro, se observaron diferencias, esto se atribuye al desarrollo de microorganismos nitrificantes en las paredes internas del tinaco, en contacto con la disolución de amonio, y en el interior de las mangueras. Cuando esto se observó, fue necesario lavar el tinaco y mangueras para poder evaluar el desempeño del filtro. Para el caso en que se usó como influente el agua del Hospital, también se observó esa disminución (últimos seis puntos de la gráfica). Sin embargo, en este caso no se hizo ningún lavado y sólo se observó el desarrollo del proceso. Una implicación importante de esta observación es que, en campo, es posible que los biofiltros reales tengan un desempeño superior al observado en el laboratorio, por lo que aunque aquí se observó que la concentración de nitrógeno amoniacal puede disminuir entre 3 y 5 unidades, es posible que en realidad se obtengan remociones mayores, como lo indica la literatura.

Nitrógeno amoniacal. Estudio de la remoción mediante filtros de zeolita.

Fase de estudio I.

La remoción biológica de nitrógeno amoniacal, es un proceso que ha sido adoptado en varios países alrededor del mundo. Recientes reportes indican que ha sido empleada de manera exitosa en China (Feng et al., 2012), Dinamarca (Lee et al., 2014) y muchos otros países europeos (Rittmann & McCarty, 2001). En realidad no se comprende muy bien cómo funciona, diversos mecanismos han sido identificados, lo mismo que varias especies microbianas como ya se mencionó. A pesar de ello este proceso resulta muy conveniente en el tratamiento del agua que contiene nitrógeno amoniacal. En Europa ya ha sido empleado por varios años y recientemente en los estados unidos (US-EPA, 2014) está siendo adoptado por sus probadas ventajas.

El tren de tratamiento propuesto combinará el acoplamiento de un filtro percolador con un filtro de zeolita clinoptilolita. En sitio se probó el acoplamiento de una torre de charolas de aireación, seguida de filtros. La torre empleada está diseñada para un caudal de 3.6 lpm, el agua aireada es recibida en un recipiente de 20 L desde donde es enviada por un lado a los filtros con material filtrante que se están evaluando y por otro a un tinaco en donde se almacena para surtir de agua a los filtros durante la noche, el agua en el tinaco se mantiene en recirculación para mantener, gracias a un salto hidráulico, lo más alto posible la concentración de oxígeno en el agua.

En este periodo se presentó desarrollo de algas en las charola de aireación que taponaron los orificios disponibles para la percolación del agua. El cambio de las charolas de aireación a filtro percolador, con mayores espacios disponibles para la circulación del agua permitirá que este tipo de problemas no se presente.

Se deberán realizar revisiones periódicas y brindar mantenimiento constante a las instalaciones para evitar la proliferación de algas.

En la Figura 3-6 se puede observar el comportamiento de la concentración de nitrógeno amoniacal durante la evaluación de los filtros a escala piloto.

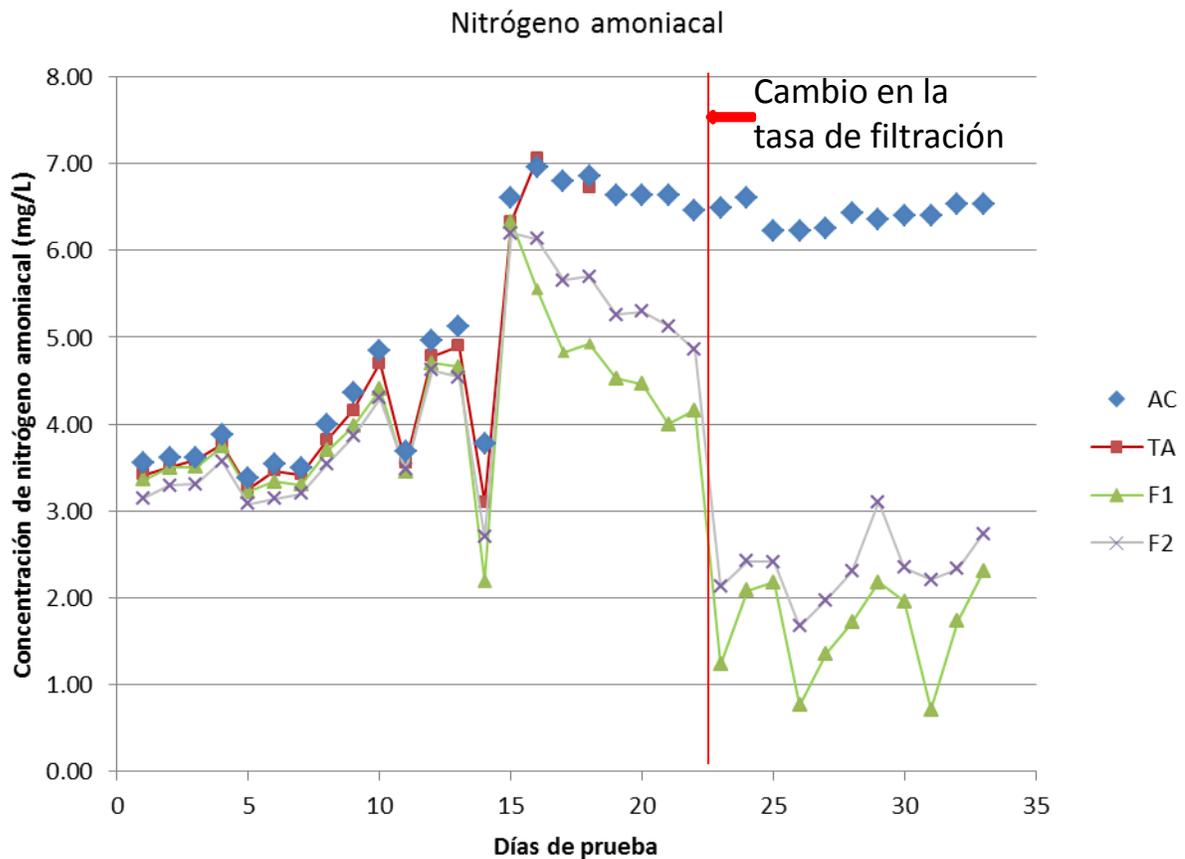


Figura 3-6 Concentraciones de nitrógeno amoniacal durante las pruebas realizadas en el Hospital Psiquiátrico.

Al inicio del periodo de evaluación, la concentración de nitrógeno amoniacal en el agua cruda se encontraba en el orden de 3.5 mg/L; sin embargo, esta concentración fue aumentando en las siguientes semanas hasta alcanzar valores cercanos a 7 mg/L. En la torre de aireación, la concentración de nitrógeno amoniacal se presentaba igual que en el agua cruda, por lo cual se decidió interrumpir la cuantificación en este punto.

Después de un mes de operación, la concentración de $N-NH_3$ en el efluente de los filtros empezó a disminuir notablemente, obteniéndose valores de 4 mg/l. No obstante, se decidió retrolavar el medio filtrante y disminuir el caudal de alimentación de 22 a 3.6 l/min, con la finalidad de observar el efecto de la disminución de la carga de nitrógeno amoniacal en su desempeño. Debido a este cambio, la concentración promedio en la salida de los filtros fue de 1.66

y 2.33 mg/l para el filtro 1 y 2 respectivamente. La Figura 3-7 muestra el efecto de la carga de nitrógeno amoniacal ($q \text{ N-NH}_3$) con respecto a su remoción.

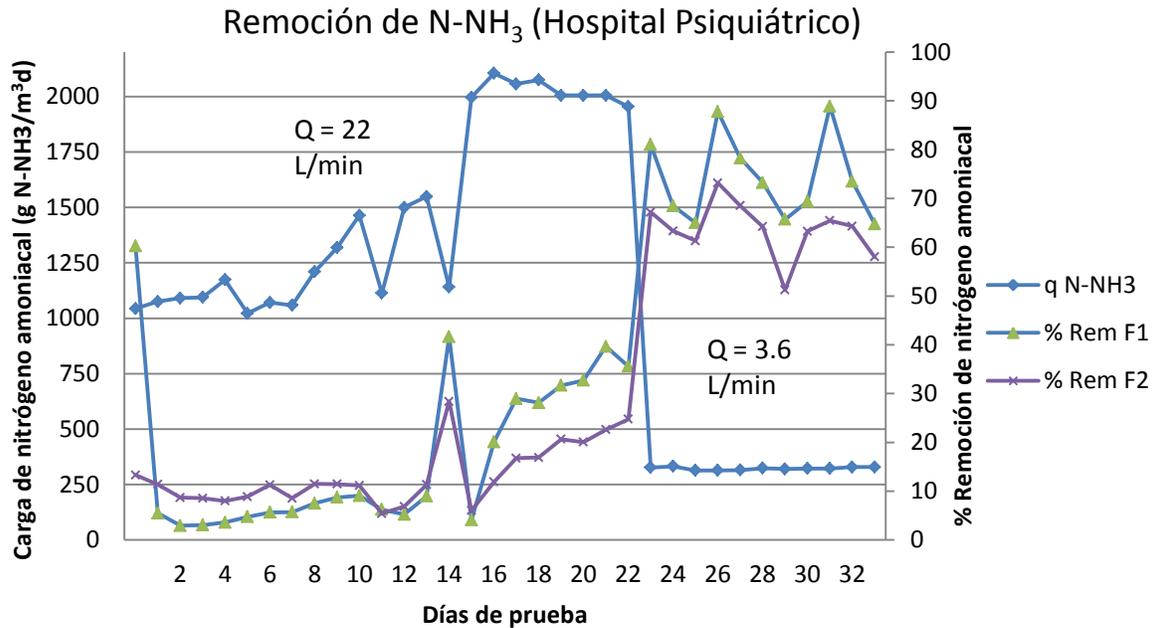


Figura 3-7 Efecto de la carga de nitrógeno amoniacal sobre la remoción durante las pruebas realizadas en el Hospital Psiquiátrico.

Los filtros empezaron a operar a una carga de 1000 g N-NH₃/m³ d, la cual fue aumentando con el cambio en la concentración de nitrógeno amoniacal en el agua cruda, alcanzando valores de 2000 g N-NH₃/m³ d. Bajo estas condiciones, la remoción fue en promedio de 17.4 y 13.2 % para el filtro 1 y 2 respectivamente.

Un análisis de la literatura mostró que las cargas trabajadas por otros autores son bastante más bajas de la que se venía trabajando, así que se disminuyó la carga a 350 g N-NH₃/m³ d. Desde el primer día posterior al cambio se pudo observar un aumento importante en la remoción para ambos filtros. Con esta carga se obtuvieron remociones promedio de 74.2 % en el filtro 1 y 63.7 % en el filtro 2.

La Figura 3-8 relaciona la carga con la tasa de remoción de nitrógeno amoniacal. Después de un mes de operación y operando a un caudal de 22

L/min y una carga de 1000 a 2000 g N-NH₃/m³ d, la tasa de remoción para el filtro 1 aumentó hasta 795 g N-NH₃/m³ d y 483 g N-NH₃/m³ d para el filtro 2. No obstante, a estas condiciones de operación la eficiencia de remoción en ambos filtros fue sólo de entre 20 y 40 %.

Por otro lado, cuando los filtros operaron a un caudal de 3.6 L/min, las tasas de remoción promedio fueron de 239.4 y 205.4 g N-NH₃/m³ d para el filtro 1 y 2 en ese orden, logrando remociones entre el 60 y 90 %. Este caudal es equivalente a una tasa de filtración de 0.84 m/h.

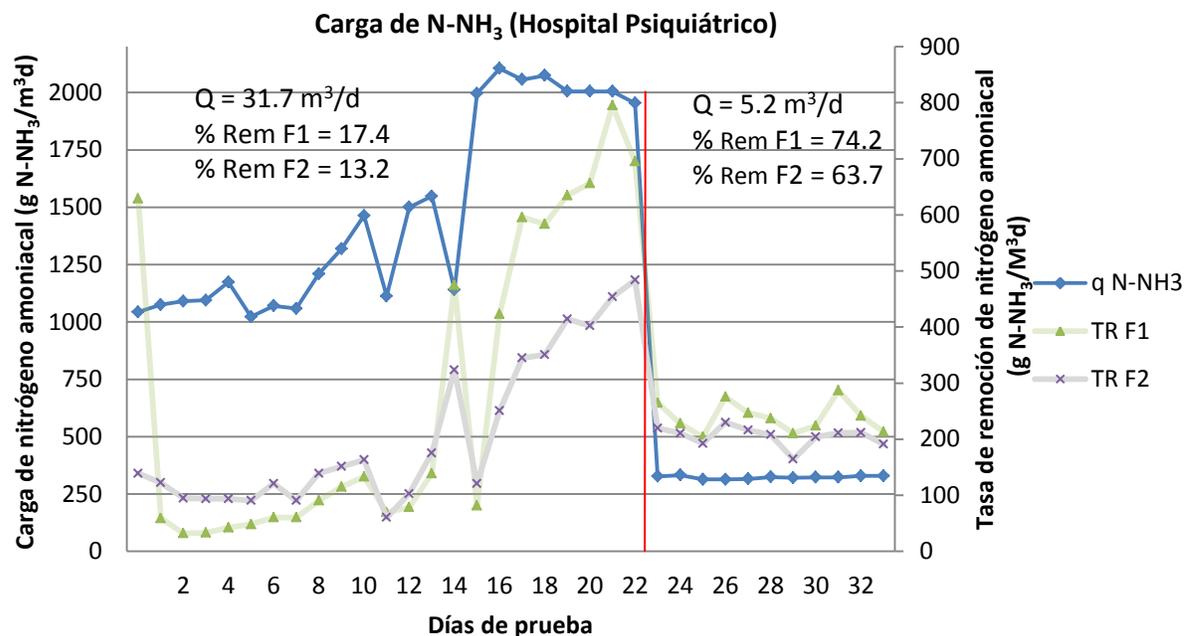


Figura 3-8 Relación de la carga de nitrógeno amoniacal sobre la tasa de remoción de las pruebas realizadas en el Hospital Psiquiátrico.

Como se mencionó anteriormente, en el proceso de nitrificación el nitrógeno amoniacal es oxidado a nitratos, por lo cual, también se monitoreo el comportamiento de la concentración de nitratos.

La concentración de nitratos en el agua cruda fue de 0.6 mg/L. Al inicio de la operación de los filtros, los nitratos en ambos efluentes era igual que en el

agua cruda. Sin embargo, fue posible observar un aumento paulatino en su concentración hasta valores entre 3 y 5 mg/L, debido a que se estaba llevando a cabo el proceso de nitrificación. Por otro lado, cuando se realizó el cambio de caudal de alimentación de los filtros, este parámetro se mantuvo en valores de 1mg/L y 2 mg/L hasta el término de la evaluación. Un posible motivo por el cual se presentó una disminución de los nitratos, es que pudo haber ocurrido simultáneamente el proceso de desnitrificación en las zonas anóxicas del medio filtrante, con lo cual ocurrió la conversión de los nitratos a nitrógeno gas. Sin embargo, para haber corroborado que también ocurría la desnitrificación, hubiera sido necesario monitorear el comportamiento del nitrógeno total.

Nitrógeno amoniacal.

Fase de estudio II.

Se inició una segunda serie de pruebas, esta vez a nivel semipiloto. En esta segunda serie de pruebas a escala laboratorio, se utilizó un filtro empacado con zeolita verde, alimentado por agua aireada con aproximadamente 4mg/L de oxígeno disuelto proveniente de la cascada de las charolas de aireación, empleando un caudal de 100ml/min, para una tasa de filtración de 1 m²/h. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 3-9 muestra las concentraciones de oxígeno disuelto determinadas en el agua cruda o agua de entrada, a la salida de las charolas de aireación y a la salida del filtro de zeolita verde (clinoptilolita).

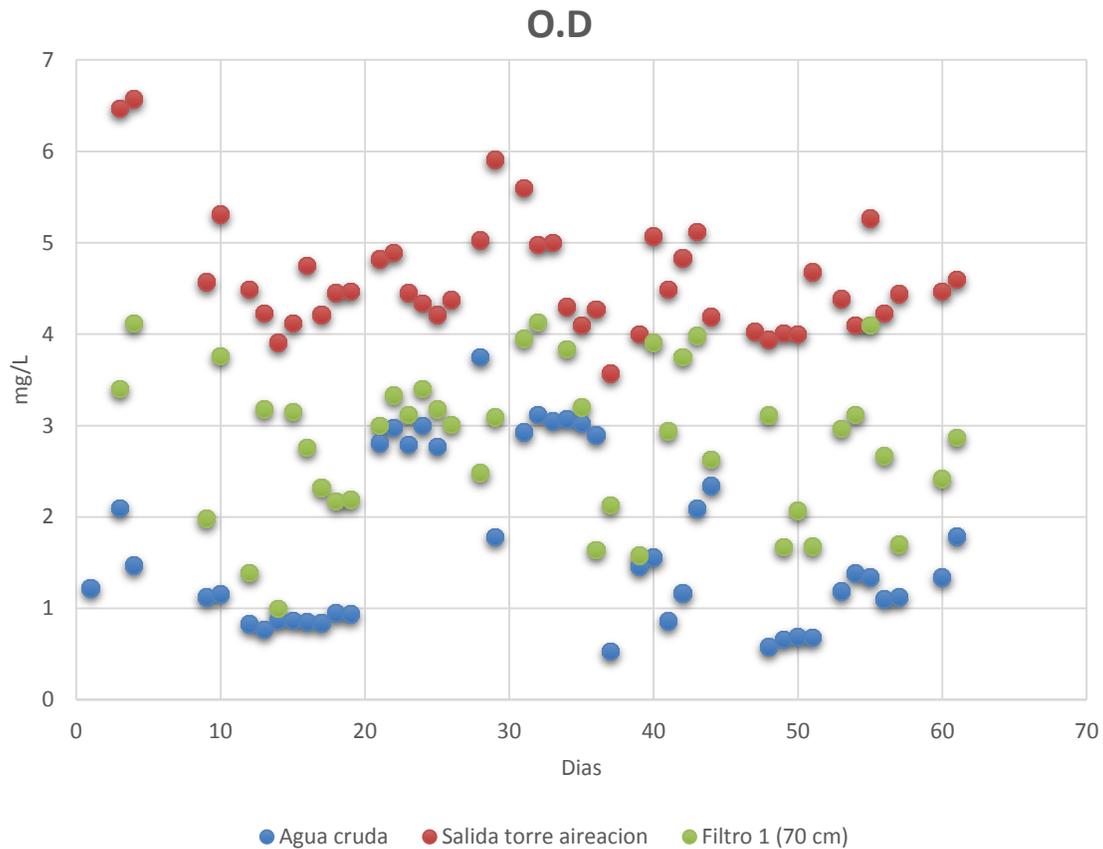


Figura 3-9 Concentración de oxígeno disuelto en agua cruda, salida de aireación y salida de filtro de zeolita.

El agua cruda presenta valores que van de 1 mg/L y en ocasiones hasta 3 mg/L.

La concentración de oxígeno disuelto se incrementa por efecto de la cascada de agua a través de las charolas de aireación. Los valores en agua aireada van de 4 mg/L a 5 mg/L en la mayoría de los casos, presentándose ocasionalmente algunos valores cercanos a los 6 mg/L.

Este elemento es consumido a su paso por el filtro de zeolita recubierta, debido al proceso de nitrificación. El consumo de oxígeno observado va de poco menos de una unidad (mg/L) hasta casi tres unidades; es variable aunque no se sabe muy bien a qué atribuir esta variación.

Lo que es un hecho es que la torre de charolas de aireación cumple adecuadamente con los requerimientos del proceso.

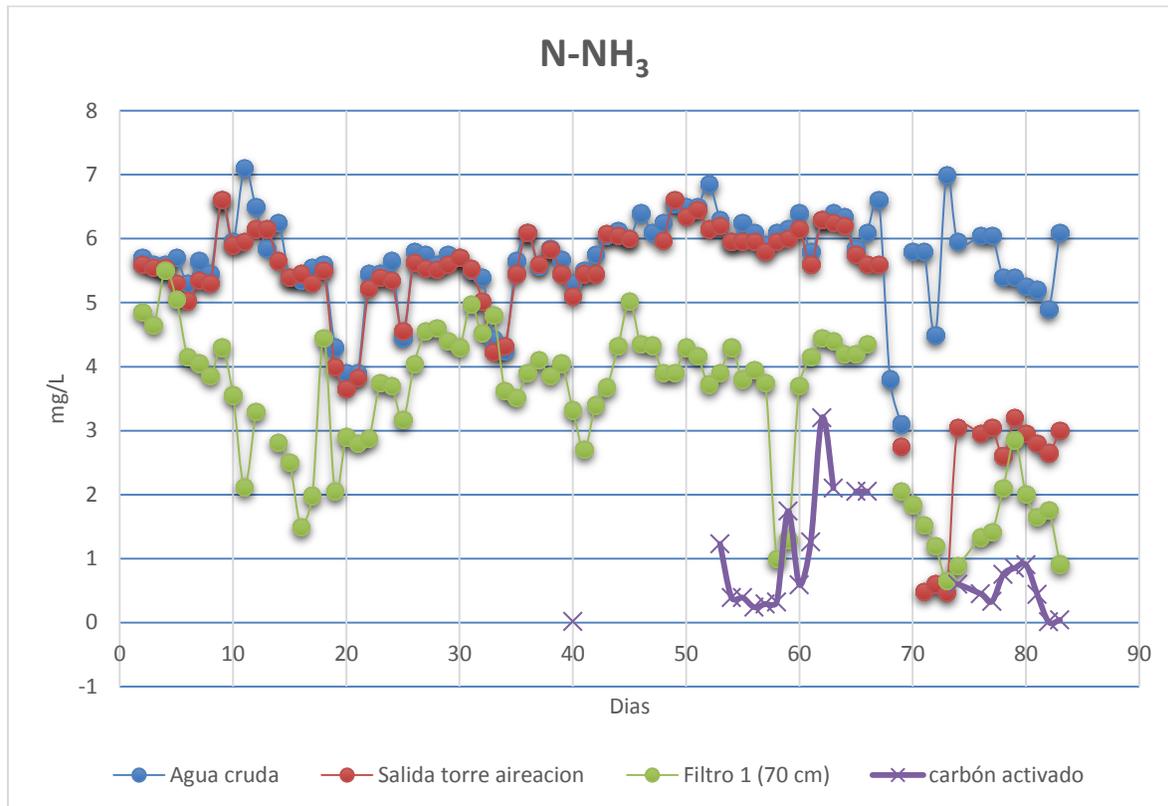


Figura 3-10 Concentraciones de nitrógeno amoniacal durante las pruebas realizadas en el Hospital Psiquiátrico.

La Figura 3-10 muestra la variación de las concentraciones de nitrógeno amoniacal en el agua cruda, después de las charolas de aireación y después del filtro de zeolita.

La gráfica muestra que se requirió un periodo de, aproximadamente, sesenta días de aclimatación. A diferencia del caso del Vivero Netzahualcóyotl, en donde la aclimatación se alcanzó en aproximadamente un mes, en el Hospital de requirieron más de 60 días para lograr observar una disminución en la

concentración del nitrógeno amoniacal. Es de llamar la atención que simultáneamente se observe un decremento en la concentración de nitrógeno en el efluente de las charolas de aireación y en el efluente del filtro de zeolita. Definitivamente están relacionados. También se observa que las concentraciones finales alcanzadas eran cercanas a 1 mg/L, valor que aún rebasa el límite permisible que establece la norma.

La incorporación de un filtro de carbón activado, después del filtro de zeolita, si bien tiene como objetivo principal la remoción de compuestos orgánicos, complementa el tren de remoción de nitrógeno amoniacal. Se pudo verificar en sitio que el efluente del filtro de carbón activado contiene cantidades de nitrógeno amoniacal de entre 0.04 mg/L y 0.9 mg/L.

Lo interesante de estos resultados es que se ha podido demostrar que el filtro de zeolita clinoptilolita puede realizar la remoción de hasta cinco unidades de nitrógeno amoniacal por sí solo. Este resultado es importante porque garantiza la obtención de agua que cumple con la concentración de 0.5 mg/L de la NOM-127 SSA1 Modificación 2000, en combinación con un filtro percolador, para el que se ha demostrado que, a su vez, es capaz de remover al menos, 3.5 mg/L de nitrógeno amoniacal.

Aunque por razones de tiempo no fue posible realizar el acoplamiento experimental entre el biofiltro y la secuencia de filtros zeolita-carbón activado, el desempeño obtenido por ambos arreglos, de manera separada, permite afirmar que el agua que sea tratada por un arreglo en el que se acoplen estas unidades, cumplirá con el límite máximo permitido para nitrógeno amoniacal, establecido en la Norma NMX-127 SSA01 Modificación 2000.

De esta manera, el tren de tratamiento unitario propuesto, consistente en filtro percolador (Biofiltro grueso, denominado así porque en él se realizará la mayor remoción de nitrógeno amoniacal), filtro de zeolita (o biofiltro fino, porque hará las veces de un filtro de pulimiento en el proceso de remoción de nitrógeno amoniacal), y un filtro de carbón activado, permitirá obtener agua que cumpla con todos los parámetros que establece la NOM-127 SSA1 Modificación 2000. La Figura 3-14 muestra el esquema de tratamiento propuesto.

3.2.1 PRUEBAS DE TRATABILIDAD EN PLANTA PILOTO PARA REMOCIÓN DE HIERRO, MANGANESO Y ARENAS EN PUNTO DE ENTREGA HOSPITAL PSIQUIÁTRICO.

Hierro. El énfasis del tratamiento se orientó inicialmente hacia la remoción del nitrógeno amoniacal. Las etapas inicialmente seleccionadas para este fin fueron la aireación mediante una torre de charolas en las que se utiliza tezontle como medio dispersante del agua y un filtro de zeolita clinoptilolita. Se hizo el seguimiento de la concentración de hierro y de manganeso a la par del que se realizó para la concentración de nitrógeno amoniacal. La Figura 3-11 muestran los resultados obtenidos para la concentración de hierro medida en el agua cruda, a la salida de la torre de charolas de aireación y a la salida del filtro de zeolita clinoptilolita, durante las pruebas en campo.

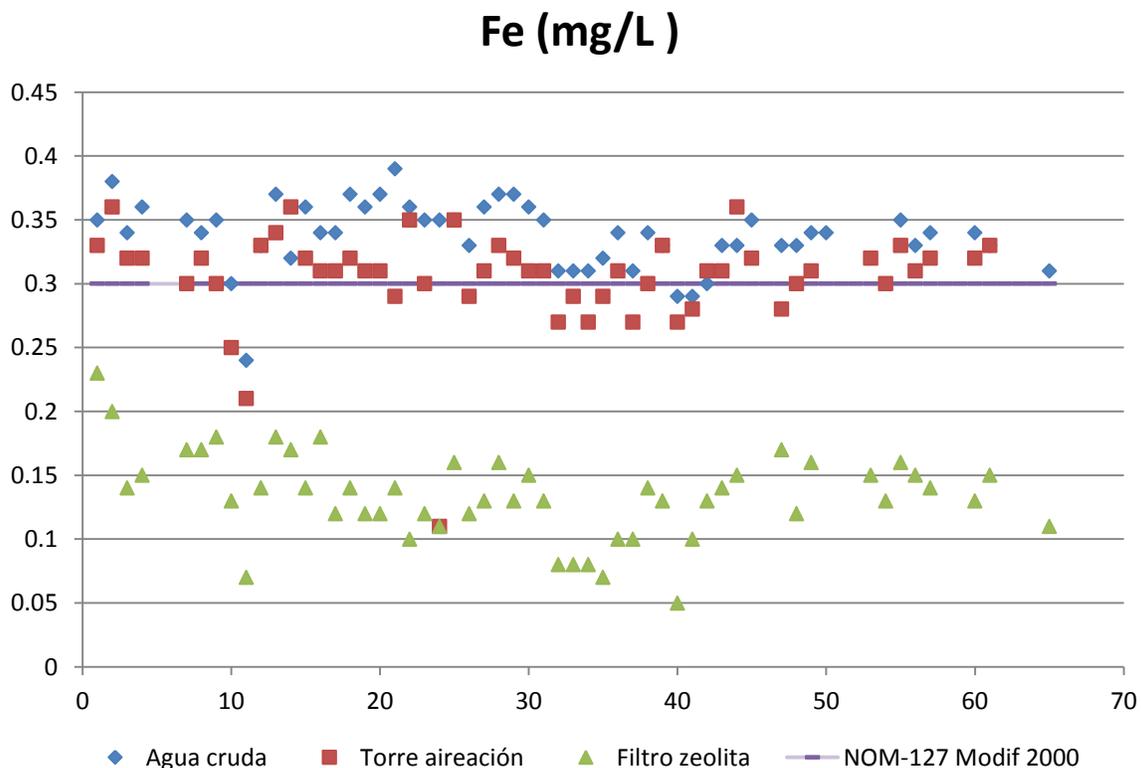


Figura 3-11 Variación de la concentración de hierro durante las pruebas realizadas en sitio, en el agua cruda, aireada y a la salida del filtro de zeolita verde.

Estas pruebas mostraron que la concentración de hierro en el agua cumple con el límite permisible establecido en la NOM-127 SSA1 Modificación 2000, de 0.3 mg/L prácticamente desde el inicio de la prueba y permanece debajo de éste durante toda la prueba.

Manganeso. La aireación en las charolas favorece, aunque lentamente, la oxidación del manganeso, y aunque la función del filtro de zeolita es servir de medio de soporte para bacterias nitrificantes, de los resultados experimentales obtenidos en campo, se estima que el manganeso presente en el agua que llega al Hospital, típicamente 0.4 mg/L, puede ser retenido en este primer filtro de zeolita, permitiendo que el efluente cumpla con el límite máximo permisible establecido en la NOM-127 SSA1 Modificación 2000, de 0.15 mg/L.

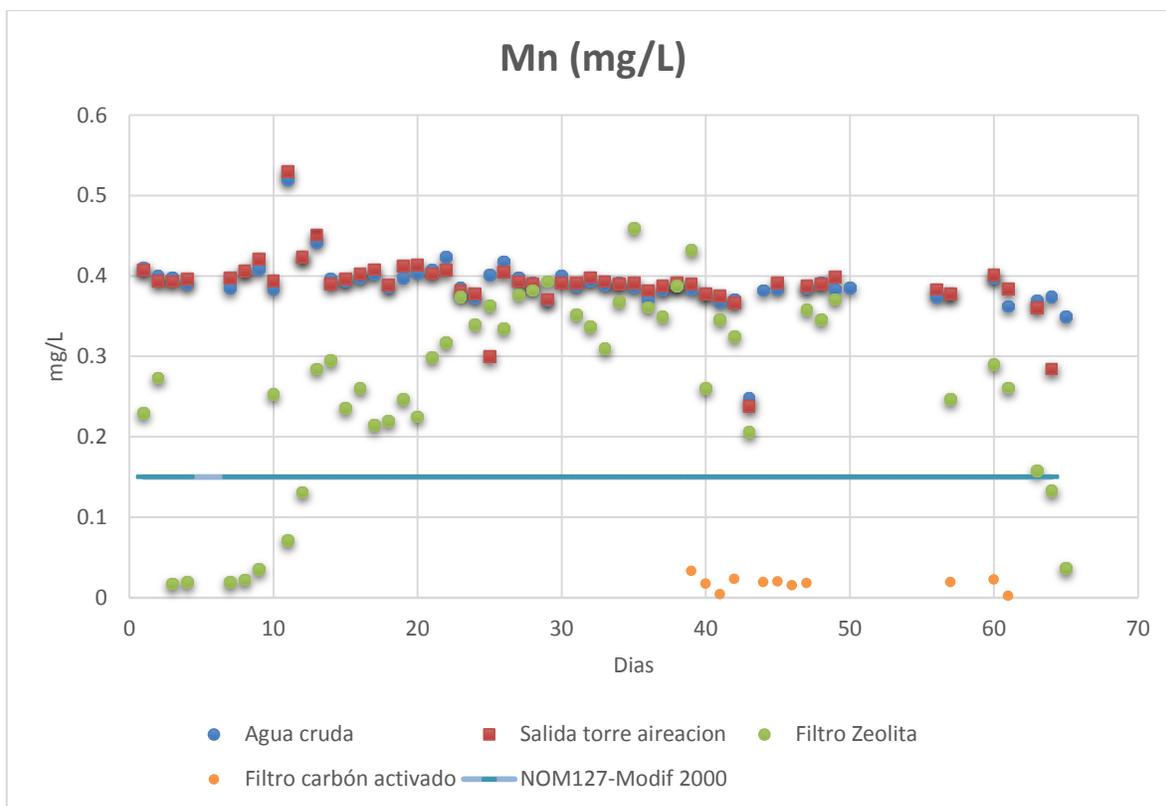


Figura 3-12 Variación de las concentraciones de manganeso durante pruebas en sitio, en el agua cruda, agua aireada, a la salida del filtro de zeolita verde y después del filtro de carbón activado.

En campo se probó un tren en el que se incorporó un filtro de carbón activado después del filtro de zeolita. Tal y como se observa en la figura alrededor del día 40, este filtro retiene al manganeso aún presente hasta niveles prácticamente no detectables en el efluente. Si bien durante las pruebas en campo este resultado se observó después del filtro de carbón activado, la experiencia previa con este metal ha mostrado que después de algunas semanas de trabajo continuo, los óxidos que van revistiendo las partículas de zeolita clinoptilolita favorecen la remoción de manganeso, haciendo el proceso altamente eficiente. Por lo que está garantizado que el agua efluente de la planta cumplirá con el límite permisible establecido en la NOM-127 SSA1 Modificación 2000, para manganeso.

Arenas. Durante el periodo de pruebas en sitio, que abarcó más de ocho semanas, no se observó la llegada de arenas. La turbidez se estuvo monitoreando, encontrando valores inferiores a 5 NTU, que establece la NOM-127 SSA1 Modificación 2000, para este parámetro.

Turbiedad

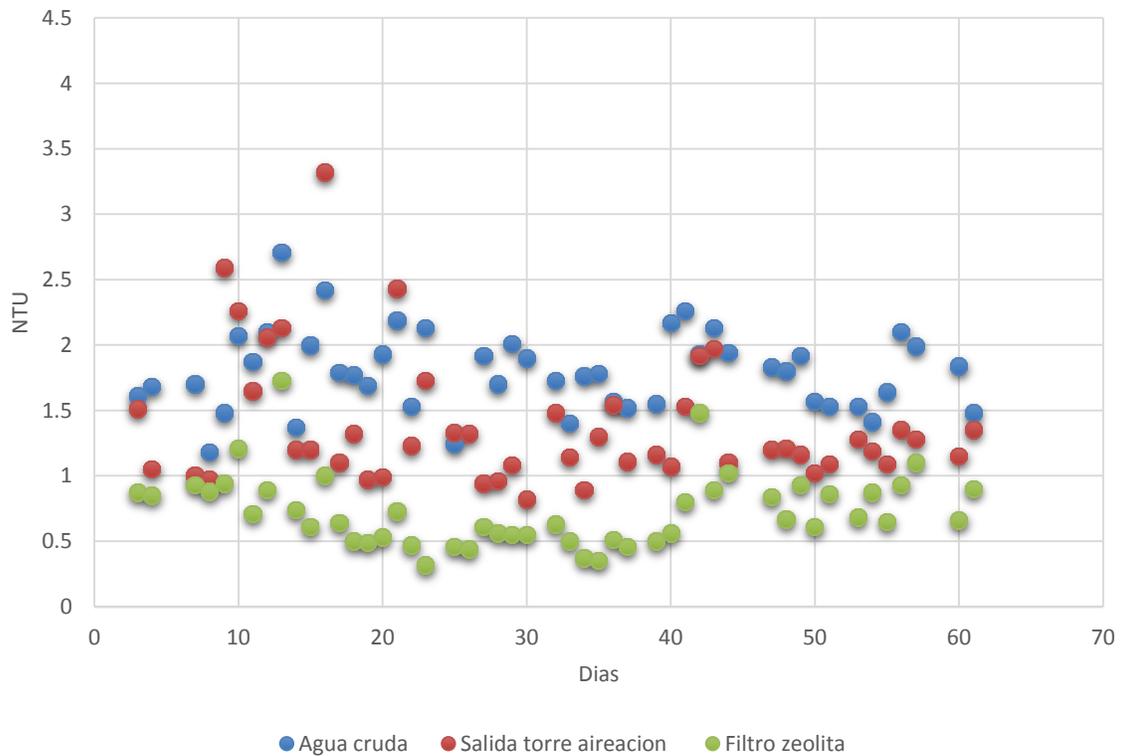


Figura 3-13 Valores de turbiedad determinados en el agua cruda, en el agua aireada y en el efluente del filtro de zeolita

Con base en las observaciones realizadas en campo se determinó que no es necesario implementar ninguna medida o dispositivo para retención de arenas en este punto de entrega.

Materia orgánica. La presencia de materia orgánica es común en fuentes de abastecimiento superficiales, más no subterráneas como es el caso del agua que llega al Hospital, obtenida de los pozos de los ramales Tláhuac (Netzahualcóyotl), Mixquic-Santa Catarina y Santa Catarina. Los valores de COT de 6 mg/L obtenidos en varias determinaciones indican que el agua trae cierta contaminación orgánica.

Con el fin de evaluar si la presencia de esta materia orgánica representa algún riesgo al consumir el agua, se realizaron análisis cromatográficos para determinar la posible presencia de compuestos orgánicos tóxicos. Los resultados de los análisis tanto de compuestos volátiles como semivolátiles se encuentran en los incisos **3.1.2** y **3.1.3** de este mismo informe.

Tal y como ahí se comentó, se logró determinar la presencia de algunos compuestos tóxicos, aunque en concentraciones muy bajas. A fin de garantizar que el agua que se entregue al usuario esté libre de contaminantes, como parte final del tren de tratamiento se instaló un filtro para remover contaminantes orgánicos.

Se instaló un filtro de carbón activado para tener un tiempo de contacto de aproximadamente 7 min, se empleó carbón activado de cáscara de coco. El material se colocó en una columna de acrílico de 4.5 cm de diámetro. La altura del material fue de 60 cm, lo que para el caudal de prueba que fue 200 ml/min, conlleva un tiempo de contacto de 7 min. La tasa de filtración que se operó fue de aproximadamente 5 m/h, para el área superficial del filtro que fue de $2.37 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

En estas condiciones, se tomaron muestras a la entrada y salida del tren de tratamiento y fueron analizadas por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

Los resultados del análisis mostraron que el efluente del tren de tratamiento está libre de compuestos orgánicos, ya que no hubo detecciones.

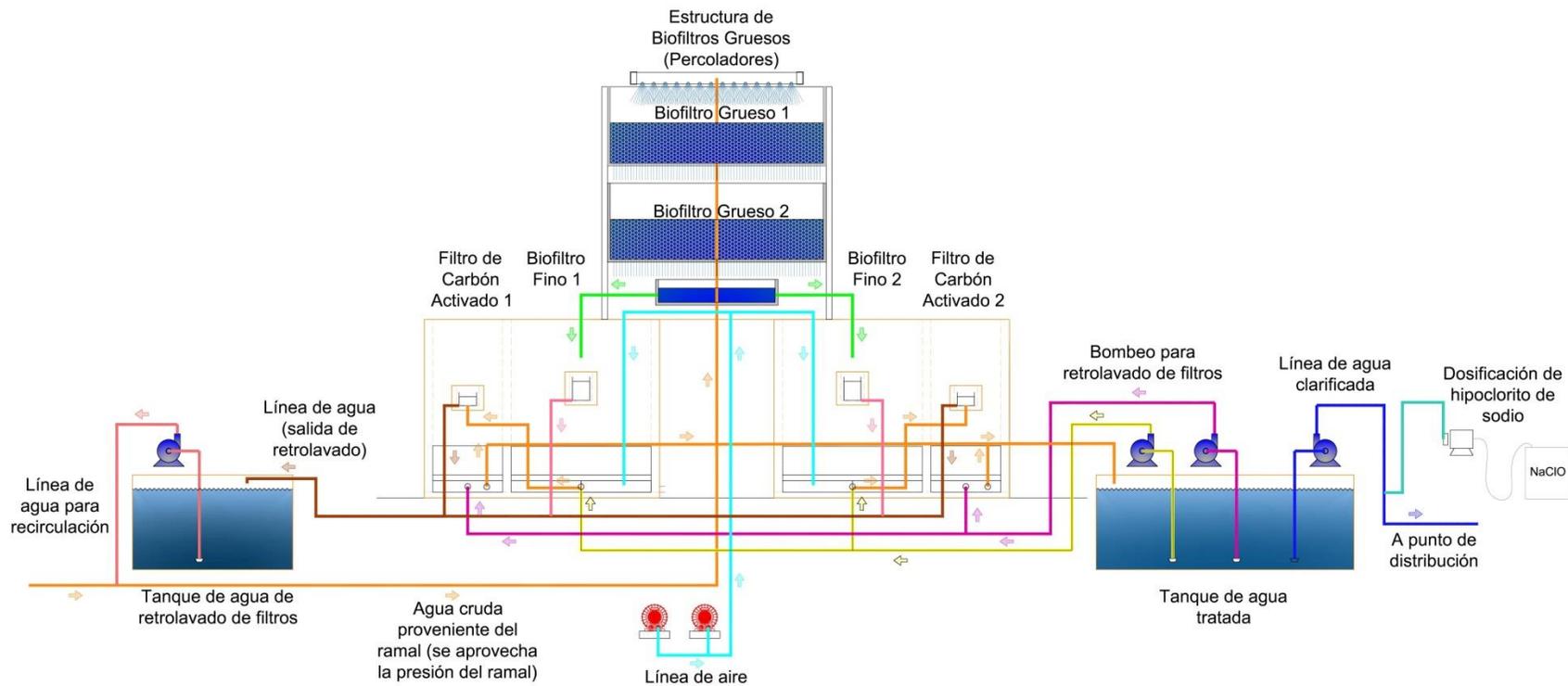


Figura 3-14 Esquema que ilustra el tren de tratamiento propuesto para potabilizar agua en el Hospital Psiquiátrico.

4 CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RAMAL TLÁHUAC (NETZAHUALCÓYOTL) EN PUNTO DE ENTREGA VIVEROS-CUENCA LECHERA.

El agua que llega al Vivero Netzahualcóyotl es agua subterránea, extraída de la batería de pozos que administra la CONAGUA y conducida a través del ramal Tláhuac-Netzahualcóyotl. Para este punto de entrega, el agua es una mezcla proveniente de los pozos 1 a 9 del ramal.



Durante el estudio realizado en el 2014 por el IMTA, se realizó una caracterización de la calidad del agua para la mezcla de los pozos 1 a 6, punto situado a unos 500 m del Vivero, y cuya calidad no difiere mucho de la que recibe el Vivero. Las principales características fisicoquímicas del agua del ramal a la altura del pozo 6, medidas en 2014, se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Características relevantes del agua del ramal Tláhuac Netzahualcóyotl, a la altura del pozo 6 (un poco antes del punto de entrega Viveros).

Análisis	Pozo 6	NOM-127-SSA1-1994 Modif. 2000
Aluminio (mg/L)	0.0707	0.2
Arsénico (mg/L)	0.0061	0.05
Bario (mg/L)	<0.50	0.7
Cadmio (mg/L)	<0.0010	0.005
Cobre (mg/L)	<0.05	2
Cromo (mg/L)	<0.005	0.05
Hierro (mg/L)	0.9132	0.3
Manganeso (mg/L)	0.9815	0.15
Mercurio (mg/L)	<0.001	0.001
Plomo (mg/L)	<0.005	0.025
Silicio (mg/L)	23.0935	N/A
Sodio (mg/L)	134.9505	200
Zinc (mg/L)	<0.10	5
COT (mg/L)	4.66	N/A
Cianuros (mg/L)	<0.020	0.07

Análisis	Pozo 6	NOM-127-
Cloruros (mg/L)	73.7	250
Cloro libre (mg/L)	0.06	0.2-1.50
Alcalinidad (mg/L)	388	N/A
Color verdadero UPt-Co	25	20
Dureza total (mg/L) CaCO ₃	285	500
Fenoles T. (mg/L)	<0.0145	0.001
Floururos (mg/L)	0.429	1.5
Fosfatos T. (mg/L)	<1.25	N/A
N-NH ₃ (mg/L)	0.316	0.5
N-NO ₃ (mg/L)	0.147	10
N-NO ₂ (mg/L)	0.1047	0.05
P-(ORTO) (mg/L)	<0.39	N/A
SDT (mg/L)	724	1000
SST (mg/L)	<6.27	N/A
ST (mg/L)	724	N/A
Sulfatos (mg/L)	122	400
SAAM1 (mg/L)	<0.130	0.5
Turbiedad (UNT)	6.8	5
Coliformes totales (NMP/100mL)	No detectable	Ausencia o no detectable
Coliformes fecales (NMP/100mL)	No detectable	Ausencia o no detectable

Como se observa, los parámetros que están fuera de norma son los metales hierro y manganeso, así como la turbiedad. Estos datos sólo se han

considerado como un antecedente para tener una referencia de los valores que pueden esperarse para los contaminantes.

Para este estudio se ha obtenido un promedio de las concentraciones para Fe, Mn y nitrógeno amoniacal evaluadas en el Vivero, durante un periodo de dos meses, en que se realizaron pruebas de tratabilidad en sitio. Estas fueron de 0.345 para hierro, 0.305 para manganeso y 0.825 mg/L para nitrógeno amoniacal. De acuerdo con estos últimos datos, el contenido de nitrógeno amoniacal rebasa el límite permisible de 0.5 mg/L establecido en la Modificación del año 2000 a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

El contenido de hierro rebasa apenas el límite de la normatividad (0.3 mg/L), en tanto que el manganeso está del orden de dos veces por encima del límite de la norma que es de 0.15 mg/L.

Considerando estas características y dado que la CONAGUA tiene el compromiso de la entrega de agua con características potables, se procedió a la realización de pruebas en sitio para determinar un tren de tratamiento que permita obtener agua que cumpla con la normatividad.

Con el objetivo de determinar los parámetros de diseño del sistema de tratamiento para potabilizar el agua que llega al punto de distribución Viveros-Cuenca Lechera se realizaron, en sitio, pruebas piloto durante dos meses en el ramal Tláhuac.

Se instaló en el Vivero Netzahualcóyotl una planta piloto con el tren de tratamiento definido en 2014, consistente en una torre de charolas de aireación seguida de un filtro de zeolita. En las charolas de aireación se retiraría una parte del hierro contenido en el agua, quizá un poco de nitrógeno amoniacal, pero sobre todo se esperaba un incremento en la concentración de oxígeno disuelto requerido para el segundo paso del tratamiento consistente en la nitrificación del nitrógeno amoniacal, de acuerdo a la siguiente ecuación:



Hay que señalar que esta es una ecuación de una reacción neta que implica una compleja serie de pasos intermedios catalizados por enzimas.

La nitrificación produce protones libres, H^+ , que consumen fácilmente iones de bicarbonato (HCO_3^-), disponibles, o alcalinidad, reduciendo así la capacidad de amortiguamiento del agua. Además, las bacterias nitrificantes consumen CO_2 para construir nuevas células. El consumo total de alcalinidad por la nitrificación es de 7,1 mg como $CaCO_3$ por mg de NH_4^+-N oxidado (US EPA, 1975). La demanda de oxígeno de la nitrificación es también significativa; así para la nitrificación completa, se requieren 4,6 mg O_2 por mg NH_4^+-N oxidados (US EPA, 1975; US EPA 1993).

Este proceso biológico es realizado por bacterias aerobias ubicuas, que se desarrollarán sobre los medios filtrantes de la planta piloto instalada en el Vivero Netzahualcóyotl. Para el desarrollo de las bacterias nitrificantes se probaron dos medios granulares que se colocaron en filtros que trabajaron en paralelo: zeolita *clinoptilolita* virgen y zeolita, del mismo tipo, recubierta con óxidos de manganeso. Este segundo material fue probado ya que aunque se coloque virgen, se espera que con el paso del tiempo de operación se depositen sobre la zeolita los óxidos de manganeso debido a la presencia de iones manganeso en el agua del ramal.

La planta potabilizadora piloto tiene dos filtros a presión de diámetro igual a 50 cm. En uno de los filtros se colocó un lecho de 50 cm de espesor conformado por zeolita virgen y en el otro filtro un lecho de espesor similar con zeolita recubierta con óxidos de manganeso.

Se inició la prueba piloto a un caudal aproximado de 20 L/min (0.34 L/s) que se alimentó al aireador de charolas. El caudal tuvo que ajustarse ya que la toma de agua no brindó la suficiente para mantener el valor seleccionado planteado en el anexo técnico de 30 L/min. Se mandó a los filtros toda el agua que se obtenía de la toma, el valor del caudal medido fue aproximadamente 20 L/min, por lo que cada filtro fue alimentado con la mitad de este caudal

El agua aireada se bombeó a los filtros dividiéndose en corrientes del mismo gasto, es decir cerca de 10 L/min o lo que es lo mismo 0.16 L/s. Este sistema se operó durante dos meses de manera continua, y se tomaron muestras, de lunes a viernes, al menos una vez al día, de la entrada y salida de la planta piloto para determinar, en sitio, mediante métodos rápidos, los parámetros que normalmente se encuentran fuera de norma y que tienen que ser

removidos mediante este tratamiento (nitrógeno amoniacal, hierro y manganeso), también se monitorearon posibles subproductos como nitritos y nitratos, y parámetros generales de calidad del agua como pH, conductividad, alcalinidad, fosfatos, dureza total y de calcio. Con fines de verificación, aproximadamente un diez por ciento de las muestra del efluente de la planta piloto fueron enviadas a un laboratorio acreditado para contrastarlas con los límites permisibles de estos parámetros, que establece la Modificación del año 2000 a la NOM-127-SSA1-1994. Las imágenes de las Figuras 4.1 a 4.3 muestran la instalación de las unidades piloto de tratamiento, el seguimiento de operación, muestreo y análisis de calidad del agua en la entrada y salida de la planta piloto.



Figura 4-1 Instalación de aireador de charolas y planta piloto con filtros de zeolita clinoptilolita virgen y recubierta de óxidos de manganeso, en el Vivero Netzahualcóyotl (Ramal Tláhuac).



Figura 4-2 **Seguimiento de operación de los filtros**;Error! Marcador no



definido..

Figura 4-3 **Análisis en sitio de algunos parámetros de calidad del agua antes y después del tratamiento**;Error! Marcador no definido.

4.1 Resultados de las pruebas semipiloto y piloto realizadas en laboratorio y en sitio para el agua en el Vivero Netzahualcóyotl y datos de la validación del tren de tratamiento.

Los resultados para la remoción de nitrógeno se muestran en la Figura 4.4

En la gráfica se observa que la concentración de nitrógeno amoniacal en el agua de llegada se mantuvo con pocas variaciones en el periodo de prueba. En la gráfica no aparecen los datos de los días previos (doce días naturales), periodo en que se inició la fase de inducción del desarrollo de los microorganismos nitrificantes.

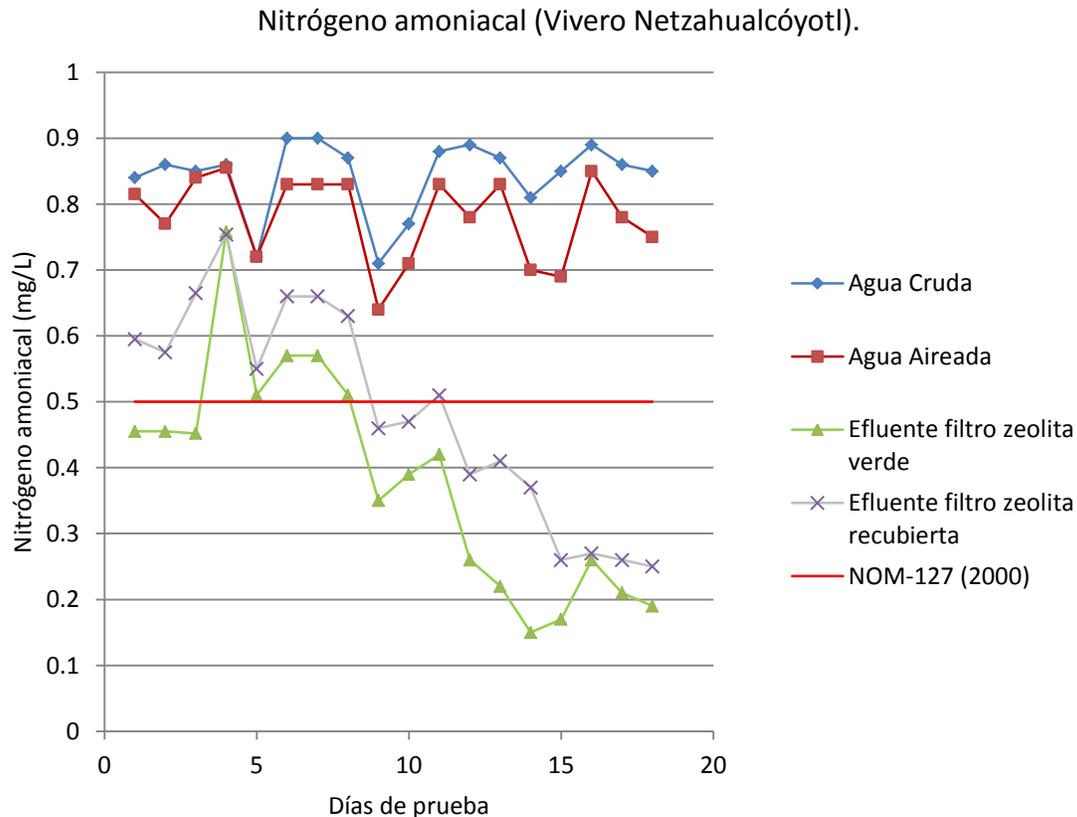


Figura 4-4 Variación de la concentración de nitrógeno amoniacal en agua de llegada (AC), agua aireada (TA) y efluente de filtros (F1 y F2) durante el periodo de prueba en el Vivero Netzahualcóyotl.

La disminución observada en los filtros durante los primeros puntos de la gráfica podrían atribuirse a fenómenos de adsorción sobre los materiales filtrantes, con lo cual se cumplía con el límite máximo permisible (0.5 mg/L) de la NOM-127-SSA1-1994. Posteriormente, se observó un aumento en la concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente de ambos filtros. Y sólo se volvió a cumplir el límite permisible hasta después 21 días, contados a partir del inicio de la prueba, y que corresponde con el día 9 en la gráfica. Considerando los siete últimos días de prueba, periodo para el que ya no se observó mucha variación, se obtuvieron eficiencias de remoción promedio para el filtro 1 de 75 % y para el filtro 2 del 63 %. En ambos casos el efluente cumple con el límite permisible de nitrógeno amoniacal establecido en la normatividad vigente.

Con respecto a la presencia de hierro y manganeso, se realizó el seguimiento de la concentración de estos dos metales en los efluentes de la planta piloto.

En la Figura 4-5 se presenta el comportamiento de la concentración de hierro durante la etapa de evaluación.

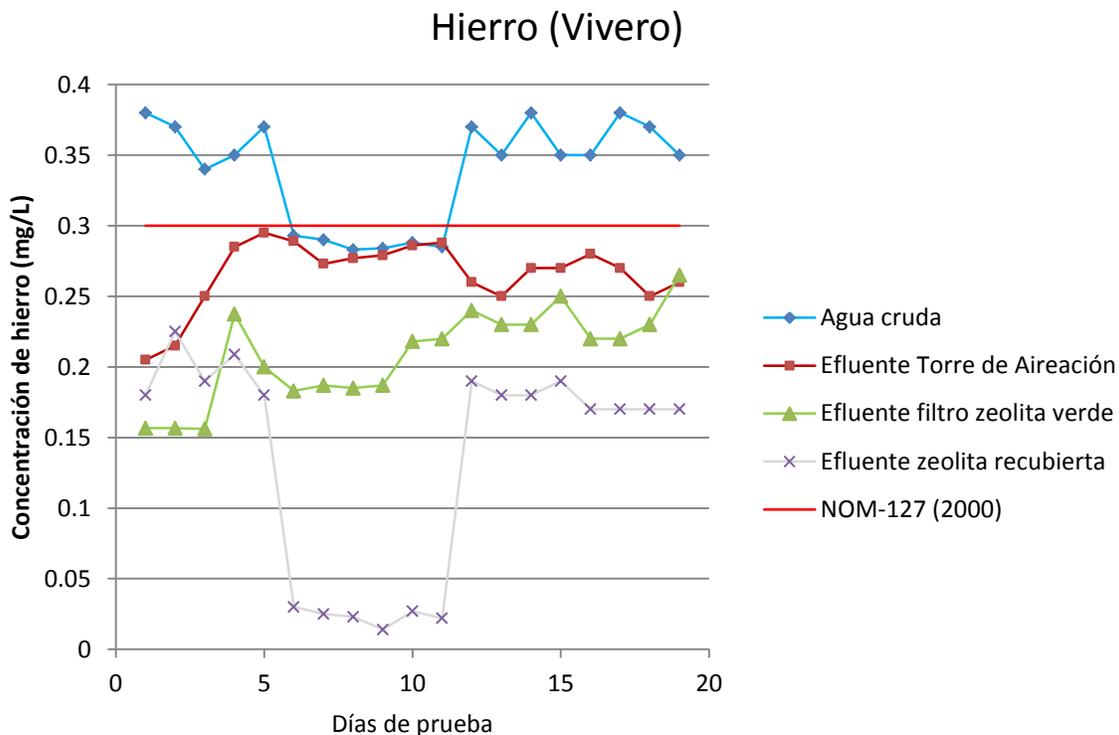


Figura 4-5 Tendencias observadas en la concentración de hierro en agua de llegada (AC), agua aireada (TA) y efluente de filtros (F1 y F2), (Viveros).

Como se puede observar, el hierro es oxidado y retenido en la torre de aireación, obteniendo concentraciones menores al límite máximo permisible de 0.3 mg/L de la NOM-127-SSA1-1994. El hierro remanente es removido en ambos filtros alcanzando concentraciones de 0.2 y 0.15 mg/L para el filtro 1 y 2 respectivamente.

Respecto al manganeso, la Figura 4-6 muestra las concentraciones de manganeso en las diferentes unidades del sistema de filtración.

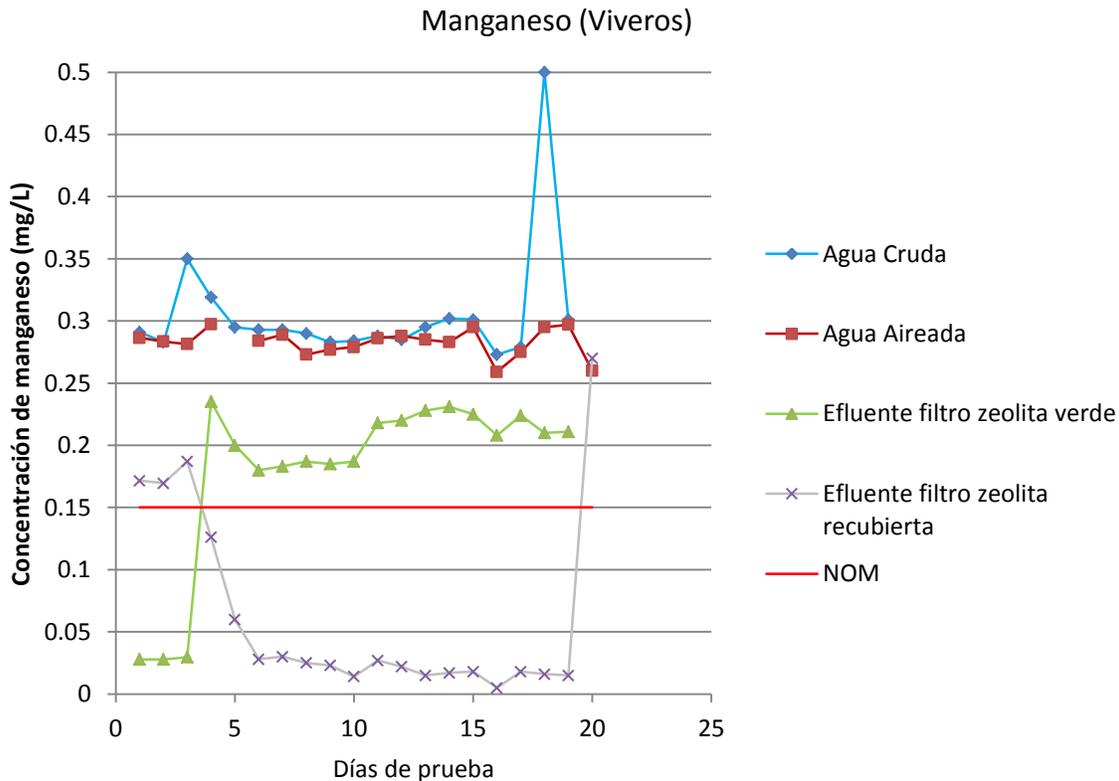


Figura 4-6 Concentraciones de manganeso encontradas en el influente (AC), en agua aireada (TA) y efluente de filtros (F1 y F2), en sitio de entrega Viveros.

La concentración promedio de manganeso en el agua cruda fue de 0.3 mg/L, el cual fue removido hasta 0.18 mg/L en el filtro de zeolita verde y 0.07 mg/L en el filtro de zeolita recubierta con óxidos de manganeso. Con esto se confirmó, que, igual que en el sistema que se estuvo operando en el Hospital Psiquiátrico, la zeolita recubierta con óxidos de manganeso presentó un mejor desempeño en la remoción de manganeso.

Para el tren de tratamiento final se ha propuesto solamente la implementación de un filtro de zeolita virgen, ya que se considera suficiente para llevar a cabo la remoción tanto de hierro como de manganeso.

4.2 Propuesta de esquema de tratamiento

El tren de tratamiento propuesto se esquematiza en la Figura 4-7 y consta de:

- 1 Aireación. Se realiza mediante el uso de una torre de charolas que percolan el agua a través de camas de tezontle, permitiendo incrementar la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Durante esta etapa se favorece la oxidación de los iones de hierro, Fe (II), y manganeso Mn(II). Las especies oxidadas son retenidas parcialmente en el tezontle.
- 2 Biofiltración. El agua pasa a través de un filtro empacado con zeolita que sirve como soporte para el desarrollo de microorganismos nitrificantes. La filtración es descendente. En este filtro sucede la nitrificación (paso de nitrógeno amoniacal a nitratos), la retención de óxidos de hierro y la oxidación y retención del manganeso.
- 3 Desinfección con hipoclorito de sodio. El agua filtrada, a la que ya se le ha retirado nitrógeno amoniacal, hierro y manganeso, se colecta en una cisterna desde la cual es distribuida de manera independiente hacia Viveros y hacia Cuenca Lechera.

El agua que llega al Vivero proviene del ramal Tláhuac-Netzahualcóyotl. El agua se derivará del ramal a la altura del pozo 8, aprovechando la válvula de desfogue del ramal, se instalará una derivación para alimentar a la planta potabilizadora. La presión del ramal, con un valor promedio de 2 Kg/cm², será aprovechada para llevar el agua hasta la parte superior de las charolas de aireación.

La aireación tiene como finalidad eliminar ácido sulfhídrico, en caso de que llegara a estar presente, e incrementar la concentración de oxígeno disuelto. Esto último tiene dos implicaciones: por un lado, causa la oxidación de los metales, particularmente de hierro, favoreciendo su precipitación a medida que el agua avanza en las charolas y, aunque marginalmente, también favorece la oxidación y precipitación de manganeso. La segunda implicación es que el agua queda rica en oxígeno, mismo que es requerido por las bacterias nitrificantes en el siguiente elemento del tren de tratamiento.

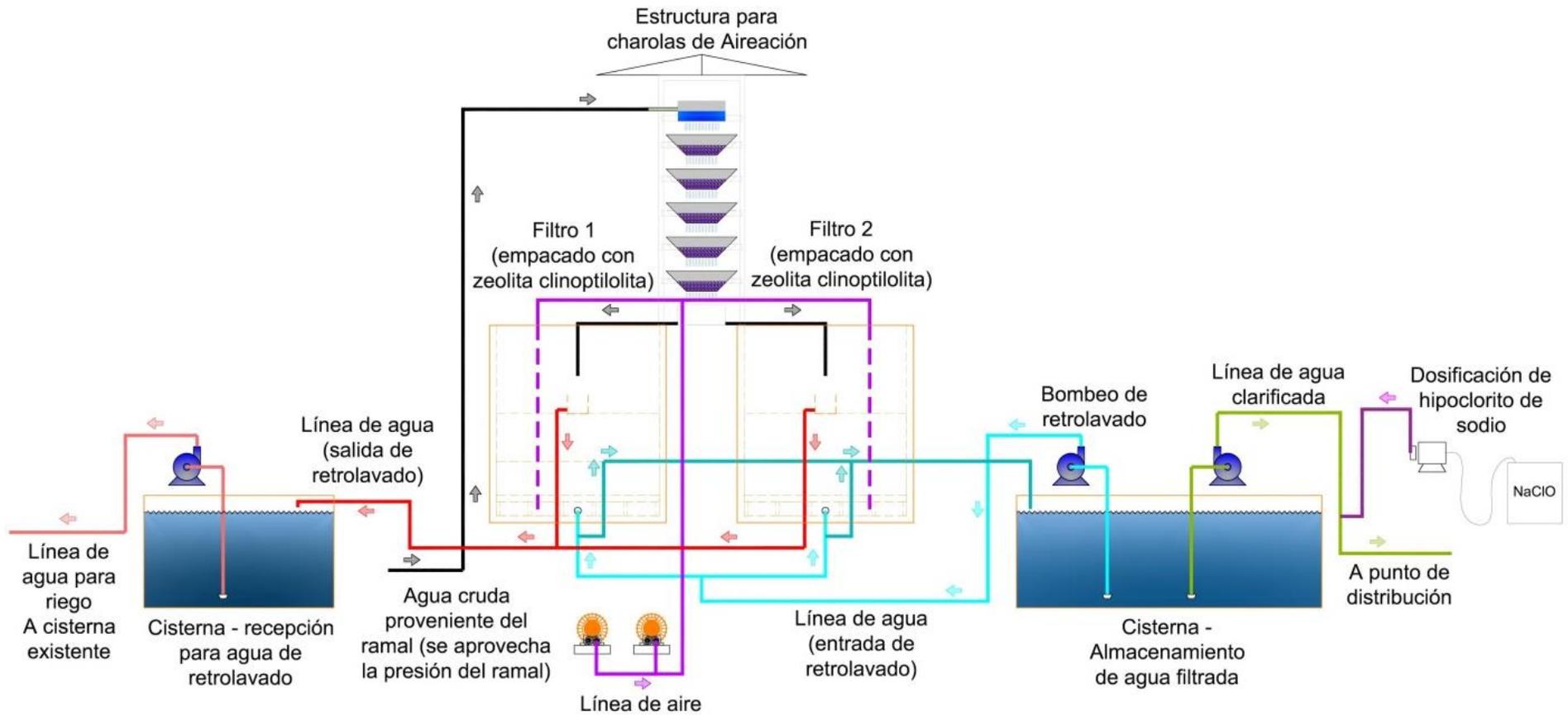


Figura 4-7 Esquema de tratamiento propuesto, Planta Potabilizadora Viveros-Cuenca Lechera.

BIBLIOGRAFÍA

Feng S., Xie S., Zhang X., Yang Z., Ding W., Liao X., Liu Y. y Chen C. (2012). Ammonium removal pathways and microbial community in GAC-sand dual media filter in drinking water treatment. *Journal of Environmental Sciences*. 24(9), 1587-1593.

Lee C. O., Boe-Hansen R., Musovic S., Smets B., Albrechtsen H-J., Binning P. (2014). Effects of dynamic operating conditions on nitrification on biological rapid sand filters for drinking water treatment. *Water Research* 64, 226-236.

Rittmann B.E., McCarty P. L. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. Chapter 12. Drinking Water Treatment.

US EPA, 1975 & US EPA, 1993. En EPA/600/R-14/336 | September 2014 | www.epa.gov/research

US EPA, 2014. EPA/600/R-14/336 | September 2014 Engineering Design and Operation Report: Biological Treatment Process for the Removal of Ammonia from a Small Drinking Water System in Iowa: Pilot to Full-Scale. Prepared by Darren A. Lytle, Dan Williams, Christy Muhlen, Maily Pham, Keith Kelty, with the collaboration of Matthew Wildman, Glenn Lang, Mitch Wilcox, and Melissa Kohne.

van den Akker B., Holmes M., Cromar N. & Fallowfield H. (2008) Application of high rate nitrifying trickling filters for potable water treatment. *Water Research* · 42(17), 4514-4524