



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE  
MÉXICO**



**INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y  
CIENCIAS DEL AGUA**

**ELABORACIÓN DE UN MODELO HIDROGEOFÍSICO DE LA REGIÓN  
CENTRAL DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA, ESTADO DE  
MÉXICO, COMO HERRAMIENTA PARA SU MANEJO SUSTENTABLE**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA**

PRESENTA:

**NERI DÍAZ ESPÍRITU**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO**

**CO-DIRECTORES: DRA. MARIA VICENTA ESTELLER ALBERICH**

**DR. MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ ALBORES**

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, AGOSTO DE 2021

## **Dedicatoria**

A mi amada esposa, Elizabeth, por inspirarme, motivarme y principalmente por apoyarme de manera incondicional durante todo este proceso tan fuera de lo normal y complicado.

¡Gracias infinitas!

## **Agradecimientos**

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida.

A mis tutores, Dr. José Luis Expósito Castillo, Dra. Ma. Vicenta Esteller Alberich y Dr. Miguel Ángel Gómez Albores, por su guía durante este proceso, por sus enseñanzas y su tiempo dedicado hacia mí.

Al comité evaluador por sus comentarios tan atinados siempre con el fin de mejorar la calidad de la investigación.

De manera muy especial al Ingeniero Eduardo Juayek Sotelo, director de la empresa Geofísica Juayek que sin su apoyo el desarrollo de este trabajo no habría sido posible.

A las dependencias de Agua y Saneamiento de Toluca (AYST) y Comisión del Agua de Estado de México (CAEM) por permitirme consultar su información disponible.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo económico para poder cumplir en tiempo y forma con los estudios de maestría.

## Resumen

La extracción intensiva del agua subterránea aunado al crecimiento industrial y poblacional ha generado una serie de problemas directos traducidos en hundimientos y agrietamientos en superficie, exponiendo de esta manera la integridad del acuífero bajo posibles escenarios de contaminación.

Ante esta problemática, el acuífero del Valle de Toluca (AVT) no es la excepción, por tal motivo, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo generar un modelo hidrogeofísico tridimensional de la zona centro a través de la información geofísica disponible y con él, elaborar mapas de peligro a la contaminación a una escala local que permitan proponer nuevas medidas de protección hacia el mismo.

La exhaustiva búsqueda y recopilación de información geofísica e hidrogeológica permitieron generar una base de datos robusta y confiable con la cual se elaboró el modelo hidrogeológico tridimensional general del AVT. Con la misma base de datos se generaron los insumos para llevar a cabo un análisis multicriterio (AMC) mediante el proceso de jerarquización analítica (AHP por sus siglas en inglés) e identificar el área prioritaria y establecer las fronteras de la zona centro. Partiendo de lo anterior, se delimitó la información disponible y se elaboró el modelo hidrogeofísico tridimensional el cual permite conocer el comportamiento geológico-geofísico de la zona. Por otro lado, con la implementación del método AVI modificado se calculó la vulnerabilidad intrínseca. De manera análoga, se analizaron las diferentes fuentes de contaminación y se evaluó su carga potencial de nocividad mediante el método POSH (Pollutant Origin Surcharge Hydraulic). Finalmente, tanto la vulnerabilidad intrínseca como la carga potencial fueron utilizadas para generar los mapas de peligro para el área prioritaria.

El último paso consistió en realizar un análisis entre el modelo hidrogeofísico, el mapa de peligro, algunas características hidrogeológicas (elevación del N.E. y líneas de flujo subterráneo), elementos que modifican las características naturales del acuífero (abatimientos, fracturas y densidad de pozos), así como algunos focos de contaminación que se encuentran dentro de la AP, con el fin de identificar aquellos sitios que necesitan de principal atención al encontrarse en zonas con peligro a la contaminación alto y muy alto.

## **Abstract**

The intensive groundwater withdrawal in addition to industrial and population growth have generated some main problems such as subsidence and cracks all along the surface, making the integrity of the aquifers vulnerable under certain pollution scenarios.

Facing these problems, the Toluca Valley Aquifer is not the exception, for this reason, the current research work has the main purpose to generate a tridimensional hydrogeophysical model of the center region through the available geophysical information and to make pollution danger maps for a local scale which will allow to propose new ways of protection for it.

The exhaustive search and recompilation of geophysical and hydrogeological information allowed to generate a wide and trustworthy database which was used to make the tridimensional hydrogeological model of the Toluca Valley Aquifer. The same database was used to create the supplies for carrying out the multicriteria analysis following the analytics hierarchy process technique to identify the priority areas and set the limits of the center region. Based on the above, the available information was bounded and the tridimensional hydrogeophysical model was built, this one allowed to know the geophysical-geological behavior of the area. On the other hand, the computation of the intrinsic vulnerability was possible with the application of the modified AVI method. Analogously, the different pollution sources were analyzed, and their potential noxiousness were calculated through Pollutant Origin Surcharge Hydraulic (POSH) method. Finally, both elements were used to get the danger maps for the priority area.

The last step consisted of an analysis between the hydrogeophysical model, the danger map, some hydrogeological characteristics (water table level and groundwater flow), elements which modify the natural features of the aquifer (such as boreholes density, cracks and descend of water levels) and some pollution sources located inside the priority area classified as high and very high pollution danger, to identify those sites which need primary attention due to their position, according to the danger map.

## Índice general

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>- 1 -</b>
1.1	Generalidades	- 3 -
1.2	Justificación	- 5 -
1.3	Objetivos	- 6 -
1.4	Organización de la tesis	- 7 -
<b>Capítulo 2</b>	<b>Descripción del área de estudio</b>	<b>- 8 -</b>
2.1	Localización y características físicas	- 9 -
2.2	Clima	- 10 -
2.3	Marco geológico e hidrogeológico	- 11 -
2.4	Hidrografía	- 15 -
2.5	Uso de suelo y vegetación	- 17 -
2.6	Población	- 17 -
<b>Capítulo 3</b>	<b>Síntesis de estudios hidrogeológicos previos</b>	<b>- 22 -</b>
<b>Capítulo 4</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>- 28 -</b>
4.1	Agua subterránea y problemáticas asociadas	- 29 -
4.1.1	<i>Manejo sustentable de un acuífero</i>	- 29 -
4.1.2	<i>Explotación intensiva del agua subterránea</i>	- 31 -
4.1.3	<i>Subsistencia</i>	- 32 -
4.1.4	<i>Agrietamientos</i>	- 34 -
4.2	Caracterización hidrogeológica de acuíferos	- 36 -
4.3	La geofísica como herramienta para la caracterización hidrogeológica	- 38 -
4.3.1	<i>Modelos conceptuales</i>	- 38 -
4.3.2	<i>Métodos geofísicos</i>	- 39 -
4.4	El uso de los SIG como apoyo para la caracterización hidrogeológica	- 45 -
4.4.1	<i>Análisis multicriterio y los sistemas de información geográfica (SIG)</i>	- 45 -
4.4.2	<i>Proceso de jerarquía analítica</i>	- 46 -
4.5	Metodologías empleadas para el cálculo de la vulnerabilidad y peligro a la contaminación en acuíferos	- 49 -
<b>Capítulo 5</b>	<b>Materiales y método</b>	<b>- 52 -</b>
5.1	Recopilación, síntesis y análisis de la información	- 54 -
5.2	Elaboración del modelo hidrogeológico general del AVT en 3D	- 55 -
5.2.1	<i>Selección y análisis de la información geofísica</i>	- 55 -
5.2.2	<i>Procesado e interpretación de la información</i>	- 57 -

5.2.3 Integración de resultados con información multidisciplinaria.....	- 62 -
5.3 Selección de criterios e identificación del área prioritaria del AVT mediante la aplicación del análisis multicriterio y técnica AHP con apoyo de los SIG .....	- 63 -
5.4 Elaboración del modelo hidrogeofísico en 3D del área prioritaria.....	- 66 -
5.4.1 Delimitación de la información geológico-geofísica con base en la AP.....	- 66 -
5.4.2 Integración de información multidisciplinaria .....	- 66 -
5.5 Análisis de la relación del modelo hidrogeofísico del área prioritaria y el peligro a la contaminación del acuífero .....	- 67 -
<b>Capítulo 6 Resultados y discusión .....</b>	<b>- 70 -</b>
6.1 Generación de base de datos y mapas de información.....	- 71 -
6.2 Modelo hidrogeológico general del AVT en 3D .....	- 71 -
6.2.1 Recopilación, selección y análisis de información geofísica .....	- 71 -
6.2.2 Procesado e interpretación de la información.....	- 72 -
6.2.3 Integración de información multidisciplinaria .....	- 75 -
6.3 Selección de criterios e identificación del área crítica mediante el análisis multicriterio y metodología AHP con apoyo de los SIG .....	- 78 -
6.3.1 Fallas y fracturas (intensidad y longitud).....	- 79 -
6.3.2 Focos de contaminación.....	- 82 -
6.3.3 Subsistencia.....	- 84 -
6.3.4 Abatimientos .....	- 86 -
6.3.5 Densidad de pozos de extracción.....	- 88 -
6.3.6 Delimitación del área crítica del AVT .....	- 95 -
6.4 Modelo hidrogeofísico del área crítica en 3D .....	- 99 -
6.5 Análisis de la relación del modelo hidrogeofísico del AP y el peligro a la contaminación .....	- 106 -
<b>Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>- 120 -</b>
7.1 Conclusiones .....	- 121 -
7.2 Recomendaciones .....	- 123 -
<b>Referencias.....</b>	<b>- 125 -</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>- 140 -</b>

## Índice de figuras

Figura 2.1	Mapa de localización del acuífero del Valle de Toluca y la ZMVT.....	10
Figura 2.2	Mapa de clasificación climática para la superficie que cubre el AVT ...	11
Figura 2.3	Mapa de geología regional y sección geológica del AVT .....	13
Figura 2.4	Mapa hidrogeológico del AVT .....	15
Figura 2.5	Mapa de red hidrográfica correspondiente con la superficie que cubre el AVT .....	16
Figura 2.6	Mapa de clasificación de uso de suelos para la superficie que cubre el AVT.....	18
Figura 2.7	Datos históricos del crecimiento poblacional de los municipios comprendidos dentro del límite administrativo del AVT para el periodo 1990–2020.....	20
Figura 2.8	Proyecciones de crecimiento poblacional de los municipios comprendidos dentro del límite administrativo del AVT para el periodo de tiempo 2030–2050.....	21
Figura 4.1	Factores interactivos en el manejo sustentable del agua subterránea..	30
Figura 4.2	Diagrama de flujo que involucra los tres pasos para la identificación de problemas relacionados con la deficiencia de los equipos de extracción o los pozos .....	31
Figura 4.3	a) Mecanismo de fracturas debido a la influencia del lecho rocoso b) Generación de fracturas debido a la heterogeneidad del lecho rocoso..	34
Figura 4.4	Modelos de generación de grietas: a) zonas de debilidad, b) cuerpo discontinuo y c) cambios abruptos de espesor .....	35
Figura 4.5	Generación rápida de fracturamientos después de una lluvia torrencial	35
Figura 4.6	Modelo conceptual simple elaborado con valores de densidad a través del método gravimétrico .....	39
Figura 4.7	a) sismograma que muestra un frente de ondas que pasa de una capa de menor velocidad de viaje a otra de mayor velocidad de viaje; b) interpretación del frente de ondas .....	41
Figura 4.8	Líneas equipotenciales y de corriente que viajan en un medio homogéneo que corresponden con el principio físico de los métodos eléctricos .....	42
Figura 4.9	Representación esquemática de un sondeo TEM con arreglo in-loop.	43
Figura 4.10	Arreglo típico de un registro geofísico de pozo en donde se aprecia la respuesta de las curvas SP y Rho para diferentes capas que conforman el medio profundo.....	44
Figura 5.1	Procedimiento metodológico para el desarrollo y logro de los objetivos planteados en la presente investigación .....	53
Figura 5.2	Mapa de ubicación espacial de toda la información geofísica recopilada para el área de estudio.....	56

Figura 5.3	Ejemplo 1 de la interpretación de un RGP para la elaboración de su columna litológica.....	59
Figura 5.4	Ejemplo 2 de la interpretación de un RGP para la elaboración de su columna litológica.....	60
Figura 5.5	Ejemplo 3 de la interpretación de un RGP para la elaboración de su columna litológica.....	61
Figura 5.6	Representación visual del proceso de suma de factores entre diferentes capas de información mediante un análisis multicriterio ....	65
Figura 5.7	Valores de resistividad y conductividad de los diferentes tipos de roca.	67
Figura 6.1	Localización espacial de toda la información recopilada de pozos de extracción, columnas litológicas y sondeos geofísicos .....	73
Figura 6.2	Georreferenciación y digitalización de las columnas estratigráficas obtenidas de la interpretación de los RGP y los sondeos geofísicos localizados dentro de los límites del AVT .....	74
Figura 6.3	Modelo conceptual resultante del proceso de interpolación de las columnas litológicas mediante el algoritmo lithobending (correlación de capas vecinas) (a) Vista general de la geología superficial del AVT, b) Ubicación y distribución de columnas litológicas con N.E. y c) Modelo conceptual resultante .....	76
Figura 6.4	Mapa hidrogeológico general del AVT en 3D .....	77
Figura 6.5	Mapa de intensidad de fracturamiento de la región del AVT .....	81
Figura 6.6	Mapa de longitud de los sistemas de fallas y fracturas de la región del AVT .....	82
Figura 6.7	Mapa de clasificación de los focos de contaminación de acuerdo con su potencial nocivo mediante el método POSH .....	84
Figura 6.8	Mapa de subsidencia acumulada histórica en la región del AVT para el periodo de 1962 – 2010.....	86
Figura 6.9	Mapa de abatimiento histórico para el periodo de tiempo de 1968 – 2016 en el AVT .....	88
Figura 6.10	Mapa de densidad de pozos de extracción por superficie de 1 km <sup>2</sup> en el AVT.....	90
Figura 6.11	Mapas de los diferentes factores utilizados en el AMC para la selección del área prioritaria.....	92
Figura 6.12	Mapa resultante del AMC correspondiente a los índices de importancia.....	96
Figura 6.13	Delimitación y selección del área prioritaria para realizar el modelo hidrogeofísico .....	98
Figura 6.14	Localización de las secciones geológicas transversales al sistema de fracturas San Pedro Totoltepec (A-A' y B-B').....	100
Figura 6.15	Modelo hidrogeofísico tridimensional del área prioritaria.....	102
Figura 6.16	Análisis de la relación de algunos elementos utilizados en el AMC y el modelo hidrogeofísico tridimensional .....	103

Figura 6.17	Sección geológica A-A' transversal al sistema de fracturas San Pedro Totoltepec.....	104
Figura 6.18	Sección geológica B-B' transversal al sistema de fracturas San Pedro Totoltepec.....	105
Figura 6.19	Distribución de puntos de referencia y pozos, multipiezómetros y/o sondeos utilizados para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca .....	106
Figura 6.20	Mapa de conductancia longitudinal (S) obtenido para el área prioritaria.....	107
Figura 6.21	Mapa de vulnerabilidad intrínseca del área prioritaria obtenido mediante el método AVI modificado .....	109
Figura 6.22	Mapa de carga potencial de nocividad de los diferentes focos potenciales de contaminación ubicados dentro del AP.. .....	110
Figura 6.23	Representación gráfica de la multiplicación de la matriz compuesta por las capas de vulnerabilidad y carga potencial de nocividad para generar el mapa de peligro.. .....	110
Figura 6.24	Mapa de peligro resultante de la multiplicación de los mapas de vulnerabilidad intrínseca y carga potencial de nocividad del área prioritaria.....	112
Figura 6.25	Análisis de la relación que existe entre el mapa de peligro a la contaminación y algunos factores que modifican las condiciones naturales del AVT.....	113
Figura 6.26	Mapa de peligros sobrepuesto en una imagen satelital que permite identificar de mejor manera la ubicación de las zonas con riesgo alto y muy alto .....	116
Figura 6.27	Evidencia fotográfica que señala la condición de algunos puntos ubicados en zonas con peligro a la contaminación alto y muy alto.....	119

### **Índice de tablas**

Tabla 2.1	Descripción del tipo de material geológico del AVT .....	12
Tabla 2.2	Evolución histórica de la población de los municipios comprendidos dentro del límite administrativo del AVT para el periodo de tiempo de 1990 – 2020 .....	19
Tabla 4.1	Clasificación de los diferentes tipos de subsidencia de acuerdo con el ambiente en donde se genera .....	33
Tabla 4.2	Métodos geofísicos e hidrológicos más comúnmente usados en la caracterización hidrogeológica .....	37
Tabla 4.3	Métodos geofísicos más comúnmente utilizados para la caracterización hidrogeológica.....	40
Tabla 4.4	Escala de asignación de pesos de importancia para la matriz de comparación utilizada en un análisis multicriterio .....	46
Tabla 4.5	Valores propuestos para el índice de inconsistencia para diferente número de criterios empleados en la matriz de comparación.....	48

Tabla 5.1	Lista de instituciones y fuentes de consulta y acceso a la información de interés para el desarrollo de la presente investigación.....	55
Tabla 5.2	Descripción y resumen del principio físico de los RGP, así como su medición y escala, seleccionados para el presente trabajo .....	58
Tabla 5.3	Unidades litológicas identificadas en las columnas estratigráficas de los multipiezómetros y los registros geofísicos .....	63
Tabla 5.4	Lista de diferentes factores disponibles en la base de datos para la realización de un análisis multicriterio.....	64
Tabla 5.5	Clasificación del grado de protección (o vulnerabilidad) de acuerdo con los valores de conductancia longitudinal (S) .....	68
Tabla 5.6	Matriz utilizada para realizar la cartografía del peligro ante la contaminación del área prioritaria .....	69
Tabla 6.1	Datos y capas de información utilizados para la generación de insumos para llevar a cabo el AMC .....	79
Tabla 6.2	Clasificación de las fuentes de contaminación mediante el método POSH.....	83
Tabla 6.3	Clasificación, rangos y pesos relativos asignados a los diferentes factores utilizados en el AMC .....	91
Tabla 6.4	Relación de pesos posibles a asignar a cada elemento en una matriz de comparación.....	93
Tabla 6.5	Matriz de comparación entre los elementos seleccionados para el análisis multicriterio.....	93
Tabla 6.6	Matriz de comparación con pesos normalizados.....	93
Tabla 6.7	Valores resultantes del vector sumatorio de pesos.....	94
Tabla 6.8	Valores resultantes del cálculo del vector de consistencia y su valor promedio .....	94
Tabla 6.9	Valores resultantes de CR, RI y CR.....	95
Tabla 6.10	Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca para el área prioritaria....	108

## Abreviaciones y/o acrónimos utilizados

AP	Área prioritaria
AHP	Analytic Hierarchy Process (por sus siglas en inglés)
AMC	Análisis Multi Criterio
ASTM	American Society for Testing and Materials (por sus siglas en inglés)
AYST	Agua y Saneamiento de Toluca
AVI	Aquifer Vulnerability Index (por sus siglas en inglés)
AVT	Acuífero del Valle de Toluca
CAEM	Comisión de Aguas del Estado de México
CAVM	Comisión de Aguas del Valle de México
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
DGCOH	Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica
FEA	Fondo para la Comunicación y Educación Ambiental, A.C.
FAO	Food and Agriculture Organization (por sus siglas en inglés)
IDW	Inverse Distance Weighting (por sus siglas en inglés)
IFOMEGEM	Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
IN	Índice de nocividad
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPN	Instituto Politécnico Nacional
IVI	Índice de vulnerabilidad intrínseca
POSH	Pollutant Origin Surcharge Hydraulic (por sus siglas en inglés)
RAE	Real Academia Española
RGP	Registro Geofísico de Pozo
REPDA	Registro Público de Derechos del Agua
SEDYUM	Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
SGM	Servicio Geológico Mexicano
SIG	Sistema de Información Geográfica
SODA	Strategic Options Development and Analysis (por sus siglas en inglés)
SRH	Secretaría de Recursos Hídricos

TEM	Transient Electromagnetic Method (por sus siglas en inglés)
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica
UAEMEX	Universidad Autónoma del Estado de México
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
VE	Vulnerabilidad específica
VI	Vulnerabilidad intrínseca
VT	Valle de Toluca
WLC	Wighted Lineal Comparisson (por sus siglas en inglés)
WPP	World Population Prospects (por sus siglas en inglés)
ZMVT	Zona metropolitana del Valle de Toluca
2D	Dos Dimensiones o Bidimensional
3D	Tres Dimensiones o Tridimensional

# Capítulo 1

## Introducción

En este primer capítulo se aborda, de manera general, el contexto que guarda la problemática de contaminación hacia los acuíferos y su relación con el desarrollo industrial y poblacional señalando el impacto del crecimiento acelerado, así como con el uso intensivo del recurso hídrico subterráneo para satisfacer las nuevas demandas y necesidades básicas. Así mismo se menciona el caso particular del Acuífero del Valle de Toluca (AVT).

Por otro lado, se menciona el enfoque de la presente investigación, indicando y señalando los elementos que dan la base para justificar la metodología que se desarrolló con el fin de lograr los objetivos tanto general como específicos.

Finalmente, de manera breve, se describe el desarrollo de la tesis mencionando los elementos fundamentales de cada apartado incluyendo la presente introducción.

Desde la década de los 50, la economía mundial optó por un desarrollo modernizador basado únicamente en el crecimiento, es decir, el aumento de la producción y el consumo con base en la implementación de nuevas tecnologías y el uso indiscriminado de los recursos naturales, sin considerar que los recursos de los cuales dependen se agotan o deterioran (FEA, 2015).

A mediados del siglo pasado, la población mundial se incrementó 4.4 veces, mientras que la extracción de los recursos hídricos subterráneos aumentó 7.3 veces; es decir, la extracción aumentó 1.7 veces más rápido que la población mundial (FAO, 2017). Sin embargo, ello se invierte para la segunda mitad del siglo, siendo mayor el crecimiento de la población respecto a la extracción lo que conlleva a un incremento gradual de una mayor demanda del recurso líquido. Para México el panorama no es diferente ya que 157 de los 653 acuíferos están sobreexplotados; 32 poseen presencia de suelos salinos y agua salobre y finalmente, 18 cuentan con intrusión salina (SINA, 2020).

En este contexto, el manejo sustentable de los recursos hídricos subterráneos se ha convertido en un elemento crucial para mantener el equilibrio en el sistema por lo que se deben de considerar los factores económicos, la protección ambiental y la concientización social que permita concebir e implementar modelos de producción y consumo que no degraden los recursos y, a su vez, satisfagan las necesidades de la población actual y futura (Castilla-Rho *et al.*, 2019). Para ello es necesario involucrar nuevos enfoques y formas de manejo de los recursos.

En algunos casos de estudio referentes al análisis de la subsidencia e identificación de zonas con posibilidades de sufrir la misma problemática (Calderhead *et al.* 2010; Dávila *et al.* 2014; Chaussar *et al.* 2014; Castellazzi *et al.* 2015), están enfocados a la parte superficial debido a la aplicación de técnicas de radar, arrojando resultados visibles pero que no son posibles de correlacionar o inferir para la parte profunda del acuífero.

En este trabajo se propuso una metodología que integró información superficial y profunda del conocimiento hidrogeológico y geofísico, recopilando la mayor información disponible del AVT para con ella generar un modelo hidrogeológico general y un modelo hidrogeofísico local que sirvan como herramienta para la evaluación de la vulnerabilidad ante la contaminación y proponer nuevos mapas de peligros para un manejo adecuado del recurso hídrico subterráneo.

## 1.1 Generalidades

Diferentes problemáticas aquejan a la sociedad tanto en México como en el mundo, en relación con la disponibilidad de aguas subterráneas para satisfacer la gran demanda poblacional. Lo anterior como consecuencia de un mal manejo sustentable de los acuíferos, principalmente de aquellos en donde las grandes urbes se asientan y cuyo desarrollo está a expensas de la gran demanda del vital líquido.

Mundialmente, la población para el año 2019 ascendió a 7.7 billones de personas, considerando que el porcentaje de crecimiento ha venido en decaimiento con respecto a los años 50 (WPP, 2019). Sin embargo, las proyecciones muestran que para los años 2030, 2050 y 2100, el número ascenderá a 8.5, 9.7 y 10.9 billones de personas. Para el caso de México, la población ascendió a poco más de 126 millones de personas con una tasa de crecimiento por encima del 1.09 % anual, por lo que para el año 2025, se espera que la población supere los 130 millones de personas (INEGI, 2020).

Los mayores asentamientos poblacionales se dan en zonas que cuentan con las mejores condiciones hidrogeológicas para extraer los recursos hídricos subterráneos de una manera relativamente sencilla. Estas zonas cumplen con la condición específica de ser cuencas sedimentarias las cuales poseen propiedades físicas ideales para funcionar como acuíferos de alto potencial (López-Ramos, 2008). En México, las ciudades importantes como Toluca de Lerdo se encuentran en cuencas vulcano-sedimentarias dentro de la Faja Neovolcánica, en donde su estratigrafía se compone por secuencias de depósitos volcánicos y sedimentarios (López, 2019).

De esta manera, las necesidades de la sociedad por subsistir conllevan al crecimiento de las zonas agrícolas, ganaderas e industriales, las cuales deben de satisfacer la demanda de la sociedad. Con lo anterior, el uso del recurso natural aumenta, por lo que, al no ser suficiente el abastecimiento con los cuerpos de agua superficiales se recurre a la explotación de los acuíferos profundos (Durán y Torres, 2006).

La explotación intensiva provoca cambios en el estado físico inicial de un acuífero que se traduce en la modificación de la red de flujo, afectación a ecosistemas en superficie, así como en la presencia de zonas con subsidencia y en la generación de agrietamientos, siendo esto último un factor crítico ya que aumenta la vulnerabilidad del acuífero ante

fuentes de contaminación, degradando de esta manera la calidad y cantidad del agua subterránea (Llamas, 1989; Llamas y Custodio, 1999; Pulido Bosh, 1993).

El estado físico de un acuífero puede ser monitoreado a través de métodos directos como la geología e hidrogeología, o bien mediante métodos indirectos. La geofísica es un método indirecto y mediante sus diversas técnicas de estudio es posible definir de manera indirecta diferentes modelos conceptuales que satisfagan las características hidrogeológicas de un sistema (Wang *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2018; Prudhomme *et al.*, 2019); así mismo, permite identificar anomalías que pueden ser asociadas a presencia de rasgos geológicos o agentes provocados por el hombre (sobreexplotación de acuíferos).

Se ha comprobado que la información hidrogeológica y geofísica en conjunto permite generar propuestas para solucionar problemas diversos relacionados con los acuíferos (Pacheco, 2013; Díaz, 2016; Steelman *et al.*, 2016).

En el Acuífero del Valle de Toluca (AVT) se han llevado a cabo estudios de calidad del agua, hidrodinámicos, hidrogeológicos y geofísicos (Esteller *et al.*, 2012; Calderhead *et al.*, 2011; Expósito, 2012; Dávila *et al.*, 2014; IMTA, 2008), distribuidos a lo largo y ancho del AVT, es decir, a escala regional, por lo que la conjunción de esta información podría ser insuficiente para la elaboración de un modelo hidrogeofísico general que permita generar propuestas específicas para su manejo sustentable.

Para este caso en particular del AVT, se busca identificar, con base en información de distintos indicadores como: características de las fallas y fracturas (densidad y longitud), focos de contaminación, grado de subsidencia del terreno, abatimientos y densidad de pozos de extracción, el área prioritaria de la parte central para su estudio y generar un modelo hidrogeofísico en 3D que sirva como herramienta para determinar algunas características físicas del acuífero, comprobar sus características hidrogeológicas y, a su vez, proponer medidas para su manejo sustentable mediante la generación de nuevos mapas de peligro a la contaminación.

## 1.2 Justificación

El manejo sustentable es una acción que se requiere de manera inmediata en el Acuífero del Valle de Toluca (AVT). Cifras recientes indican que dicho acuífero está siendo explotado de manera intensiva en los últimos años, dejándolo con un déficit de  $-136.7262 \text{ Mm}^3/\text{a}$  (CONAGUA, 2015). A su vez, Expósito (2012), resalta la modificación en la red de flujo; Esteller *et al.* (2012), Fonseca-Montes de Oca *et al.* (2020) y Martín del Campo *et al.* (2014), muestran las modificaciones hidrogeoquímicas e hidrodinámicas del acuífero; mientras que Almazán-Vázquez (2017) y López (2019) señalan la presencia de un gran número de grietas en diferentes puntos de la región central del acuífero, este último aspecto como consecuencia de la subsidencia hídrica tan avanzada, tal como lo señala Arroyo-Domínguez (2016). Todo lo anterior como consecuencia de un mal manejo del recurso hídrico subterráneo, de un acelerado crecimiento poblacional, así como de los asentamientos industriales y las grandes extensiones agrícolas que demandan una gran cantidad de agua anualmente.

La Coordinación Municipal de Protección Civil de Toluca (2016-2018) lleva un registro y control de los agrietamientos y, por otro lado, instituciones educativas como la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), han desarrollado investigaciones para conocer más acerca del fenómeno, medirlo y predecir zonas susceptibles a nuevos agrietamientos, a través de técnicas con sensores remotos (Dávila, 2014; Chaussar *et al.*, 2014; Castellazzi *et al.*, 2015; Arroyo-Domínguez, 2016). Lo anterior deja una ventana abierta a la investigación mediante el empleo de métodos directos, sin embargo, realizar este tipo de estudios para una mejor comprensión de un acuífero implica gastos económicos elevados.

Ante este escenario, países como E.U.A, Canadá, China y Portugal (por mencionar algunos) han implementado los métodos geofísicos como una herramienta indirecta para generar información de la parte no visible del subsuelo y en conjunto con información multidisciplinaria, generar modelos conceptuales con menor incertidumbre. Para el caso específico del AVT, al momento no existen trabajos documentados que integren toda la información disponible con el único fin de elaborar un modelo hidrogeológico o hidrogeofísico. En este sentido, el presente trabajo surgió ante la necesidad de generar información que ayude a entender el funcionamiento hidrogeológico de la zona central del AVT, a través de un modelo hidrogeofísico en 3D, todo ello con el fin de proponer estrategias de protección hacia el acuífero que faciliten su manejo sustentable.

### **1.3 Objetivos**

#### **General**

Elaborar un modelo hidrogeofísico tridimensional de la región central del acuífero del Valle de Toluca, mediante la interpretación e integración de la información multidisciplinaria disponible, para su uso como herramienta en su manejo sustentable.

#### **Específicos**

Para lograr el objetivo general planteado previamente, es indispensable cumplir cada uno de los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar, sintetizar y analizar la información hidrológica, geológica, geofísica e hidrodinámica disponible sobre la región de interés relacionada con el tema en desarrollo de la presente investigación, con el fin de generar una base de datos confiable y robusta.
- Generar el modelo hidrogeológico general del AVT en 3D mediante la correcta interpretación de la información geofísica disponible, integrando los resultados con la información geológica regional y local, hidrogeológica e hidrodinámica para conocer el comportamiento general del acuífero.
- Delimitar el área prioritaria para el manejo sustentable de la región central del acuífero, mediante el uso de SIGs y la evaluación multicriterio, considerando indicadores como: características de las fallas y fracturas (intensidad y longitud), focos de contaminación, grado de subsidencia del terreno, abatimientos y densidad de pozos para establecer las fronteras de un modelo hidrogeofísico tridimensional de dicha área.
- Generar un modelo hidrogeofísico en 3D del área prioritaria con apoyo de la información geológica-geofísica que permita priorizar las zonas de peligro a la contaminación del acuífero.
- Analizar la relación entre el modelo hidrogeofísico y la priorización de las zonas de peligro a la contaminación del AVT para proponer nuevas estrategias para el manejo sustentable del acuífero.

#### **1.4 Organización de la tesis**

Como es de notarse, el capítulo 1 tiene la función de darle al lector un panorama amplio y a grandes rasgos de las condiciones en las que se encuentra la zona de estudio, así mismo se le hace notar la problemática que se abordará y la propuesta metodológica que se aplicará para dar solución a dicho problema.

El capítulo 2 muestra los antecedentes de la zona de estudio, incluyendo la descripción detallada de localización, así como algunas de las características físicas principales, incluyendo el marco geológico e hidrogeológico, los cuales son elementos importantes para la comprensión del modelo conceptual a elaborarse.

Para la tercera parte, se designa un capítulo completo al estado del arte que guarda el conocimiento del AVT enlistando y resumiendo algunos de los estudios hidrogeológicos, hidrodinámicos, hidrogeoquímicos, de subsidencia y geofísicos, más importantes y que dan la pauta a seguir para futuras investigaciones.

En el capítulo 4 se aborda de manera detallada el marco teórico y conceptual de los conceptos fundamentales que dan cuerpo a la presente investigación, entendiendo de esta manera la situación actual en la que se encuentra el estado del acuífero en estudio. Así mismo, se menciona de manera general la teoría de algunos métodos geofísicos y finalmente, la importancia de los SIG y su aplicabilidad en el desarrollo del presente trabajo.

Por su parte, el capítulo 5 describe de manera detallada los insumos y la metodología de cada proceso aplicado, mientras que el capítulo 6, muestra, describe y se discute los resultados obtenidos de cada uno de estos puntos.

Finalmente, el capítulo 7 engloba las conclusiones que de manera concreta se obtuvieron en la presente investigación, con ellas, es posible realizar las recomendaciones más acertadas para el desarrollo de futuros trabajos.

# Capítulo 2

## Descripción del área de estudio

Para comprender un poco del contexto y características de la zona de interés, es indispensable realizar una breve descripción de aquellos elementos físicos principales que generaron una base de referencia para identificar la problemática a tratar y, de esta manera, proponer la metodología descrita en el presente trabajo de investigación para dar solución a dicho problema.

La comprensión de la zona a estudiar es primordial, así como la relación que existe entre el sistema y la sociedad ya que, es la sociedad misma la que influye de manera significativa en las modificaciones que sufre el acuífero y los sistemas naturales que depende de éste.

## 2.1 Localización y características físicas

Fisiográficamente, el Acuífero del Valle de Toluca (AVT), se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz, 1964; Lugo-Hubp & Códova, 1992), la cual se caracteriza por una serie de estructuras volcánicas, entre las que más destacan, El Nevado de Toluca, a cuyos pies tiene asiento la ciudad de Toluca, capital del Estado de México.

Comprende un extenso valle con elevaciones del orden de 2600 msnm y está constituido por materiales aluviales y lacustres interdigitados con derrames volcánicos (López, 2019). Dicho valle está rodeado hacia el oriente, sur y poniente por elevaciones topográficas formadas por rocas de origen ígneo, como la sierra andesítica y basáltica de Las Cruces, con elevaciones que alcanzan los 3800 msnm, y el Nevado de Toluca con más de 4000 msnm y una superficie aproximada de 2000 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2018a).

Geográficamente, el AVT se ubica dentro de la cuenca Alta del Río Lerma, situado al sur del Altiplano Mexicano. Así mismo, se encuentra rodeado por el valle de Atlacomulco-Ixtlahuaca al norte, al sur por el cerro Tenango, la Sierra de las Cruces y Monte Alto al oriente y, finalmente, por el Nevado de Toluca al sur-poniente (Figura 2.1).

La superficie aproximada ha sido estimada en 2,768 km<sup>2</sup>, aproximadamente, cubriendo los municipios de Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Jalatlaco, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Oztolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca y Zinacantepec, de manera total e Iturbide, Huixquilucan, Jilotzingo, Joquicingo, Naucalpan de Juárez, Tenango del Valle y Xonacatlán, de manera parcial (CONAGUA, 2018a).

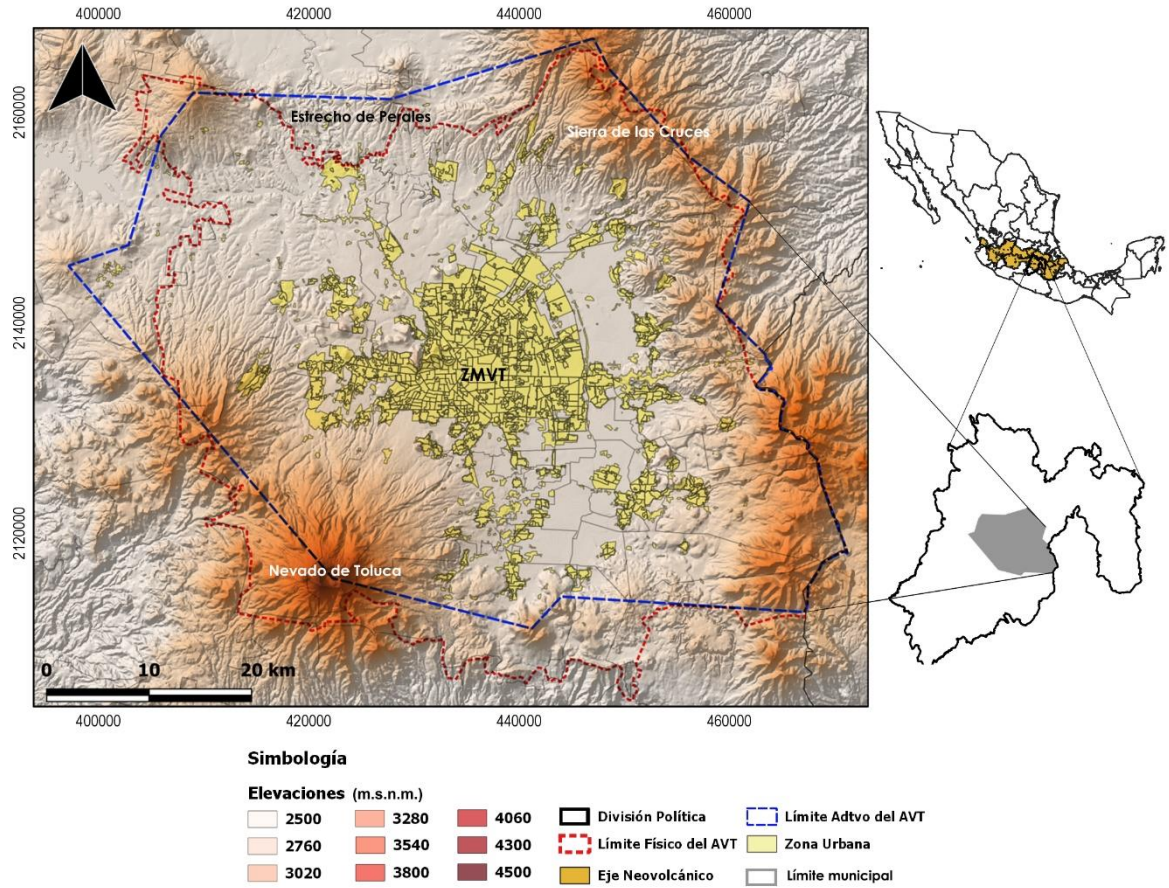


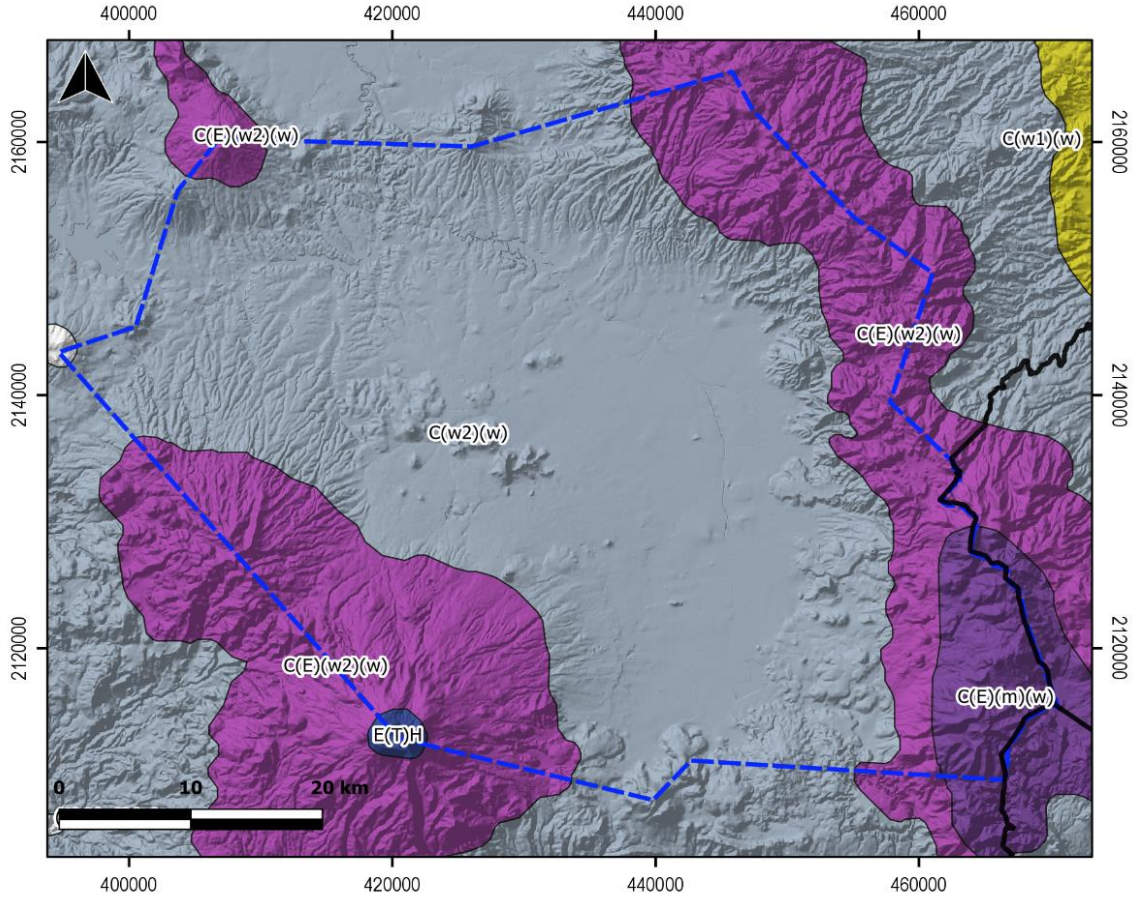
Figura 2.1.- Mapa de localización del acuífero del Valle de Toluca y la ZMVT.

## 2.2 Clima

García (2004), a través de la modificación hecha a la clasificación climática de Köppen, ha identificado tres diferentes condiciones para el AVT: de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano y humedad invernal moderada C(w2) (w) para la parte central; semifrío subhúmedo C(E)(w2) (w) para las partes altas que rodean el valle y de tipo frío E(T)H para la parte más alta del Nevado de Toluca (Figura 2.2).

La temperatura media anual del VT oscila entre los 12 y 13 °C; entre los meses de diciembre y enero desciende brevemente hasta una media de 9.5 °C e incrementa de manera gradual hasta el mes de mayo alcanzando un valor de 14 °C.

Respecto al rango de precipitaciones, los máximos oscilan entre 1200 y 1400 mm/año para las partes montañosas y con mayor elevación, mientras que los mínimos que se han registrado para el centro del valle varían en un rango de 770 y 790 mm/año, por lo que un valor medio de precipitaciones está entre 800 y 1000 mm/año (CONAGUA, 2018a).



**Simbología**

**Clasificación Climática**


Figura 2.2. Mapa de clasificación climática para la superficie que cubre el AVT.

**2.3 Marco geológico e hidrogeológico**

El Acuífero del Valle de Toluca (AVT) se encuentra dentro de la cuenca sedimentaria del Valle de Toluca que es una cuenca rodeada de estructuras volcánicas de diferentes edades que van del Mioceno al Cuaternario como el Nevado de Toluca, Volcán San Antonio, la Sierra de las Cruces y Complejo Volcánico Chichinautzin (García-Palomo *et al.*, 2002, 2008; Arce *et al.*, 2005; Almazán-Vázquez, 2017; López, 2019). Las rocas que constituyen estas estructuras son andesitas, dacitas y basaltos (Qhv, Qpv, Tmpv, Tpv). En la parte central del AVT se presentan estructuras volcánicas de menor tamaño de dimensiones desde el punto de vista geológico como domos volcánicos andesítico-dacíticos, conos cineríticos y conos piroclásticos andesítico-basálticos (Qpvc y Tpvc).

Los depósitos geológicos en las partes bajas y planas de la parte central del AVT se han documentado como depósitos piroclásticos, depósitos sedimentarios y derrames lávicos (Almazán-Vázquez, 2017; López, 2019). Los depósitos piroclásticos incluyen caídas de ceniza volcánicas y los flujos piroclásticos que son de composiciones andesíticas y dacíticas; los depósitos sedimentarios que son de origen fluvial con materiales volcánicos retrabajados y depósitos fluvio-lacustres con componentes volcánicos andesítico-dacíticos (Qal, Qla y Qpla) (IFOMEGEM, 1994; López, 2019) (Figura 2.3).

El Instituto de Geología de la UNAM (1994) realizó una descripción más detallada de todas las unidades estratigráficas que se han documentado hasta el momento, tal como aparecen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1.- Descripción del tipo de material geológico del AVT (UNAM, 1994).

Clave	Descripción
Qal	Grava, arena y limo con interestratificación de ceniza volcánica en el VT y en otras depresiones pequeñas, resultado del proceso erosivo a lo largo de ríos y arroyos.
Qla	Arcillas desarrolladas a partir de tobas y cenizas volcánicas depositadas en agua con horizontes de turbidez.
Qhv	Derrames de lava de composición andesítica, basáltica y dacítica con depósitos cineríticos y otras rocas piroclásticas asociadas.
Qpla	Sedimentos lacustres, incluyendo conglomerados, areniscas y limolitas semiconsolidados e interestratificados con capaz de pómez y diatomitas.
Qpv	Derrames de lavas de composición basáltica y andesítica con depósitos cineríticos y brechas asociadas.
Qpvc	Lahares y depósitos vulcanoclásticos con menor cantidad de materiales fluviales; además de formaciones de tipo lahar y pómez en grandes áreas de la zona de estudio.
Tpvc	Rocas volcánicas epiclásticas, abanicos aluviales, así como depósitos de lahar y cenizas volcánicas.
Tpv	Basaltos y andesitas en las cercanías de la Sierra de las Cruces.
Tmv	Lavas basálticas y andesitas indiferenciadas.
Tmt	Formación Tepoztlán constituida por depósitos vulcanoclásticos, principalmente lahares y andesitas.
Tmpv	Rocas volcánicas indiferenciadas predominantemente andesíticas y dacíticas de la Sierra de las Cruces.

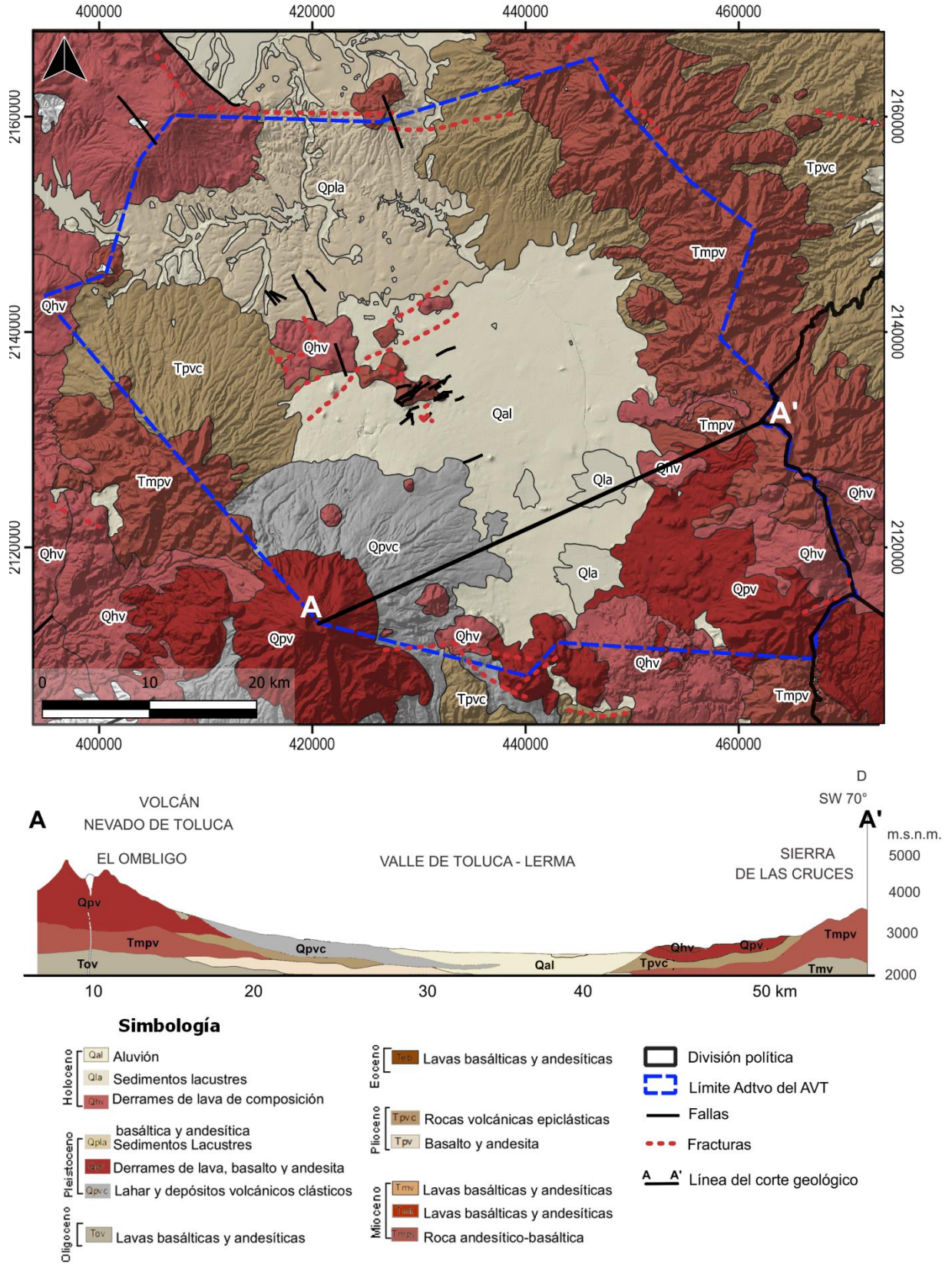


Figura 2.3.- Mapa de geología regional y sección geológica del AVT (elaborado con base en IFOMEGEN, 1994)

En lo que refiere al aspecto estructural, en la parte central del AVT se han cartografiado varias fracturas y fallas y se ha inferido posibles lineamientos estructurales que pudieran significar fracturas o fallas geológicas más profundas (Almazán-Vázquez, 2017; López, 2019). Protección Civil de Toluca ha reportado la presencia de grietas en varias áreas de la ciudad de Toluca las cuales fueron asociadas con la subsidencia hídrica y la posible presencia de fallas geológicas profundas (Almazán-Vázquez, 2017).

Un gran número de sondeos geofísicos y perforaciones profundas, han permitido conocer de manera más acertada el subsuelo del AVT. De esta manera, se ha podido conocer que todo el valle se encuentra cubierto por flujos y productos piroclásticos alcanzando espesores de hasta 1000 metros (CONAGUA, 2018a). Entre los que más destacan son las rocas volcánicas del terciario (F. Andesitas Xochitepec) (Tomv) así como los materiales granulares de diferente tamaño (F. Tarango) (Tpt).

De acuerdo con lo anterior, y desde el área de conocimiento de la hidrogeología, todas las unidades estratigráficas han sido agrupadas en función de sus características físicas y atendiendo su funcionamiento hidrogeológico, correspondiente con acuíferos, acuifugos y acuitardos, según sea el caso (CONAGUA-GTZ, 2008). Por otro lado, Escolero *et al.* (2009) propone dos clasificaciones más generales; una unidad porosa compuesta por todos los materiales clásticos no consolidados y una segunda unidad conformada por las rocas volcánicas con permeabilidad secundaria producto del fracturamiento (Figura 2.4).

Atendiendo lo anterior, Ortiz-Madrid (2010), propone una clasificación general a escala regional en donde considera un primer acuífero de tipo poroso y superficial; mientras que el segundo es de tipo fracturado y se encuentra a profundidad. Aunque ambos acuíferos se encuentran divididos por lentes impermeables, pertenecen a un mismo sistema y son de tipo multicapa.

La principal fuente de recarga del AVT proviene de las sierras circundantes, en particular las laderas y pie de monte del Volcán Nevado de Toluca, así como de las Sierra de las Cruces. La principal infiltración ocurre sobre los abanicos aluviales de los cursos de agua que bajan de las zonas altas (CONAGUA-Desarrollo y Sistemas, S.A., 2005). De esta manera, Expósito (2012), identificó tres flujos subterráneos principales en la región del AVT, el primero y segundo provenientes del Nevado de Toluca con direcciones este-noreste y sur-norte, respectivamente y, un tercer flujo que proviene de la Sierra de las Cruces con dirección oeste.

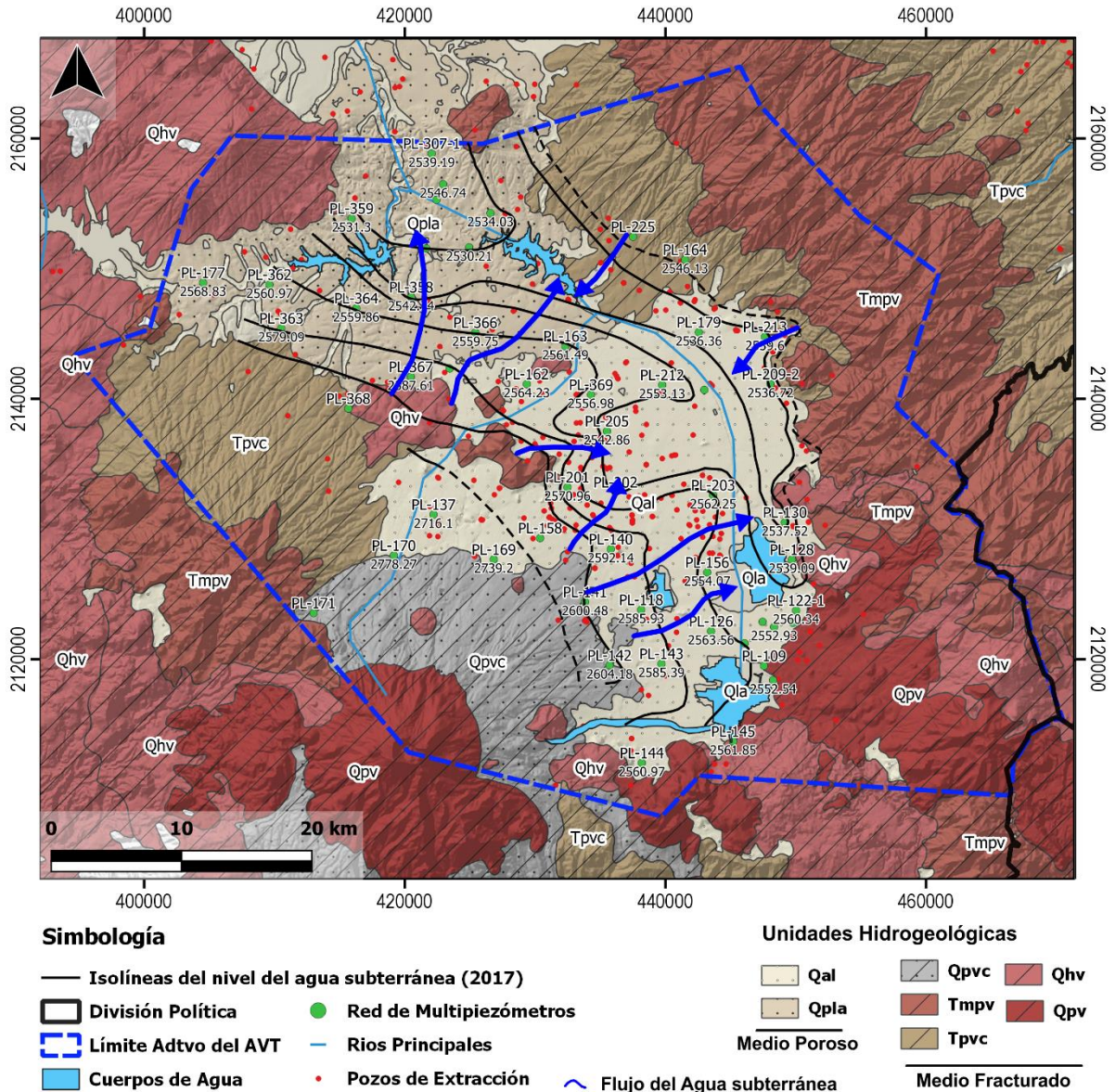


Figura 2.4.- Mapa hidrogeológico del AVT (Elaborado con base en Expósito, 2012).

## 2.4 Hidrografía

En relación con el aspecto hidrográfico superficial, la zona de interés queda comprendida dentro de la Región Hidrológica (RH) No. 12, en la cuenca del Río Lerma. Siendo este mismo el escurrimiento superficial más importante (Figura 2.5).

Partiendo del poblado de Lerma, el cauce del río sigue una dirección norte-noroeste, cruzando por completo el Valle de Ixtlahuaca hasta llegar al poblado de Atlacomulco. Por otro lado, del Nevado de Toluca, desciende el Río Ojo de Agua con dirección este hacia

San Antonio la Isla desembocando en la laguna Almoloya del Río, nacimiento antiguo del Río Lerma. En ese mismo punto se concentran algunos escurrimientos provenientes de la Sierra de las Cruces.

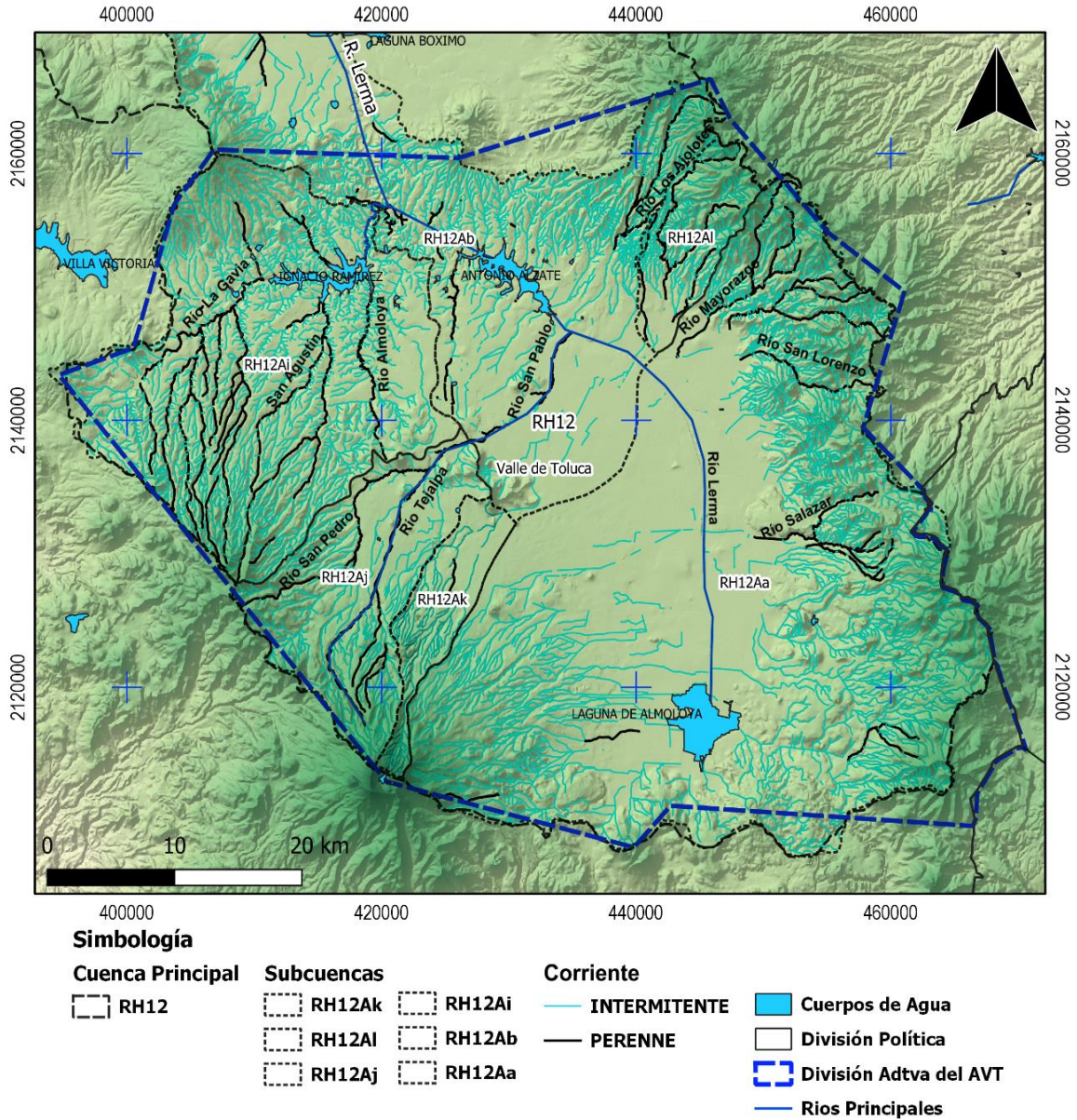


Figura 2.5.- Mapa de Red Hidrográfica correspondiente con la superficie que cubre el AVT (Elaborado con información de INEGI).

Así mismo, descendiendo del Nevado de Toluca de forma radial se presentan los siguientes escurrimientos: Río Verdiguél, el cual atraviesa la ciudad y descarga finalmente en el Río Lerma junto con las aguas residuales de la ciudad; y el Río Tejalpa, además de los ríos y arroyos provenientes de la vertiente occidental de las serranías; así mismo, por la parte

oriental provenientes de la Sierra de Monte Alto y las Cruces con dirección hacia el norte, descienden los ríos Ocoyoacac, Mayorazgo y Oztolotepec, entre otros, aportando un gran caudal al río principal hasta descargar sus agua en el embalse de la presa José Antonio Alzate (CONAGUA, 2018a).

## **2.5 Uso de suelo y vegetación**

La clasificación de uso de suelo y vegetación más reciente realizada por el INEGI (2016), muestra los cambios que han sufrido diferentes zonas respecto a su estado original en años previos. Específicamente para el AVT, se identifican seis tipos de coberturas generales, en donde destaca la agricultura (de temporal y de riego), seguida del notable crecimiento de la mancha urbana (Figura 2.6).

Para el caso de los bosques, estos se encuentran principalmente en los sistemas montañosos que para este caso son la Sierra de las Cruces y el Nevado de Toluca. Geográficamente hablando, los municipios de Xonacatlán, Lerma, Ocoyoacac, Toluca y Zinacantepec son los que presentan mayor densidad de vegetación, en donde además se suman las Arenas Naturales Protegidas (ANP) (SEDUYM, 2019).

El uso de suelo se clasifica partiendo de la superficie total del AVT (2,768 km<sup>2</sup>) del cual los usos de mayor representatividad son: agrícola que en conjunto representa el 67.29 %; uso forestal que de acuerdo con su superficie representa el 9.6 % y el uso urbano con 13.75 %. El porcentaje restante es ocupado por los cuerpos de agua, pastizales y otros tipos de vegetación (o sin vegetación).

## **2.6 Población**

La población histórica y actual del Acuífero del Valle de Toluca, fue estimada con base en la información de los Censos Generales de Población y Vivienda, de las encuestas intercensales y de los conteos de población y vivienda realizados entre el periodo de tiempo de 1990 a 2020 del INEGI.

Es importante mencionar que, a pesar de que la poligonal del AVT involucra un total de 32 municipios, para este caso de estudio se consideraron únicamente 27 ya que, Huixquilucan, Naucalpan, Isidro Fabela, Jilotzingo y Nicolás Romero ocupan un área mínima dentro del acuífero, razón por la cual no se incluyeron en la base de datos del INEGI (2020).

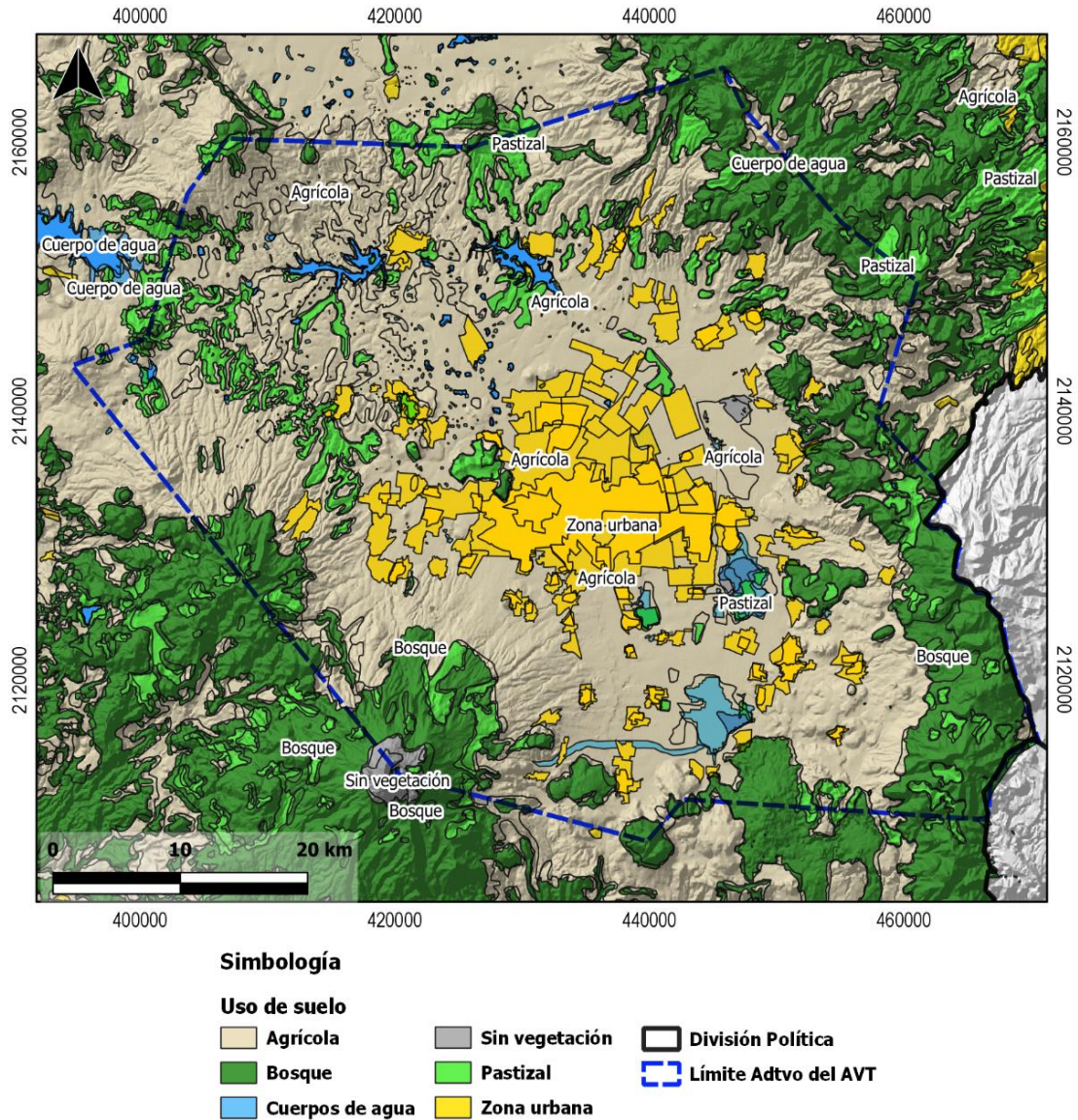


Figura 2.6.- Mapa de clasificación de uso de suelos para la superficie que cubre el AVT (Elaborado con información de INEGI, 2016).

La tabla 2.2, enlista todos aquellos municipios involucrados en el acuífero (ya sea de manera total o parcial) y son los que inciden de manera directa en el comportamiento hidrodinámico debido a la extracción continua del recurso hídrico subterráneo.

Tabla 2.2.- Evolución histórica de la población de los municipios comprendidos dentro del límite administrativo del AVT para el periodo de tiempo de 1990-2020.

Municipio	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Almoloya de Juárez	84147	96662	110591	126163	147653	176237	174587
Almoloya del Río	6777	7729	8873	8939	10886	11126	12694
Atizapán	5339	7147	8172	8909	10299	11875	12984
Calimaya	24906	31902	35196	38770	47033	56574	68489
Capulhuac	21258	25900	28808	30838	34101	35495	36921
Chapultepec	3863	5163	5735	6581	9676	11764	12772
Ixtlahuaca	88545	107628	115165	126505	141482	153184	160139
Jiquipilco	44012	51447	56614	59969	69031	74314	76826
Joquicingo	7769	10223	10720	11042	12840	13857	15428
Lerma	66912	81192	99870	105578	134799	146654	170327
Metepec	140268	178096	194463	206005	214162	227827	242307
Mexicaltzingo	7248	8662	9225	10161	11712	12796	13807
Ocoyoacac	37395	43670	49643	54224	61805	66190	72103
Ocuilán	19043	22869	25989	26332	31803	34485	36223
Otzolotepec	40407	49264	57583	67611	78146	84519	88783
Rayón	7026	8300	9024	10953	12748	13261	15972
San Antonio la Isla	7321	9118	10321	11313	22152	27230	31962
San Mateo Atenco	41926	54089	59647	66740	72579	75511	97418
Temoaya	49427	60851	69306	77714	90010	103834	105766
Tenango del Valle	45952	54789	65119	68669	77965	86380	90518
Texcalyacac	2961	3744	3997	4514	5111	5246	5736
Tianguistenco	42448	51149	58381	64365	70682	77147	84259
Toluca	487612	564476	666596	747512	819561	873536	910608
Villa Victoria	58566	63978	74043	77819	94369	104612	108196
Xalatlaco	14047	17601	19182	20002	26865	29572	30687
Xonacatlán	28837	36141	41402	45274	46331	51646	54633
Zinacantepec	83197	105566	121850	136167	167759	188927	203872

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2020.

Con base en los datos anteriores, se puede decir que la población que comprende todos los municipios ubicados dentro de los límites administrativos del AVT, para el año 2020, contaba con una población total de 2,934,017 habitantes (aproximadamente el 15 % de la población total del Estado de México), distribuidos principalmente en los municipios de Toluca, Metepec, Zinacantepec, Ixtlahuaca y Almoloya de Juárez, donde se concentra el 72 % de la población total y la cual presenta un incremento considerable (Figura 2.7).

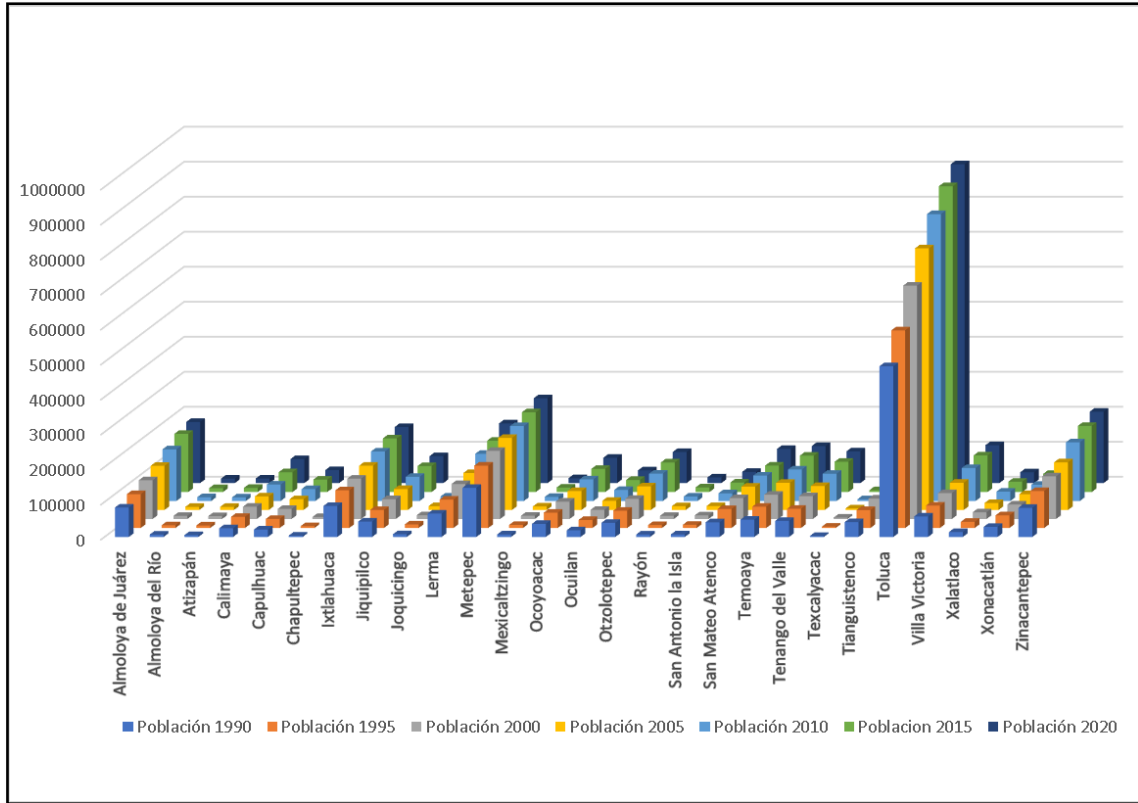


Figura 2.7. Datos históricos del crecimiento poblacional de los municipios comprendidos dentro del límite administrativo del AVT para el periodo 1990 – 2020 (Elaborada con información de INEGI, 2020).

Tomando en cuenta la tendencia general de crecimiento en el área de estudio, se consultaron los datos de la CONAPO (2015), para poder ver de manera visual las proyecciones de crecimiento para los años 2030-2050 (Figura 2.8). Se estima que para el año 2030 la población ascienda a un poco más de 3 millones de personas, lo cual representa un incremento del 25 %. Mientras que para el 2050 este incremento se duplicará y la proyección estima una población total de más de 3.5 millones (esto solo para los municipios comprendidos dentro de los límites del AVT).

Con base en lo anterior, fue posible estimar la densidad de población y los resultados indican que para el año 2020, el AVT contaba con 865 hab/km<sup>2</sup>, cifra 14 veces mayor al promedio nacional (61 hab/km<sup>2</sup>) y mayor al promedio estatal, el cual se encuentra en el orden de los 724 hab/km<sup>2</sup>.

Cap. 2 – Descripción del área de estudio

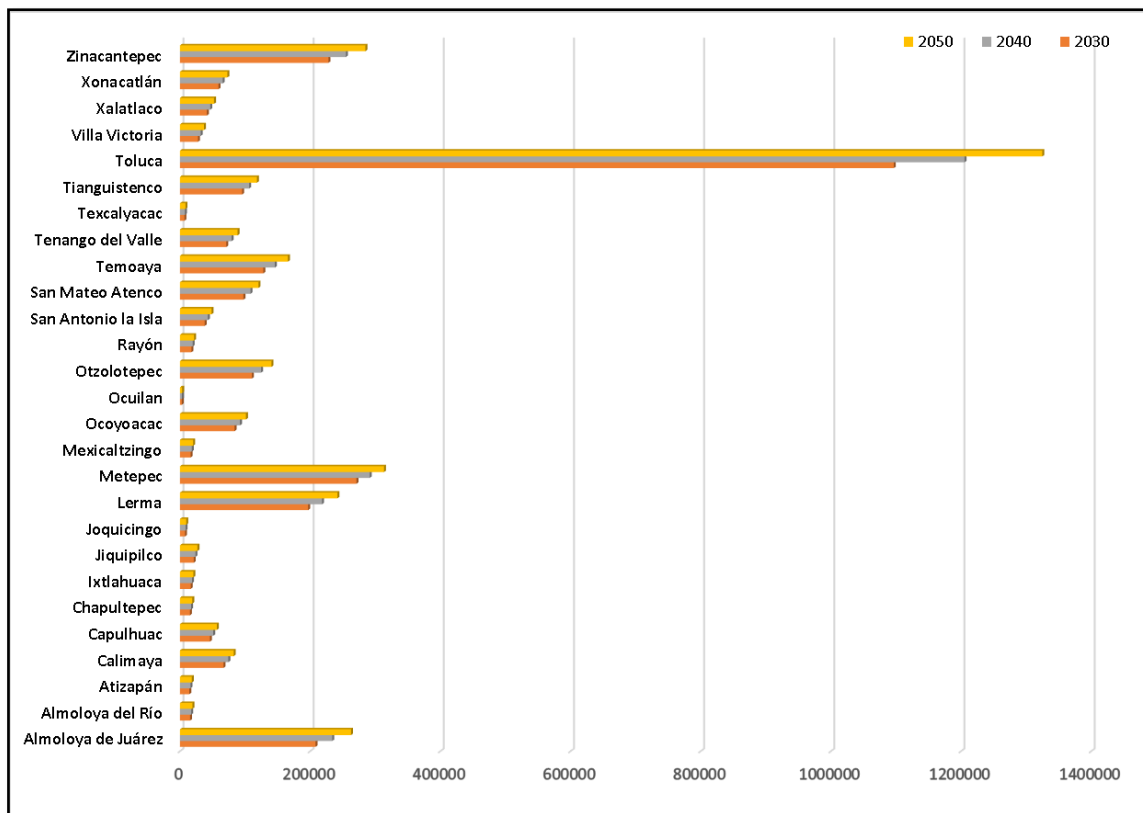


Figura 2.8. Proyecciones de crecimiento poblacional de los municipios comprendidos dentro del límite administrativo del AVT para el periodo de tiempo 2030-2050 (Elaborado con datos de CONAPO, 2015).

# Capítulo 3

## Síntesis de estudios hidrogeológicos previos

La generación de información sobre un lugar en específico que permita el conocimiento y entendimiento de las diversas problemáticas actuales se logra a través de la realización de un gran número de estudios, trabajos, proyectos e investigaciones en diversas áreas del conocimiento.

En el AVT, instituciones educativas, gubernamentales y empresas del sector privado han desarrollado investigaciones puntuales sobre las características físicas, hidrogeológicas, hidrogeoquímicas, estructurales y sociales durante un largo periodo de tiempo como son los de [Loehnberg, 1960](#); [Veytia, 1960](#); [Servicios Geológicos, S.A., 1966](#); [Ingeniero Civiles y Geólogos Asociados, 1977](#); [Lesser y Asociados, 1987](#); [Ariel Consultores S.A., 1996](#); [IMTA, 2008](#); [Patoni y Sánchez, 2018](#); y [López, 2019](#), por mencionar algunos; dando con ello información que permite el entendimiento del sistema superficial y profundo del acuífero.

A continuación, se realiza una síntesis de los trabajos más sobresalientes relacionados con el tema de interés y son los que han dado la pauta a seguir para el desarrollo y la mejora continua en la generación de información del Acuífero del Valle de Toluca.

En orden cronológico:

Se tiene conocimiento de estudios hechos desde principios de siglo XX para bombear aguas de los manantiales del Río Lerma y conducirlos por gravedad a la Ciudad de México. Posteriormente esta idea fue retomada varias veces considerando distintas posibilidades en cuanto al volumen captado y las obras de conducción; sin embargo, fue en 1960 cuando se hizo un estudio cuantitativo del Alto Lerma enfocado específicamente a determinar el volumen de aguas subterráneas factible de captar (UAEM, 2013).

El primero de esos estudios fue realizado por Loehnberg (1960), quien llegó a determinar un potencial del orden de 7.1 a 10.5 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente, para toda la cuenca alta del Río Lerma. Consecuentemente, Veytia (1960); determinó nuevamente el potencial de los acuíferos en la misma cuenca hasta la estación Hacienda La "Y", obteniendo un resultado de 11.8 m<sup>3</sup>/s o bien, 3.2 m<sup>3</sup>/s adicionales en caso de abatir el nivel freático en la zona de las lagunas y pantanos para evitar evaporaciones. Ese mismo año, en una actualización de su estudio, confirma la cifra de 12.2 m<sup>3</sup>/s.

Posteriormente, la empresa Servicios Geológicos, S.A. (1966), con el objeto de incrementar hasta donde fuera posible las captaciones actuales en el Alto Lerma y construir nuevas obras para cubrir las demandas de agua potable de la ciudad de México, llevó a cabo un estudio que comprendía aspectos geológicos y aplicó coeficientes empíricos de infiltración, modificando a la baja las cifras reportadas en los estudios previos.

El siguiente estudio se realizó por la Oficina de Estudios Especiales de la SRH (1970), como una contribución al abastecimiento de agua para la ciudad de México, es uno de los más completos, pues se apoyó en observaciones hechas en una red con piezómetros colocados a distintas profundidades para el estudio de acuíferos múltiples, además se calibró un modelo matemático representativo del comportamiento del acuífero. Es de hacer notar que, en aquel entonces, el abatimiento piezométrico era del orden de 3 a 4 metros en la zona urbana generando efectos directos como la desaparición de manantiales, secado de numerosas norias por el descenso del nivel freático y un mayor costo del bombeo, y como efectos indirectos se señalan los hundimientos regionales del terreno y su agrietamiento.

Partiendo de lo anterior, existen varios estudios relativos al comportamiento de grietas y su medición en la cuenca del Alto Lerma, que tienen interés por estar relacionados con la sobreexplotación de los acuíferos y sus efectos secundarios inducidos, mismos que serán comentados a continuación.

La compañía [Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados \(1977\)](#) llevó a cabo una actualización del levantamiento de las grietas para la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM), con el objetivo de censar todas las grietas localizadas en los valles de Toluca e Ixtlahuaca, verificando localización, abertura, profundidad y orientación. Ese mismo año la empresa realizó una serie de investigaciones geofísicas con el objetivo de conocer en una zona de grietas identificadas la forma en que se comporta el campo eléctrico y con ello inferir nuevas zonas en donde no se observan superficialmente.

Dando continuación a los estudios anteriores, [CONSULTEC \(1978-1979\)](#) realizó diversos estudios para la CAVM, con el objeto de estudiar las causas y efectos de los agrietamientos, así como la instrumentación de 15 estaciones de medición con observaciones durante un año de los desplazamientos, tanto horizontales como verticales. Los resultados reportan la existencia de aproximadamente 100 grietas en un área de unos 1,500 km<sup>2</sup>. Dentro del VT se censaron 21 grietas al sur de la carretera Toluca-Lerma, reportando aumentos en su longitud y profundidad, y aumentos o disminución de su abertura.

Regresando nuevamente al ámbito hidrogeológico, nuevos estudios fueron realizados para el cálculo de la recarga anual del acuífero. Uno de ellos fue realizado por ICATEC, 1985 en citado en [CONAGUA \(2018\)](#) quien llevó a cabo el trabajo denominado “Estudio geohidrológico preliminar del Valle de Toluca” en donde se realizó un censo de 626 pozos, determinando un volumen de recarga anual de 364 Mm<sup>3</sup> y extracciones de 413 Mm<sup>3</sup>.

[Lesser y Asociados \(1987\)](#) realizó otro trabajo con el propósito de medir los niveles estáticos en los pozos piloto de los valles de Toluca e Ixtlahuaca, determinar la evolución de la superficie piezométrica del acuífero y obtener datos para apoyar los numerosos dictámenes que se requieren sobre solicitudes de perforaciones nuevas, rehabilitaciones de pozos y cancelaciones. Los resultados reportan un abatimiento de 70 m en la zona industrial de Toluca (1970-1987) el cual disminuyen radialmente hasta mostrar abatimientos de entre 10 y 20 m en el resto del valle; en la porción sur, los mayores abatimientos son del orden de 30 m y se presentan hacia Almoloya del Río; a la altura de la población de Lerma, el abatimiento piezométrico es del orden de 40 m hacia el oriente y disminuye a 20 m hacia el

poniente; en el área de Santa María Atarasquillo los abatimientos varían entre 30 y 60 m, y en la parte del norte del Valle de Toluca se localizan los menores abatimientos, del orden de 10 m.

El siguiente trabajo consultado se hizo por [Perforaciones Leor, S.A.](#), (1989) con objetivos muy diversos y ambiciosos, entre los cuales destacan el estudio de la evolución de niveles y gastos de extracción en cada pozo, para emitir un dictamen sobre su comportamiento y vida útil; investigar posibilidades de un agotamiento de los horizontes acuíferos como causa del detrimento en los caudales de producción de los pozos y establecer una relación abatimiento-agrietamiento-afectación de pozos, para los Valles de Toluca e Ixtlahuaca.

Nuevamente [Lesser y Asociados S.A. de C.V.](#), (1992) realizó un estudio para implementar la reglamentación de las extracciones del agua subterránea en el AVT, siendo sus objetivos principales determinar las condiciones del acuífero, implementar un modelo matemático simplificado y plantear alternativas de aprovechamiento de agua en zonas conflictivas. Resultó un estudio muy completo desde el punto de vista de la hidrología subterránea, pues después de abordar aspectos geológicos, piezométricos, determinar volúmenes de extracción, características hidrodinámicas y balance de las aguas subterráneas, se aplicó el modelo PLASM, derivado del Prickett y Lonquist, adaptado por el Consultivo de la CONAGUA, con el cual se investigaron distintas alternativas de reordenación y manejo que teóricamente permiten recuperaciones piezométricas en el área urbana de Toluca y la zona industrial.

En ese mismo año de 1992 la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Distrito Federal, realizó un estudio regional de los valles de Toluca e Ixtlahuaca, con objetivos consistentes en evaluar las características y condiciones hidrogeológicas en los valles señalados, a fin de corroborar y estructurar los modelos conceptuales y de funcionamiento de los acuíferos; establecer los efectos generados por las extracciones de agua subterránea; delimitar las estructuras y unidades del subsuelo aprovechables como acuíferos y realizar un balance de aguas subterráneas de la zona. Se cuantificó el volumen de extracción en 448 Mm<sup>3</sup>, con un total de 914 aprovechamientos censados entre pozos, norias y manantiales. Este es probablemente el estudio geohidrológico más completo de la zona de estudio ya que se realizó un buen levantamiento geológico, 32 SEVs en una prospección geofísica, el censo de aprovechamientos y sus extracciones, buena amplitud los aspectos piezométricos, calidad del agua y caracterización hidrogeoquímica, un modelo

conceptual del funcionamiento del acuífero y un balance hídrico que integra la evaporación calculada por varios métodos.

Al siguiente año, [Figueroa \(1993\)](#) llevó a cabo una actualización de los acuíferos de Toluca e Ixtlahuaca y se enfoca en los efectos de la sobreexplotación de los acuíferos locales, resaltando que, además de los abatimientos piezométricos que encarecen paulatinamente el bombeo, se ha originado asentamientos y agrietamientos del terreno.

Uno de los primeros estudios enfocados a la parte de calidad del agua fue en que realizó la empresa [EXYCO, S.A., \(1994\)](#) para CONAGUA, denominado “Estudio de caracterización hidrogeoquímica de seis de los principales acuíferos del país”, estando este enfocado en el Valle de Toluca.

[Ariel Consultores S.A. \(1996\)](#), realizó el estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de las Redes de Observación del Acuífero Valle de Toluca, el cual determinó el balance hidrológico y el modelo de simulación y predicción de flujo hidrodinámico principalmente, llegando a los siguientes resultados: Entradas de 256.5 Mm<sup>3</sup>/año, salidas de 342.0 Mm<sup>3</sup>/año y un cambio de almacenamiento de -85.5 Mm<sup>3</sup>/año.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ([IMTA, \(2008\)](#)) también se ha involucrado en el estudio de las consecuencias de la sobreexplotación del AVT pues llevó a cabo dos estudios con diferentes métodos geofísicos. Estos estudios fueron enfocados a dos sitios en particular en donde los agrietamientos han cobrado gran importancia debido a su impacto a la sociedad. Los resultados reportan que para ambos lugares (El sitio San Pedro y el Sitio Almoloya) presentan zonas con agrietamientos producto de la explotación intensiva del acuífero y a la presencia de capas arcillosas, susceptibles a la deformación.

Con lo anterior, la UAEMex, a través de sus centros educativos (Facultad de Geografía e IITCA), se vio motivada para enfocar sus estudios al AVT. De esta manera, un gran número de trabajos de tesis y de investigación se han desarrollado en los últimos años.

Estudios que han tenido como objetivo principal la generación de nuevo conocimiento y el entendimiento de las características físicas, hidrodinámicas, hidrogeoquímicas ([Expósito, 2012; Esteller et al., 2012; Fonseca-Montes de Oca et al., 2020](#)), geológico-estructurales ([López, 2019](#)), la actualización de cálculos de recarga mediante diversos métodos ([Patoni y Sánchez, 2018](#)), la propuesta de actualización y mejora de redes de monitoreo ([Sánchez,](#)

2013; Esquivel, 2015), así como la cartografía actualizada de los agrietamientos y fallas del AVT (Almazán-Vázquez, 2017) y el análisis y predicción de nuevas zonas de subsidencia (Hernández-Conde, 2014; Arroyo-Domínguez, 2016), por mencionar solo algunos.

De manera independiente, la empresa Geofísica Juayek (2002-2020), consultoría dedicada y especializada en la geofísica de exploración y el estudio y construcción de pozos profundos, cuenta en su base de datos con un gran número de Registros Geofísicos de Poso (RGP) y sondeos. Estos se encuentran distribuidos en todo el Valle de Toluca y son una herramienta valiosa para el entendimiento de la composición geológica del acuífero.

Finalmente, las dependencias gubernamentales como: Comisión de Agua del Estado de México (CAEM) y Agua y Saneamiento de Toluca (AYST) (2017-2019), han llevado a cabo estudios de prospección geofísica en diversos municipios y localidades del Valle de Toluca con el objetivo de identificar nuevos puntos para la rehabilitación o construcción de nuevos pozos de extracción. Lo anterior como consecuencia del deterioro de los pozos que cuentan ya con bastantes años de servicio.

# Capítulo 4

## Marco teórico

Para la mejor comprensión de la problemática que se aborda en el presente documento, es indispensable tener claros algunos conceptos que están relacionados entre sí y que en conjunto brindan las bases para la implementación de una metodología adecuada para dar solución a los objetivos fijados.

La parte teórica y los fundamentos matemáticos de algunas técnicas geofísicas a emplearse juegan un papel primordial ya que es a través de ellas que, mediante la relación de parámetros (datos) medidos en campo con las características físicas de las rocas, se obtiene información del subsuelo.

A continuación, se describen de manera breve y clara cada uno de estos elementos.

## 4.1 Agua subterránea y problemáticas asociadas

### 4.1.1 Manejo sustentable de un acuífero

Según [FEA \(2015\)](#), el término de desarrollo sostenible, sustentable o perdurable se utilizó por primera vez en 1987 y se refiere a un desarrollo socioeconómico que considera el carácter finito de los recursos naturales, su deterioro y la equidad en el reparto del bienestar social.

Sin embargo, el agua subterránea está siendo rápidamente abatida en todo el mundo ([Famiglietti \*et al.\*, 2011](#); [Aeschbach-Hertig and Gleeson, 2012](#); [Richey \*et al.\*, 2015](#)). La mayor causa de sobreexplotación se debe a las zonas agrícolas en donde utilizan grandes volúmenes de agua para riego (ej. India, China, USA y México) y en aquellas zonas en donde las grandes urbes se encuentran asentadas ([Gleeson \*et al.\*, 2012b](#); [Margat and Van Der Gun, 2013](#)).

Entre los grandes problemas que se han tenido durante los últimos años, hay que destacar que el agua subterránea es un recurso invisible, es decir, no se puede ver; hay una limitación de acceso a los datos o la carencia de ellos, el insuficiente conocimiento del sistema subterráneo, el uso inadecuado de tecnología y herramientas de monitoreo y la ausencia del trabajo conjunto de instituciones educativas, gubernamentales y sociales ([Jakeman \*et al.\*, 2016](#)).

Ante esta situación, [Brown \(2018\)](#), propone un esquema conceptual que involucra los cuatro factores fundamentales para el manejo sustentable de los acuíferos. Entre ellos destacan el adoptar nuevas tecnologías de riego y de cultivo o bien implementar medidas de ahorro o el reúso del agua en casa, entre otros (Figura 4.1).

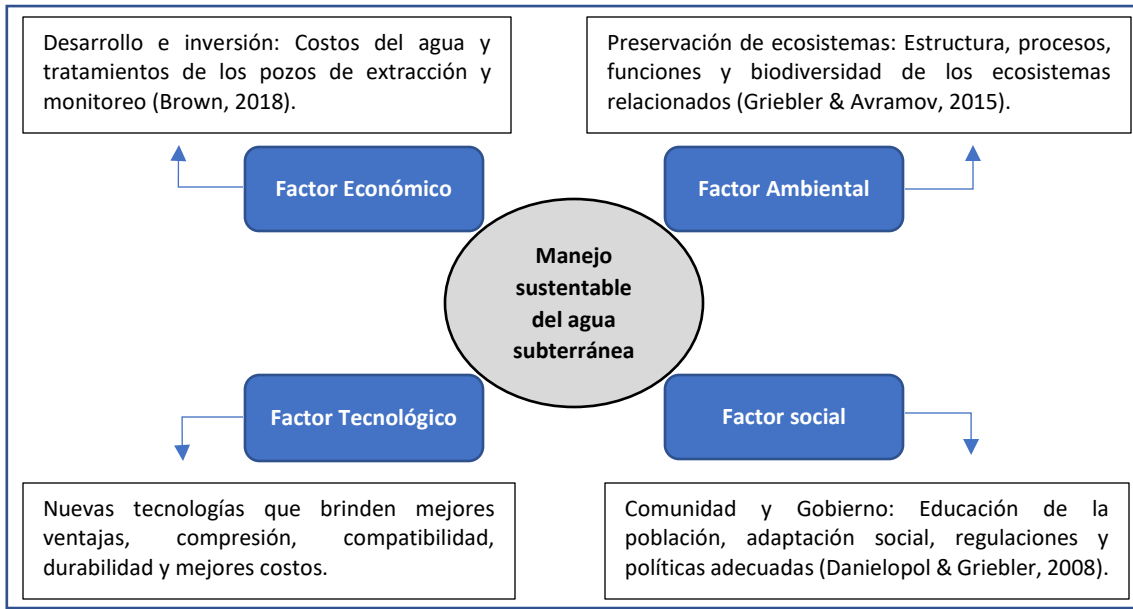


Figura 4.1.- Factores interactivos en el manejo sustentable del agua subterránea. (Modificado de Ahmad & Al-Ghouti, 2019).

Para [De Sousa y Morais \(2020\)](#) un factor fundamental en la pérdida significativa del recurso subterráneo es el deficiente sistema de equipos de extracción y la falta de mantenimiento. Por ello, proponen una metodología que se compone de tres etapas: 1) Caracterización: permite el entendimiento del problema y recolección de información; 2) Estructura: se aplica la técnica SODA (por sus siglas en inglés) para generar opciones que den solución al problema y 3) Clasificación: se utiliza un análisis multicriterio con base en la metodología de Simon (Figura 4.2). Con los resultados será posible establecer prioridades y se dará mantenimiento a los equipos que más lo necesiten.

Bajo este escenario, [Castilla-Rho et al. \(2019\)](#), desarrolló un algoritmo que permitió evaluar el comportamiento social, la información de un modelo específico y diversos datos empíricos para conocer los diferentes escenarios posibles ante las políticas de sustentabilidad que se aplican al manejo de acuíferos.

Para el caso de México, [CONAGUA \(2018b\)](#), indica que la nueva política de sustentabilidad hídrica se enfoca en el incremento del tratamiento de aguas residuales, así como en el reúso del agua y se hace énfasis en la administración de las aguas nacionales mediante la verificación de aprovechamientos y el ordenamiento de cuencas y acuíferos; lo que permitirá mantener una extracción sustentable de los acuíferos que no se encuentran en riesgo y recuperar aquellos que cuentan con un déficit o en sobreexplotación.

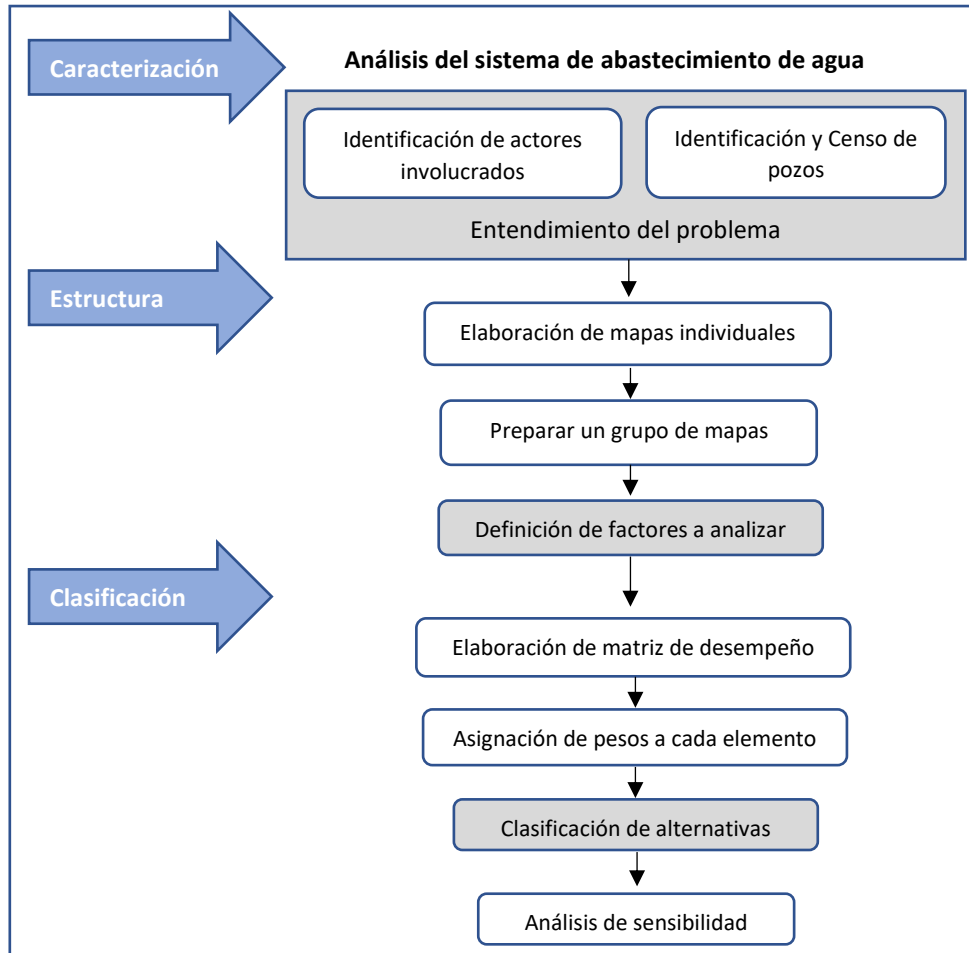


Figura 4.2.- Diagrama de flujo que involucra los tres pasos para la identificación de problemas relacionados con la deficiencia de los equipos de extracción o los pozos. (Modificado de Pereira & Morais, 2020).

#### 4.1.2 Explotación intensiva del agua subterránea

Para Custodio y Llamas (2002), existe una explotación intensiva de aguas subterráneas cuando se extrae una fracción significativa del recurso renovable interanual de los acuíferos, que, en contrapartida, modifica apreciablemente su régimen hidrogeológico, o causa impactos ecológicos, políticos o socioeconómicos significativos, o se producen cambios importantes en la interacción río-acuífero.

Si bien la población juega un papel fundamental para el equilibrio de un sistema, las variables climáticas son de suma importancia. De acuerdo con cifras de la CONAPO, (2004, 2018), entre 2000 y 2030 la población del país incrementará en 20.4 millones de personas, disminuyendo la disponibilidad de agua por habitante pasando de 4028 m<sup>3</sup>/año a 3430 m<sup>3</sup>/año. A su vez, los escenarios para 2020 y 2050 indican aumentos de temperatura entre 1 y 3 °C y disminución en la precipitación media anual de 5 a 10 %, ocasionando mayores

valores de evapotranspiración lo que traerá consigo un incremento en la extracción de las aguas subterráneas (CONAGUA, 2018b).

Extraer las aguas subterráneas de una manera desordenada puede traer consigo diversos problemas de índole técnico, ambiental, social, económico, administrativo y legal. Entre esos problemas, los que más destacan son: descenso de niveles piezométricos con el aumento consiguiente de la altura de elevación y su consecuencia inmediata del incremento de los costos de explotación; la afectación a superficies de agua libre, ya sean ríos, lagos o humedales (Llamas, 1991); contaminación y/o salinización de acuíferos y/o suelos; problemas a intereses de terceros; inducción de colapsos; y asentamientos diferenciales con consecuencias estructurales, entre otros (LaMoreaux, 1991).

En consecuencia, en aquellas grandes urbes, tal como lo es la Ciudad de Toluca y su área conurbada, la explotación intensiva aunado a factores como el crecimiento poblacional, el abatimiento de los niveles freáticos y el impacto de agrietamientos originados por la subsidencia del terreno genera vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. Lo anterior degrada la calidad y cantidad del recurso hídrico ante escenarios futuros; tal como lo demuestra Esteller *et al.* (2014), para el caso del Acuífero del Valle de Toluca (AVT).

Debido a los problemas enlistados y a la urgente necesidad de conocer los procesos y parámetros que intervienen en la explotación, uso, vertido, conservación y protección del agua subterránea, catalogada como recurso muy valioso en el medio urbano, emerge una nueva rama científica dentro de las ciencias hidrogeológicas denominada “Hidrogeología Urbana” (HU) (Dávila y De León, 2011).

Esta nueva unidad de estudio investiga las condiciones hidrodinámicas del agua subterránea, la recarga, el uso y calidad del agua, así como el manejo, preservación y repercusiones de los acuíferos en las áreas urbanizadas y en sus alrededores, orientada al abastecimiento de la población y sus zonas urbanas, industriales, comerciales, de riego, de recreo y parques públicos (Llamas y Custodio, 2003; Custodio, 2004).

#### 4.1.3 Subsidencia

Se considera como aquel proceso paulatino del hundimiento de la corteza terrestre, ya sea continental y/o marina (Corapcioglu, 1984). Para el primero de los casos, es necesario que ocurra un asentamiento en superficie y esto puede ser ocasionado por diversos factores, ya sean naturales asociados a fenómenos geológicos como pliegues, fallas, tectonismo,

vulcanismo, etc., o causados por actividad antropogénica (Prokopovick, 1979; Tomás *et al.*, 2009).

Pacheco (2007), la define como aquel fenómeno que tiene lugar debido a la extracción de sólidos (minerales) o fluidos del subsuelo (agua, aceite, gas), que se manifiesta en hundimientos paulatinos de la superficie, generando zonas de ruptura manifestada en agrietamientos. Un término más contemporáneo es el de la RAE (2021), el cual se define como el hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia de trabajos de minería, colapso de cavidades subterráneas, extracción de agua o petróleo o desecación.

De manera general, Scott (1979), propone una clasificación de los tipos de subsidencia de acuerdo con el fenómeno que la ocasiona (Tabla 4.1).

Tabla 4.1.- Clasificación de los diferentes tipos de subsidencia de acuerdo con el ambiente en donde se genera (Modificada de Scott, 1979).

Tipo de subsidencia	Ambiente donde se genera
Por disolución subterránea	Rocas carbonatadas (ambiente calcáreo)
Por obras subterráneas	Cualquier ambiente con obras
Por erosión subterránea	Ambiente kárstico
Por flujo lateral	Material granular y/o fracturado
Por compactación	Zonas con extracción de fluidos
Por tectonismo	Zonas sísmicamente activas

Para el caso particular de la subsidencia por compactación, Terzhagi (1956), desarrolló una teoría en la cual resume la ecuación diferencial del proceso de consolidación de suelos con flujo vertical. Esta ecuación establece una relación entre la presión del poro, la profundidad y el tiempo (Ecuación 4.1). Así mismo, permite calcular la distribución de presiones en cualquier profundidad del estrato y en cualquier tiempo del proceso de consolidación.

$$\frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} = \frac{\delta u}{\delta t} \quad (\text{ecuación 4.1})$$

Donde  $k$  es la permeabilidad,  $e$  es la porosidad,  $a_v$  es el coeficiente de compresibilidad,  $\gamma_w$  es el peso específico del agua,  $u$  la presión del poro y  $z$  el espesor del estrato.

Poland (1984), propone el modelo del drenaje del acuitardo. Este modelo considera que los hundimientos son causa de una despresurización resultado del descenso de los niveles piezométricos.

#### 4.1.4 Agrietamientos

El proceso de génesis de este fenómeno puede deberse a diferentes factores (subsistencia, sismos, procesos geomecánicos, etc.), sin embargo, debido a su complejidad, aún no ha sido posible definir una metodología que ayude a predecirla con exactitud. Sin embargo, existen trabajos que han clasificado las grietas visibles en superficie. (Jachens y Holzer, 1982; Sheng y Helm, 1995; Wang *et al.*, 2016).

Jachens y Holzer (1982), llevaron a cabo estudios geofísicos sobre grietas en el Suroeste de Arizona, con los resultados pudieron concluir que uno de los orígenes de las grietas se debe a la influencia que genera el lecho rocoso en forma de horst sobre las capas que lo sobreyacen, ejerciendo esfuerzos y generando una configuración de flexión (Figura 4.3 a). Otro escenario ocurre cuando el lecho rocoso cuenta con irregularidades o heterogeneidades en su distribución, de modo que se rompen en forma de talud, lo que genera hundimientos y fallamientos. (Figura 4.3 b).

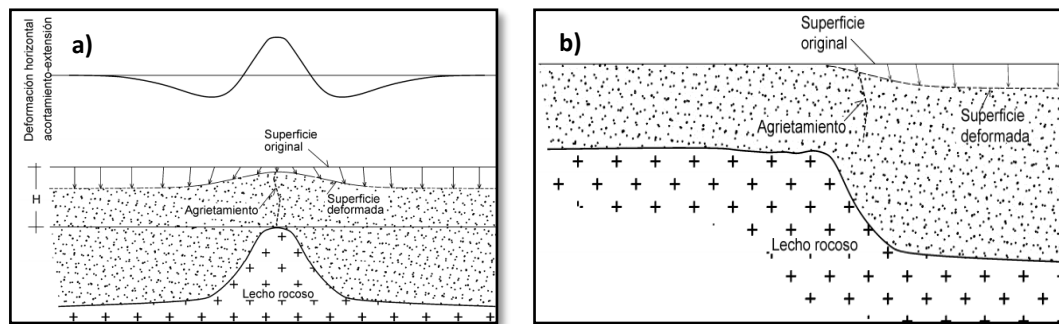


Figura 4.3.- a) Mecanismo de fracturas debido a la influencia del lecho rocoso; b) Generación de fracturas debido a la heterogeneidad del lecho rocoso (Tomado de Jachens y Holzer, 1982).

Posteriormente, Sheng y Helm (1995), proponen tres modelos conceptuales considerando posibles escenarios en los cuales se pueden generar grietas cuando existe abatimiento del nivel piezométrico.

El primero de los escenarios plantea que las interfaces entre los estratos que componen el medio se comportan como zonas de debilidad (Figura 4.4 a), en segundo lugar, se plantea que el cuerpo que compone el acuífero es discontinuo, es decir, es posible la presencia de una falla preexistente de origen no especificado (Figura 4.4 b); y finalmente, el tercer caso considera cambios abruptos en el espesor del relleno granular provocando esfuerzos cortantes y deformaciones que provocan fallamientos del suelo y a su vez agrietamientos en superficie (Figura 4.4 c).

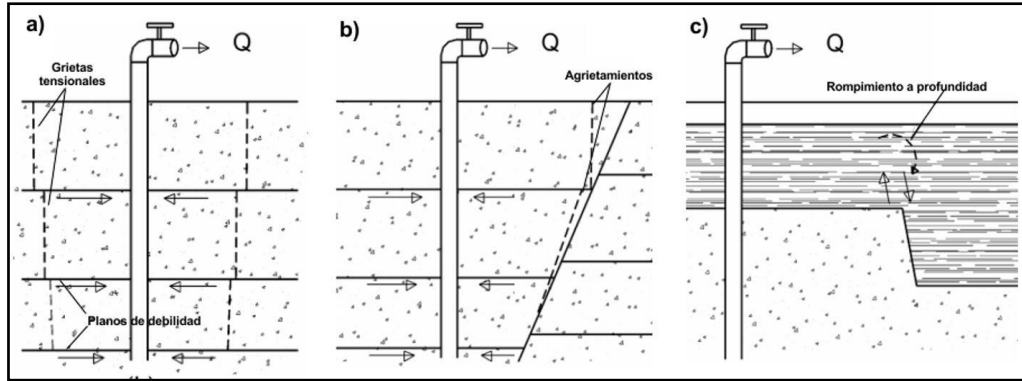


Figura 4.4. Modelos de generación de grietas: a) zonas de debilidad; b) cuerpo discontinuo y c) cambios abruptos de espesor (modificado de Sheng y Helm, 1995).

Por otra parte, [Carpenter \(1999\)](#) integra la variable de lluvias torrenciales. Él considera que los agrietamientos generan una zona de debilidad en la superficie; y que cuando se presenta una lluvia torrencial, el agua se infiltra a través del agrietamiento erosionándolo y haciendo que su tamaño aumente en cuestión de minutos (Figura 4.5). Años después, [Burbey \(2002\)](#), realizó una simulación numérica para el descenso de niveles piezométricos y concluyó que las fallas preexistentes funcionan como discontinuidades al flujo horizontal, provocando abatimientos no uniformes y, por lo tanto, generando hundimientos diferenciales y fallamientos en superficie.

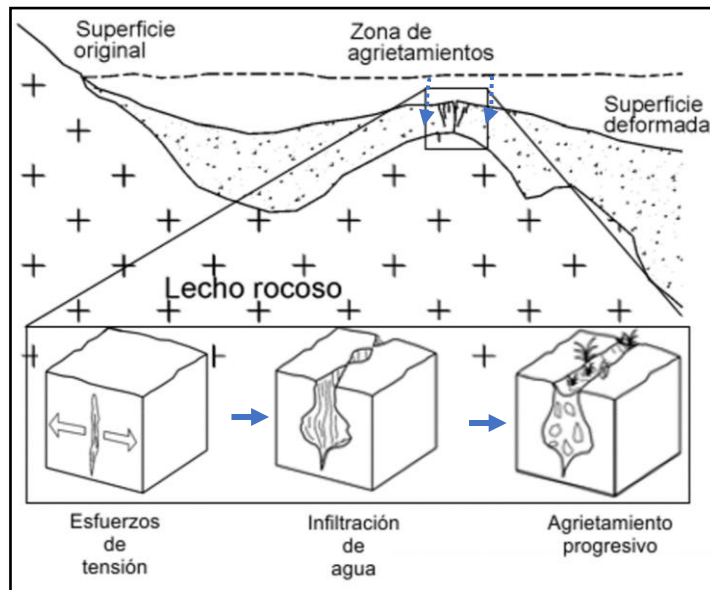


Figura 4.5.- Generación rápida de fracturamientos después de una lluvia torrencial (modificado de Carpenter, 1999).

## 4.2 Caracterización hidrogeológica de acuíferos

Los suelos y el agua subterránea son recursos naturales de gran importancia ya que permiten el sustento de la vida en el planeta. El uso y manejo efectivo de estos recursos subterráneos implican un gran reto para la sociedad y los gobiernos. Por ello, es de gran importancia generar conocimiento que permitan el entendimiento de los sistemas de agua subterránea (Vereecken *et al.*, 2006).

Muchos gobiernos y agencias externan la necesidad de desarrollar nuevas herramientas que permitan la caracterización, monitoreo e investigación de parámetros hidrogeológicos que ocurren en la parte profunda del subsuelo a diferentes escalas y de una manera no invasiva (National Research Council, 2000; US Department of Energy, 2000; US Global Change Research Program, 2001).

Es sabido que el medio natural se comporta de manera heterogénea y que las propiedades físicas cambian de un punto a otro, es por ello por lo que se requiere implementar la caracterización hidrogeológica a diferentes escalas. Para algunos casos es indispensable realizar reconocimiento geológico regional para identificar elementos a gran escala; sin embargo, existen otros escenarios en donde el estudio de un sitio en particular requiere de una caracterización mucho mayor para definir las diferencias entre una capa y otra (Rubin & Hubbard, 2005).

Las técnicas convencionales para la caracterización o monitoreo del suelo poco profundo generalmente consisten en la recolección de muestras o la perforación de pozos para la obtención de parámetros hidrogeológicos; sin embargo, cuando los requerimientos o la escala del estudio son mayores, estas mediciones no son suficientes para una buena caracterización. Para ello, se implementan los métodos geofísicos, los cuales permite realizar levantamientos regionales y locales a costos menores y de una forma no invasiva.

Los datos necesarios para la caracterización hidrogeológica pueden ser obtenidos de muchas plataformas diferentes, desde los satélites o mediciones aéreas, en superficie o incluso dentro del subsuelo a través de la perforación de pozos. La tabla 4.2 enlista los dos métodos principales de caracterización hidrogeológica, separados por dos principales métodos: los métodos geofísicos y los métodos hidrológicos, así como la escala o resolución de la obtención de datos y los resultados que se pueden obtener a partir de cada uno de ellos.

Tabla 4.2.- Métodos geofísicos e hidrológicos más comúnmente usados en la caracterización hidrogeológica (modificada de Rubin & Hubbard, 2005).

Escala de adquisición	Método de caracterización	Objetivo hidrogeológico
<b>Métodos geofísicos</b>		
Aerotransportado	Sensores remotos	Mapeo del lecho rocoso, identificación de interfaces agua dulce-salada, identificación de fallas, asentamientos regionales, etc.
En superficie	Sísmicos	Mapeo de lecho rocoso, nivel del agua, interfaces agua dulce-salada, delimitación de zonas de fallas y fracturas, cavidades, plumas contaminantes, geometría de acuíferos, calidad del agua, estimación de parámetros hidráulicos y geomecánicos, etc.
	Eléctricos	
Pozos transversales	Electromagnéticos	Mapeo de la geometría de acuíferos, delimitación de zonas con fallas y fracturas, cálculo de velocidades de ondas, estimación de litología, etc.
	Sísmicos	
Dentro de pozos	Eléctricos	Litología, contenido de agua, calidad de agua, hidrocarburos, delimitación puntual y precisa de fallas y fracturas, etc.
	Sísmicos	
Laboratorio	Registros geofísicos	Propiedades petrofísicas de las rocas y validación de modelos.
	Eléctricos	
	Sísmicos	
	Dieléctricos	
Laboratorio	X-Ray	Propiedades petrofísicas de las rocas y validación de modelos.
	Eléctricos	
	Sísmicos	
	Dieléctricos	
<b>Métodos hidrológicos</b>		
Ensayos de pozos	Bombeos	Estimación de la conductividad hidráulica y almacenamiento específico.
	Pruebas hidráulicas	
Pozos transversales	Pruebas de trazas hidráulicas	Conductividad hidráulica, dispersión, trayectorias de los flujos.
	Tomografía hidráulica	Conductividad hidráulica.
Dentro de pozos	Mediciones de flujo	Conductividad hidráulica y contenido de agua.
	Pruebas de neutrón	
Laboratorio	Permeámetros	Conductividad hidráulica, conductividad y contenido de agua.
	Análisis granulométrico (Sieves)	
	Reflectómetros en el dominio del tiempo	

La elección del método para llevar a cabo una caracterización dependerá de factores como el objetivo de la investigación, la resolución deseada, las condiciones del sitio a estudiar, el tiempo, presupuesto y recursos computacionales disponibles para dicha investigación. Los datos de baja resolución se obtienen con recorridos de campo, mientras que, los datos de alta resolución se obtienen con más de un método. Finalmente, la combinación de los datos obtenidos con la información hidrogeológica disponible del área ayudará a obtener buenos resultados del suelo profundo o superficial, así como a la estimación de uno o varios parámetros hidrológicos y/o geomecánicos (Rubin & Hubbard, 2005).

### 4.3 La geofísica como herramienta para la caracterización hidrogeológica

#### 4.3.1 Modelos conceptuales

Los métodos geofísicos no pueden ser utilizados para identificar directamente los cuerpos de agua o los acuíferos ya que estos se encuentran alojados en ciertos cuerpos geológicos. Sin embargo, es posible determinar las propiedades físicas de las rocas y por lo tanto identificar los acuíferos. Estos métodos permiten establecer el espesor, profundidad y posición del acuífero de manera general; a través de estos datos también se puede obtener el flujo del agua, sólidos disueltos, densidad, temperatura, porosidad, velocidad de infiltración, etcétera (Kelly & Mares, 1993).

La tarea principal de un levantamiento geofísico es conocer los elementos individuales de una estructura hidrogeológica y clasificarlos de acuerdo con sus propiedades físicas.

Una capa, geológicamente hablando, se define por su litología; geofísicamente hablando es un cuerpo que posee propiedades físicas diferentes a sus cuerpos vecinos. De esta manera, la geofísica se utiliza para determinar las dimensiones de las capas, su posición en el espacio y ocasionalmente su estructura (Figura 4.6). En muchas ocasiones una capa geológica puede descomponerse en varias capas geofísicas, pero para el caso de la hidrogeología siempre es conveniente asociar un conjunto de capas geológicas a una sola capa geofísica (Kelly & Mares, 1993).

Si bien una anomalía geofísica se encuentra ampliamente relacionada con su descripción geológica, existen pasos intermedios que permiten llegar a dicho resultado, uno de estos pasos intermedios son los modelos conceptuales. En términos simples, un *modelo* es una versión simple y pequeña de un objeto real. Ej. Un modelo puede ser descrito en términos geofísicos a través de sus propiedades físicas como tamaño, profundidad, densidad, etc., el cual se ajustará a los datos recolectados en campo.

Generalmente, un modelo es más simple que la realidad y esto se debe a tres razones: 1) la señal o los datos medidos son distorsionados y/o enmascarados, perdiendo detalle del objeto causante de anomalías; 2) errores en las mediciones y el ruido que afecta a los datos, y 3) la resolución (la cual está relacionada con la densidad de información disponible o recolectada en campo) (Musset & Khan, 2000).

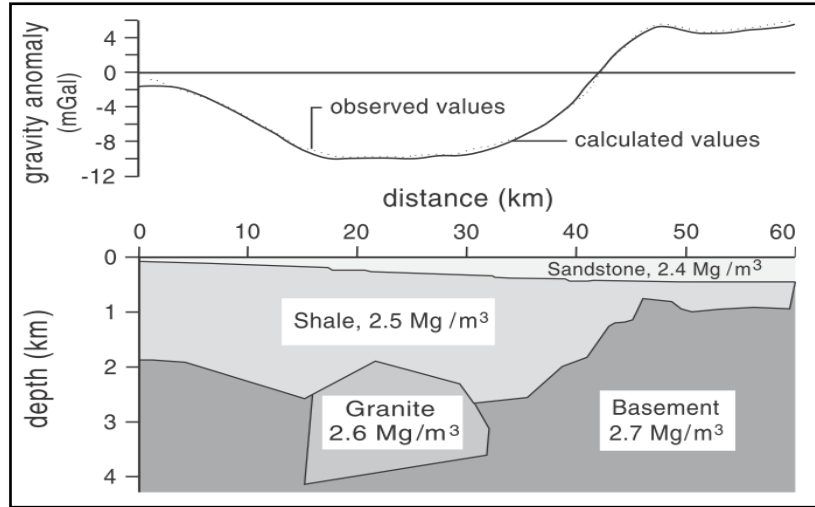


Figura 4.6.- Modelo conceptual simple elaborado con valores de densidad a través del método gravimétrico (Tomado de Musset & Khan, 2000).

#### 4.3.2 Métodos geofísicos

Ya que no es posible observar directamente las condiciones de los elementos subterráneos, se han empleado métodos que revelan las propiedades físicas e hidrogeológicas de los acuíferos. La unión de la geofísica, a través de sus diferentes métodos aplicados para la caracterización de los sistemas de aguas subterráneas (delimitación de geometrías de acuíferos, localización de capas, valles, zonas de fracturas y/o cavidades, etc.) y con el cálculo de parámetros hidrodinámicos (grado de saturación, porosidad, velocidad de flujo, etc.), ha sido denominada como “hidrogeofísica” (Rubin & Hubbard, 2005).

A pesar de que los métodos geofísicos se han utilizado a lo largo de los años para la exploración de hidrocarburos, fue necesario desarrollar métodos que permitieran conocer las características físicas del subsuelo a profundidades menores. La hidrogeofísica se enfoca solamente a los objetivos hidrológicos subsuperficiales (Rubin & Hubbard, 2005).

Durante la caracterización, la adquisición de datos puede realizarse a diferentes escalas, según sea el objetivo de investigación, la resolución que se desee alcanzar, las condiciones del sitio, el costo económico, el tiempo disponible o bien los recursos computacionales. La Tabla 4.3 enlista los métodos geofísicos que se emplean principalmente para la caracterización hidrogeológica, señalando el atributo o propiedad física que se obtiene de él y algunas aplicaciones generales.

Tabla 4.3.- Métodos geofísicos más comúnmente utilizados para la caracterización hidrogeológica (modificada de Rubin & Hubbard, 2015).

Método	Atributos obtenidos	Aplicación hidrogeológica
Refracción sísmica	- Velocidad de onda P y S	- Mapeo del lecho rocoso - Nivel freático - Identificación de fallas y fracturas
Geoelectrico	- Resistividad aparente	- Identificación y delimitación de fallas y fracturas - Mapeo y zonificación de acuíferos - Nivel freático - Interfaces agua dulce/salada/salobre - Plumas contaminantes - Calidad del agua
Electromagnético	- Resistividad aparente	- Identificación y delimitación de fallas y fracturas - Mapeo y zonificación de acuíferos - Nivel freático - Interfaces agua dulce/salada/salobre - Plumas contaminantes - Calidad del agua
Registro geofísico de pozo	- Resistividad eléctrica - Velocidad de ondas - Constantes dieléctricas - Imágenes de pozos - Densidad de formaciones - Estimación de porosidad - Etc.	- Delimitación e identificación de fallas y fracturas - Estimación más precisa de la litología. - Generación de columnas estratigráficas - Contenido de agua - Porcentaje de arcillosidad - Calidad del agua - Imagen de pozos - Etc.

Cada uno de los métodos mencionados anteriormente en la tabla obedecen a un principio físico y es a través de él que es posible obtener parámetros de interés para la generación de conocimiento en la caracterización hidrogeológica. Cabe destacar al método de registro geofísico de pozo (RGP) ya que, al ser una herramienta multiparamétrica, permite obtener una mayor cantidad de parámetros y propiedades físicas de las rocas de manera puntual y con menor grado de incertidumbre.

A continuación, se describe de manera breve el principio físico de cada uno de ellos.

**Refracción sísmica.** La energía sísmica transmitida desde una fuente que viaja a través de un conjunto de capas puede regresar a la superficie de la tierra de dos maneras: 1) a través de la reflexión y 2) si las ondas transmitidas son refractadas dentro de las capas, es decir, las ondas encuentran un punto de regreso dentro de cada capa. Observar estos cuerpos de ondas es el principio básico de medición de la sísmica de refracción (Kirsch, 2009).

Una onda transmitida encuentra un punto de regreso dentro de una capa solo si fue transmitida desde un ángulo crítico. Siguiendo la ley de Snell, este ángulo existe si la velocidad de onda de la capa es mayor que la del cuerpo en el cual viajará. Siguiendo el criterio anterior, un frente de ondas se formará solo si la velocidad sísmica de la capa refractante es constante o incrementa de manera gradual (Figura 4.7 a y b).

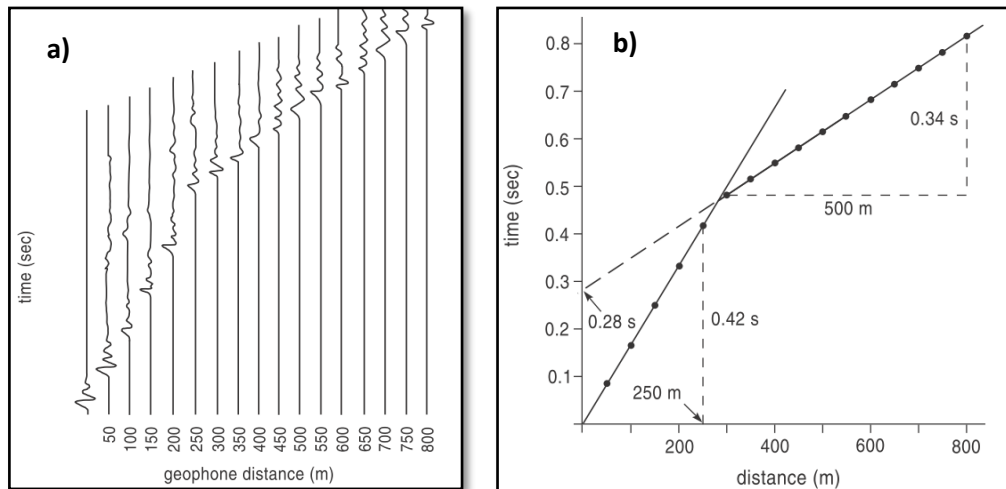


Figura 4.7.- a) Sismograma que muestra un frente de ondas que pasa de una capa de menor velocidad de viaje a otra de mayor velocidad de viaje; b) interpretación del frente de ondas (Musset & Khan, 2000).

La refracción sísmica puede ser utilizada de manera satisfactoria en estudios de geología estructural en donde se identifica de manera clara el lecho rocoso al aumentar la velocidad de propagación de las ondas. Por otro lado, en temas de hidrogeología, se identifica el arribo de onda P el cual señala el nivel de agua o bien la interfaz entre un acuífero y un acuitardo (Kirsch, 2009).

**Método Geométrico.** Los métodos eléctricos, resistivos o geométricos emplean una fuente artificial de corriente, la cual es introducida al subsuelo mediante un par de electrodos clavados en el suelo. El fin específico es medir el potencial de corriente mediante otro par de electrodos colocados en las cercanías del flujo de corriente. De esta manera, al ser medida y controlada la corriente que se inyecta al medio, será posible determinar una resistividad aparente del medio en el que viaja (Figura 4.8).

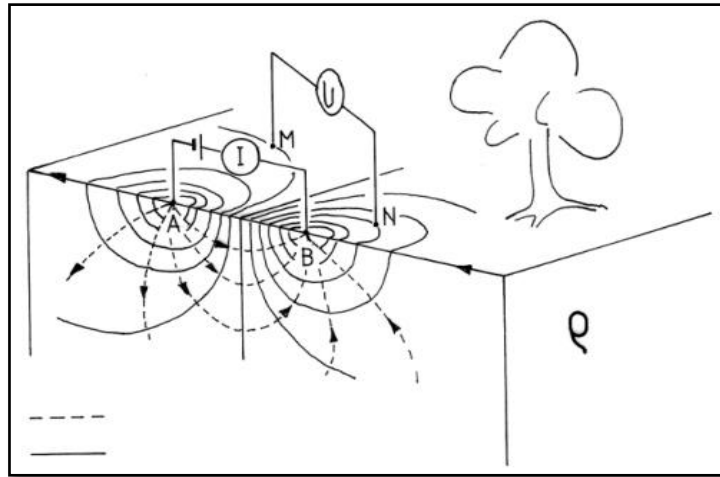


Figura 4.8.- Líneas equipotenciales y de corriente que viajan en un medio homogéneo que corresponden con el principio físico de los métodos eléctricos (Milsom, 2003).

Para un medio homogéneo y un arreglo electródico arbitrario (arreglo Schlumberger), la resistividad  $\rho$ , como parámetro petrofísico relevante, puede ser calculado con el valor conocido de corriente inyectada  $I$  y la diferencia de potencial  $U$ , mediante la ecuación 4.2:

$$\rho_A = K * \frac{U}{I} \quad \text{ecuación 4.2}$$

En donde  $K$  es el factor geométrico que depende de la disposición electródica y que se puede calcular mediante la ecuación 4.3:

$$K^{-1} = \frac{1}{2\pi} * \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad \text{ecuación 4.3}$$

De modo que un medio homogéneo no puede ser comparado con las condiciones geológicas reales, el término de resistividad aparente es empleado y es calculado a través de la ecuación 4.2.

Los datos calculados son procesados con el fin de obtener la distribución de resistividades en el medio, lo cual, puede ser interpretado en términos geológicos (Milsom, 2003).

**Método Electromagnético.** Los sondeos de transitorios electromagnéticos o también conocidos como sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) puede ser ejecutados a través de diferentes maneras (Telford *et al.*, 1990).

La aplicación más común de los TEM está representada por una corriente que es inyectada dentro de una bobina colocada de manera horizontal constituida por un cable sencillo. La corriente actúa como un círculo magnético el cual genera un campo magnético primario que se extiende a profundidad. La corriente transmitida es abruptamente interrumpida causando el decaimiento de dicho campo magnético, el cual, por principio electromagnético, genera las corrientes de Eddy, las cuales continúan fluyendo a mayor profundidad.

En un periodo de milisegundos, estas corrientes se atenúan conforme avanzan a profundidad y se extienden de manera lateral. La variación temporal de estas corrientes genera un campo magnético secundario y es la evolución de este lo que puede ser medido en superficie a través de otra bobina más pequeña en superficie o bien a través de la misma bobina transmisora (arreglo de bobina simple).

La figura 4.9 muestra la variación del tiempo derivativo del segundo campo magnético, también conocido como impulso de respuesta para un modelo de diferentes capas del subsuelo. Debido a que la magnitud y la evolución temporal del campo magnético secundario depende de la resistividad del medio, los datos obtenidos con el método TEM puede ser usado para reconstruir la geometría y distribución de las unidades estratigráficas que poseen diferentes propiedades eléctricas, a través de una inversión de datos con el fin de generar el modelo de resistividades que representen las capas del subsuelo (Bücker, 2017).

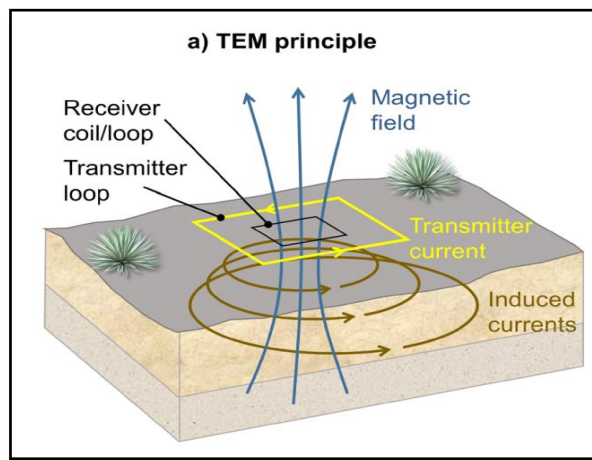


Figura 4.9.- Representación esquemática de un sondeo TEM con arreglo in-loop (tomada de Bücker, 2017).

**Registros Geofísicos de Pozo.** Diferentes propiedades físicas pueden ser medidas dentro de un pozo a través de un registro geofísico. La primera definición de un registro es una muestra de núcleo la cual es extraída durante la perforación y es analizada en laboratorio para proporcionar información litológica, de porosidad, permeabilidad, etc., y de esta manera poder correlacionar dicha información con pozos vecinos. Lo ideal sería realizar diversas perforaciones para la extracción de núcleos, sin embargo, se vuelve muy costoso y emplea mucho tiempo de trabajo.

Las mediciones geofísicas emplean herramientas sofisticadas que son suspendidas con un cable dentro del pozo, y una vez que llegan al fondo, son jaladas hacia la superficie a una velocidad constante que permite realizar múltiples mediciones generando de esta manera los registros geofísicos del pozo (Figura 4.10).

Actualmente, existen herramientas que permiten generar los registros de una gran cantidad de propiedades físicas, como son: Potencial espontáneo (SP), Rayos Gamma (GR), Densidad, Sónico, Neutrón-Densidad, Resistividad, Temperatura, Caliper (forma del pozo), imágenes y Conductividad, entre otras (Musset & Khan, 2000).

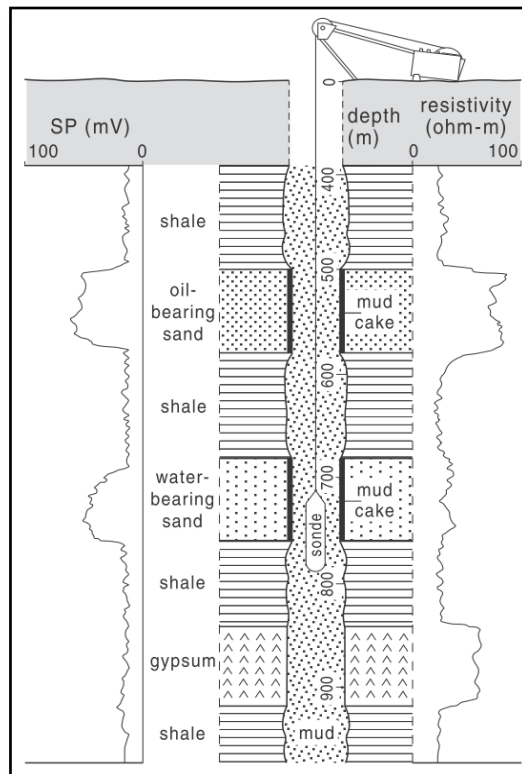


Figura 4.10.- Arreglo típico de un registro geofísico de pozo en donde se aprecia la respuesta de las curvas SP y Rho para diferentes capas que conforman el medio profundo (tomada de Musset & Khan, 2000).

## 4.4 El uso de los SIG como apoyo para la caracterización hidrogeológica

### 4.4.1 Análisis multicriterio y los sistemas de información geográfica (SIG)

El análisis en la toma de decisiones puede ser definido como un procedimiento sistemático para la toma de decisiones en la solución de algún problema. Anteriormente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el análisis multicriterio trabajaban de manera independiente, sin embargo, en los últimos años la implementación de ambas técnicas en conjunto ha cobrado gran importancia (Drobne *et al.*, 2009).

El análisis de decisión multicriterio (AMC), se basa en la metodología de Simon, quien propone tres fases en el proceso: la inteligencia, el diseño y la etapa de decisión (Simon, 1977).

Cualquier proceso de decisión multicriterio inicia con el reconocimiento del problema a ser solucionado. En la fase de inteligencia, la situación es examinada para poder tomar una decisión. Para la fase de diseño, los tomadores de decisiones proponen o sugieren diferentes alternativas de solución para el problema ya identificado. Generalmente para este punto, cada alternativa está bien sustentada con un modelo que la respalda. Finalmente, para la fase de decisión, se evalúa y se elige la mejor alternativa (Malczewski, 1999). Mientras que las etapas de inteligencia y diseño pueden ser apoyadas con métodos de análisis espacial multipropósito, la fase de decisión requiere aún de métodos que se encuentran ausentes de la mayoría de los SIG (Borouhaki & Malczewski, 2008; Malczewski, 1999; Malczewski, 2006; Malczewski & Rinner, 2005; Rinner, 2008).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés) se enfocan principalmente en dos aspectos: tecnología y solución de problemas. Son una herramienta que permite la introducción, almacenamiento, manipulación y análisis de información espacial, jugando un papel importante en el proceso comprensivo de toma de decisiones (FAO, 1976; Goodchild, 1987; Grimshaw, 1994; Laurini & Thompson, 1996; Malczewski, 1999).

Un SIG permite el manejo de una gran variedad de información que de manera conjunta puede ser utilizada para la toma de decisiones. Por lo tanto, debe verse como un proceso más que como una herramienta o un simple software (Grimshaw, 1994).

#### 4.4.2 Proceso de jerarquía analítica

La técnica de Jerarquía Analítica (AHP, por sus siglas en inglés), ha sido desarrollada por Saaty (1977), dentro del contexto de toma de decisiones como un método de análisis multicriterio. Para tomar decisiones de una forma ordenada y generar prioridades, es necesario hacer comparaciones y se debe establecer una escala la cual señale cuantas veces más de importancia tiene un elemento sobre otro, respecto al criterio a analizar o dependiendo de la forma en que sean comparados.

Esta técnica fue desarrollada en un contexto ajeno a los SIG, sin embargo, se comenzó a utilizar como una aplicación de los SIG en el año de 1991 (Rao *et al.*, 1991). En la técnica de Saaty, los pesos de las capas a utilizar pueden ser calculados a partir del eigenvector principal de una matriz cuadrática recíproca comparativa entre los elementos a considerar. Esta comparación se basa en la importancia relativa de cada elemento respecto al problema abordado. Los valores son asignados de acuerdo con la escala continua de nueve puntos (Saaty, 1980), tal como se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4.- Escala de asignación de pesos de importancia para la matriz de comparación utilizada en un análisis multicriterio (Saaty, 1980).

Grado de Importancia	Definición
1	De igual importancia
2	De igual a moderada importancia
3	De moderada importancia
4	De moderada a fuerte importancia
5	De fuerte importancia
6	De fuerte a muy fuerte importancia
7	De muy fuerte importancia
8	De muy fuerte a extrema importancia
9	De extrema importancia

Por su parte, la Combinación Lineal Ponderada (WLC, por sus siglas en inglés), la cual es empleada dentro del proceso de jerarquía analítica, se basa en el concepto de pesos promedios en el cual el número de elementos a analizar son estandarizados dentro de un rango de valores y luego combinados por las medias del peso promedio. En este caso, el tomador de decisiones asigna valores a cada capa de atributos. El valor total de cada capa es obtenido de multiplicar el peso de importancia asignado a cada atributo por la escala de

valor dado para dicho atributo y luego sumando el producto de todos los atributos ([Drobne et al., 2009](#)), mediante la expresión 4.4, en donde  $W_i$  es el peso del factor  $i$  y  $X_i$  es la puntuación de cada factor y  $S$  es la idoneidad, la cual representa las áreas prioritarias.

$$S = \sum W_i X_i \quad \text{ecuación 4.4}$$

Este método puede ser aplicado en cualquier SIG con la facilidad de utilizar una superposición de capas, lo cual permite una evaluación multicriterio y arroja como resultado una capa compuesta. El procedimiento puede aplicarse a capas vectoriales o ráster e incluso algunos SIG tienen las rutinas para dicho método ([Eastman, 2006](#)).

Para la asignación de pesos, es indispensable consultar la bibliografía adecuada o bien a un grupo de expertos. El proceso de ponderación se inicia con la construcción de una matriz cuadrada de comparación de criterios (contiene los mismos criterios a ponderar tanto en las filas como en las columnas). En esta matriz los valores de la diagonal son “1” porque es la comparación de cada factor entre sí mismo, lo que se considera que tiene la misma importancia. La diagonal divide en dos partes a la matriz, por lo que solo se hace la comparación de los pares de la parte inferior pues la superior tendría los valores recíprocos de la parte inferior resuelta.

Cuando el criterio de la fila es menos importante para la consecución del objetivo que el criterio de la columna, se coloca en forma de fracción, en caso contrario, se coloca un número entero.

El procedimiento para el cálculo de los pesos normalizados implica que el eigenvector principal de la matriz de comparación de como resultado un ajuste adecuado de pesos. ([Malczewski, 1999](#)), propone el siguiente orden para realizar los cálculos:

- Sumar los valores de cada columna de la matriz.
- Dividir cada elemento por el total correspondiente de su columna (este valor se asigna a la nueva matriz normalizada).
- Calcular el promedio de cada elemento por fila de la matriz normalizada (esto es, dividiendo la suma de los totales normalizados entre el número de elementos considerados).

Estos valores reflejan un estimado de los pesos relativos de los elementos relevantes. Aquí, los pesos son interpretados como todas las posibles formas de comparación entre cada elemento. Considerando el hecho de que los elementos de comparación pueden adoptar

una amplia gama de comparación, es importante realizar el cálculo del grado de consistencia de la matriz que se emplea.

El grado de consistencia (Consistency Ratio (CR), por sus siglas en inglés) define la probabilidad en que la matriz fue generada de manera aleatoria y un valor por encima de 0.10 indica que la matriz presenta inconsistencia por lo que necesita ser reevaluada (Saaty, 1980).

Antes de poder llegar al cálculo de CR, es necesario realizar los siguientes pasos de forma ordenada:

- Obtener el *vector de la sumatoria de pesos* mediante la multiplicación de los pesos calculados ( $W_i$ ) por cada elemento de las columnas disponibles de la matriz original, y finalmente, sumando estos resultados en forma de fila.
- Determinar el *vector de consistencia* a través de la división de los vectores sumatorios entre los pesos previamente calculados ( $W_i$ ).

Con lo anterior, es posible calcular el grado de consistencia (CR), para ello, Saaty (1980), propone la ecuación 4.5.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{ecuación 4.5}$$

Donde  $CR$  es el grado de consistencia,  $CI$  es el índice de consistencia y  $RI$  es el índice aleatorio; este último depende del número de factores usados en la matriz y la Tabla 4.5 muestra el valor propuesto para dicho valor (Saaty, 1980).

Tabla 4.5.- Valores propuestos para el índice de inconsistencia para diferente número de criterios empleados en la matriz de comparación (Saaty, 1980).

n	RI	n	RI	n	RI
1	0.00	6	1.24	11	1.51
2	0.00	7	1.32	12	1.54
3	0.58	8	1.41	13	1.56
4	0.90	9	1.45	14	1.57
5	1.12	10	1.49	15	1.59

Finalmente, para el cálculo de  $CI$  se usó la ecuación 4.6.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad \text{ecuación 4.6}$$

Donde  $n$  es el número de factores y  $\lambda$  es el valor promedio del vector de consistencia. De acuerdo con Saaty (1980), si el valor de  $CR$  no es mayor que 0.10, la matriz de comparación, los pesos asignados y el cálculo de los pesos ponderados son admisibles.

#### **4.5 Metodologías empleadas para el cálculo de la vulnerabilidad y peligro a la contaminación en acuíferos**

El término de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación se remonta a finales de los años 60, cuando Margat (1968), la define como “la mayor o menor protección que ofrece el medio físico al agua subterránea contra la actividad antrópica susceptible de contaminar”.

Por su parte, Aguilar *et. al.* (2013) menciona las diferentes definiciones y modificaciones que dicho término ha sufrido con el paso de los años, pero concluye en que todas hacen referencia a los procesos de atenuación y/o protección que están presentes en la zona no saturada de un acuífero.

Sin embargo, ya que la vulnerabilidad no solo depende de la capa protectora sino de los agentes contaminantes (Vlaicu & Munteanu, 2008), se ha clasificado en dos tipos:

- Vulnerabilidad intrínseca (VI): se refiere a la susceptibilidad del agua subterránea a ser afectada por contaminantes generados por las actividades humanas en función de las características físicas, geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, clima, vegetación, etc., independientemente del tipo de contaminante (Harter & Walker, 2001; Vlaicu & Munteanu, 2008).
- Vulnerabilidad específica (VE): Depende principalmente de tres variables relacionadas con el contaminante o grupo de contaminantes; el tiempo de transporte, la duración y la concentración máxima (Vlaicu & Munteanu, 2008; Vergara *et al.*, 2009; Aguilar *et al.*, 2013).

Respecto a los métodos de VI, Paredes (2010), señala que la mayoría de ellos se basan en técnicas de índice y sobreposición de capas o elementos. La combinación de mapas con distribución espacial de valores con atributos específicos conduce a la asignación de un índice numérico, la combinación de estos arroja como resultado una puntuación de vulnerabilidad.

Los métodos para estimar la vulnerabilidad dependen de diversos parámetros, por lo que hay algunos que involucran un gran número de ellos mientras que otros más están basados en un número reducido (Franco, 2002).

Al ser los métodos de sobreposición e índice relativamente sencillos de aplicar, se han desarrollado una gran variedad, ejemplo de ellos son: DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), SINTACS (Civita y De Mario, 1997), AVI (Van Stempvoort, 1992), GOD (Foster e Hirata, 1998), e ISIS (Civita y Regibus, 1995) por mencionar solo algunos.

Dadas las condiciones del área de estudio y la disponibilidad de información geofísica e hidrogeológica, se seleccionó el método AVI (Acuifer Vulnerability Index, por sus siglas en inglés) que se basa en dos parámetros fundamentales, el primero de ellos es el espesor de la capa que sobreyace al acuífero ( $d$ ) y el segundo corresponde con la conductividad hidráulica de dicha capa ( $k$ ); a partir de estos parámetros es posible obtener la resistencia hidráulica ( $C$ ) de la zona no saturada mediante:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i} \quad \text{ecuación 4.7}$$

Debido a la complejidad y al alto costo que implica el obtener el parámetro  $K$  y a que  $C$  está en función del contenido de arcilla, Kalinski *et al.* (1993) propuso sustituir la resistencia hidráulica por la resistencia eléctrica mediante los parámetros de Dar Zarrouk, introducidos por Maillet (1947), los cuales son fácilmente obtenibles a través de los métodos eléctricos, a través de la expresión:

$$S = \sum_0^{WT} \frac{h_i}{\rho_i} \quad \text{ecuación 4.8}$$

Donde  $h$  y  $\rho$  representan el espesor y resistividad, respectivamente, de la capa ( $i$ ) dentro de la zona no saturada, y  $S$  es la conductancia longitudinal. Esta adaptación al método AVI fue utilizada por primera vez para estudios de protección de aguas subterráneas por Henriot (1976), y aplicada en la actualidad para diversos estudios de vulnerabilidad de acuíferos (Kalinski *et al.*, 1993; Terhemba *et al.*, 2016; Valcarce-Ortega *et al.*, 2020; Sendrós *et al.*, 2020; Barros *et al.*, 2021).

Considerando el hecho de que existen diversos elementos que pueden modificar de manera significativa los resultados de una estimación de la vulnerabilidad, se pone principal atención a los agrietamientos del terreno, los cuales pueden actuar como vías preferenciales de flujo para algunos contaminantes (Bense *et al.*, 2003; Bense, 2004; Mejía,

2007), tal como lo demostraron Borja y Rodríguez (2004) quienes evaluaron la vulnerabilidad en el acuífero de Salamanca, Gto., y sus resultados se vieron drásticamente modificados al considerar las heterogeneidades de las fallas y fracturas de la zona de estudio.

Por otro lado, la distribución de fuentes potenciales de contaminación son el segundo factor que, aunado a lo anterior, pondría en riesgo la integridad del acuífero. Estas fuentes se encuentran en un constante crecimiento derivado del aumento de la población, la mayor demanda agrícola y el desarrollo industrial que conlleva a una descarga incontrolada de agua residual y residuos sólidos, lo que ha ocasionado un importante deterioro en la calidad del recurso (Vasanthavigar *et al.*, 2012; Jamin *et al.*, 2012; Srinivasamoorthy *et al.*, 2011; Pizol *et al.*, 2011; Katta *et al.*, 2010).

Debido a lo anterior, es de suma importancia evaluar el potencial nocivo que representa cada una de estas fuentes de contaminación y a través de esto generar estrategias de protección ya que las emisiones generadas por dichas fuentes son las que contaminan el ambiente subterráneo (Draoui *et al.*, 2006; Foster *et al.*, 2002).

Finalmente, la evaluación del peligro a la contaminación se realizó mediante la matriz y asignación de valores propuesta por Foster *et al.*, (2002), mediante la expresión:

$$P = IVI * IN \quad \text{ecuación 4.9}$$

Donde  $P$  es el peligro a la contaminación,  $IVI$  es el grado de vulnerabilidad intrínseca e  $IN$  indica la nocividad de las fuentes potenciales de contaminación evaluadas mediante el método POSH (Foster *et al.*, 2002).

# Capítulo 5

## Materiales y método

El método propuesto para la elaboración del modelo hidrogeofísico del presente trabajo está integrado por una serie de pasos sucesivos que, en conjunto y una vez realizados cada uno de ellos, pretenden alcanzar los objetivos planteados.

La recopilación y síntesis de información relacionada al tema fue un paso esencial porque con base en ella fue posible delimitar y seleccionar el área crítica a través de un análisis multicriterio con apoyo de los SIG. A su vez, dentro de la gran variedad de métodos geofísicos se eligió aquel cuya información previamente recolectada permitiera lograr el fin específico. De esta manera, la información multidisciplinaria disponible permitió elaborar un modelo hidrogeológico general en 3D de la composición y comportamiento del AVT, así como un modelo hidrogeofísico tridimensional específico del área seleccionada mediante el AMC.

Finalmente, los resultados permitieron realizar nuevos mapas de vulnerabilidad y peligro del acuífero ante la contaminación y con ello proponer nuevas medidas de protección.

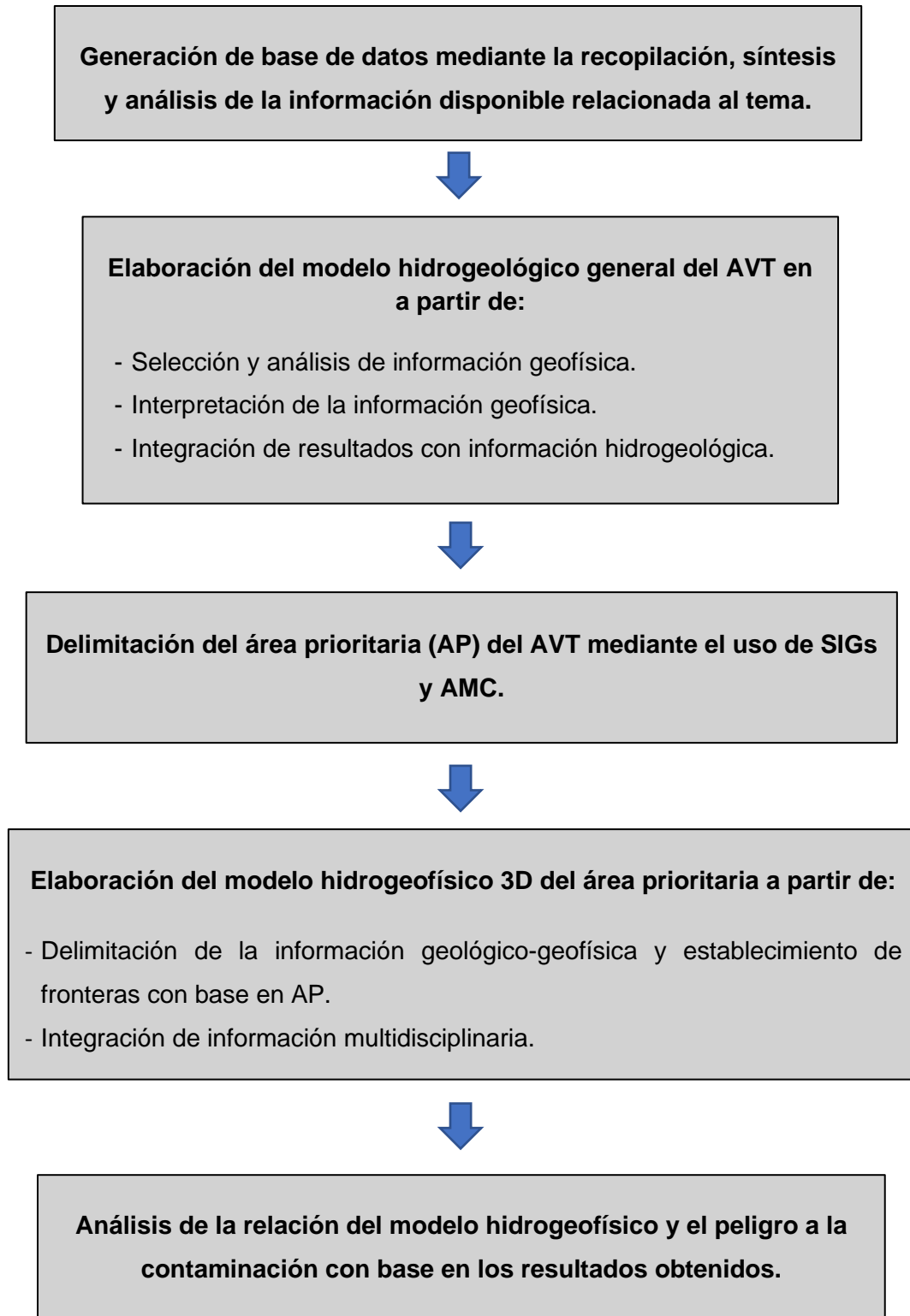


Figura 5.1.- Procedimiento metodológico para el desarrollo y logro de los objetivos planteados en la presente investigación.

### **5.1 Recopilación, síntesis y análisis de la información**

La primera tarea exhaustiva que se realizó fue la búsqueda de información, relacionada al tema, de estudios y trabajos realizados previamente en el AVT. La síntesis y manejo ordenado de dicha información permitió generar una base de datos digital, así como mapas vectoriales que facilitan el entendimiento de la información geográfica, geológica y geofísica de diferentes zonas. Dicha recopilación se mantuvo de manera constante durante el desarrollo de toda la investigación.

Para el caso de las instituciones gubernamentales como CONAGUA, SEDUYM, INEGI y SGM, la obtención de la información fue a través de sus portales de internet en donde la información es de acceso público. Por otro lado, fue necesario elaborar un formato de solicitud para las instituciones como AYST y CAEM. Sin embargo, la información obtenida fue mínima e incompleta.

Los repositorios de las universidades como UAEMEX, UNAM, IPN, IITCA, IMTA, etc., son de gran importancia ya que permiten la consulta de trabajos relacionados y son el punto de partida para nuevos temas de investigación.

Finalmente, empresas del sector privado como Geofísica Juayek, poseen una gran base de datos por lo que, para el presente proyecto su ayuda fue fundamental ya que brindó acceso a información de estudios y registros geofísicos de pozos de la zona de interés.

La Tabla 5.1 resume aquellas instituciones y fuentes de consulta y recopilación de información, así como aquellos elementos que fue posible adquirir de cada una de ellas.

Tabla 5.1.- Lista de instituciones y fuentes de consulta y acceso a la información de interés para el desarrollo de la presente investigación.

Fuentes de Consulta de Información	
Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Información de estudios geofísicos del AVT</li> <li>- Registros geofísicos de algunos pozos de extracción</li> <li>- Información piezométrica</li> </ul>	Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Información algunos estudios geofísicos y registros de pozos de extracción de la ZMVT.</li> </ul>
Agua y Saneamiento de Toluca (AYST) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Información de estudios y registros geofísicos de la ciudad de Toluca.</li> <li>- Información piezométrica de los pozos de extracción.</li> </ul>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapas</li> <li>- Bases de datos</li> <li>- Archivos .shp</li> </ul>
Servicio Geológico Mexicano (SGM) e Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (INFOMEGEM) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cartas geológicas (regional y estatal)</li> </ul>	Instituciones Educativas (UAEMex, UNAM, IPN, IITCA, IMTA) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Repositorios de tesis</li> <li>- Artículos publicados</li> <li>- Libros y/o revistas de divulgación científica</li> </ul>
Empresas del Sector Privado (Geofísica Juayek) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Información de estudios y registros geofísicos dentro del área de interés.</li> </ul>	

## 5.2 Elaboración del modelo hidrogeológico general del AVT en 3D

Para realizar de manera satisfactoria la elaboración del modelo hidrogeológico general del Acuífero del Valle de Toluca (AVT), fue necesario realizar los tres siguientes subprocesos.

### 5.2.1 Selección y análisis de la información geofísica

Dentro de los métodos geofísicos enlistados en las Tablas 4.2 y 4.3, se puede considerar a los Registros Geofísicos de Pozo (RGP) como un método que, gracias a su medición multiparámetro, permite obtener una gran cantidad de información puntual del pozo en estudio. A partir de ello, si se tiene un gran número de pozos de extracción que cuenten con su RGP, la información podrá ser comparada y correlacionada entre sí para generar secciones geológicas en 2D (o en 3D, según la densidad de información).

Coconi (2017), propone una metodología para en análisis e interpretación de los RGP para la industria petrolera, pero puede adaptarse y aplicarse a los registros enfocados a la hidrogeología. Con base en ello, se seleccionaron las curvas de Potencial Espontáneo (SP), Rayos Gamma (RG), Resistividad (Normal larga, corta y lateral) así como la Temperatura (T) disponibles en los registros recopilados, seleccionando solo aquellos que contaran con información continua completa y se descartaron aquellos registros que poseían información insuficiente o incompleta.

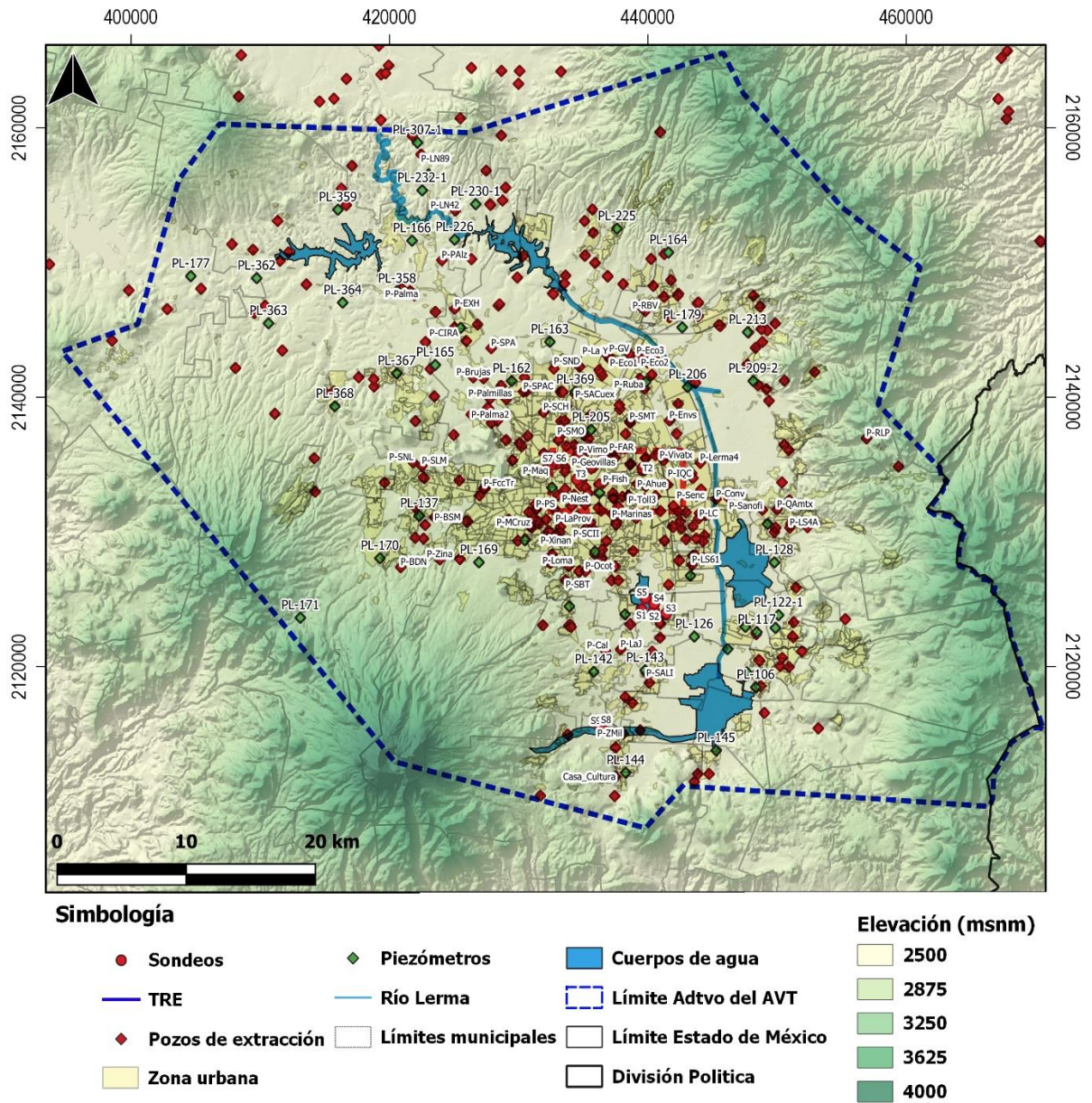


Figura 5.2.- Mapa de ubicación espacial de toda la información geofísica recopilada para el área de estudio.

La figura 5.2 muestra la distribución espacial de toda la información geofísica recopilada para la zona de estudio, siendo visible la gran densidad de pozos que se encuentran para la zona centro del valle; sin embargo, se filtró y seleccionó solo aquella información completa y continua, tal como se menciona anteriormente.

### *5.2.2 Procesado e interpretación de la información*

La representación gráfica de las curvas mencionadas anteriormente da origen a los llamados registros geofísicos. La información que representan es la respuesta de diversos parámetros a las propiedades físicas de las formaciones por las cuales la herramienta pasa. Un análisis conjunto de esta información permite identificar a través de las deflexiones de las curvas, los diferentes estratos a través de valores numéricos que obedecen a los principios físicos de medición de acuerdo con las propiedades físicas de las rocas (porosidad, permeabilidad, temperatura, presión, resistividad, factor de formación, radioactividad, saturación de fluidos, etc.). La Tabla 5.2 indica el principio físico, así como la forma de medición de las curvas seleccionadas y utilizadas en el desarrollo del presente trabajo.

Con base en lo anterior, y con apoyo de la carta geológica regional y local, las columnas litológicas de los multipiezómetros y de los cortes litológicos de los pozos Bomberos No. 3 (DGCSAPA, 1981), San Diego de los Padres (Tory, 2019), La Palma (Geovilla, 2019), San Cayetano (Tory, 2019), Pablo Sidar (AYST, 2019), Tollocan No. 3 (AYST, 2018), Los Ahuehuetes (AYST, 1980), Moderna de la Cruz (DGCSAPA, 1981), Geovillas de San Mateo (PAISA, 1990), San Pedro Totoltepec (AYST, 1972), Santa María de las Rosas (AYST, 1981), Vialidad Metepec No. 6 (DGCSAPA, 1981), entre otros, fueron las bases que sirvieron para conocer la distribución geológica a profundidad en diferentes puntos del acuífero y con ellos correlacionar los parámetros físicos con el tipo de material correspondiente.

Las figuras 5.3, 5.4 y 5.5, muestran de manera ejemplificada el proceso de identificación de algunas capas de acuerdo con las deflexiones de las curvas SP, RG y de Resistividad, así como la construcción de las columnas litológicas correspondientes de acuerdo con su ubicación espacial y el tipo de material geológico característico de dicha área.

Tabla 5.2. Descripción y resumen del principio físico de los RGP, así como su medición y escala, seleccionados para el presente trabajo (Modificada de Coconi M.E., 2017).

Curva	Principio	Medición	Escala
<b>SP</b>	Las deflexiones de la curva del SP resultan de las corrientes eléctricas que fluyen en el lodo del pozo. Estas corrientes se deben a fuerzas electromotrices en las formaciones que tienen un origen electrocinético y electroquímico.	Registra el diferencial de potencial producido por la interacción del agua de la formación, el fluido de perforación y las arcillas a través de un par de electrodos, uno fijo en superficie y otro móvil dentro de la herramienta de medición.	No hay ceros absolutos y se usan divisiones de 10 o 20 mV.
<b>RG</b>	Los RG chocan con el detector ocasionando un centelleo que excita u fotocátodo, cada fotón de luz libera electrones, estos son acelerados en un campo eléctrico y producen una corriente proporcional a la energía incidente.	Mide la cantidad de energía de los RG que emiten las formaciones arenosas (o arcillosas) de manera continua dentro del pozo.	De 0 a 100 o 0 a 150 API.
<b><math>\rho_a</math></b>	La resistencia es la capacidad de impedir el flujo de una corriente eléctrica y la resistividad es la resistencia por unidad de longitud.	Mide la resistividad de las formaciones al paso de la corriente, a través de electrodos dispuestos en la herramienta con la cual se alcanzan diferentes radios de investigación dentro de la pared del pozo.	Logarítmica de 0.2 a 2000 $\Omega$ m.
<b>T</b>	Generalmente la temperatura incrementa con la profundidad sin embargo existen caso en donde los fluidos presentan geotermalismo, es decir, temperaturas altas.	Un sensor dentro de la herramienta mide de manera continua la variación de T dentro del fluido.	Variable, dependiendo temperatura ambiente y del pozo en $^{\circ}$ C

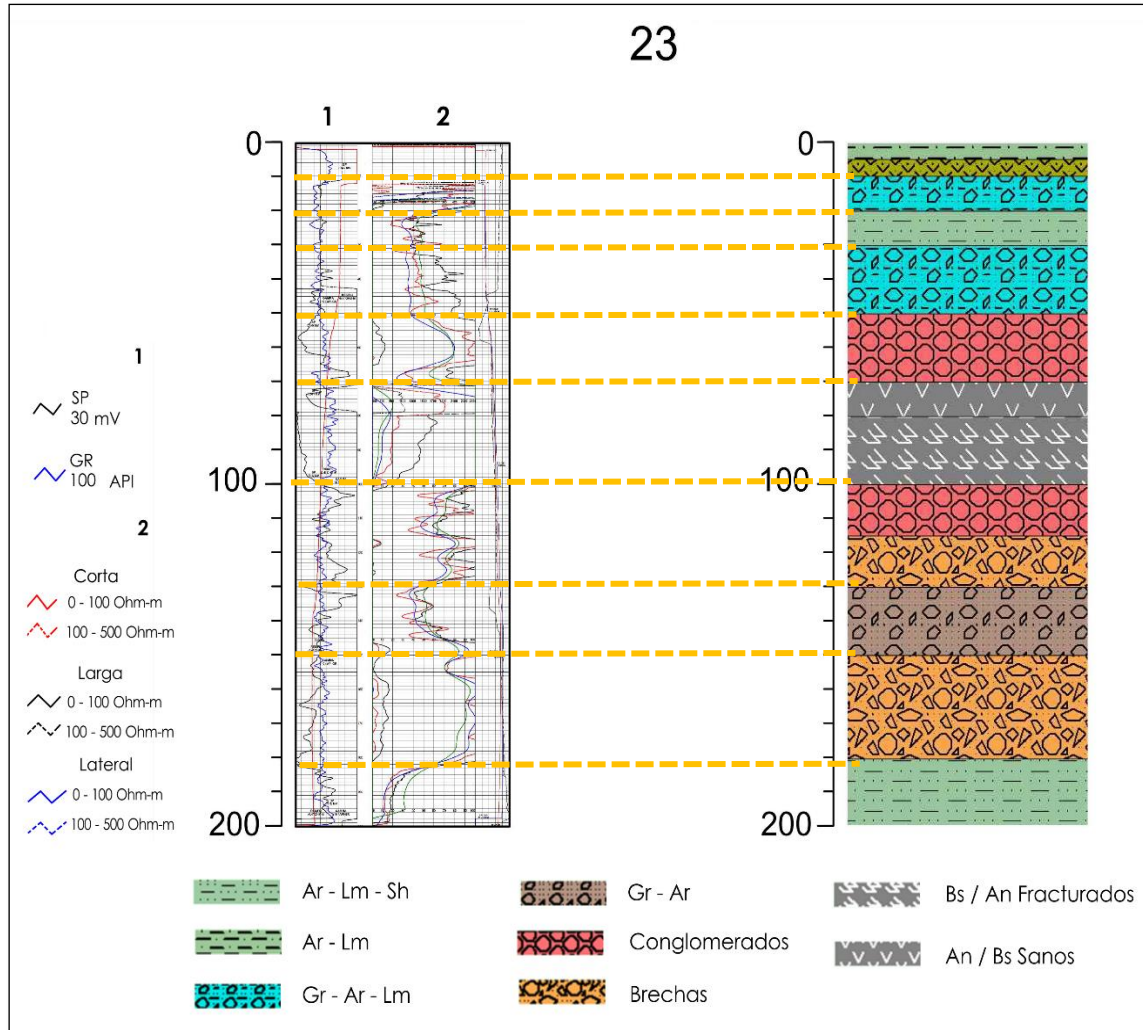


Figura 5.3.- Ejemplo 1 de la interpretación de un RGP para la elaboración de su columna litológica.

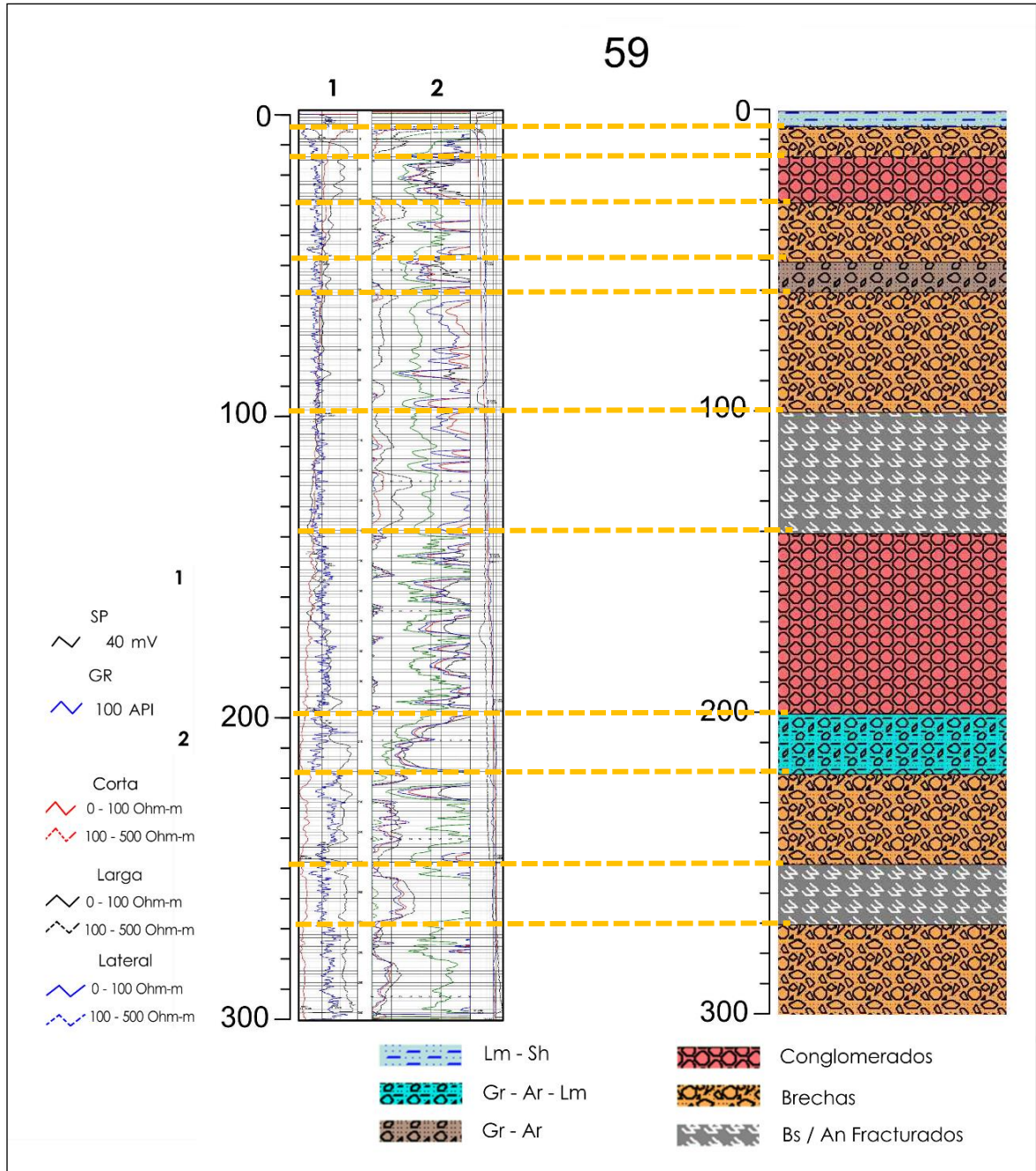


Figura 5.4.- Ejemplo 2 de la interpretación de un RGP para la elaboración de su columna litológica.

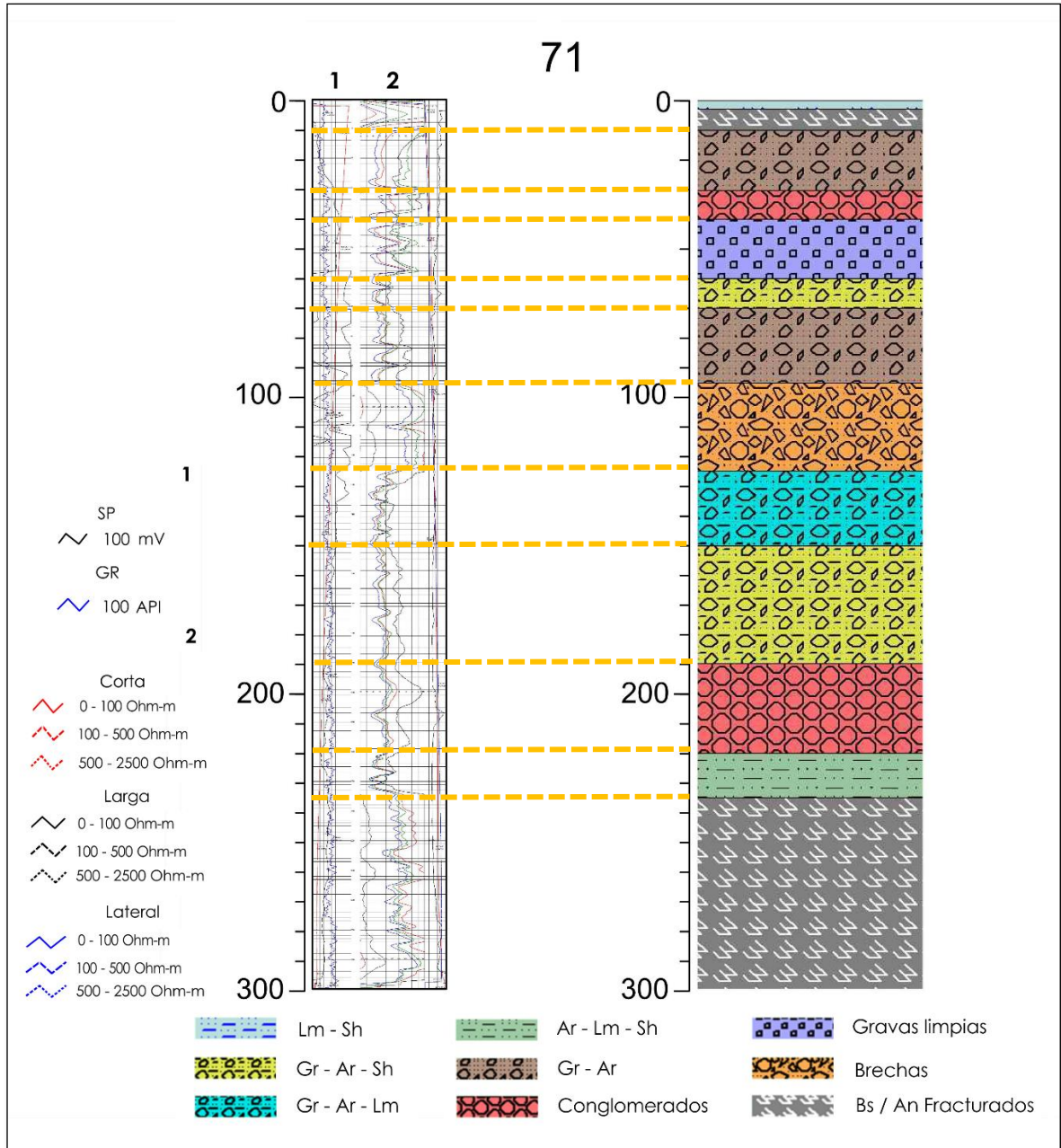


Figura 5.5.- Ejemplo 3 de la interpretación de un RGP para la elaboración de su columna litológica.

### *5.2.3 Integración de resultados con información multidisciplinaria*

La información multidisciplinaria recopilada a través de distintas fuentes, posterior a un adecuado procesado e interpretación, permite la elaboración de un modelo conceptual ya sea en 2D o 3D. La integración de toda esta información en un solo modelo arrojará resultados más confiables.

Para llevar a cabo lo anterior, se seleccionó toda aquella información hidrogeológica y geofísica, de estudios previamente realizados, que se encuentra dentro de la superficie del AVT con el fin de complementar el modelo hidrogeológico general.

Con toda la información recopilada, el primer paso fue ubicar de manera espacial aquellas columnas estratigráficas correspondientes a los piezómetros, a los pozos de extracción previamente interpretados, así como todos los sondeos geofísicos disponibles.

Finalmente, se ingresaron a una base de datos digital en el programa de cómputo Rockworks ([Rockware, 2015](#)), asignando a cada unidad litológica un valor numérico denominado *G* el cual sirve como parámetro de referencia para la correlación litológica. La tabla 5.3, muestra todas las unidades litológicas identificadas en todas las columnas y registros interpretados y digitalizados, así como el valor propuesto para *G*.

El valor de *G* es un parámetro que se asigna de manera arbitraria a cada uno de los materiales geológicos identificados en la interpretación de los sondeos y RGP para que el programa de cómputo pueda llevar a cabo la correlación de capas (interpolación) en la parte profunda. Para este caso en particular dicho valor osciló en un rango de 1 a 10, en donde los valores que van de 1 a 3 corresponden con material fino con presencia considerable de arcillas, mientras que los valores entre 3.1 y 8 son granular medio y grueso con mínimo contenido de arcillas y finalmente, los valores entre 8.1 y 10 se asociaron a material grueso sin presencia de arcillas o bien a roca compactada y/o fracturada.

Tabla 5.3.- Unidades litológicas identificadas en las columnas estratigráficas de los multipiezómetros y los registros geofísicos.

Clave utilizada	Valor de G	Descripción
An	9	Roca volcánica de composición andesítica
Ar	5	Arenas limpias
Brch	7.8	Brechas volcánicas empacadas en matriz arenosa, areno-limosa o areno-arcillosa
Bs	10	Roca volcánica de composición basáltica
Bs-Frc	9.5	Roca volcánica de composición basáltica con diferentes grados de fracturamiento
Cnz	2.8	Cenizas volcánicas
Cong	7.5	Conglomerados empacados en matriz arenosa, areno-limosa o areno-arcillosa
Gr	8	Gravas limpias
Gr-Ar	7	Intercalación de gravas y arenas
Gr-Lm-Ar	3.5	Intercalación de gravas, limos y arenas
Gr-Sh-Ar	4	Intercalación de gravas, arcillas y arenas
Lm	2	Limos limpios
Lm-Ar-Sh	1.5	Intercalación de limos, arenas y arcillas
Lm-Sh	1	Intercalación de limos y arcillas
Pmz	8.5	Pómez
Sh	0.5	Arcillas limpias
Sh-Ar	3	Intercalación de arcillas con poca arena
Sl	2.5	Suelo de relleno (natural y/o artificial)
Tb-Ar	4.5	Toba arenosa
Tb-Ar-Sh	4.2	Toba areno-arcillosa
Tz	6	Tezontle
Tz-Ar	6.5	Tezontle arenoso

Es importante señalar que el valor de G no represente ningún parámetro ni propiedad física de las rocas.

### 5.3 Selección de criterios e identificación del área prioritaria del AVT mediante la aplicación del análisis multicriterio y técnica AHP con apoyo de los SIG

Para poder llevar a cabo un análisis multicriterio es indispensable, en primera instancia, contar con una amplia base de datos de información. Dicha información debe ser acorde con el objetivo principal de la investigación por lo que se debe realizar una selección adecuada de aquellos elementos que brinden la información adecuada para lograr el fin específico.

De la base de datos generada en el primer paso metodológico, se tienen una lista considerable de diferentes factores que pudieran ser útiles para desarrollar un AMC mediante la técnica de jerarquización (AHP, por sus siglas en inglés) (Tabla 5.4).

Tabla 5.4.- Lista de los diferentes factores disponibles en la base de datos para la realización de un análisis multicriterio.

Elemento	Formato disponible	Resolución espacial (tamaño de píxel)	Resolución temporal
Abatimientos	Tabla de datos / Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	1968 – 2016
Desplazamiento vertical del terreno	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	1968 – 2016
Densidad de pozos	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	NA
Distancia de los pozos a los agrietamientos	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	NA
Intensidad de los conos de abatimiento	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	NA
Fallas y fracturas	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	NA
Focos de contaminación	Tabla de datos / Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	2009 – 2020
Precipitación	Tabla de datos	NA	1990 – 2019
Pérdida de cobertura vegetal	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	NA
Población	Tabla de datos	NA	1990 – 2020
Subsidencia	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	1962 – 2010
Tipo de suelo	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	NA
Uso de suelo	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	NA
Zonas de inundación	Capa vectorial / Capa ráster	1:250,000 100 x 100	NA

NA (No aplica)

Los elementos anteriores fueron sometidos a la consideración de expertos en áreas como geología, hidrogeología, SIG, hidrogeoquímica y geofísica, para definir solo aquellos que pudieran tener un aporte significativo en la definición de zonas prioritarias y descartar aquellos que no tienen relación con el objetivo del AMC o bien que son dependientes entre sí, es decir, que representan una variable similar y que el resultado podría verse poco

afectado por el manejo de más criterios por lo que representaría una mayor carga de trabajo sin resultados distintos.

Para lo anterior, se planteó la interrogante: ¿cuál de estos factores afecta con mayor impacto la vulnerabilidad del acuífero ante la contaminación?

Una vez que se tienen seleccionados los elementos a utilizar, se realizó la asignación de pesos a cada capa y se efectuó la suma lineal de pesos ponderados con apoyo de los SIG como lo propone Saaty (1980) (Figura 5.2).

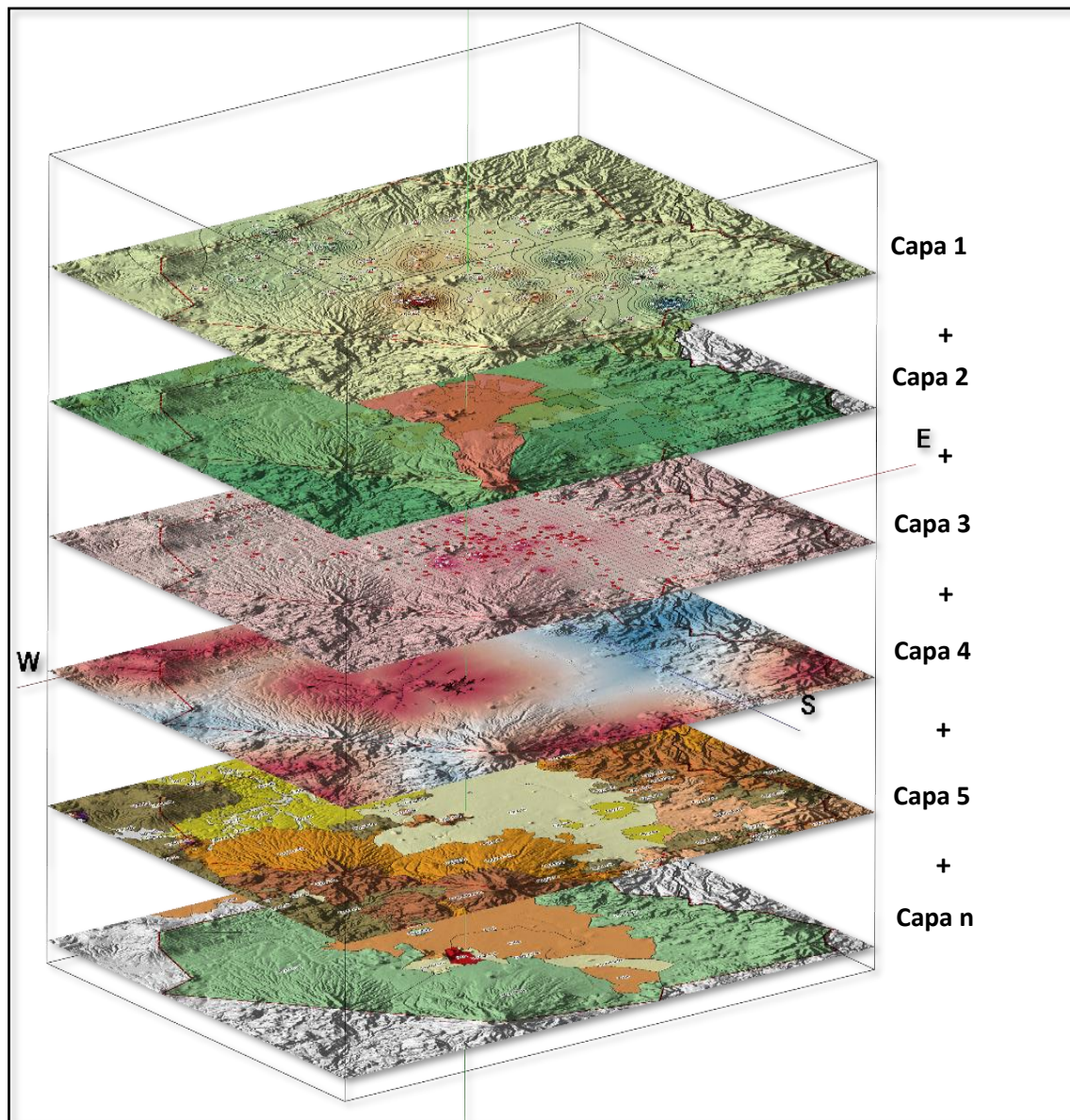


Figura 5.6.- Representación visual del proceso de suma de factores entre diferentes capas de información mediante un análisis multicriterio.

#### **5.4 Elaboración del modelo hidrogeofísico en 3D del área prioritaria**

Conociendo los resultados arrojados por el AMC y sabiendo la delimitación del área prioritaria (AP) del AVT fue posible generar un modelo hidrogeofísico tridimensional de dicha área para llevar a cabo un análisis más local y específico y conocer las características geológico-geofísicas de la zona centro del acuífero la cual está expuesta a diferentes agentes contaminantes.

Para llevar a cabo lo anterior, fue indispensable cumplir de manera específica con los dos puntos siguientes.

##### *5.4.1 Delimitación de la información geológico-geofísica con base en la AP*

Teniendo la base de datos del AVT previamente conformada por información multidisciplinaria y conociendo el polígono que delimita el área crítica de la zona centro fue posible asignar las coordenadas frontera para la generación del modelo hidrogeofísico particular o local dentro del mismo programa de cómputo, el cual permite la manipulación de dicha información.

Estas coordenadas corresponden al sistema de referencia UTM WGS 84 dentro del cuadrante 14 N con valores de 432465 y 442726 para la longitud (mínima y máxima, respectivamente) y de 2131516 y 2136008 para la latitud (mínima y máxima, respectivamente).

##### *5.4.2 Integración de información multidisciplinaria*

Para generar el modelo hidrogeofísico bastó con aplicar el mismo algoritmo de interpolación utilizado en el modelo hidrogeológico general (apartado 5.2), delimitando las fronteras previamente mencionadas.

Adicionalmente a esto, se integró de manera conjunta una capa vectorial con contiene algunos de los elementos utilizados para el AMC, los cuales permitieron visualizar la relación de cada uno de ellos con el comportamiento geológico-geofísico del modelo generado, tanto en superficie como en profundidad.

### 5.5 Análisis de la relación del modelo hidrogeofísico del área prioritaria y el peligro a la contaminación del acuífero

Para el caso particular que nos ocupa, se evaluó la VI del área prioritaria del AVT, mediante el método AVI modificado, el cual involucra las propiedades geoelectricas del medio y además considera la influencia de las fracturas en toda la zona central.

Para la estimación de la vulnerabilidad, partiendo del modelo hidrogeofísico realizado, se definió un mallado. Posteriormente, se identificaron aquellas celdas en donde no se tenía información disponible y se les asignó un punto de referencia. A partir del modelo fue posible definir la secuencia litológica de cada punto y se asignaron valores de resistividad eléctrica con base en los RGP vecinos y en la Figura 5.3.

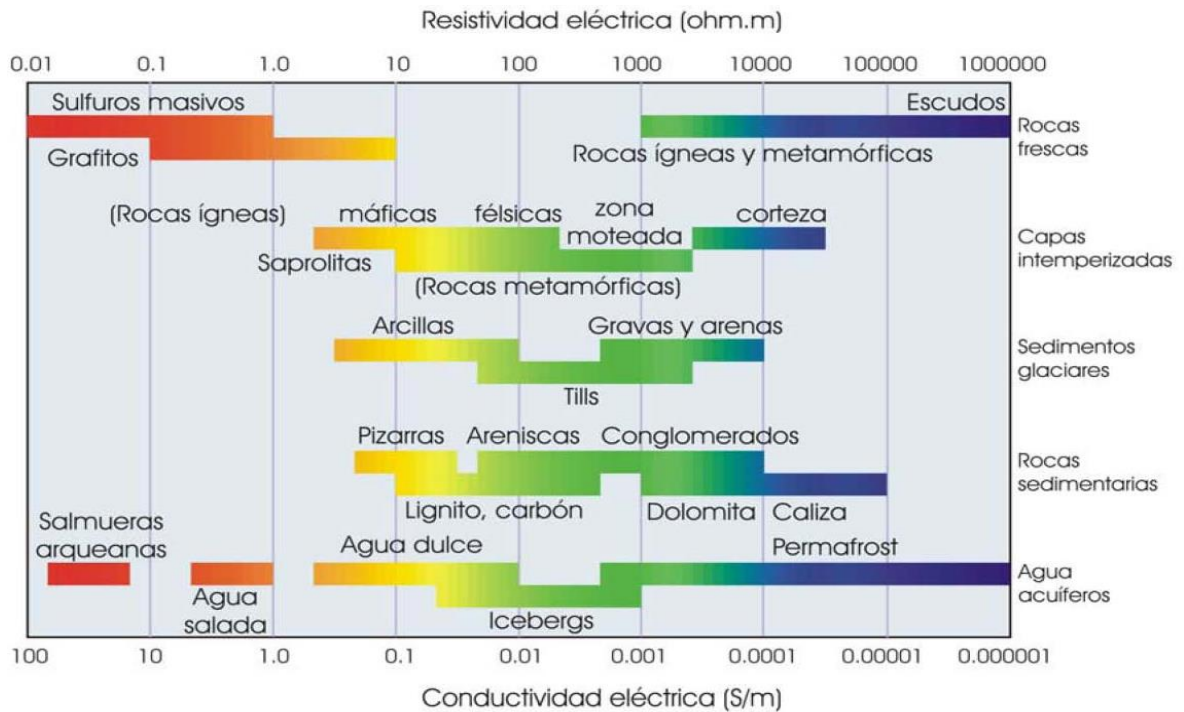


Figura 5.7.- Valores de resistividad y conductividad de los diferentes tipos de roca (tomado de Herrera-Casseres, 2018).

Con el espesor de cada capa y su valor correspondiente de resistividad aparente, fue posible realizar el cálculo de S mediante la ecuación 4.8 y con ello generar el mapa de conductancia longitudinal de toda el área prioritaria. Los valores fueron clasificados de acuerdo con [Henriet \(1976\)](#), quien considera el grado de protección (o vulnerabilidad intrínseca) que representan las capas sobre el acuífero (Tabla 5.5).

Tabla 5.5.- Clasificación del grado de protección (o vulnerabilidad intrínseca) de acuerdo con los valores de la conductancia longitudinal (S) (modificada de Henriot, 1976).

Grado de protección	Valor de S (Siemens)
Excelente	> 10
Muy buena	7 – 10
Buena	3.6 – 6
Moderada	1.6 – 3.5
Baja	0.1 – 1.5
Muy baja	< 0.1

La modificación al método AVI se llevó a cabo considerando la influencia de los sistemas de agrietamientos hacia la vulnerabilidad del acuífero tal como se demuestra en los estudios realizados por el IMTA (2008a), en donde mediante la técnica geofísica de TRE muestran la extensión del sistema de fracturas en San Pedro Totoltepec hasta una profundidad de 20 metros y más tarde, Paredes (2010) comprobó a través de pruebas directas de infiltración la velocidad con la que viajan los fluidos a través de estas fracturas, principalmente la antes mencionada de San Pedro Totoltepec.

Dentro del mapa de vulnerabilidad se consideró el peso de estos fracturamientos como una zona con muy alta vulnerabilidad debido a la influencia que juega la geometría de estos sistemas con la zona circundante.

Almazán-Vázquez (2017) señala que la mayoría de los sistemas de fallas y fracturas de la ZMVT “son de tipo escalonado o echelón, de relevo, en sigmoides extensionales, anastomosadas, paralelas, en arreglo riedel, conjugadas y terminación de cola ca caballo o ramificadas”, abarcando una zona de influencia de hasta 100 metros, mientras que Bense et al., (2013) indica que la zona de influencia de un sistema de fracturas y/o fallas puede ser de hasta 120 metros.

Finalmente, para obtener el mapa de peligros, se aplicó la matriz propuesta por Foster et al. (2002) la cual relaciona los índices del mapa de vulnerabilidad y el mapa de carga potencial de nocividad que representan los focos de contaminación, tal como se muestra en la Tabla 5.6.

De esta manera, fue posible clasificar zonas con un rango entre 1 y 2 que representan sitios con peligro bajo, mientras que áreas con valores de 3 y 4 se asocian a un peligro moderado, por su parte, las zonas con valores entre 5 y 8 son sitios con peligro alto y finalmente, los valores de 9 a 12 corresponden con un peligro muy alto.

Tabla 5.6.- Matriz utilizada para realizar la cartografía de peligro ante la contaminación del área prioritaria.

<b>IVI \ IN</b>	<b>Nocividad reducida (1)</b>	<b>Nocividad moderada (2)</b>	<b>Nocividad elevada (3)</b>
<b>Baja (1)</b>	1	2	3
<b>Moderada (2)</b>	2	4	6
<b>Alta (3)</b>	3	6	9
<b>Muy Alta (4)</b>	4	8	12

# Capítulo 6

## Resultados y discusión

En el presente capítulo se integran y discuten de manera simultánea los resultados obtenidos a través del proceso metodológico aplicado. En primer lugar, se presentan todos los productos y mapas generados con la información adquirida de diferentes fuentes. La información anterior fue analizada y seleccionada, utilizando los datos geofísicos para su interpretación y generación de columnas litológicas, mismas que integran a la base de datos que da origen al modelo hidrogeológico general del AVT.

Posteriormente, se generaron los insumos para poder llevar a cabo el análisis multicriterio para la identificación del área prioritaria (AP), mediante la aplicación de un AMC con la ayuda de los SIG. Conociendo la delimitación del AP y con la base de datos disponible, se generó un modelo hidrogeofísico tridimensional específico el cual permite analizar la relación que existe entre el comportamiento geológico-geofísico y los diferentes factores que generan la vulnerabilidad del acuífero ante la contaminación, siendo el punto de partida para el análisis y la posibilidad de proponer y/o modificar las medidas de protección hacia el mismo.

## **6.1 Generación de base de datos y mapas de información**

A través de la búsqueda exhaustiva de información mediante diferentes portales gubernamentales, electrónicos o de archivos físicos, se pudo generar una base de datos extensa y confiable, generalmente conformada por tablas de datos o archivos vectoriales.

Con lo anterior y con ayuda del programa [QGIS \(2020\)](#), estas bases de datos numéricas fueron convertidas a capas vectoriales a través de las cuales fue posible visualizar la información de una manera más sencilla. De esta forma, se generaron todos los mapas correspondientes al capítulo 2, en donde se les asignó un sistema de referencia, simbología y otros elementos que en conjunto representan las características físicas de la zona en estudio.

Por otro lado, las tablas de información obtenidas del portal del INEGI, fue una herramienta valiosa para la creación de gráficas que ayudan a entender el comportamiento del crecimiento acelerado de la población y a su vez hacer proyecciones para escenarios posteriores.

La información geofísica fue recopilada principalmente del sector privado (Geofísica Juayek) la cual fue el elemento principal para el desarrollo y culminación en buen término del presente trabajo de investigación ya que, con ella, fue posible la generación del modelo hidrogeológico general e hidrogeofísico local de la zona centro del área de estudio.

Finalmente, los mapas de todos los elementos propuestos en el capítulo 5 para el AMC se generaron a través de la información de portales gubernamentales, trabajos de investigación previamente realizados o bien del repositorio de tesis de algunas instituciones educativas.

## **6.2 Modelo hidrogeológico general del AVT en 3D**

La elaboración del modelo hidrogeofísico conceptual se elaboró a través de la conclusión satisfactoria de cada uno de los puntos siguientes:

### *6.2.1 Recopilación, selección y análisis de información geofísica*

Partiendo del paso 1 de la metodología general del presente trabajo de investigación, se recurrió a diversas estancias gubernamentales, educativas y privadas con el fin de obtener información geofísica (principalmente) del AVT. Como primer paso, se obtuvieron las bases

de datos del registro de los pozos de extracción (REDPDA) el cual asciende a más de 600 pozos sin considerar la red de multipiezómetros y aquellos pozos no registrados.

Sin embargo, de la cantidad antes mencionada, solamente fue posible obtener información de columnas litológicas, RGP y sondeos geofísicos de 200 puntos. Dicha información fue revisada y analizada y se descartaron aquellos sitios en donde la información era incompleta o irreconocible (en mal estado) quedando solamente 158 sitios con información completa.

La Figura 6.1 muestra la ubicación geográfica de la información recopilada, la cual si divide en tres elementos: 1) los multipiezómetros que se encuentran distribuidos de manera estratégica en toda la superficie del acuífero y que habían sido utilizados previamente para la elaboración de esquemas geológicos conceptuales con alto grado de incertidumbre; 2) los pozos de extracción de los cuales se pudo obtener su información geofísica a través de los registros de pozo (con etiqueta aquellos que pudieron mostrarse en el presente trabajo) que corresponden principalmente al uso público-urbano e industrial y que claramente se presentan con una mayor densidad en la parte metropolitana e industrial del Valle de Toluca. y; 3) los estudios geofísicos a través de SEVs, TEMs y/o TRE de los cuales es poca la información de la que se dispone, pero algunos refuerzan la información a mayores profundidades de investigación.

#### *6.2.2 Procesado e interpretación de la información*

El procesado e interpretación de la información se realizó de manera empírica y manual, analizando cada uno de los RGP en intervalos de 5 metros, en donde, de acuerdo con la deflexión y valor leído en cada curva (SP, RG, Resistividad y T) se asignó un tipo de litología de acuerdo con la carta geológica local, con las columnas litológicas existentes de pozos vecinos y de los multipiezómetros, así como de los diferentes cortes litológicos de los que se tenía información. Con esto fue posible generar nuevas columnas litológicas que fueron los elementos principales para la construcción del modelo en tres dimensiones.

En el anexo 2 aparecen los RGP que son posible mostrar con sus respectivas columnas litológicas, por su parte, el anexo 3 muestra solamente el resultado final de la interpretación de los registros los cuales por motivos de confidencialidad no es posible mostrar.

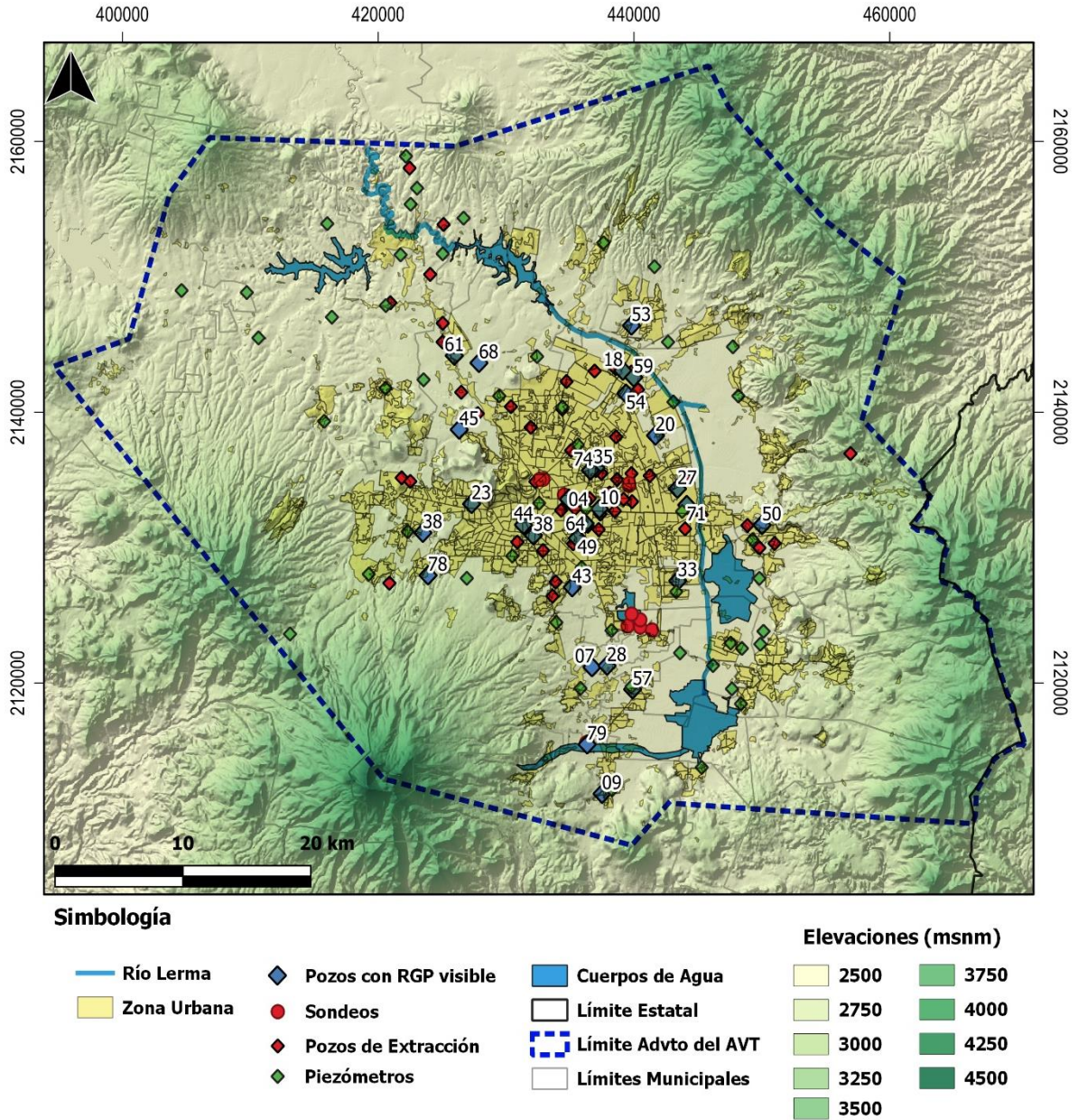


Figura 6.1.- Localización espacial de la información geofísica y litológica utilizada para la elaboración de nuevas columnas litológicas (con etiqueta aquellos pozos de los cuales es posible mostrar su RGP original en el anexo 2).

Por otro lado, cada columna procesada e interpretada fue digitalizada y georreferenciada con la finalidad de, además de conocer su ubicación espacial y geográfica, ir formando la base de datos que sería útil para la elaboración del modelo hidrogeológico general, así como el modelo hidrogeofísico local correspondiente con el área crítica, dentro del programa de cómputo Rockworks (Rockware, 2016).

La Figura 6.2 muestra la ubicación espacial de todas las columnas litológicas digitalizadas, así como la distribución de capas tanto de manera horizontal como vertical. Durante el proceso de interpretación y digitalización, fue posible identificar y corroborar que, a lo largo y ancho del AVT, existe una gran heterogeneidad en la disposición de las capas y materiales geológicos con una predominancia de rocas de tipo vulcanosedimentario de espesores variados y con granulometría que cambia desde arenas finas a gravas, boleos y brechas; así mismo, existe la presencia de diferentes coladas de roca ígnea tanto compactadas como con diferentes grados de fracturamiento, distribuidas de manera irregular y heterogénea, destacando aquella que alcanza la zona centro del valle con una orientación S-N.

Por su parte, la presencia de material arcilloso, limo-arcilloso y/o areno-arcilloso es abundante principalmente en la zona centro la cual se presenta de manera intercalada con los materiales granulares antes mencionados, mientras que para la parte oriente (en las cercanías con las lagunas y el Río de Lerma) estos materiales finos prevalecen en forma de pequeñas capas intercaladas entre sí de manera heterogénea. La descripción detallada de la litología colocada en la simbología puede consultarse en el anexo 2.

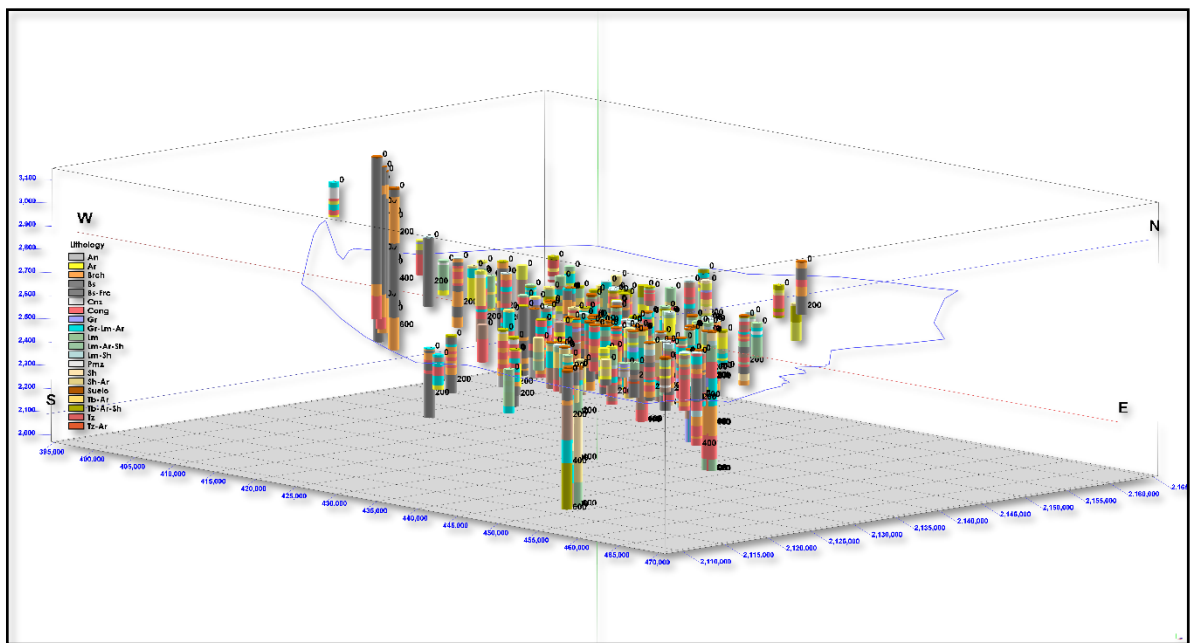


Figura 6.2.- Georreferenciación y digitalización de columnas estratigráficas obtenidas de la interpretación de los RGP y sondeos geofísicos localizados dentro de los límites del AVT.

### 6.2.3 Integración de información multidisciplinaria

Con la información geológica que contiene cada uno de estos puntos es posible realizar una interpolación del tipo *Lithoblending* (Rockware, 2016) o mejor conocida como “correlación lateral de capas” con el objetivo de generar una primera versión del modelo hidrogeológico general del AVT en 3D.

La Figura 6.3 muestra el resultado de la interpolación en donde cada color corresponde con un tipo de litología identificado en cada punto (la descripción detallada de la litología que representa la simbología ubicada en la figura 6.3 c), puede consultarse en el anexo 2). En dicha figura es posible apreciar la distribución de capas del acuífero confirmando su principal característica de ser multicapa. De igual manera se puede destacar que para la parte sur, suroeste y sureste se presentan grandes espesores de roca ígnea (tanto compactada como fracturada) mientras que para la parte centro, noroeste y noreste predominan las capas granulares finas que se componen de lentes arcillosos o bien intercalación de arenas y limos con importante contenido de arcillas.

Debido a que el algoritmo de interpolación no considera elementos importantes como el rumbo, echado o buzamiento de las capas, es indispensable realizar una interpretación y adecuación geológica e hidrogeológica para dar mayor sentido al modelo conceptual. Por lo tanto, partiendo del modelo original, se seleccionó una vista E-O y una orientación S-N (pudiéndose modificar hacia cualquier orientación) y con apoyo de la información hidrogeológica y geológica de la carta regional (SGM, 2002) y local (IFOMEGEM, 1994), así como las descripciones realizadas por la UNAM (1994), se dio una interpretación con el objetivo de llevar el modelo a una concepción lo más parecido a la realidad. La Figura 6.4 ilustra como resultado final el modelo hidrogeológico general del AVT en 3D.

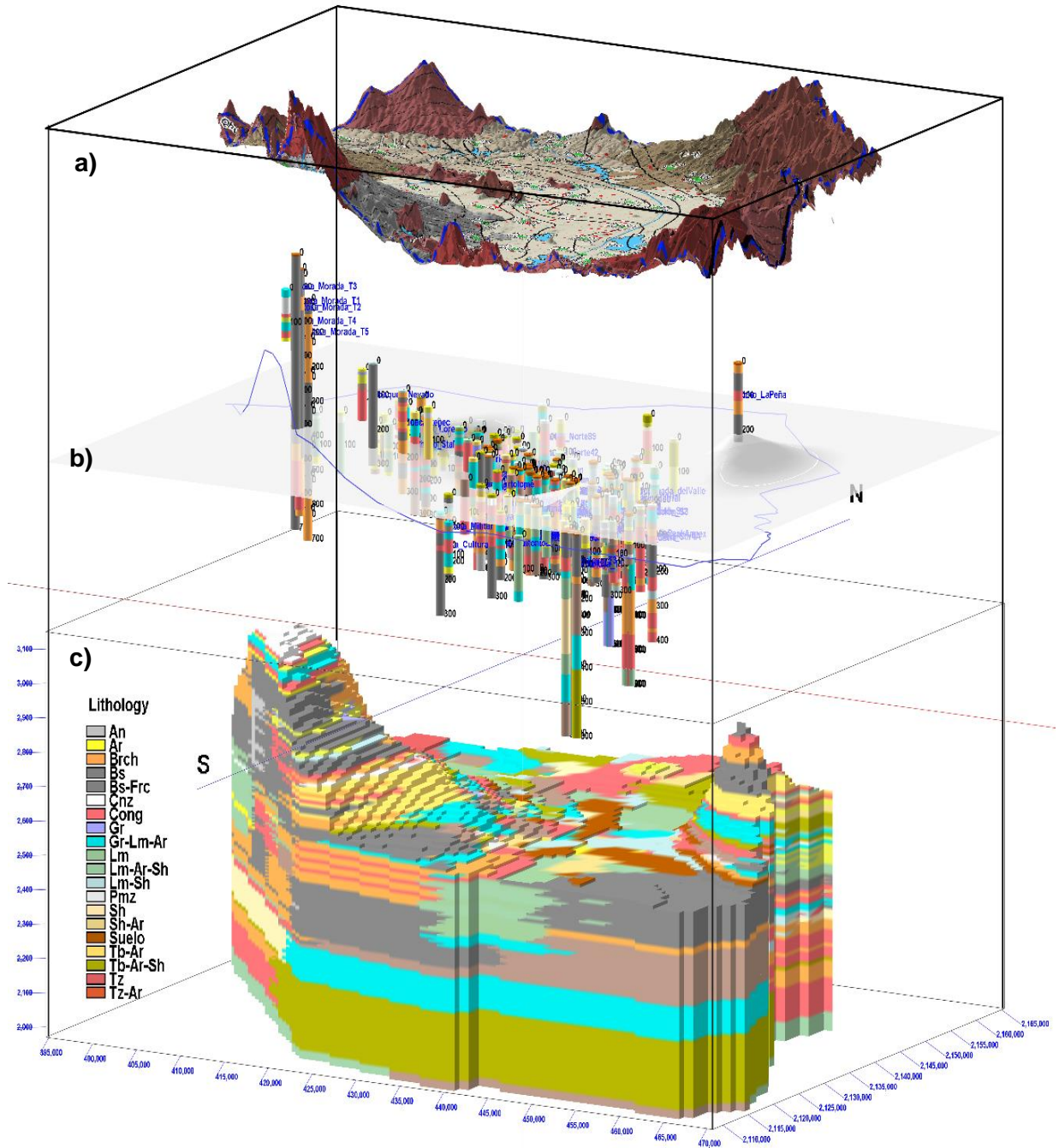


Figura 6.3.- Modelo conceptual resultante del proceso de interpolación de las columnas litológicas mediante el algoritmo lithoblending (correlación de capas vecinas). (a) Vista general de la geología superficial del AVT, b) Ubicación y distribución de las columnas litológicas con el N.E. y c) Modelo conceptual resultante).

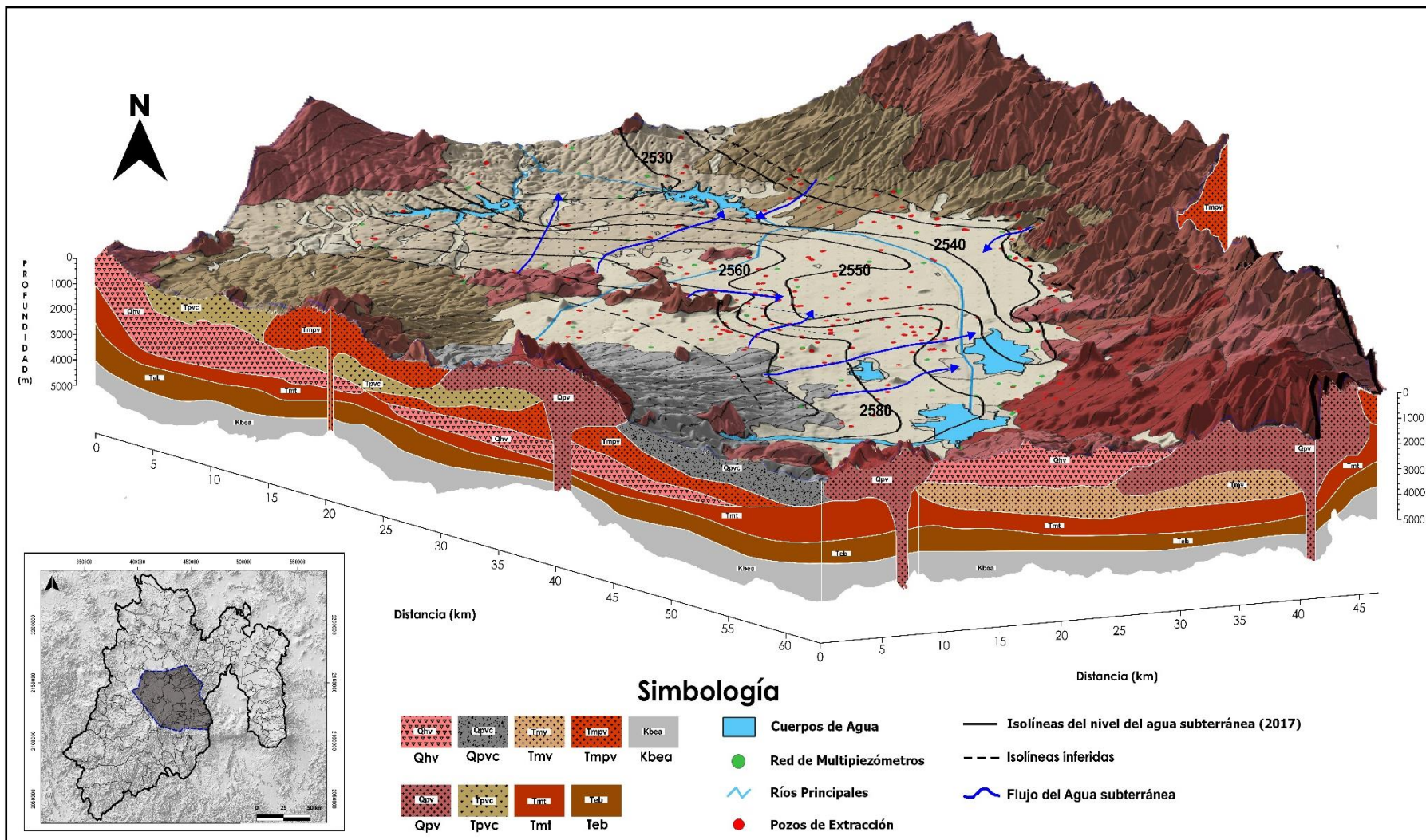


Figura 6.4.- Modelo hidrogeológico general del AVT en 3D (Elaboración propia con apoyo de la información geofísica recopilada, del SGM, IFOMEGEM y UNAM).

### **6.3 Selección de criterios e identificación del área crítica mediante el análisis multicriterio y metodología AHP con apoyo de los SIG**

Después del análisis de un conjunto de criterios, con ayuda de expertos en diferentes áreas del conocimiento, fueron seleccionados aquellos elementos que brindaban la información adecuada para lograr el objetivo específico de identificar el área crítica del AVT con el fin de generar un modelo hidrogeofísico particular de dicha área.

Los elementos fueron seleccionados contestando la pregunta ¿cuál elemento afecta de manera directa la vulnerabilidad del acuífero? Dicha pregunta permitió ir acortando el número de elementos disponibles, considerando también el factor de la disponibilidad de información, así como la factibilidad de obtenerla.

Por lo tanto, los elementos seleccionados fueron los siguientes:

- Fallas y fracturas (intensidad y longitud)
- Focos de contaminación
- Subsistencia
- Abatimientos
- Densidad de pozos de extracción

Si bien a la fecha existe un mapa de vulnerabilidad del AVT realizado considerando todos los factores antes mencionados (Expósito, 2012), dicho mapa se elaboró tomando en cuenta que todos los sistemas de agrietamientos se extendían a profundidad y se conectaban con el nivel freático de dicho acuífero, así mismo, fue realizado de manera regional. A diferencia de lo antes mencionado, para este caso en particular, se consideró más a detalle las características de todos los sistemas de fallas y fracturas, además de que el enfoque fue local.

Los datos para la creación de los mapas utilizados fueron recolectados de diferentes fuentes (Tabla 6.1), posteriormente fueron procesados y analizados en el programa de cómputo QGIS (2020), siguiendo las metodologías aplicadas en diferentes estudios para la solución de diversas problemáticas con apoyo de los SIG (Aceves-Quesada *et al.*, 2006; J.A. Parry *et al.*, 2018; Vojteková & Vojtek, 2020).

Tabla 6.1. Datos y capas de información utilizados para la generación de insumos para llevar a cabo el AMC.

Datos y/o Mapa	Formato	Fuente
Fallas y Fracturas (longitud y densidad)	Base de datos y archivo .shp	Almazán-Vázquez, 2017; López, 2019
Focos de contaminación	Archivos .shp	Expósito, 2012; Esquivel, 2015
Subsistencia	Imagen Raster	CONAGUA y UAEM, 2013
Abatimientos	Base de datos	Patoni y Sánchez, 2018
Densidad de pozos de extracción	Base de datos	CONAGUA, 2020 (REPDA); Geofísica Juayek

### 6.3.1 Fallas y fracturas (intensidad y longitud)

**Justificación.** Los agrietamientos en superficie son generados como consecuencia de los hundimientos provocados por la subsidencia hídrica o bien, pueden estar relacionados con algún sistema de fallas local o regional, siendo estos dos elementos la base para la clasificación de los fracturamientos identificados en el AVT. Con lo anterior se podrá inferir si estos sistemas se manifiestan solamente en superficie o si es posible que se extiendan a una mayor profundidad. Por otro lado, los daños que estos han generados en la infraestructura del sistema de alcantarillado pueden ocasionar, por ejemplo, que se conviertan en focos de contaminación.

**Metodología aplicada.** Para esta capa se consideran dos de sus características principales, la intensidad de fracturamiento dentro de una superficie específica y la longitud total. La base de datos se obtuvo de la tesis más reciente respecto a la cartografía y actualización de la aparición de estos fenómenos, elaborada por Almazán-Vázquez (2017) y López (2019), quienes a través de recorridos en campo identificaron, midieron y clasificaron cada una de ellas.

Para la determinación del parámetro de intensidad, se aplicó el método de Palmstrom (2001), quien a través del método de densidad de unión ponderada ( $wJd$ , por sus siglas en inglés), propone para un plano en 2D, la ecuación 6.1 y 6.2.

$$wJd = Nw/\sqrt{A} \quad \text{ecuación 6.1}$$

$$Nw = \sum n * f_i \quad \text{ecuación 6.2}$$

En donde  $A$  es la superficie para analizar (en  $m^2$  o  $km^2$ ) y  $f_i$  es un factor constante que para el caso del análisis en 2D, se considera 1 y  $n$  es el número de fracturas identificadas.

Para el parámetro de longitud, bastó con sumar la longitud total de los fracturamientos dentro de la superficie de interés (Paredes y Flores, 2001).

Dadas las dimensiones del AVT, fue necesario definir una escala de trabajo para el análisis de dichos parámetros. Por lo anterior, se utilizó un mallado de 10 km<sup>2</sup> considerando la relación que utiliza Ross y Frohlich (1993), para las diferentes escalas de estudio. Con ello, fue posible contar y medir todos los sistemas de fracturas por unidad de superficie y de esta manera definir las áreas con mayor intensidad y longitud.

Los resultados obtenidos del cálculo de los parámetros de intensidad y longitud de los sistemas de agrietamientos muestran claramente que la zona más afectada es la parte central del acuífero, específicamente, la zona urbana e industrial de la ciudad de Toluca.

El mapa de intensidad de fracturamientos (Figura 6.5), indica la presencia de un rango de entre 5 y 7 sistemas de fracturas por cada 10 km<sup>2</sup>, destacando los ubicados en el flanco sur del cerro La Teresona, la zona circundante a Ciudad Universitaria y en la zona industrial, específicamente, el sistema Totoltepec. Adicional a los antes mencionados, aparecen una gran cantidad de sistemas de fracturas, que no hay que ignorar ya que estos pueden continuar desarrollándose con el paso del tiempo.

Con respecto a las áreas con mayor longitud de dichos sistemas, destacan nuevamente la zona central e industrial del valle, sin embargo, para este caso existen otros sistemas con una longitud considerable, destacando el que se encuentra al sur de la zona urbana, en los límites con el municipio de Metepec; así mismo, se comienzan a presentar grandes fracturamientos en la zona norte y noroeste en dirección con el estrecho de Perales, los cuales presentan longitudes que varían desde los 3 hasta los 6 km, aproximadamente, tal como se aprecia en la Figura 6.6.

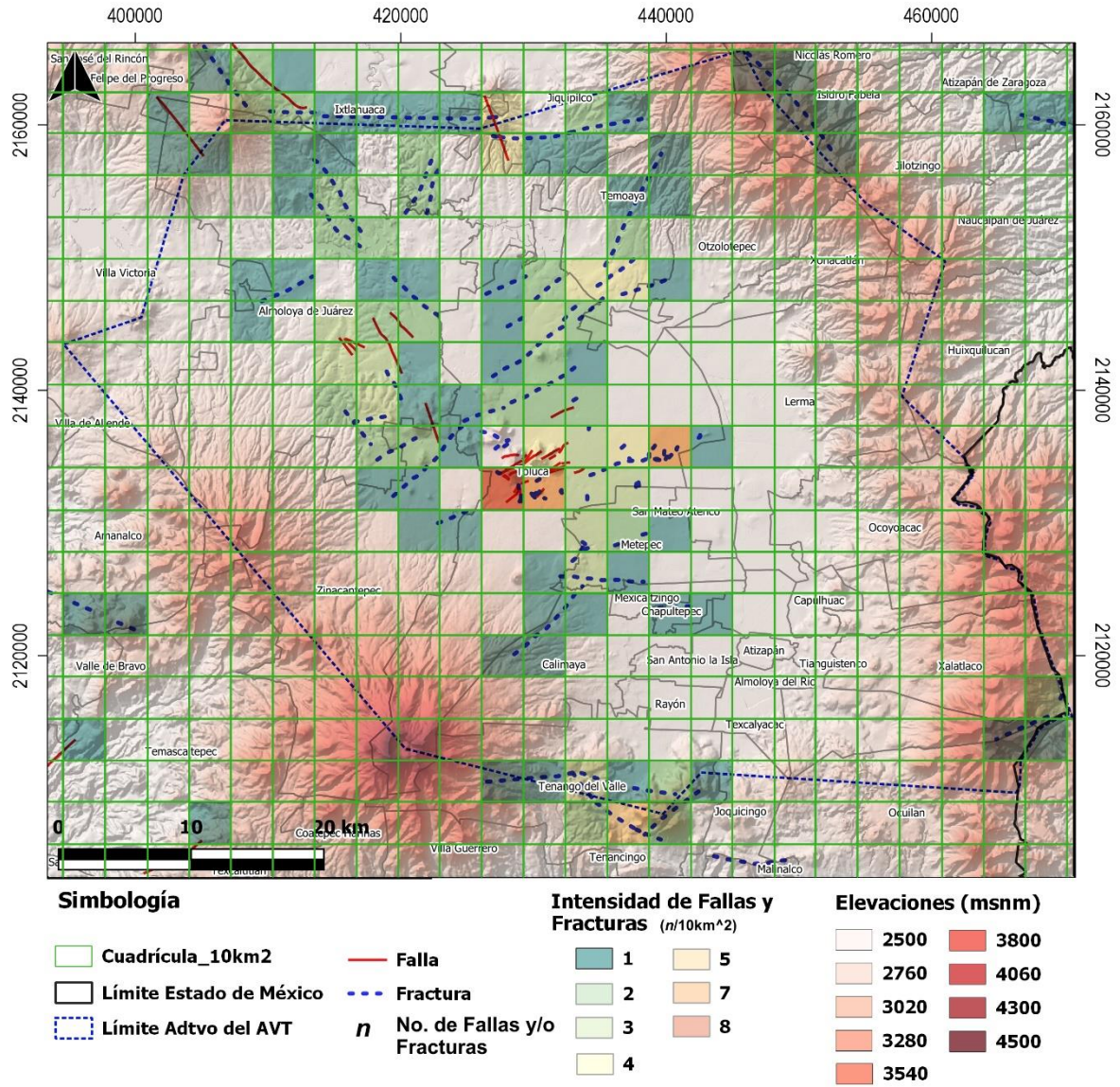


Figura 6.5.- Mapa de intensidad de fracturamientos de la región del AVT.

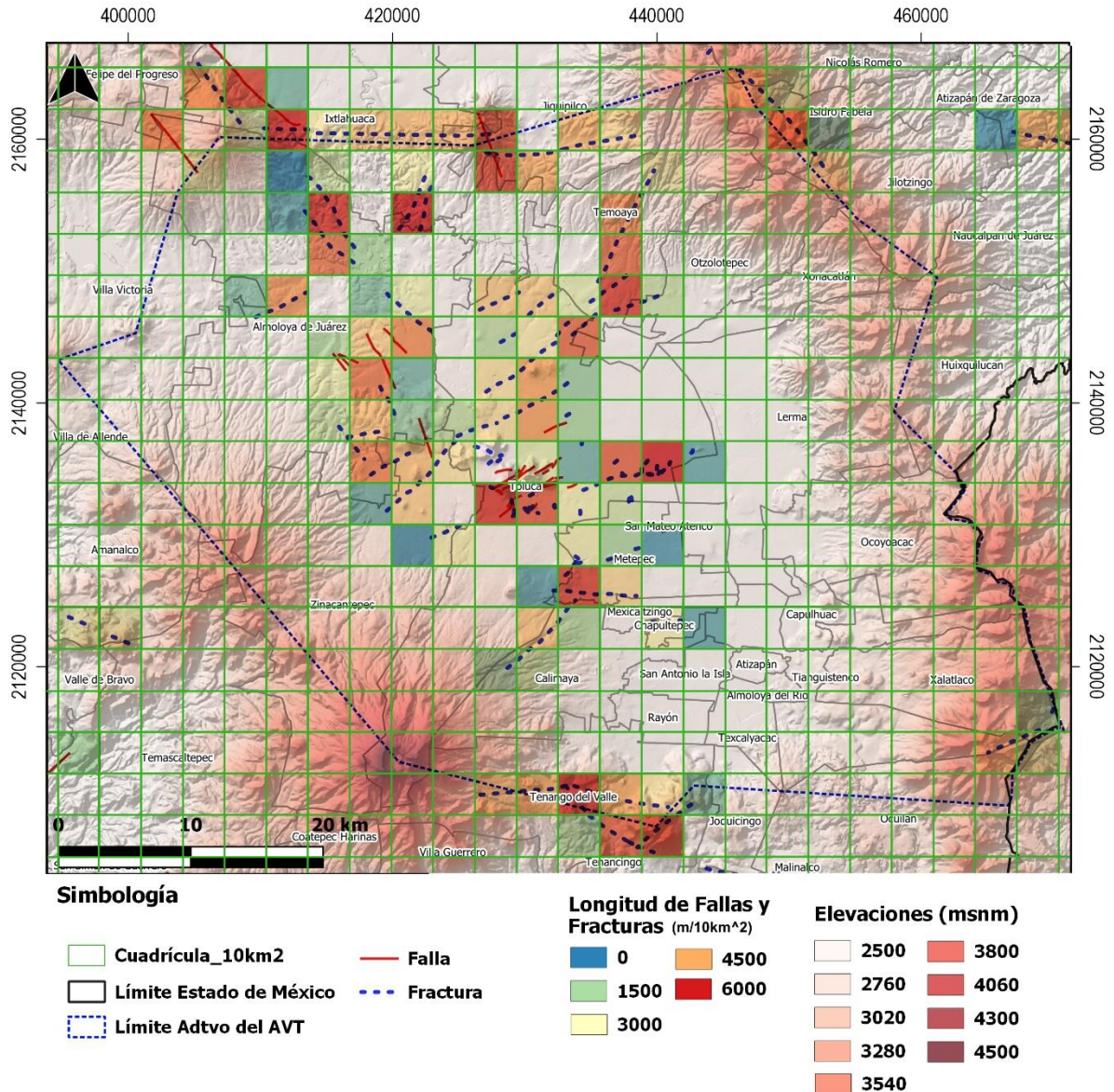


Figura 6.6. Mapa de longitud de los sistemas de fallas y fracturas de la región del AVT.

### 6.3.2 Focos de contaminación

**Justificación.** La existencia de focos potenciales de contaminación cerca de los agrietamientos y/o fallas se consideró como prioridad. Es claro que, ante la presencia de un evento contaminante, la zona afectada será aquella que presente una mayor cercanía a un sistema de fracturas, pues dichas fracturas son vías preferenciales hacia el acuífero.

**Metodología aplicada.** A partir del mapa de peligro de contaminación del AVT, elaborado por Expósito (2012) y actualizado por Esquivel (2015), se utilizaron y clasificaron los focos potenciales de contaminación de acuerdo con el método POSH. Para lo anterior se

utilizaron diversos criterios: 1) distribución espacial (puntual, lineal o difusa); 2) fuente u origen del contaminante (urbano, industrial, agricultura, minería y actividades militares, sitios de disposición de residuos, redes de transporte, líneas de aceite, corrientes de agua y sistemas de alcantarillado); 3) tipo de contaminante (físicos, químicos, biológicos y/o radiactivos) (Vrba, 2008).

En la zona de estudio se identificaron fuentes de contaminación de tipo puntual, lineal y difusa. Dentro de las que origen puntual, se encuentra una gran cantidad de sitios de disposición de residuos sólidos (232), gasolineras (49), cementerios (127), parques industriales y minas (139), localizados principalmente en las periferias del valle, así como en la porción centro del área de estudio. Por otro lado, las fuentes de origen difuso se concentran en la zona centro y norte del área y corresponden a la agricultura y a la zona metropolitana y finalmente, la fuente de tipo lineal corresponde principalmente con el Río Lerma, ubicado en la porción este del Valle (Figura 6.7).

De acuerdo con los resultados obtenidos, fue posible identificar el grado de impacto de cada uno de los focos de contaminación, siendo los sitios de residuos, los parques industriales, la agricultura y el río Lerma de potencial nocivo elevado, mientras que los sitios destinados a la minería, gasolineras, zona urbana y cementerios son considerados como fuentes de potencial nocivo moderado, mientras que el resto de la superficie del AVT se considera con potencial nulo. (Tabla 6.2).

Tabla 6.2.- Clasificación de las fuentes de contaminación mediante el método POSH (Expósito, 2012; Esquivel, 2015).

Fuente de contaminación	Nocividad
Actividad industrial	Elevada
Sitios de disposición de residuos	Elevada
Agricultura de riego	Elevada
Minería	Moderada
Gasolineras	Moderada
Zona urbana	Moderada
Cementerios	Moderada
Resto del AVT	Nula

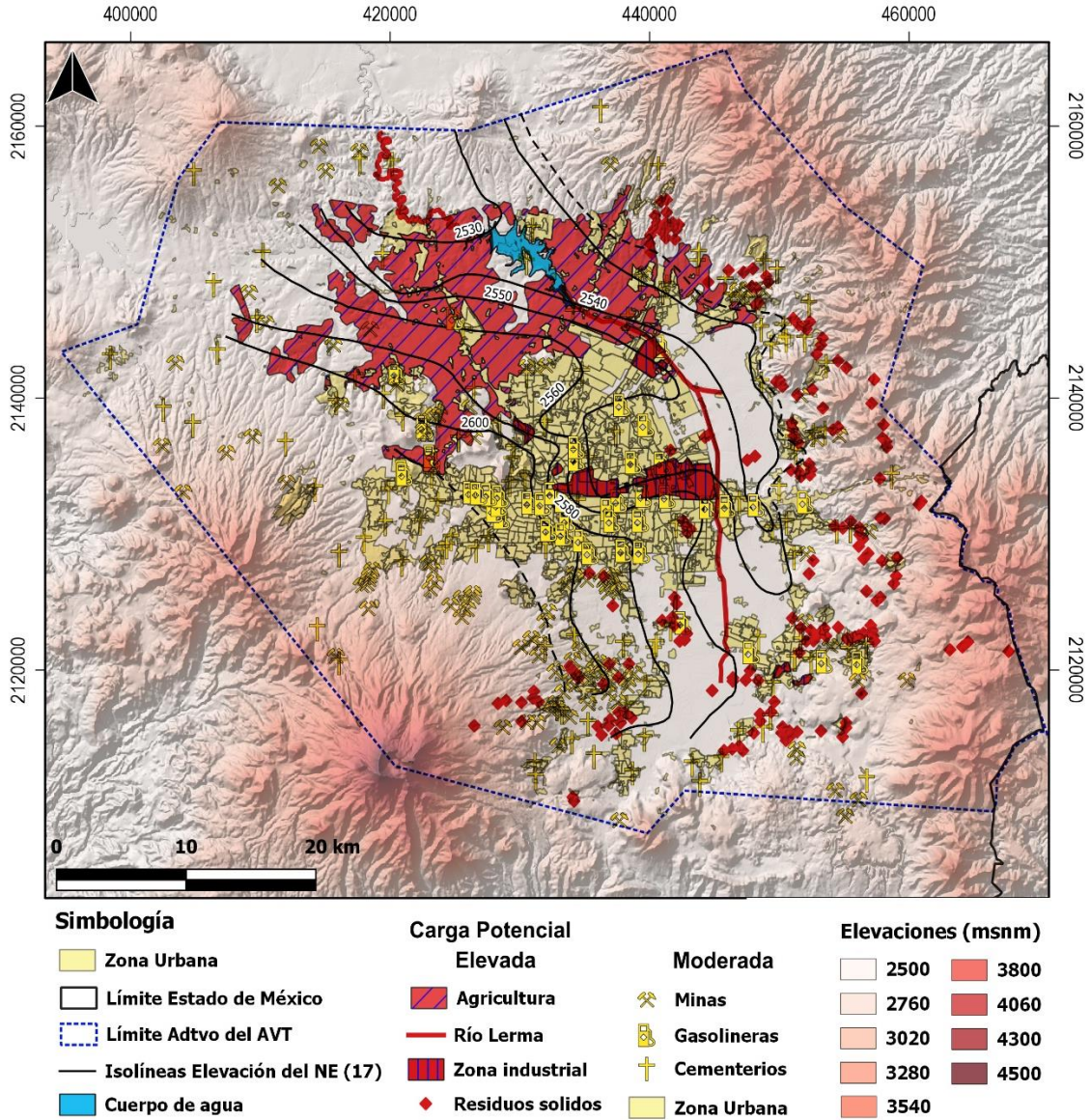


Figura 6.7.- Mapa de clasificación de los focos de contaminación de acuerdo con su potencial nocivo mediante el método POSH (elaborado con base en Expósito, 2012; Esquivel, 2015).

### 6.3.3 Subsistencia

**Justificación.** Con el apoyo de las diferentes investigaciones que se han realizado para el estudio de la subsidencia, mencionadas en el capítulo 3, se pudo conocer de manera histórica el crecimiento de dicho fenómeno en el Valle de Toluca. Por lo anterior, es importante identificar aquellas zonas con un mayor grado de subsidencia (mayores a 1 metro), ya que estos sitios son los que presentan una mayor probabilidad de sufrir agrietamientos significativos en superficie y, por lo tanto, generar daños estructurales y aumentar la vulnerabilidad del acuífero ante la contaminación.

**Metodología aplicada.** Diversos estudios realizados en el AVT para medir la subsidencia, a través de técnicas de radar, han arrojado resultados muy satisfactorios y muestran mapas de subsidencia de años recientes (CONAGUA & UAEM, 2013; Hernández-Conde, 2014; Arroyo-Domínguez, 2016). Adicionalmente, para la presente investigación es indispensable tener en cuenta los registros históricos que permitan cuantificar el valor total de subsidencia en un periodo de tiempo y con ello identificar las zonas que se han visto mayormente afectadas.

Por lo anterior, el mapa de subsidencia fue tomado de CONAGUA & UAEM (2013). Dicho mapa fue georreferenciado y digitalizado en el programa QGIS (2020), delimitando aquellas zonas con mayor subsidencia (mayores a 1 metro, asignando una mayor importancia) hasta llegar aquellas con menor grado de subsidencia (menores a 1 metro, y por lo tanto una menor importancia respecto con los demás valores).

Como efectos secundarios de la sobreexplotación del agua subterránea, desde hace más de 60 años se han venido evidenciando en la zona metropolitana del Valle de Toluca importantes efectos negativos que incluyen procesos de deslizamientos y agrietamientos del terreno que han repercutido en la generación de daos estructurales a numerosas construcciones urbanas e industriales (CONAGUA, 2013).

A pesar de que la extracción del agua subterránea se inició en la década de los 60, se estima que el hundimiento ocurrió cuando inició la explotación de manera intensiva en el Valle a finales de 1960 (Figuroa, 2004).

De acuerdo con los resultados del estudio de la subsidencia y agrietamientos realizado en el AVT, se reporta que para el periodo de análisis que abarca del año 1962 al 2010, los valores de subsidencia oscilan entre 1 y 2 metros, afectando una superficie aproximada de 74 km<sup>2</sup> (Figura 6.8), la cual se cubre principalmente la zona centro y metropolitana del valle de Toluca pero que presenta una tendencia hacia el norte y oriente, específicamente hacia la planicie de Lerma en donde estudios recientes (Hernández-Conde, 2014; Arroyo-Domínguez, 2016) muestran el desarrollo en menor medida de dicho fenómeno. Lo anterior debido a que los materiales geológicos que funcionan como acuíferos profundos en esa región pertenecen a la Formación Tarango los cuales presentan mejores propiedades geomecánicas y disminuyen la compactación amplificada de las capas.

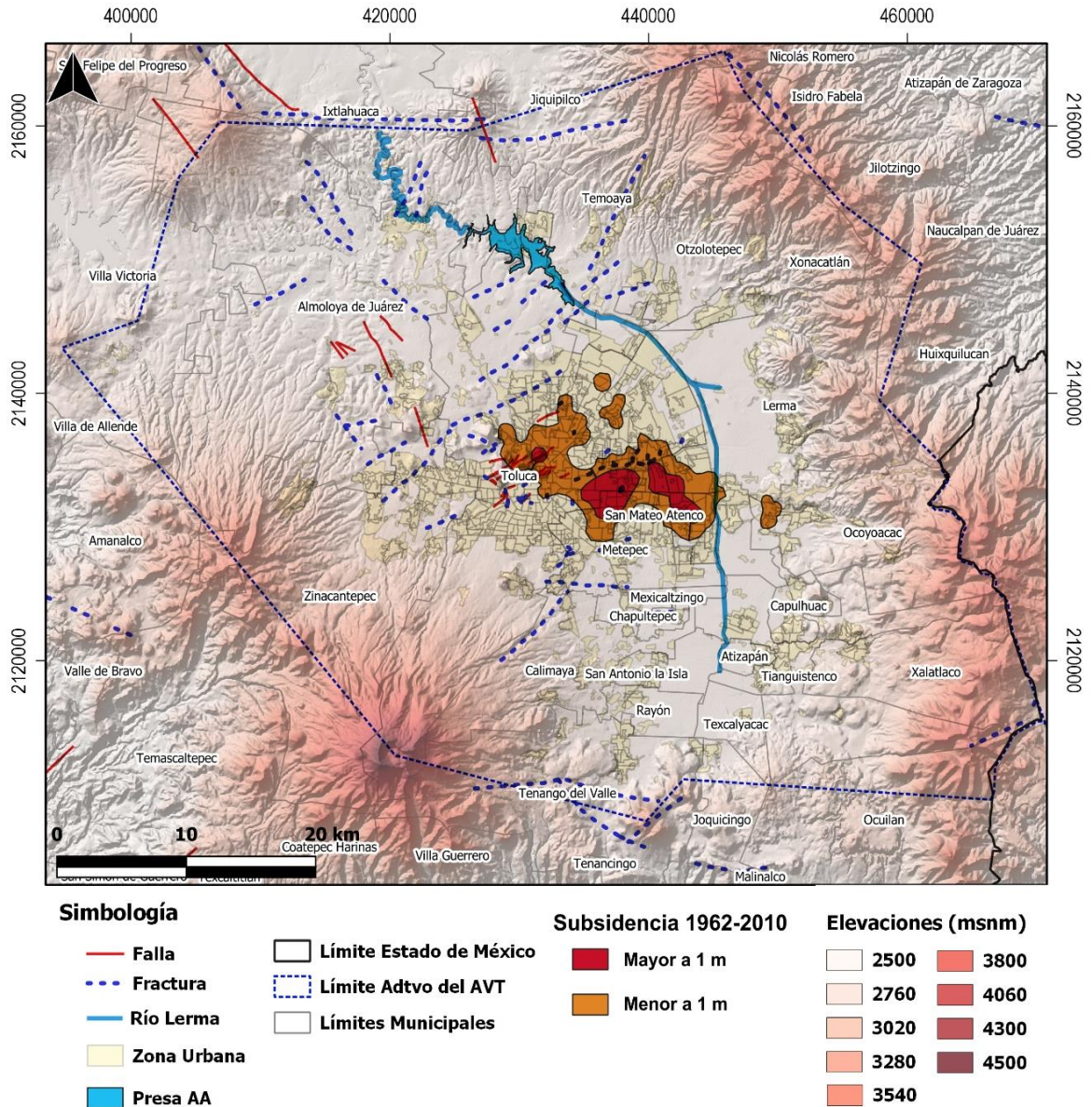


Figura 6.8.- Mapa de subsidencia acumulada histórica en la región del AVT para el periodo de 1962-2010 (tomado de CONAGUA & UAEM, 2013).

### 6.3.4 Abatimientos

**Justificación.** La gran cantidad de pozos de extracción perforados en el Valle de Toluca ha ocasionado una gran extracción de recurso hídrico, ocasionando con ello un abatimiento en los niveles piezométricos, lo que da lugar a que se bombee a una mayor profundidad para poder extraer el agua subterránea. Se requiere de identificar aquellas zonas con tasas de abatimientos mayores ya que, al quedar las capas drenadas suelen sufrir asentamientos, y a su vez agrietamientos en superficie.

**Metodología aplicada.** El análisis de abatimiento piezométrico se realizó con apoyo de las lecturas de las variaciones de los niveles para el periodo 1968 - 2016 (CONAGUA, 2017). El análisis de los descensos del nivel del agua subterránea partió de la información arrojada por la red piezométrica constituida por 54 multipiezómetros localizados y distribuidos en el área de estudio.

Los datos contenidos en una base de datos tabular fueron transformados a una capa de información de extensión .shp., con ello fue posible obtener los abatimientos para dicho periodo de tiempo. Una vez que se obtuvieron los valores para cada piezómetro, se realizó una interpolación mediante el algoritmo *ponderación inversa a la distancia* (IDW, por sus siglas en inglés) (Qgis, 2020), para conocer los valores en aquellas zonas en donde no se tiene información disponible. Lo anterior sirvió como herramienta para realizar una clasificación y asignar mayor importancia a aquellas zonas en donde se presenta un mayor abatimiento y por el otro lado, una menor importancia en donde no hay cambios o se presenta una recuperación de los niveles.

De manera general, los cálculos arrojan que las tasas de abatimiento anual son del orden de 1.2 m/a, sin embargo, el análisis de los años recientes ha manifestado cambios ya que las zonas con ritmos mayores a 1 m/a se ha fragmentado, desarrollándose nuevas áreas al norte y sur de la ciudad de Toluca, lo que manifiesta un incremento considerable de la extracción en los municipios de San Mateo Atenco, Mexicaltzingo, Chapultepec y Calimaya, así como en el municipio de Zinacantepec, que reporta los valores más altos de abatimiento; finalmente, el norte de la ciudad de Toluca presenta incrementos significativos asociados al crecimiento de la mancha urbana (Figura 6.9).

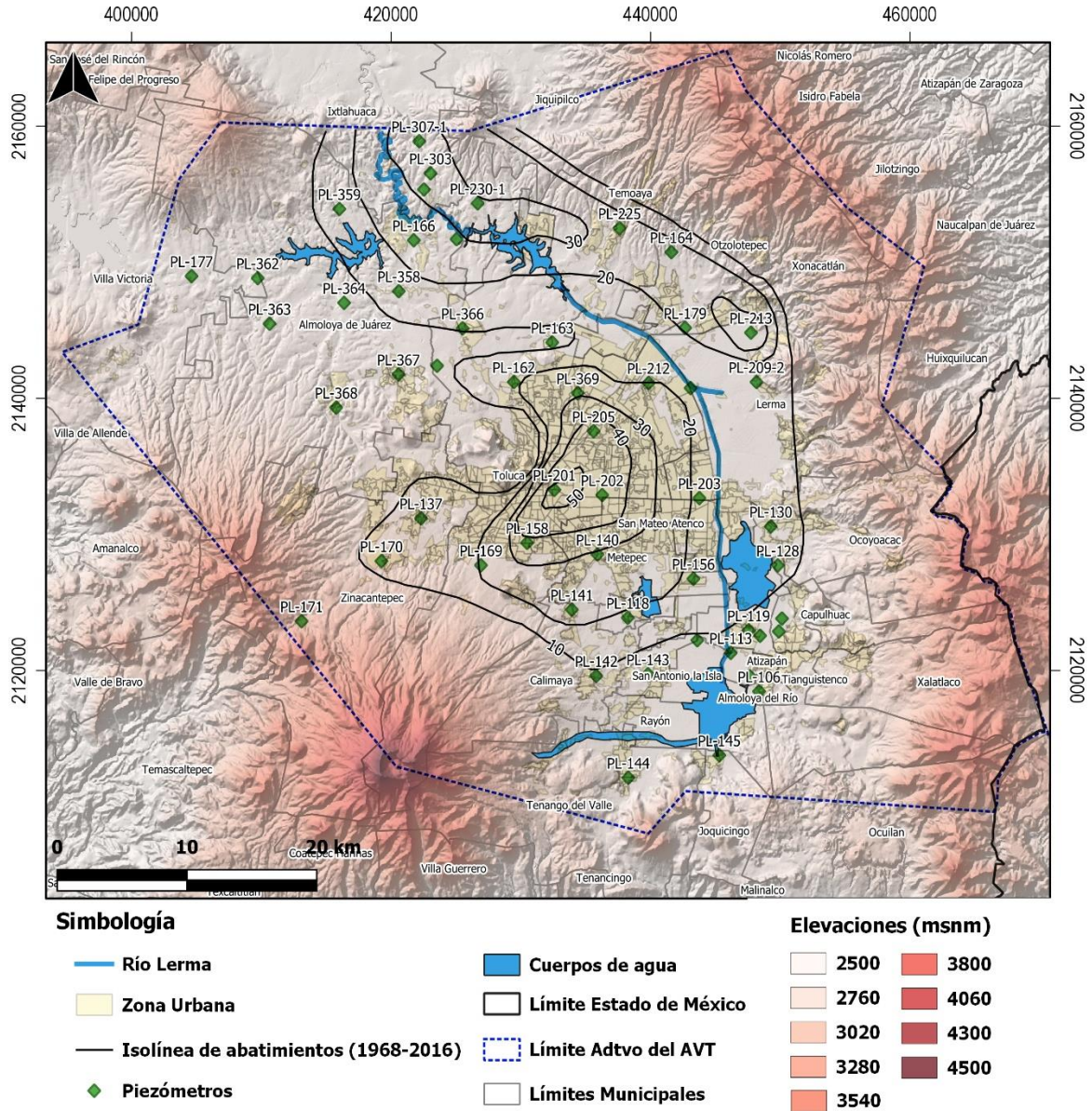


Figura 6.9.- Mapa de abatimiento histórico para el periodo de tiempo de 1968 a 2016 en el AVT (elaborado con datos de CONAGUA, 2017).

### 6.3.5 Densidad de pozos de extracción

**Justificación.** El número de pozos de extracción contenidos dentro de una superficie de 1 km<sup>2</sup> tiene una gran influencia ya que, generalmente se encuentran distribuidos en la zona centro del Valle de Toluca, abasteciendo de agua a una gran cantidad de población y de los cuales depende un ecosistema natural. Romper el equilibrio entre recarga y extracción generaría daños a dicho ecosistema, sin embargo, si estos pozos sufren daños debido a agentes contaminantes externos, no solo dañaría a la flora y fauna de la zona, sino que también un gran número de personas se verían afectadas.

**Metodología aplicada.** Para poder conocer la densidad de pozos en el AVT, se utilizó la base de datos del REPDA, ubicando espacialmente a todos los pozos de extracción documentados. Siguiendo la metodología utilizada por Expósito (2012), se definió una mallado de 1 km<sup>2</sup> y de esta manera fue posible conocer las zonas específicas en donde la densidad de pozos es mayor a 5, asignado un mayor grado de importancia y, por el contrario, aquellas zonas en donde no se encuentran pozos de extracción.

La cantidad de pozos de extracción de agua subterránea creció de manera significativa pues el crecimiento de la población exigía una mayor demanda del recurso hídrico. Sin embargo, existe una mala distribución en la localización de estos pozos pues la mayoría se concentran en la zona centro del Valle.

Debido a lo anterior, se consideró importante conocer la densidad de los pozos disponibles en la base de datos del REPDA para identificar aquellas zonas en las cuales existe un mayor estrés hídrico debido a la explotación intensiva de los pozos concentrados en tan solo 1 km<sup>2</sup>.

Los resultados arrojan una gran cantidad de sitios con una densidad de pozos que varía entre 1 y 3 por km<sup>2</sup>, sin embargo, resaltan aquellas zonas en donde la densidad aumenta de entre 5 y 8 pozos por km<sup>2</sup>. Estas zonas se ubican principalmente en el centro del área metropolitana, Zinacantepec y el límite entre la zona industrial y el municipio de San Mateo Atenco (Figura 6.10).

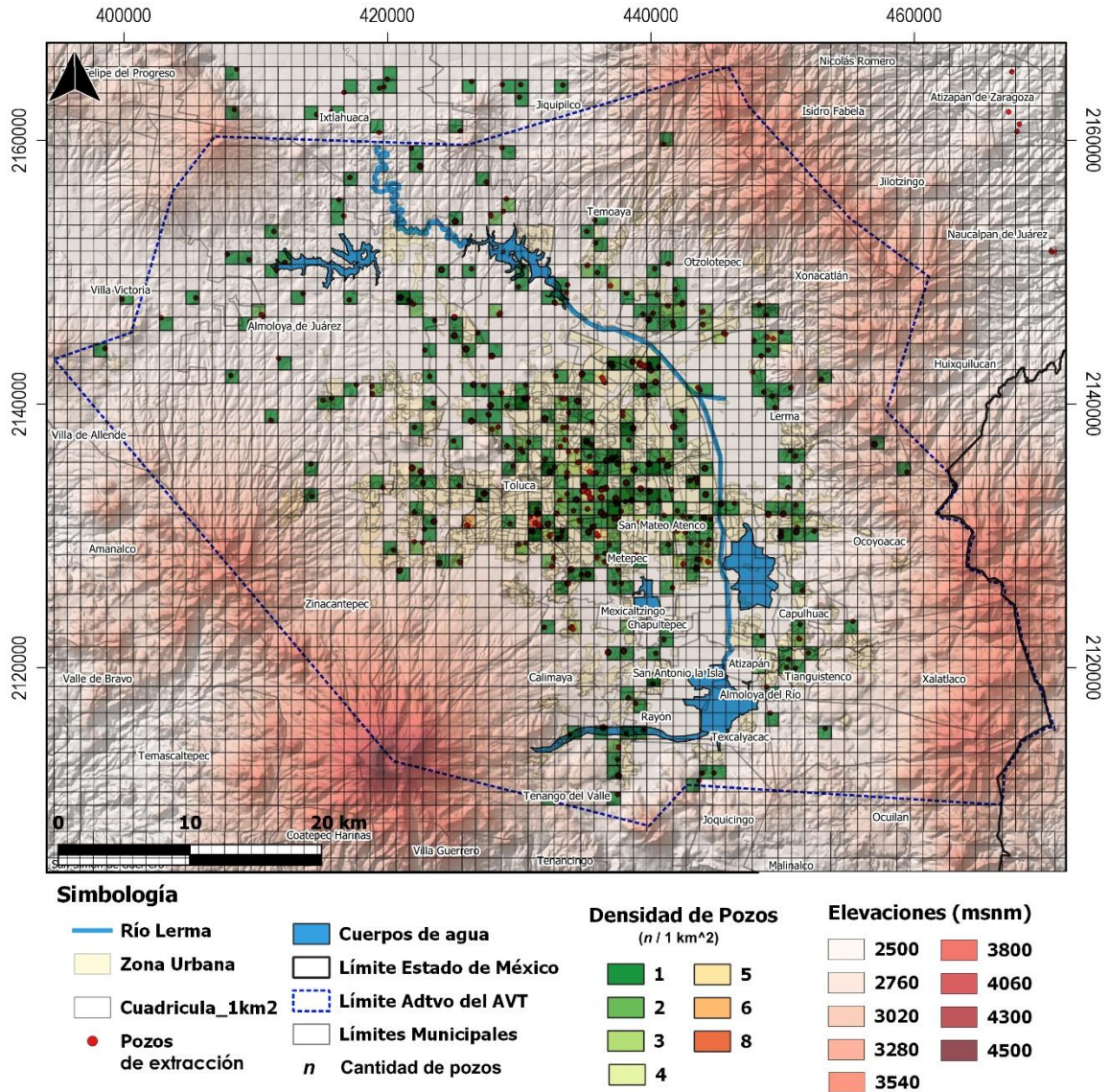


Figura 6.10.- Mapa de densidad de pozos de extracción por superficie de 1 km<sup>2</sup> en el AVT (elaboración propia con información del REPDA)

Una vez que los cinco factores previamente mencionados fueron calculados y vectorizados (Figura 6.11), cada uno de ellos fue convertido a formato ráster con un tamaño de píxel de 10 x 10 metros, reclasificando cada elemento de acuerdo con una escala estándar para cada factor. Dicha escala refleja el grado de importancia de cada elemento dentro de cada capa. El orden considerado fue: 5 = muy alto; 4 = alto; 3 = moderado; 2 = bajo; 1 = muy bajo (Vojteková y Vojtek, 2020).

Finalmente, a cada factor se le asigna un grado relativo de importancia y estos sirven para generar la matriz de comparación. Para el caso de estudio, se consultó la opinión de expertos en los temas de SIG, Geología Estructural, Hidrogeoquímica e Hidrogeología,

quienes propusieron el orden de importancia relativa de cada factor de acuerdo con el enfoque y análisis de la problemática. Este orden se logró considerando la relación causa-efecto, es decir: ¿cuál criterio afecta con mayor peso (importancia) en el aumento de la vulnerabilidad del acuífero ante la contaminación? Los valores asignados varían según el número de capas; para este caso van desde el 1 (de mayor importancia) al 5 (menor importancia) (Tabla 6.3).

Tabla 6.3.- Clasificación, rangos y pesos relativos asignados a los diferentes factores utilizados en el AMC.

Factor	Clasificación		Rango	Importancia relativa
<b>Fallas y Fracturas (Intensidad – (n/10km<sup>2</sup>))</b>	0	1	1	<b>1</b>
	1	3	2	
	3	5	3	
	5	7	4	
	7	10	5	
<b>Fallas y Fracturas (Longitud – (m/10km<sup>2</sup>))</b>	0	500	1	<b>1</b>
	500	1000	2	
	1000	3000	3	
	3000	5000	4	
	5000	10000	5	
<b>Focos de Contaminación</b>	Reducida		1	<b>2</b>
	Reducida a moderada		2	
	Moderada		3	
	Moderada a alta		4	
	Alta		5	
<b>Subsidencia</b>	Nula		1	<b>3</b>
	Muy Baja		2	
	Baja		3	
	Moderada		4	
	Alta		5	
<b>Abatimientos</b>	0	10	1	<b>4</b>
	10	20	2	
	20	30	3	
	30	40	4	
	40	50	5	
<b>Densidad de pozos de extracción</b>	0	1	1	<b>5</b>
	1	3	2	
	3	5	3	
	5	7	4	
	7	10	5	

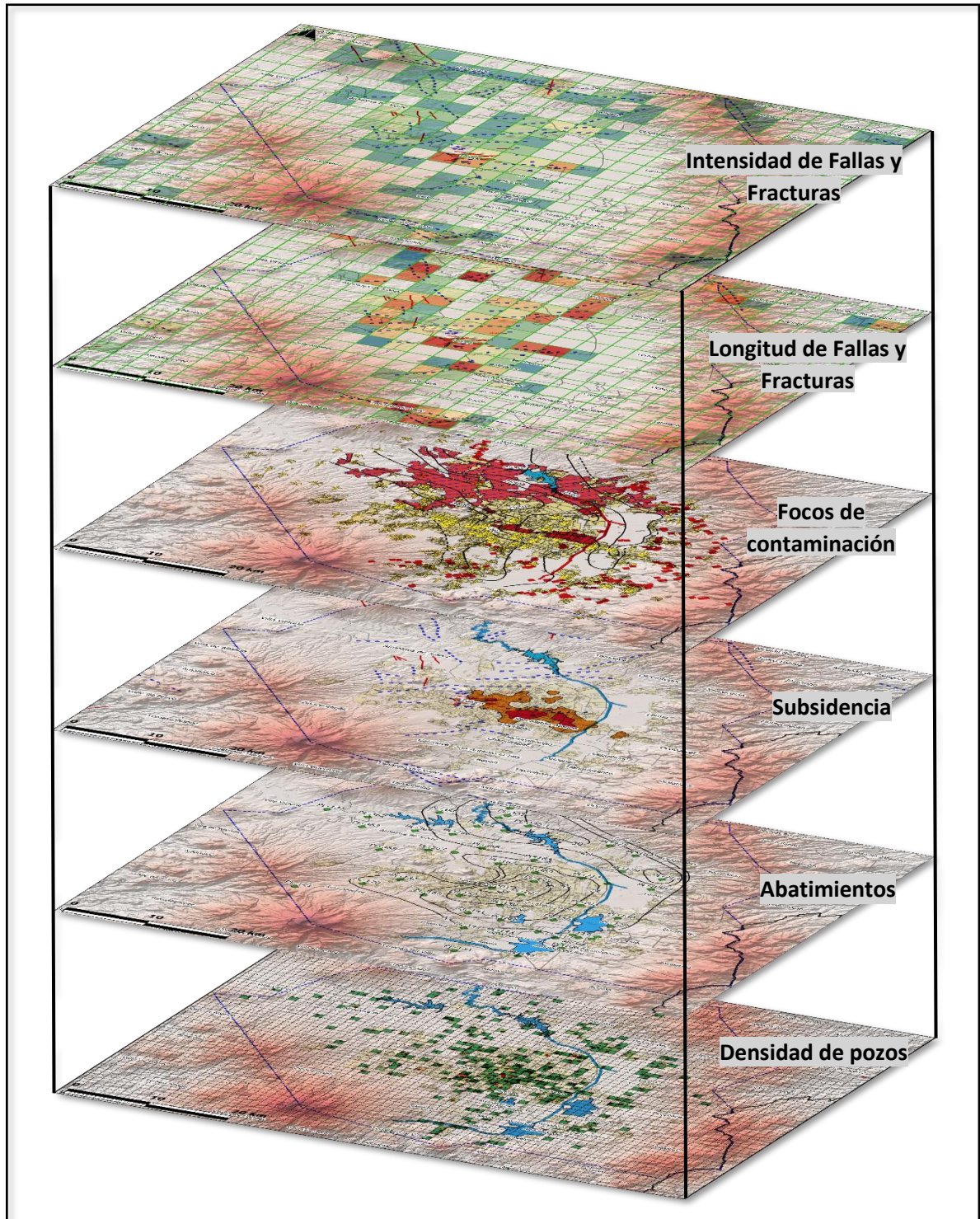


Figura 6.11.- Mapas de los diferentes factores utilizados en el AMC para la selección del área prioritaria.

Así mismo, los expertos consultados apoyaron con la asignación de pesos a cada factor de la matriz de comparación, de acuerdo con su área de experiencia y con base en la tabla de comparación propuesta por Saaty (1980) (Tabla 6.4).

Tabla 6.4.- Relación de pesos posibles a asignar a cada elemento en una matriz de comparación (Saaty, 1980).

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extrema	Muy fuerte	fuerte	moderada	Igual	moderada	fuerte	Muy fuerte	extrema
Menos importante					Más importante			

Una vez que se tuvieron las matrices propuestas por los expertos, se analizaron y se realizó un promedio de los valores de cada factor, con el fin de generar una sola matriz. La tabla 6.5, enlista los factores finales con sus respectivos pesos asignados.

Tabla 6.5.- Matriz de comparación entre los elementos seleccionados para el análisis multicriterio.

Factores	Fallas y fracturas (densidad y longitud)	Focos de contaminación	Subsidencia	Abatimientos	Densidad de pozos
Fallas y Fracturas (densidad y longitud)	1	3	5	7	9
Focos de contaminación	1/3	1	5	5	7
Subsidencia	1/5	1/5	1	3	5
Abatimientos	1/7	1/5	1/3	1	3
Densidad de pozos	1/9	1/7	1/5	1/3	1

En la técnica AHP, los pesos normalizados para cada factor son calculados a partir del eigenvector principal de la matriz cuadrática obtenida (Tabla 6.5) entre el número de factores, el cual refleja la importancia de cada elemento comparado con los demás (Saaty, 1980). La matriz resultante de pesos normalizados se muestra en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6.- Matriz de comparación con pesos normalizados.

Factores	Fallas y fracturas (intensidad y longitud)	Focos de contaminación	Subsidencia	Abatimientos	Densidad de pozos	Wi
Fallas y Fracturas (intensidad y longitud)	0.55950	0.66038	0.43353	0.42857	0.36000	0.48840
Focos de contaminación	0.18650	0.22013	0.43353	0.30612	0.28000	0.28526
Subsidencia	0.11190	0.04403	0.08671	0.18367	0.20000	0.12526
Abatimientos	0.07993	0.04403	0.02890	0.06122	0.12000	0.06682
Densidad de pozos	0.06217	0.03145	0.01734	0.02041	0.04000	0.03427
						1

La suma de los pesos  $W_i$  de cada factor = 1, lo cual indica que el proceso de ponderación es satisfactorio.

Por otro lado, para poder determinar el *grado de consistencia* de la matriz ( $CR$ ), en primer lugar, se realizó el cálculo del *vector sumatorio de pesos* a través de la multiplicación del valor de  $W_i$  obtenido en la Tabla 6.6 por cada elemento en forma de columna de la matriz original. La Tabla 6.7 muestra los valores resultantes de dicho procedimiento.

Tabla 6.7.- Valores resultantes del vector sumatorio de pesos.

<b>Factores</b>	Fallas y fracturas (intensidad y longitud)	Focos de contaminación	Subsistencia	Abatimientos	Densidad de pozos	<b>Vector sumatorio de pesos</b>
Fallas y Fracturas (intensidad y longitud)	0.488395	0.855765	0.626304	0.467712	0.308453	2.74663027
Focos de contaminación	0.162798	0.285255	0.626304	0.334080	0.239908	1.64834601
Subsistencia	0.097679	0.057051	0.125261	0.200448	0.171363	0.65180188
Abatimientos	0.069771	0.057051	0.041754	0.066816	0.102818	0.33820910
Densidad de pozos	0.054266	0.040751	0.025052	0.022272	0.034273	0.17661362

Con el cálculo del vector de los pesos, es posible conocer el *vector de consistencia* a través de la división de cada uno de ellos entre el peso ponderado ( $W_i$ ) calculado en la Tabla 6.6. El resultado dicha operación se muestra en la Tabla 6.8. Posteriormente, se calcula el valor promedio del vector de consistencia denominado  $\lambda$  (lamda), el cual es mostrado también en la presente tabla.

Tabla 6.8.- Valores resultantes del cálculo del vector de consistencia y su valor promedio ( $\lambda$ ).

<b>Factor</b>	<b>Vector sumatorio de pesos</b>	<b>Vector de consistencia</b>
Fallas y Fracturas (intensidad y longitud)	2.74663027	5.623783
Focos de contaminación	1.64834601	5.778499
Subsistencia	0.65180188	5.203555
Abatimientos	0.33820910	5.061193
Densidad de pozos	0.17661362	5.153221
	$\lambda$	5.364168

Por último, se obtiene el valor del índice de consistencia (CI, por sus siglas en inglés) mediante la ecuación 4.5, mientras que el valor de RI se obtiene de la Tabla 4.5 y finalmente, se realiza el cálculo del grado de consistencia de la matriz (CR, por sus siglas en inglés) a través de la ecuación 4.4.

La Tabla 6.9 muestra los resultados obtenidos para cada uno de los elementos descritos previamente.

Tabla 6.9.- Valores resultantes de CI, RI y CR.

Índice de consistencia (CI)	Índice de inconsistencia aleatorio (RI)	Grado de consistencia (CR)
0.091042	1.12	0.0812

Para el caso de estudio, el valor resultante del grado de consistencia de la matriz utilizada para el análisis multicriterio es de 0.08, lo cual indica que la comparación entre elementos es adecuada.

Finalmente, para realizar la suma lineal de los pesos ponderados (WLC) con las capas de información seleccionadas, se realiza una suma de capas ráster, multiplicando cada elemento con su peso correspondiente. Para el presente caso de estudio, la suma resultó de la siguiente manera:

$$(0.48840*(Intensidad + Longitud) + 0.28526*(Focos de contaminación) + 0.12526*(Subsidencia) + 0.06682*(Abatimientos) + 0.03427*(Densidad de pozos)).$$

### 6.3.6 Delimitación del área crítica del AVT

Con el análisis multicriterio aplicado, a través de la técnica de jerarquización, fue posible identificar aquellas zonas dentro del AVT que requieren de un estudio urgente ya que se encuentran en un estado crítico pues, después de analizar los factores utilizados, todos inciden en dos áreas específicas, siendo estas los focos de atención para la presente investigación.

Para delimitar las áreas prioritarias de acción se tuvieron en cuenta los cinco criterios descritos anteriormente. Con ellos fue posible realizar la suma lineal de pesos ponderados para poder definir las áreas de mayor prioridad (Figura 6.12).

Los resultados arrojaron un mapa con valores que varían en un rango de 1 a 5. Aquellos sitios con valores entre 4 y 5 se consideran zonas de prioridad baja, el valor = 3 corresponde con una prioridad media y, finalmente, los valores de 1 y 2 se asocian a aquellos sitios con una prioridad alta. Las zonas con prioridad alta se ubican principalmente en la región central del AVT hacia la porción oriente de la zona metropolitana, específicamente en la parte industrial, la cual limita con el norte de los municipios de Metepec y San Mateo Atenco.

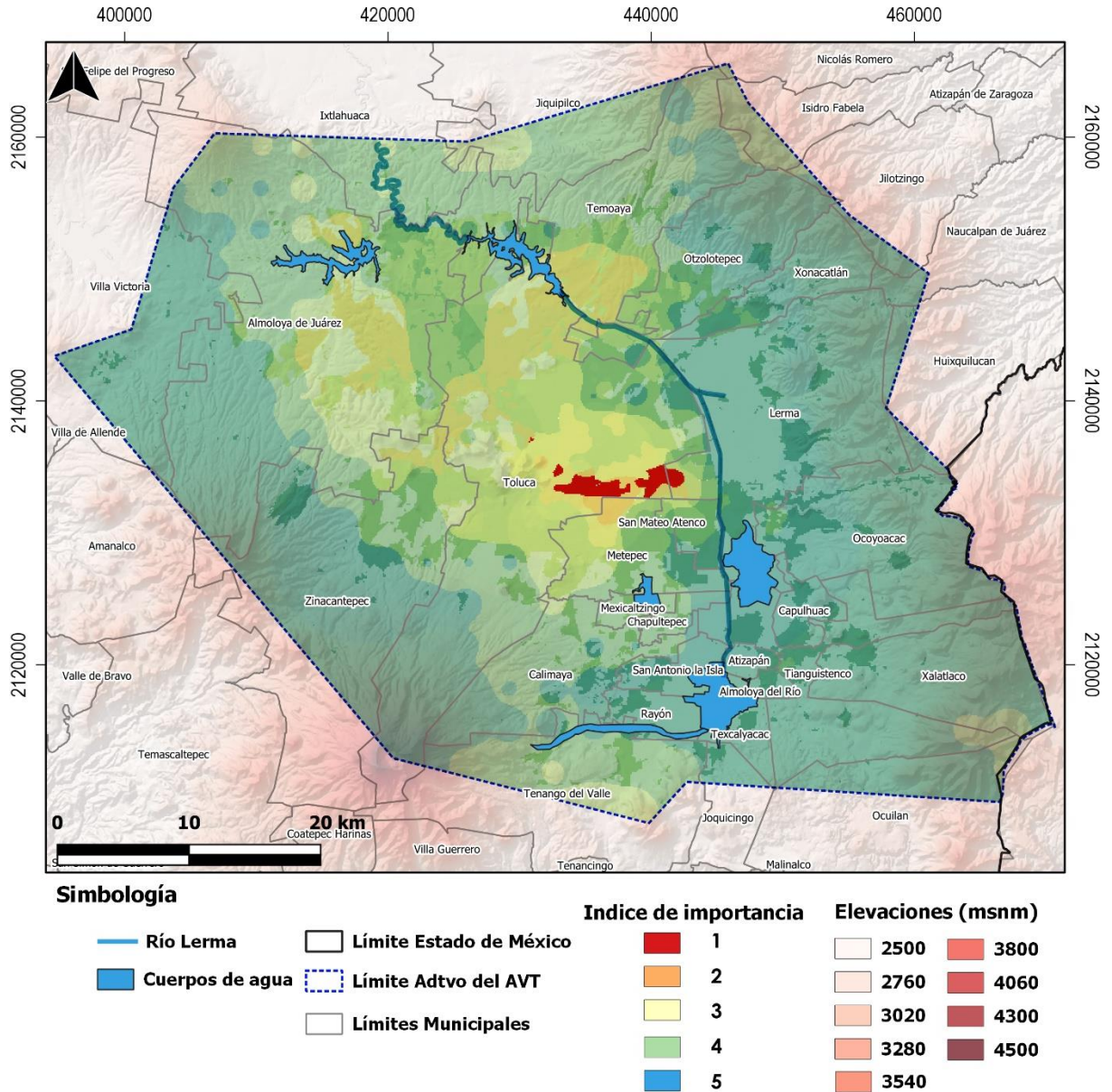


Figura 6.12.- Mapa resultante del AMC correspondiente a los índices de importancia.

Estas zonas, son consideradas las más críticas debido no solo a los abatimientos del orden de 50 m que se presentan, sino, además, por la velocidad a la que estos abatimientos se presentan año con año, producto de la alta densidad de pozos destinados al abastecimiento de la población y al gran número de empresas asentadas en esa porción del acuífero. Aunado a lo anterior, se suman los problemas de subsidencia y agrietamientos que sobresalen en toda la región, así como la ubicación de un gran número de focos potenciales de contaminación.

Debido a la interacción de estos elementos, la sostenibilidad del acuífero en estas zonas específicas se encuentra altamente comprometida, por lo tanto, urge implementar acciones que permitan contrarrestar la condición que prevalece y aumenta con el paso del tiempo.

Por lo anterior, se ha delimitado el área prioritaria que corresponde con un índice de prioridad igual a 1 y que abarca una superficie aproximada de 11.5 km<sup>2</sup>. Sin embargo, el polígono propuesto para estudiar más a detalle considera una superficie mayor para conocer las condiciones naturales del subsuelo en áreas que no cuentan con dicha problemática (Figura 6.13).

Para esta área se elaborará un modelo hidrogeofísico detallado el cual brindará información sobre el comportamiento litológico a profundidad y su relación con los elementos utilizados en el AMC y con ello poder definir nuevas medidas de protección hacia el acuífero.

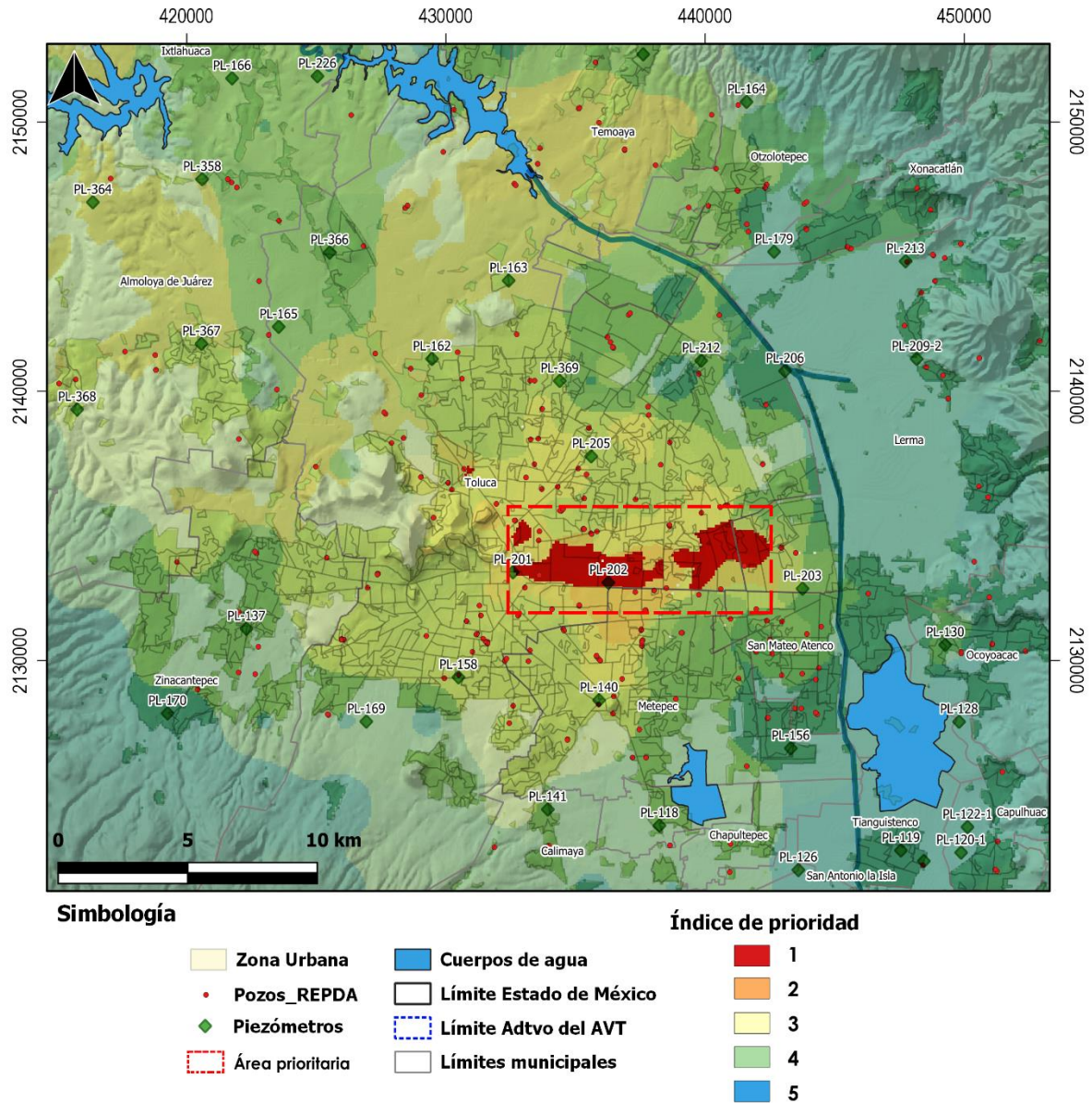


Figura 6.13.- Delimitación y selección del área prioritaria para realizar el modelo hidrogeofísico.

#### **6.4 Modelo hidrogeofísico del área crítica en 3D**

Enfocando el análisis hacia el área prioritaria definida previamente, se tomaron las coordenadas que delimitan el polígono correspondiente para identificar la información disponible y generar un modelo hidrogeofísico local, esto con la finalidad de analizar la relación que existe entre varios de los criterios utilizados en el AMC con las características geológico-geofísicas de la zona central del AVT y con ello aplicar un método adecuado que permita calcular la vulnerabilidad a la contaminación a la cual está expuesto el acuífero en su porción central.

Los resultados visibles en la figura 6.15, muestran el modelo hidrogeofísico local generado a partir de la información disponible y limitado al polígono correspondientes con el área prioritaria. Hidrogeológicamente hablando, es importante destacar la importancia del detalle geológico-geofísico, que, a diferencia de los realizados previamente, brinda dicho modelo, ya que en él se distinguen las diferentes capas geológicas, los contactos y comportamientos deposicionales de las capas, las cuales se extienden hasta una profundidad máxima de 450 metros (máxima profundidad alcanzada por la información recopilada). Con lo anterior se puede confirmar el comportamiento heterogéneo del acuífero en su porción central.

Cabe señalar que dentro de la figura en la parte superficial se observan cambios litológicos en tipo escalonamiento, esto se debe a: i) la falta de capacidad de cómputo (memoria gráfica) que permitiera apreciar con claridad cada píxel de información y ii) en menor medida al pequeño gradiente de elevación (O-E) que existe en la zona de estudio.

Por otro lado, es importante resaltar el cambio litológico que ocurre en la parte centro-orientada, en donde existe la presencia de material granular fino con limos, arenas y arcillas en diferentes proporciones; mientras que, del centro hacia la parte poniente predominan los materiales granulares de tamaño grueso como lo son los conglomerados y las brechas volcánicas empacados en matrices limo-arenosas o bien limo-arcillosas.

Finalmente, se identificaron diferentes coladas de roca ígnea en estado sano (hacia la porción centro del modelo) y con diferentes grados de fracturamiento (hacia sus extremos) con espesores aproximados que van desde los 80 hasta los 120 metros y cuya dirección se desconoce, pero puede ser S-N o bien O-E., producto de los diferentes domos volcánicos que se localizan en las cercanías del centro del AVT. (La descripción detallada de todas las capas identificadas en el modelo hidrogeofísico se pueden consultar en el anexo 2).

Debido a que la geología juega un papel fundamental en la protección del acuífero, se integraron diversos elementos utilizados en el AMC como lo son: abatimiento de los niveles, isolíneas de elevación del N.E., líneas de flujo subterráneo y fracturas, así como algunos focos de contaminación y los pozos de extracción que se encuentran dentro de la AP (Figura 6.16). Con lo anterior se puede realizar un análisis y conocer la relación que existe entre el modelo realizado y el peligro a la contaminación a la cual está expuesto el acuífero.

En este sentido, se trazaron dos secciones transversales (A-A' y B-B') a la dirección del sistema de fracturas San Pedro Totoltepec (Figura 6.14) con la finalidad de aprovechar la información geológico-geofísica disponible del modelo e identificar los cambios litológicos que pudieran considerarse como factor al desarrollo (en menor o mayor medida) del fenómeno de subsidencia y como consecuencia, de los fracturamientos en superficie.

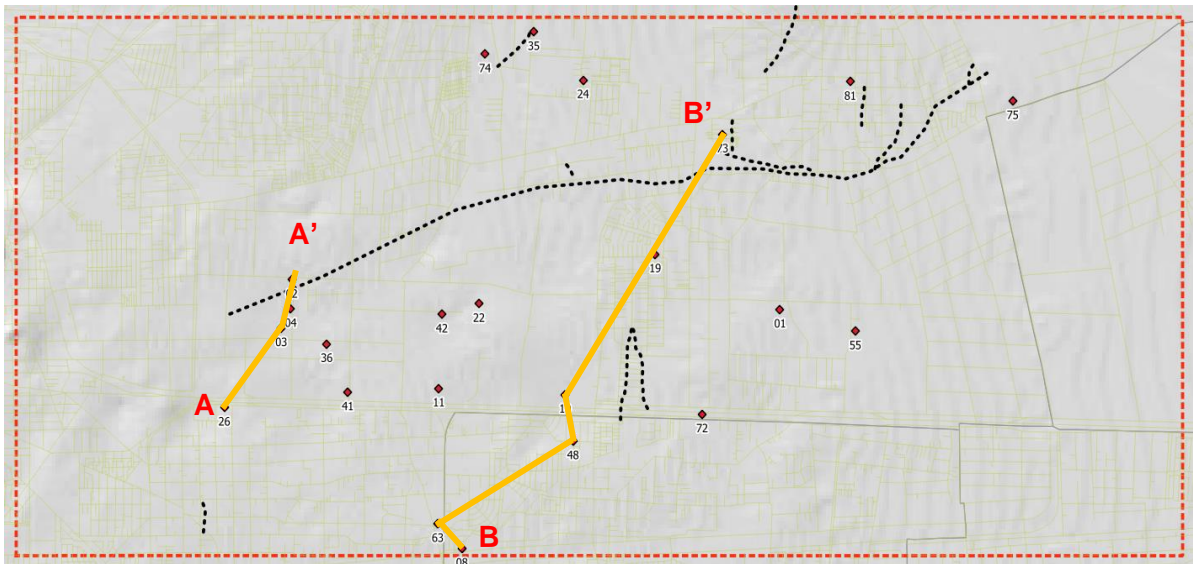


Figura 6.14.- Localización de las secciones geológicas transversales al sistema de fracturas San Pedro Totoltepec (A-A' y B-B')

La figura 6.17 muestra el resultado de la sección que fue trazada en el costado Oeste del sistema de fracturas con un sentido S-N, la cual abarca solamente los puntos 26, 03, 04 y 02. En ella se puede observar de manera general 4 unidades agrupadas de acuerdo con las similitudes que existe entre los diferentes tipos de materiales geológicos de esa zona en particular. La U1 es básicamente el material superficial de relleno ya sea de origen natural y/o artificial que consta de granos finos de origen aluvial y/o lacustre como limos y arenas.

Por su parte, la U2 se compone de materiales granulares de mayor tamaño; en este punto es importante señalar que su espesor disminuye hacia el punto 04 lo que ocasiona un cambio abrupto en el lecho rocoso compuesto por la U3 en dirección hacia el punto 02. Este cambio tan marcado en los espesores de las capas U2 y U3 podría generar la compactación discontinua de las capas superficiales generando a su vez los agrietamientos en superficie ya conocidos. Finalmente, hacia la parte profunda de los puntos 03 y 04 se encuentra la U4 que está constituida por roca volcánica fracturada.

Por su parte, la figura 6.18 muestra el resultado de la segunda sección (B-B') la cual fue trazada en la zona central del sistema de fracturas con una orientación S-N. Para este caso en particular la sección cubre los puntos 60, 49, 08, 63, 48, 10, 19 y 73 y se identificaron tres unidades generalizadas. La U1 se agrupa por los materiales de relleno superficiales, así como aquellos granulares finos con espesores promedio de 50 metros, sin embargo, cercano a los puntos 40 y 10 dicho espesor incrementa de manera considerable disminuyendo nuevamente hacia el punto 19. Lo anterior podría explicar el fracturamiento que se localiza cercano a esta sección.

De manera similar, entre los puntos 19 y 73 surge nuevamente este incremento en el espesor de la U1 lo cual lleva a suponer que estos cambios abruptos en los espesores de las capas de relleno y en el lecho rocoso podrían ser un factor determinante en el desarrollo de los agrietamientos, aunado a la constante extracción de agua subterránea.

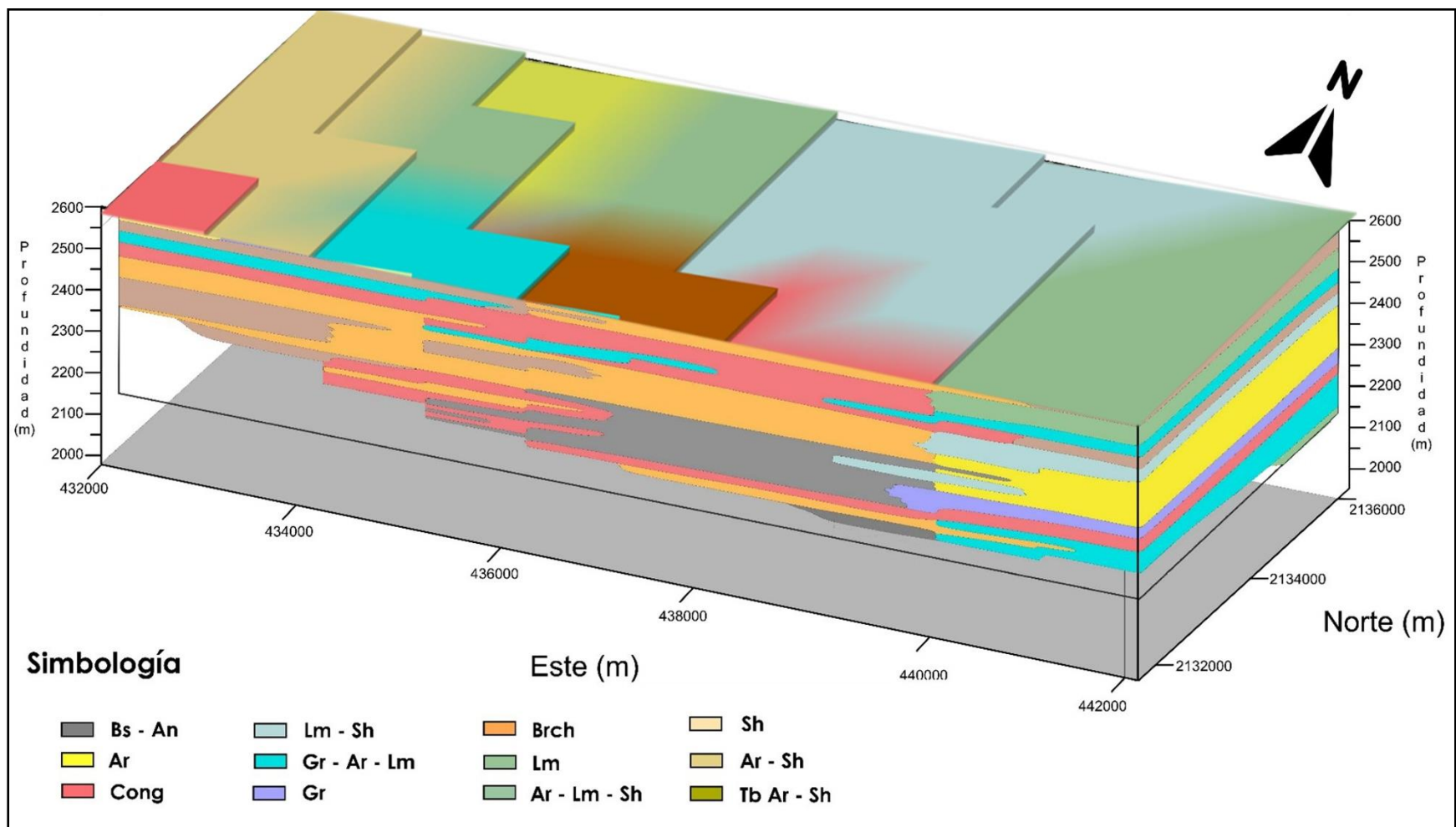


Figura 6.15.- Modelo hidrogeofísico tridimensional del área prioritaria (elaborado con información de RGP y columnas litológicas de los multipiezómetros).

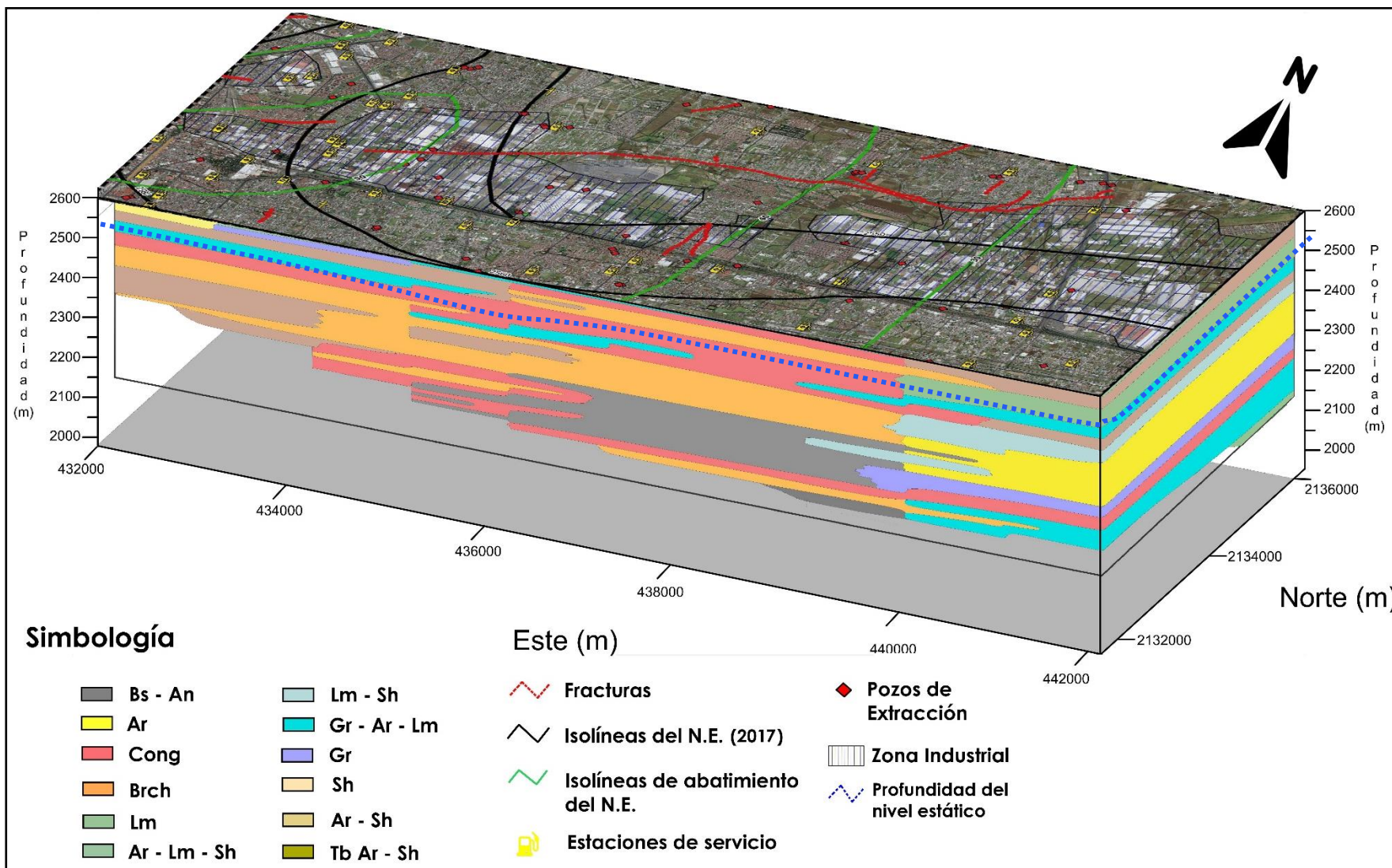


Figura 6.16.- Análisis de la relación de algunos elementos utilizados en el AMC y el modelo hidrogeofísico tridimensional

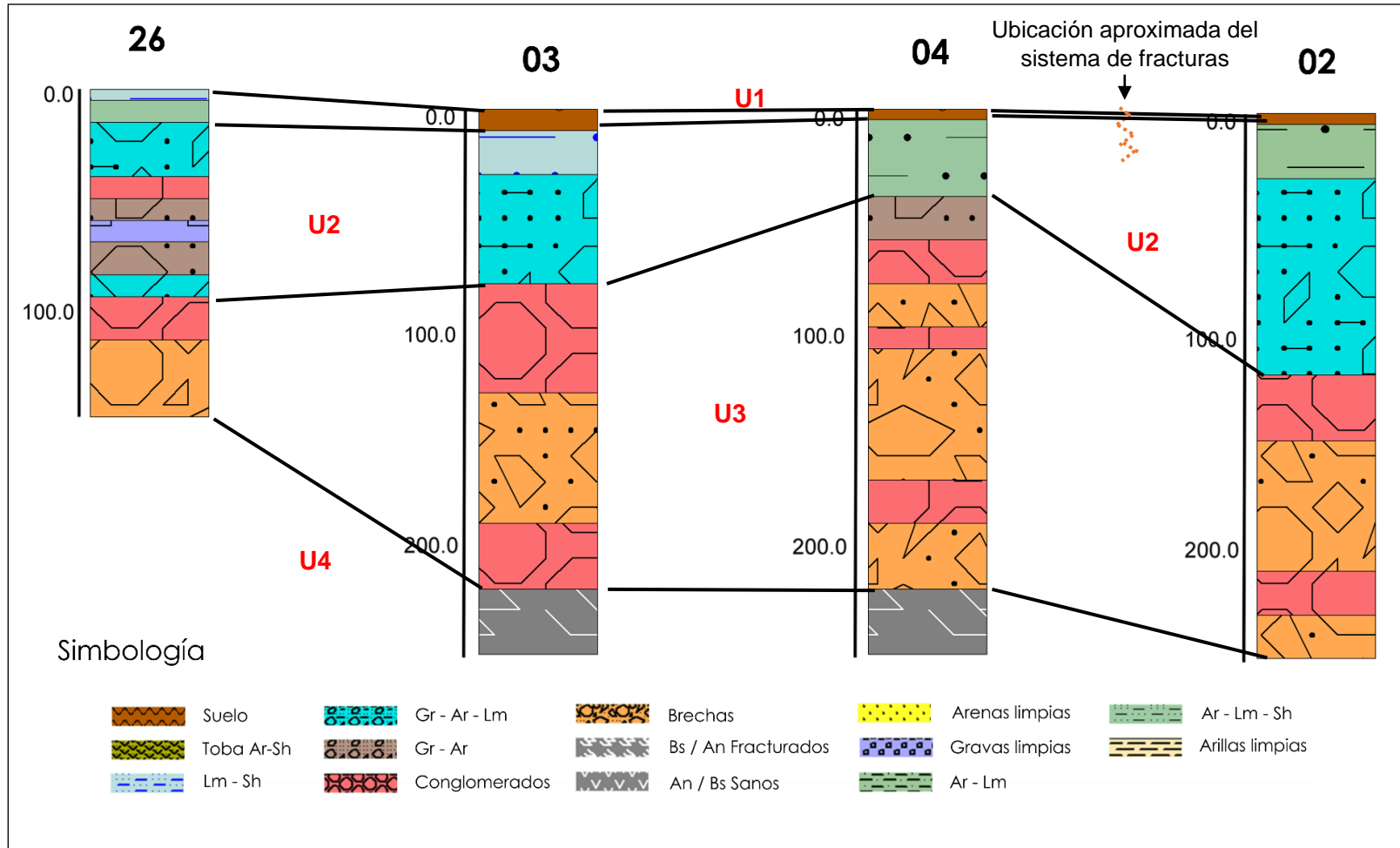


Figura 6.17.- Sección geológica A-A' transversal al sistema de fracturas San Pedro Totoltepec.

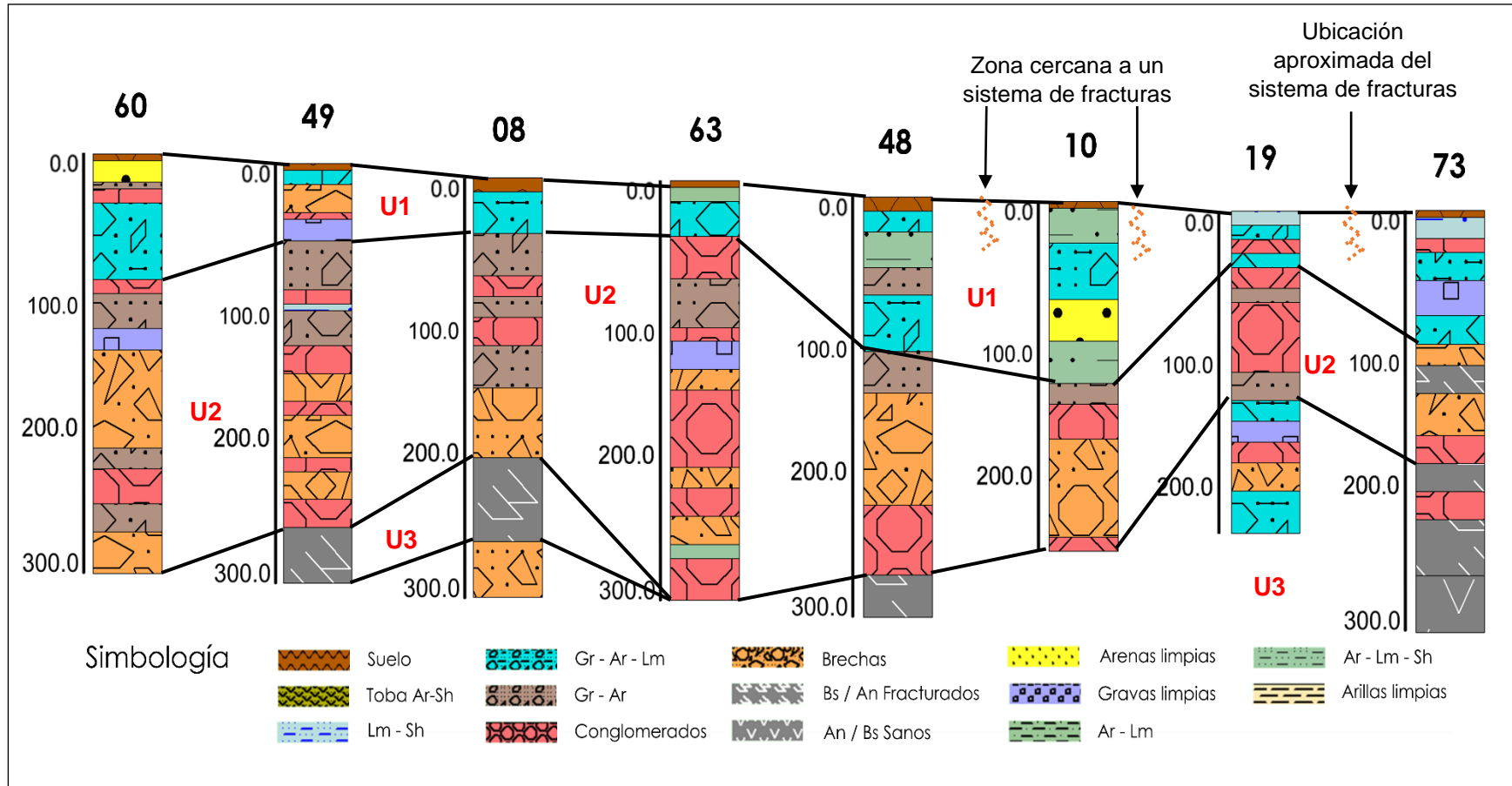


Figura 6.18.- Sección geológica B-B' transversal al sistema de fracturas San Pedro Totoltepec.

### 6.5 Análisis de la relación del modelo hidrogeofísico del AP y el peligro a la contaminación

El peligro al que está expuesto un acuífero puede ser estimado mediante dos elementos principales: la vulnerabilidad intrínseca o específica (Vlaicu & Munteanu, 2008) y la nocividad que representan las diferentes fuentes potenciales (Expósito, 2012; Esquivel, 2015).

Para la presente investigación, la vulnerabilidad intrínseca (VI) fue calculada mediante el método AVI modificado, el cual considera, además de los parámetros de espesor de capa ( $h$ ) y resistividad aparente ( $\rho_a$ ), la influencia de los agrietamientos. Aunado a lo anterior, se tomó como elemento fundamental al modelo hidrogeofísico, que permitió conocer información puntual de zonas en las cuales no se tenía algún tipo de información tanto hidrogeológica como geofísica.

El primer paso fue trazar un mallado sobre la superficie que cubre dicho modelo, agregando puntos de referencia en aquellas zonas en donde no se tenía información de RGP, piezómetros o sondeos geofísicos y considerando aquellos previamente procesados, con la finalidad de cubrir de una manera distribuida toda el área crítica (Figura 6.19).

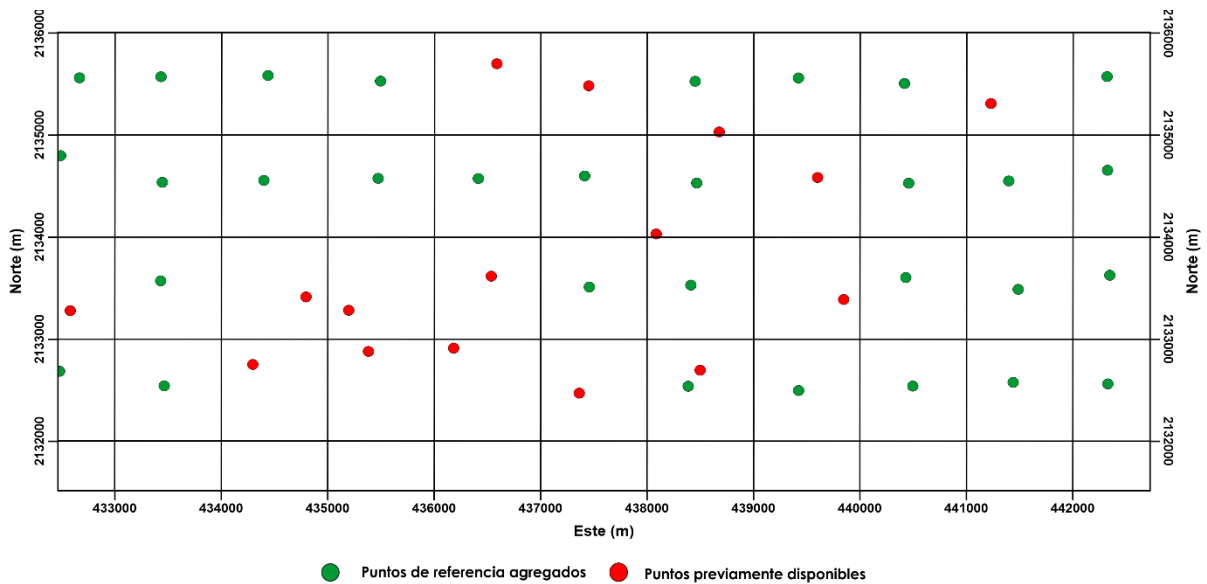


Figura 6.19.- Distribución de puntos de referencia y pozos, multipiezómetros y/o sondeos utilizados para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca.

Cabe señalar que la distribución de puntos se realizó hasta el límite correspondiente con la coordenada 2,132,000 norte, debido a que el modelo hidrogeofísico se limitó hasta dicho punto por la disponibilidad de información.

Con los 47 puntos distribuidos a lo largo y ancho del modelo hidrogeofísico y ubicados de manera espacial, se pudo extraer la litología de cada capa partiendo desde la superficie del suelo hasta el nivel freático, es decir, hasta la zona no saturada, para cada uno de los puntos. Posteriormente se asignó un valor promedio de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) con el apoyo de la Figura 6.15 y de los RGP; y finalmente, con dichos valores se calculó el parámetro de conductancia longitudinal ( $S$ ) mediante la ecuación 4.7 (parámetro de Dar Zarrouk) tanto para cada capa identificada ( $S$  *individual*) como para toda la columna ( $S$  *total*).

Los parámetros correspondientes se encuentran en el anexo 5.

Con los valores puntuales de  $S$ , se realizó una interpolación a través del algoritmo IDW (Qgis, 2020) para inferir y conocer la distribución de los valores en toda la superficie del área prioritaria. La Figura 6.20 representa dicha distribución con valores que oscilan entre 0.6 y 3.6 Siemens.

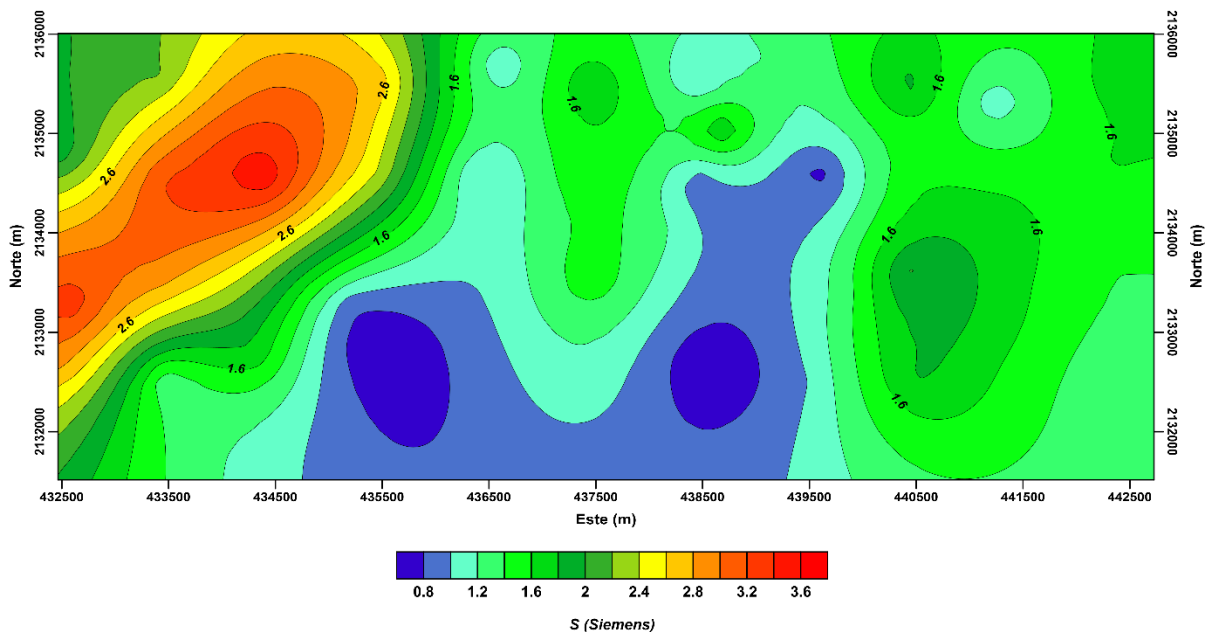


Figura 6.20.- Mapa de conductancia longitudinal ( $S$ ) obtenido para el área prioritaria.

Tomando como referencia lo mencionado por Sendrós (2016), los bajos valores de  $S$  representan zonas con menor protección por parte de las capas de la zona no saturada

hacia el acuífero, por el contrario, a mayores valores de S, la capa estará altamente protegida, es decir, es menos vulnerable. Partiendo de esto y con el fin de llevar los valores a términos de vulnerabilidad se utilizó la clasificación propuesta por [Henriet \(1976\)](#), mencionada en la tabla 5.5.

En este sentido, la clasificación de la vulnerabilidad para el AP considera tres rangos de valores en donde aquellos que varían de 0 a 1.4 Siemens corresponden con una alta vulnerabilidad, de 1.5 a 2.4 Siemens con vulnerabilidad media y de 2.5 a 4 Siemens, con vulnerabilidad baja. De manera adicional, los sistemas de fracturas y su zona de influencia fueron considerados con muy alta vulnerabilidad (Tabla 6.10). El índice asignado es un valor que será utilizado al momento de realizar la cuantificación del peligro.

*Tabla 6.10.- Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca para el área prioritaria.*

Valores de S (Siemens)	Índice asignado	Vulnerabilidad
NA	4	Muy alta
0 – 1.4	3	Alta
1.5 – 2.4	2	Moderada
2.5 – 4	1	Baja

Con base en la clasificación anterior, se realizó el mapa de vulnerabilidad intrínseca del área prioritaria (Figura 6.21). En él se pueden distinguir las distintas zonas de las cuales destaca aquella con vulnerabilidad alta de color naranja que cubre gran parte del centro y que cruza de sur a norte la zona industrial. Aunado a lo anterior, dentro de esta misma zona se localiza el sistema de fracturas más importante de la región que tiene una dirección SO-NE y que a lo largo de su trayecto expone diferentes puntos con una vulnerabilidad muy alta.

Respecto a la nocividad que representan los diferentes focos potenciales de contaminación, se utilizó el mapa realizado en el apartado 6.3 el cual fue clasificado de acuerdo con el método POSH ([Expósito, 2012](#); [Esquivel, 2015](#)), y se delimitó únicamente para la superficie correspondiente con el área prioritaria (Figura 6.22).

De dicho mapa destaca la gran superficie que cubre la zona industrial la cual está señalada con una nocividad elevada. Dentro del mismo polígono correspondiente con el área industrial se encuentran diferentes estaciones de servicio (gasolineras), las cuales de manera general están asociadas con una nocividad moderada, sin embargo, podrían representar un riesgo mayor. De manera adicional, el resto de las estaciones de servicios,

los cementerios y toda la zona urbana están ubicadas dentro del polígono que representan una nocividad moderada.

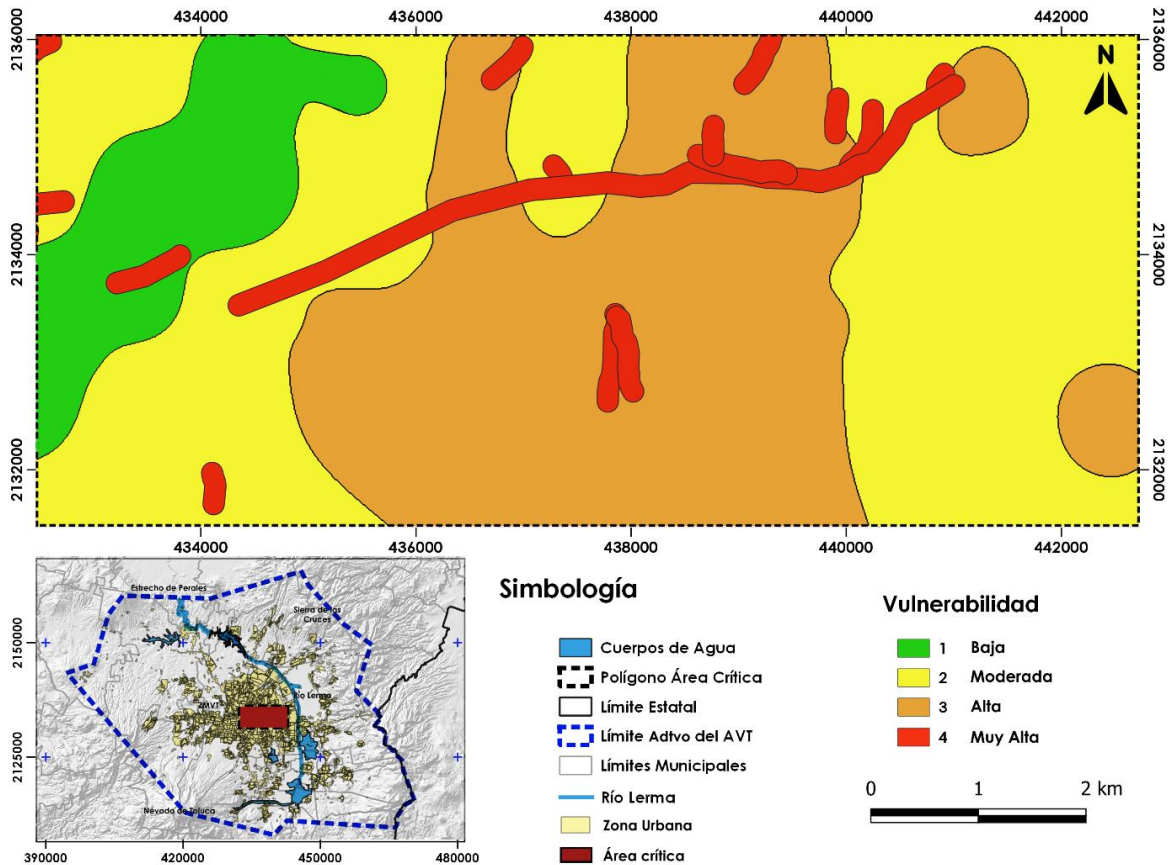


Figura 6.21.- Mapa de vulnerabilidad intrínseca del área prioritaria obtenido mediante el método AVI modificado.

Finalmente, el mapa de peligro se realizó considerando la metodología propuesta por Foster *et al.* (2002), mediante la matriz de multiplicación indicada en el apartado 5.5. Esta matriz involucra la clasificación del mapa de vulnerabilidad mediante el valor numérico del índice asignado y de manera análoga, la clasificación de la carga potencial de nocividad de los focos de contaminación.

Al manejar capas de tipo raster, cada píxel representa un valor numérico por lo que la multiplicación entre ambas capas arrojó un valor para cada píxel dentro de la superficie del área crítica, dichos valores oscilaron en un rango de 1 a 12 (rango de valores disponibles de acuerdo con la Tabla 5.5) y a partir de estos datos se pudo clasificar el peligro considerando la escala propuesta por Expósito (2012) (Figura 6.20).

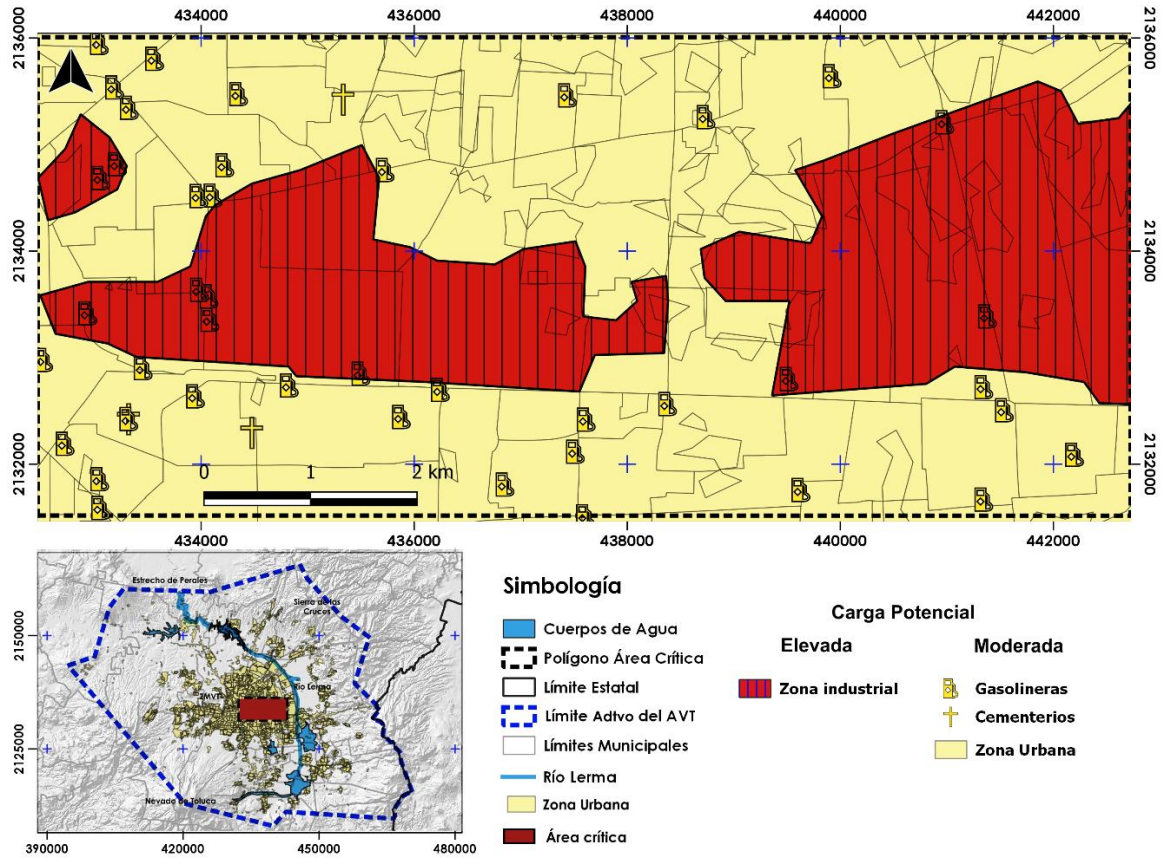


Figura 6.22.- Mapa de carga potencial de nocividad de los diferentes focos de contaminación ubicados dentro del área prioritaria (elaborado con base en Expósito, 2012; Esquivel, 2015).

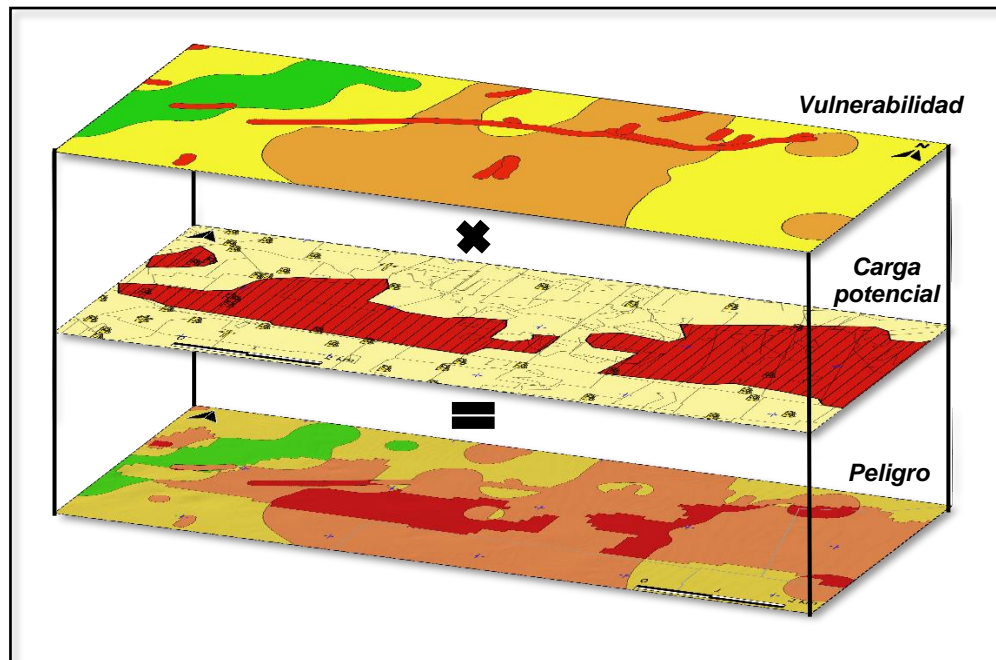


Figura 6.23.- Representación gráfica de la multiplicación de la matriz compuesta por las capas de vulnerabilidad y carga potencial de nocividad para generar el mapa de peligro.

Por su parte, la Figura 6.24 muestra con mayor detalle el mapa de peligro de contaminación resultante de la operación anterior. En él resaltan diversas zonas con peligro muy alto (color rojo) que corresponden, principalmente, a la zona industrial en donde la vulnerabilidad con un índice igual a 4 y la carga potencial con un índice igual a 3 arrojan un valor de 12 indicando un peligro muy alto.

Por su parte, a pesar de que el sistema de fracturas está clasificado con una vulnerabilidad muy alta (índice igual a 4), al momento de realizar la multiplicación en la matriz por una carga potencial de nocividad moderada (índice igual a 2), el resultado arroja una predominancia de peligro alto (color naranja), que es el más extenso en toda el área prioritaria.

Para la zona urbana, en donde la vulnerabilidad y la carga potencial es de tipo moderada (con índices igual a 2 y 3) para ambos casos, se tiene como resultado un peligro predominantemente moderado. Finalmente, el color verde que corresponde con un peligro bajo se ubica solamente en la parte poniente y noroeste del polígono que delimita la zona en estudio.

Con un mapa de peligro a la contaminación definido a escala local es posible analizar la relación que existe entre algunos elementos que han jugado un papel fundamental en la modificación de las condiciones naturales del AVT y el mismo acuífero, es decir, la parte geológica, hidrogeológica, hidrodinámica e hidrogeoquímica.

En la Figura 6.25 se muestra un análisis más detallado considerando la distribución y densidad de pozos clasificados de acuerdo con su caudal de extracción y su uso (destacando aquellos que son de uso público-urbano debido al contacto directo que tienen con la población), la localización y distribución de los principales sistemas de fracturas, las isóneas de elevación del nivel estático y sus líneas de flujo correspondiente.

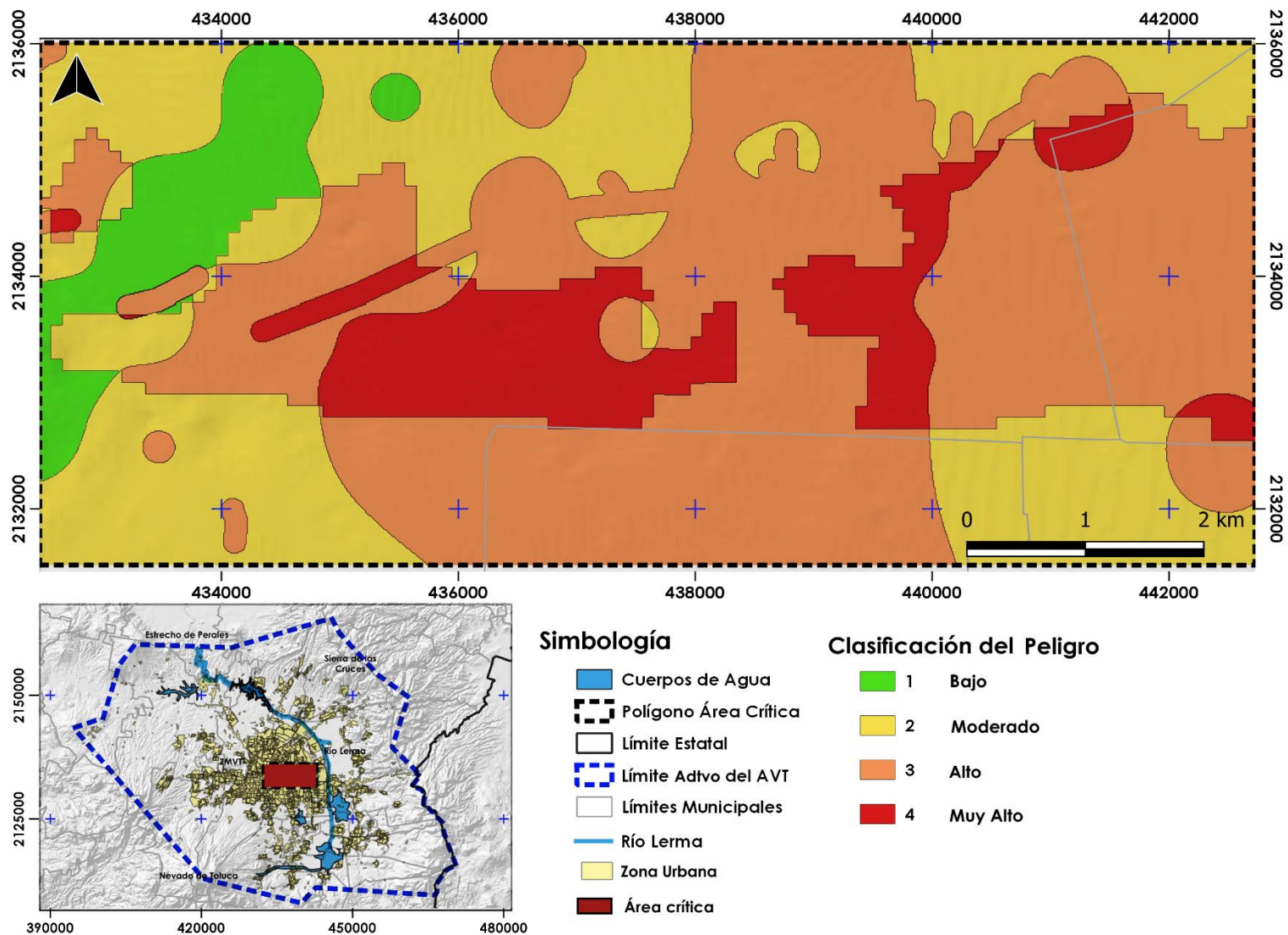


Figura 6.24.- Mapa de peligro resultante de la multiplicación de los mapas de vulnerabilidad intrínseca y carga potencial de nocividad del área prioritaria.

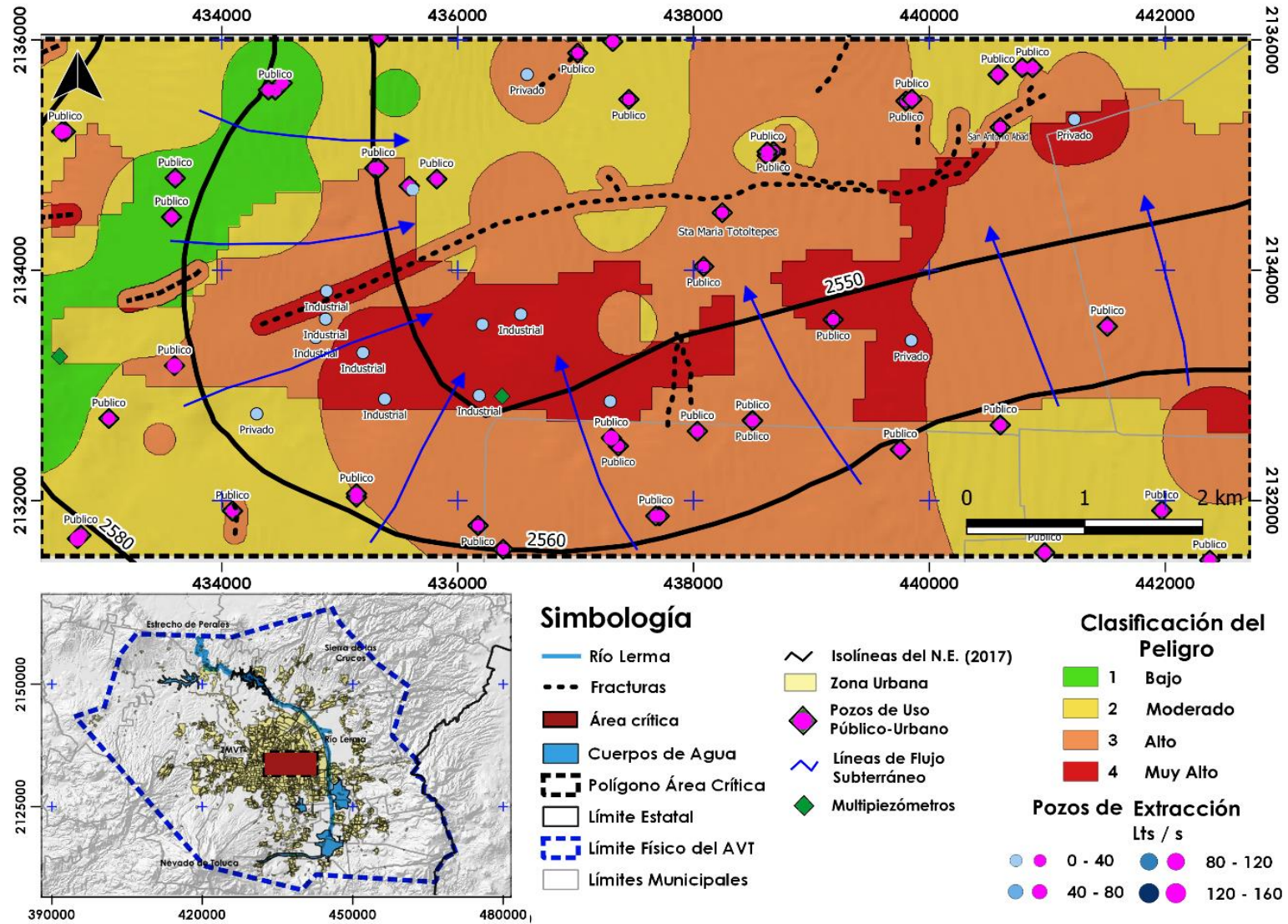


Figura 6.25.- Análisis de la relación que existe entre el mapa de peligro a la contaminación y algunos factores que modifican las condiciones naturales del AVT.

En el mapa de la figura 6.25 es posible identificar aquellos puntos que se ubican en una zona con altas posibilidades de sufrir algún tipo de contaminación ante cualquier escenario desfavorable ya que el flujo subterráneo proveniente desde la parte sur, suroeste y oeste, cruza de manera total y/o parcial la zona industrial y se dirige hacia la zona norte-noreste donde se identifica el sistema de fracturas de San Pedro Totoltepec.

Dentro de este análisis es importante poner atención principal en aquellos pozos de uso público-urbano los cuales son explotados con un caudal promedio que oscila en un rango de 20 a 40 Lt/s en la mayoría de los casos y que, por lo tanto, representan un riesgo primordial a la salud de la población que depende de ellos.

[Martin del Campo et al. \(2014\)](#) a través de estudios hidrogeoquímicos a diferentes pozos del sistema REPDA, identificó que los pozos Sta. María Totoltepec y San Antonio Abad cuentan con niveles de sulfatos por encima de los permitidos por la norma NOM-127. Estos pozos se localizan al costado sur del sistema de fracturas separados solo unos pocos metros lo cual demuestra que aquellos puntos de extracción ubicados en la periferia de las vías preferenciales de contaminación pueden ser afectados. Por lo anterior, se infiere que los pozos ubicados al norte de las fracturas cuentan ya con algunos niveles de contaminación incluso mayores.

Si bien los pozos antes mencionados presentaron niveles anormales de contaminantes dentro de un gran número de pozos muestreados, además de la cercanía con las fracturas, hay dos factores más que influyen, estos son: la profundidad de perforación con la que cuentan cada uno de los pozos y la condición de su construcción, ya que muchos de ellos tienen un largo periodo de tiempo en funcionamiento y no han recibido un mantenimiento adecuado.

En este sentido, con el paso de los años y ante la necesidad de perforar y explorar el acuífero a mayor profundidad, los pozos perforados recientemente cuentan con un contra ademe cementado, así como una tubería de tipo lisa en sus primeros metros, esto con la finalidad de protegerlos ante cualquier evento de contaminación.

En segundo lugar, pero no menos importante, se debe tener especial cuidado en monitorear aquellos pozos de uso industrial que se localizan dentro del polígono que corresponde con las zonas de muy alto riesgo ya que algún incidente podría generar una contaminación en cadena hacia todos los pozos circundantes.

La Figura 6.26, muestra la sobreposición del mapa de peligros en una imagen satelital para identificar más claramente la distribución espacial de los polígonos en la zona urbana. Para este caso en particular es indispensable prestar principal atención a tres sitios en específico: **i)** aquellos pozos de uso público-urbano que se localizan en las cercanías y principalmente al costado norte del sistema de fracturas Totoltepec, **ii)** aquellos pozos de uso industrial y/o público-urbano que se localizan dentro de o en la periferia de la zona industrial (área con peligro muy alto) y **iii)** aquellos pozos que se ubican dentro de la superficie que cubre el mayor cono de abatimiento de la zona centro de la ciudad de Toluca.

Para este tercer escenario, es posible predecir, dadas las condiciones, que los fracturamientos ubicados dentro de esta superficie y que cuentan con una dirección principal suroeste, se extiendan hacia la parte oeste y suroeste del polígono del área crítica, es decir, hacia la parte centro de la ciudad de Toluca y con ello generar mayores afectaciones a la infraestructura y dejando más vulnerable al mismo acuífero.

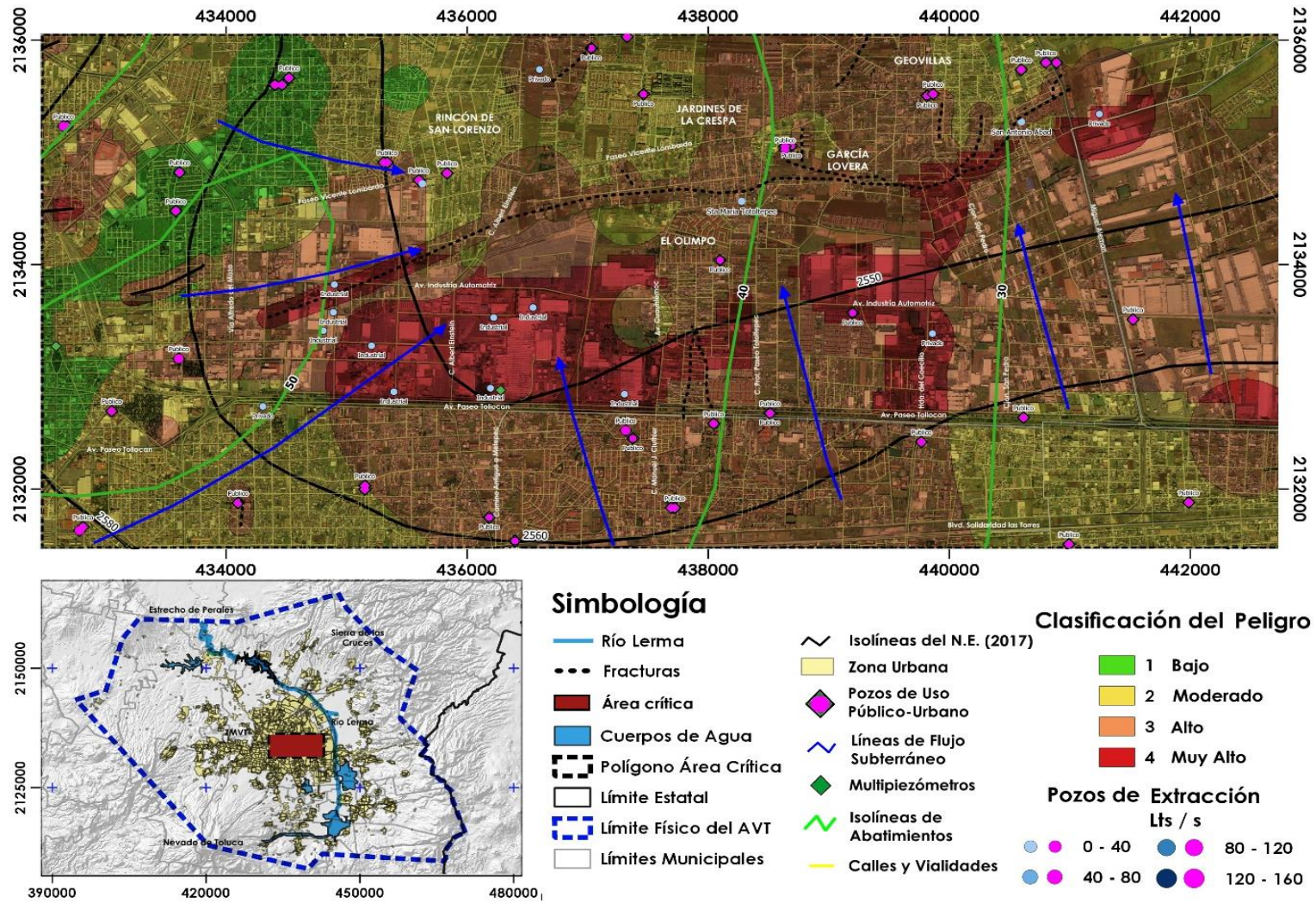


Figura 6.26.- Mapa de peligro sobrepuesto en una imagen satelital que permite identificar de mejor manera la ubicación de las zonas con riesgo alto y muy alto.

Para mostrar las condiciones reales de los sitios I y II, mencionados en el párrafo anterior, se realizó una visita a campo para reconocer las condiciones de algunos puntos que se encuentran dentro de o en los límites correspondientes con las áreas marcadas con un peligro alto o muy alto.

La Figura 6.27 muestra evidencia clara de las condiciones reales de algunos de los puntos que se localizan en los polígonos correspondientes con los peligros alto y muy alto. Es importante señalar que la visita a estos puntos se realizó dentro de las posibilidades de acceso ya que la gran mayoría de los sitios de interés corresponden a empresas o áreas privadas en donde el acceso es restringido.

La fotografía a) muestra el primero de los casos que corresponde con la vialidad más próxima al conjunto de pozos cercanos a la empresa Bosch, la cual se ha visto afectada estructuralmente de manera constante. Considerando que dichos pozos extraen un caudal significativo y que dos de ellos se ubican en la trayectoria de la fractura, el peligro bajo un escenario de contaminación es evidente por lo menos en la periferia de la trayectoria principal de la fractura. A pesar de que la vialidad fue recientemente arreglada, la fractura y algunos daños estructurales son visibles en el sitio y comienza a manifestarse nuevamente un desnivel de aproximadamente de 15 cm.

Para el caso de las fotografías b) y c), se siguió la trayectoria de la fractura hacia una vialidad perpendicular a la anterior (la cual también fue recientemente arreglada) sin embargo, estos escalonamientos y fracturas son evidentes para la parte de las aceras en donde el hundimiento paulatino es evidente y de mayor magnitud ya que para estos casos se midió un desnivel de entre 25 y 30 cm. Es de suma importancia resaltar la vulnerabilidad y el peligro con el que cuenta este sitio en particular ya que, aproximadamente a 5 metros de distancia se localizan unos ductos de Pemex (de los cuales no fue posible conocer su dirección por falta de mayores referencias visuales).

Finalmente, la fotografía d) correspondiente con el tercer punto, se localiza hacia el noreste respecto al sitio anterior y sigue la trayectoria de la fractura principal. Al igual que los casos anteriores, la vialidad había sido recientemente reparada por lo que la problemática era visible solamente en las aceras, pero de manera muy notable. De los puntos visitados este último fue el que presentó un mayor hundimiento ya que se midió un escalonamiento de 35 cm, aproximadamente.

Con lo anterior, no solo se demuestra que las áreas con peligros altos y muy altos se encuentran expuestas a diferentes agentes que representan un peligro latente, sino que también se pudo conocer que las autoridades dan solución temporal a la parte visible de la problemática sin considerar la causa que realmente ocasiona el daño material a la infraestructura pública.



Figura 6.27.- Evidencia fotográfica que señala la condición de algunos puntos ubicados en zonas con peligro a la contaminación alto y muy alto.

# Capítulo 7

## Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con el método propuesto en el presente trabajo de investigación, se realizaron diversas actividades que permitieron generar información complementaria y adicional acerca del acuífero del Valle de Toluca (AVT) así como de la parte centro de este. A partir de dicha información se generaron nuevos mapas de vulnerabilidad y de peligro a la contaminación al cual se encuentra expuesto el recurso hídrico subterráneo.

El presente capítulo permite conocer de manera concreta cuáles fueron los alcances y limitaciones de la investigación y a su vez proponer acciones que ayuden a disminuir el impacto de la extracción intensiva de los acuíferos y que den la pauta a seguir para futuros trabajos relacionados con la caracterización hidrogeológica de los acuíferos disminuyendo la incertidumbre con una mayor información implementada.

## 7.1 Conclusiones

Considerando los objetivos específicos planteados en la presente investigación, es posible mencionar de manera concreta las siguientes conclusiones:

- La búsqueda exhaustiva y continua de información multidisciplinaria permitió generar una base de datos robusta y confiable la cual fue la base fundamental para la conclusión satisfactoria de los objetivos planteados.
- El modelo hidrogeológico general del AVT se elaboró a partir de la información geofísica e hidrogeológica disponible. Esto permitió conocer de manera más detallada la distribución y comportamiento de las capas geológicas que se extienden a profundidad. Se comprobó que a lo largo y ancho del acuífero se tiene una predominancia de materiales vulcano-sedimentarios con rocas ígneas compactadas y fracturadas hacia las zonas montañosas mientras que para la zona centro y oriente existe abundancia de material fino de origen aluvial y lacustre.
- Se generaron los insumos adecuados para realizar el AMC mediante la técnica AHP (por sus siglas en inglés) en donde factores como: agrietamientos, focos de contaminación, subsidencia, abatimientos y densidad de pozos de extracción, definieron aquellas zonas prioritarias las cuales requerían de una investigación local. De estas zonas se seleccionó aquella ubicada en la zona central del Valle de Toluca la cual cubre gran parte de la zona industrial.
- El modelo hidrogeofísico del área prioritaria fue la principal herramienta generada ya que permitió conocer las condiciones hidrogeológicas y geológico-geofísicas locales hasta una profundidad de 450 metros. De igual manera se pudo conocer la distribución de capas y los cambios de facies presentes entre la zona centro y oriente, estando presente un marcado cambio en la litología entre ambas zonas con espesores distintos lo cual, de acuerdo con los resultados, puede ser un elemento clave para la generación de fracturas en superficie. Finalmente, se elaboraron los mapas de vulnerabilidad y peligro para la parte central del acuífero.
- En el contexto de la vulnerabilidad, se aplicó el método AVI modificado, en el cual además de considerar los espesores y valores de resistividad aparente de las capas que se localizan en la zona no saturada del acuífero, se consideró la influencia de los fracturamientos que se encuentran presentes en el área seleccionada. Los resultados indicaron 4 principales zonas de vulnerabilidad que varía desde baja a

muy alta, mientras que el insumo correspondiente con la carga potencial de nocividad de los focos de contaminación varía de moderada a alta.

Finalmente, partiendo de estos dos elementos, se elaboró el mapa de peligro en donde destacan las zonas industriales, las cuales se encuentran dentro de los polígonos clasificados como áreas con muy alto peligro, mientras que lo correspondiente con las fracturas y su zona periférica están ubicadas en áreas con peligro alto.

- Investigaciones hidrogeoquímicas previas y la visita a campo permitieron corroborar la vulnerabilidad y el peligro latente en el que se encuentran diferentes puntos de la zona centro del acuífero, en donde algún incidente que involucre el desplazamiento de algún contaminante provocará la posible contaminación de los pozos vecinos y, por lo tanto, la afectación directa a la población que dependa de ellos.

Con lo anterior se puede concluir que los procesos antropogénicos (en la mayoría de los casos) o naturales (en menor medida) a los cuales se encuentran sometidos los acuíferos, modificarán de manera significativa su estado natural de una forma gradual y ello provocará afectaciones a la infraestructura (en un primer lugar) así como a la salud de la población que depende del recurso hídrico extraído (considerando que el acuífero está expuesto a una gran cantidad de agentes contaminantes y que estos llegaran a entrar en contacto con el acuífero).

## 7.2 Recomendaciones

Debido a lo antes mencionado, es de suma importancia tomar medidas que permitan mitigar el impacto que representa la vulnerabilidad de un acuífero ante la desmedida explotación del recurso subterráneo.

Por lo anterior, se proponen una serie de recomendaciones que, en caso de implementarse o llevarse a cabo, ayudarían en gran medida a atender el problema abordado en la presente investigación:

- Buscar la colaboración entre sector educativo, gubernamental y privado para unificar la información disponible acerca del subsuelo el acuífero y con ello actualizar los modelos conceptuales y numéricos realizados hasta el momento con la única finalidad de disminuir la incertidumbre y tener mejores herramientas para la toma de medidas más asertivas para la protección del acuífero.
- Implementar estrategias que permitan controlar o disminuir (en el mejor de los casos) la extracción intensiva en los pozos ubicados en la región central del acuífero para frenar o desacelerar la inminente ampliación y extensión de los sistemas de fracturas registrados hasta la fecha. Algunas estrategias para considerar pueden ser:
  - No permitir la compra de derechos en esos sitios.
  - Que todos los pozos cuenten con mediciones de caudales de extracción continua para regular dicho caudal.
- Incrementar de manera urgente la red de pozos de monitoreo de niveles de agua y de calidad en la parte central del acuífero y en específico en el área estudiada (ya que por ahora solo se cuenta con dos multipiezómetros), para dar seguimiento y medir de manera constante los niveles piezométricos y los parámetros fisicoquímicos del agua extraída y descartar la contaminación del acuífero.
- Llevar a cabo estudios de calidad del agua sobre los pozos ubicados en las colonias Rincón de San Lorenzo, Jardines de la Crespá, García Lovera y Geovillas, ya que los pozos localizados dentro de estas zonas se encuentran cercanos al mayor sistema de fracturamientos lo cual significa, de acuerdo con estudios previos, la posible presencia de algún contaminante.
- Establecer un plan de videograbación de todos los pozos comenzando desde los más antiguos para conocer su estado actual y con ello implementar acciones de

mejoramiento a aquellos más deteriorados para evitar así la contaminación del acuífero.

- Desarrollar un plan de monitoreo continuo sobre los pozos de tipo industrial ubicados dentro de las zonas de mayor peligro para tener un control sobre los desechos sólidos y líquidos y evitar con ello incidentes que puedan poner en riesgo la integridad del acuífero.
- Dar a conocer los resultados del presente trabajo de investigación con las diferentes estancias gubernamentales, académicas y privadas para retroalimentar la información que se conoce hasta el momento y tomar acciones que permitan tener un manejo sustentable del acuífero.
- Declarar la zona central del AVT como “zona crítica” dentro del manejo del COTAS para alertar a la sociedad sobre la situación actual del acuífero, así como sus posibles escenarios futuros en caso de continuar con los ritmos actuales de extracción.

## Referencias

- Aeschbach-Herting, W., Gleeson, T. (2012). *Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion*. Nat. Geosci. 5 (12), 853-861.
- Agua y Saneamiento de Toluca (AYST) (1972). *Reporte técnico del corte litológico del pozo San Pedro Totoltepec*. Toluca, estado de México.
- Agua y Saneamiento de Toluca (AYST) (1980). *Reporte técnico del corte litológico del pozo Los Ahuehuetes*. Toluca, estado de México.
- Agua y Saneamiento de Toluca (AYST) (1981). *Reporte técnico del corte litológico del pozo Santa María de las Rosas*. Toluca, estado de México.
- Agua y Saneamiento de Toluca (AYST) (2019). *Reporte técnico del corte litológico del pozo Pablo Sidar*. Toluca, Estado de México.
- Agua y Saneamiento de Toluca (AYST) (2018). *Reporte técnico del corte litológico del pozo Tollocan No. 3*. Toluca, estado de México.
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. y Delgado, C. (2013). *Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos*. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 16 (2013): 243-263.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, H.J., Petty, J.R., Hackett, G. (1987). *DRASTIC; a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. USEPA-600/2-87-035, 622 pp.
- Almazán-Vázquez, A. (2017). *Peligros geológicos por fallas y grietas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca con base en un estudio morfoestructural*. Tesis, Facultad de Geografía, UAEMex, México.
- American Society for Testing Materials (D5777 - 00). *Standard guide for using the Seismic Refraction method for subsurface investigations*.
- American Society for Testing Materials (D6429). *Selection of surface geophysical methods for common applications*.
- American Society for Testing Materials (D6431 - 99). *Standard guide for using the Direct Current Resistivity Method for subsurface investigations*.
- American Society for Testing Materials (D6820 - 07). *Standard guide for using the Time Domain Electromagnetic Method for subsurface investigations*.
- Arce, J.L., Macías, J.L., and Vázquez-Selem, L. (2005). *The 10.5 ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, México: Stratigraphy and hazard implications*. Geol. Soc. Am. Bull., 115, 230-248.

- Ariel Consultores S.A. (1996). *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la srede de observación del acuífero del valle de Toluca*. CNA.
- Arroyo-Domínguez N., (2016). *Distribución espacial y evaluación temporal del proceso de consolidación del terreno por la sobreexplotación del agua subterránea*. Tesis doctoral. Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEMex, México.
- Barros, M.S.F., Abud-Louro, V.H., Kenji-Terada, R., Gil-Marques, C.H., Saraiva, F.A. & Hirata, R. (2021). *Vertical electrical soundings in the mapping of vulnerability to contaminations of the Adamantina aquifer in Urania, Sao Paulo, Brazil*. Revista do Instituto de Geociencias – USP. Vol. 21, No. 01, p. 89-102.
- Bense, V.F. (2004). *The hydraulic properties of faults in unconsolidated sediments and their impact on groundwater flow*. Netherlands Research School of Sedimentary Geology (NGS). Tesis doctoral.
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E. Bour, O. & Scibek, J. (2013). *Fault zone hydrogeology*. Earth-science reviews. 127 (2013) 171-192.
- Bense V.F., Van Den Berg, E.H., Van Balen, R.T. (2003). *Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments*. The Netherlands. Hydrogeology Journal, 11(3):319-332.
- Borja, R., Rodríguez, R. (2004). *Aquifer vulnerability changes due to faults and riverbeds in Salamanca, Guanajuato, Mexico*. Geofísica internacional, 43(4): 623-628.
- Borounshaki S. & Malczewski J. (2008). *Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGis*. Computers and Geosciences. 34, pp. 399 - 410.
- Brown, J., Das, P., Al-Saidi, M. (2018). *Sustainable agriculture in the Arabian/Persian Gulf region utilizing marginal water resources: Making the best of a ban situation*. Sustainability. 10 (5), 1364.
- Bücker M, Lozano G.S., Ortega G.B., Caballero M., Pérez L., Caballero L., Pita de la Paz C., Sánchez G.A., Villegas F.J., Flores O.A., Brown E., Werne J., Valero G.B., Schwalb A., Kemna A., Sánchez A.E., Launizar M.N., Valverde P.A y Garay J.F. (2017). *Geoelectrical and electromagnetic methods applied to paleolimnological studies: two examples from desiccated lakes in the basin on Mexico*. Boletín de la Sociedad geológica Mexicana. Vol 69. No. 2. Pp. 279-298.
- Burbey T.J. (2002). *The influence of faults in basin-fills deposits on land subsidence: Las Vegas Valley, Nevada, USA*. Hydrogeology Journal, 10, pp. 525-538.

- Calderhead A.I., Martel R., Alasset P-J., Rivera A., Gárfias J. (2010). *Land subsidence induced by groundwater pumping monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico*. Canadian Journal of Remote Sensing, 36 (1): 9-23.
- Calderhead A.I., Therien R., Rivera A., Martel R., Gárfias J. (2011). *Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico*. Advances in Water Resources, 34, 83-97.
- Carpenter, M.C. (1999). *Land subsidence in the united states*. Circular 1182, U.S.G.S. Galloway D., Jones D.R. e Ingebritsen S.E. eds. Part I, Mining Groundwater, South-Central Arizona. pp. 65-81.
- Castellazzi P., Arroyo-Dominguez N., Martel R., Calderhead A.I. Normand J.C.L., Gárfias J., Rivera A. (2015). *Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data*. International Journal of applied earth observation and geoinformation. 47:102-111.
- Castilla-Rho. J.C., Rojas R., Andersen M.S., Holley C., Mariethoz G. (2019). *Sustainable groundwater management: How long and what will it take?* Global Environmental Change 58 (2019) 101972.
- Chaussard E., Wdowinski S., Cabral-Cano E., Amelung F. (2014). *Land subsidence in central Mexico by ALOS InSAR time-series*. Remote sensing of environment 140: 94-106p.
- Civita, M., De Regibus, C. (1995). *Sperimentazione di alcune metodologie per la vulatazione della vulnerabilità degli aquifer (Development of a methodology for the assessment of aquifer vulnerabilita)*. Quaderni di Geologia Applicata Pitagora 3:63-71.
- Civita, M., De Mario, M. (1997). *SINTACS: un sistema paramétrico per la vulatazione e la cartografiad ella vulnerabilita degli acquiferi allínquinamento: metodologie e automatizzazione*. Bologna, 208 pp.
- Coconi M.E. (2017). *Registros geofísicos de pozos, evaluación de formaciones y aplicaciones a la industria petrolera*. Academia de Ingeniería de México. CDMX, 2017.
- CONAGUA-GTZ (2004). *Modelo de simulación hidrodinámica del Acuífero del Valle de Toluca, Estado de México*. 74 pp.
- CONAGUA-Desarrollo y Sistemas, S.A. (2005). *Zonas de reserva de agua potable para la ciudad de Toluca*. 154 pp.

- CONAGUA-GTZ (2008). *Plan de manejo de la cuenca del río Lerma en el Valle de Toluca. Informe final*. 178 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2015). *Atlas del agua en México*. Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501), Estado de México*. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2018). *Estadísticas del agua en México. Edición 2018*. Ciudad de México.
- CONAPO, (2004). *Desarrollo demográfico y económico de México, 1970-2000-2030*. Primera edición: 12/2004. ISBN: 970-628-833-3.
- CONAPO, (2018). *La situación demográfica de México 2017*. Primera edición: 2018. ISBN: 978-607-427-304-5.
- Constable, S.C., Parker, R.L., Constable C.G. (1987). *Occam's Inversion: A practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data*. Geophysics, 52, 289-300.
- Constructora Geovilla S.A. de C.V. (2019). *Reporte técnico del corte litológico del pozo La Palma*. Toluca, Estado de México.
- Constructora e inmobiliaria Tory S.A. de C.V. (2019). *Reporte técnico del corte litológico del pozo San Cayetano*. Toluca, estado de México.
- Constructora e inmobiliaria Tory S.A. de C.V. (2019). *Reporte técnico del corte litológico del pozo San Diego de los Padres*. Toluca, estado de México.
- CONSULTEC, Ingeniero asociados S.C. (1978). *Estudio del comportamiento de grietas en el Valle del Alto Lerma*. CAVM-SARH.
- Coordinación Municipal de Protección Civil (2018). *Programa municipal de protección civil 2016-2018*. Secretaría del Ayuntamiento, Toluca, México.
- Corapcioglu, M. (1984). *Land subsidence a state-of-the-art review: fundamentals of transport phenomena in porous media*. NATO ASI series (82). pp. 369-444.
- Custodio, E. (2004). *Hidrogeología Urbana: una nueva rama de la ciencia hidrogeológica*. Boletín geológico y minero, 115. 283-288.
- Custodio E. y Llamas M.R. (2002). *Acuíferos explotados intensivamente: conceptos principales, hechos relevantes y algunas sugerencias*. UNESCO, 2002.

- Danielopol, D.L., Griebler, C. (2008). *Changing paradigms in the groundwater ecology - from the 'living fossils traditions to the new groundwater ecology*. Int. Rev. Hydrobiol. 93 (4-5), 565-577.
- Dávila-Hernández N., Madrigal D, Expósito J.L., Antonio X. (2014). *Multi-temporal analysis of land subsidence in Toluca Valley (Mexico) through a combination of persistent scatterer interferometry (PSI) and historical piezometric data*. Advances in Remote Sensing, 3.49-60.
- Dávila, P.R.A., De León, G.H. (2011). *Importancia de la hidrogeología urbana: ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 63, Num. 3. pp. 463-477.
- Deng Z., Yang Y., Yao C., Jia Y., Li C. (2018). *The application of integrated geophysical method in the detection of ground subsidence area*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 153 (2018) 062030.
- De Sousa P.L. and Costa-Morais, D. (2020). *Multicriteria decision model to establish maintenance priorities for wells in a groundwater system*. Water Resources Management. Springer Nature B.V. DOI. 10.1007/s11269-019-02457-8.
- Diaz E.N. (2016). *Estudio geofísico con fines geohidrológicos en el predio Los Lagartos, municipio de Jojutla, Estado de Morelos*. Tesis de Licenciatura. IPN, Ciudad de México.
- Dirección general de construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado (DGCSAPA) (1981). *Reporte técnico del corte litológico del pozo Bomberos No. 3*. Toluca, estado de México.
- Dirección general de construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado (DGCSAPA) (1981). *Reporte técnico del corte litológico del pozo Moderna de la Cruz*. Toluca, estado de México.
- Dirección general de construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado (DGCSAPA) (1981). *Reporte técnico del corte litológico del pozo Vialidad de Metepec No. 6*. Toluca, estado de México.
- Draoui, D., Vias, J., Andreo, B., Targuisti, K., Stitou, J., Messari, E. (2006). *A comparative study of four vulnerability mapping methods in a detritic aquifer under Mediterranean climatic conditions*. EnvironmentalGeology, 54: 1081-1090.
- Durán J.M. y Torres A. (2006). *Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media*. Estudios sobre Estado y Sociedad. Vol. XII No. 30, pp. 129-162.

- Eastman J. R. (2006). *Idrisi Andes – Tutorial*, Clark Labs., Clark University, Worcester, MA.
- Escolero, O., Martínez, S., Kralish, E., Perevochtchikova, M. (2009). *Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático*. 169 pp.
- Esquivel Martínez, J.M. (2015). *Diseño óptimo de redes dinámicas de monitoreo de agua subterránea mediante el uso de SIG y escenarios hidrogeológicos*. Tesis doctoral, CIRA-UAEMEX. Toluca, Estado de México.
- Esteller M.V., R. Rodríguez, A. Carnoda, L. Padilla-Sánchez (2012). *Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: study cases from Mexico*. Environmental Monitoring and Assessment. DOI 10.1007/s10661-011-2376-0.
- Esteller M.V., Epósito J.L., Díaz D.C., Paredes J., Fonseca C.R. (2014). *Explotación intensiva del acuífero del Valle de Toluca: análisis de algunos efectos económicos-ambientales*. Avances en ciencias del agua. CIRA-UAEM.
- Expósito J.L., (2012). *Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México.
- Famiglietti, J.S., Lo, M., Ho, S.L., Bethune, J., Anderson, K.J., Syed, T.H., et al., (2011). *Satellites measure recent rater of groundwater depletion in California’s Central Valley*. Geophys. Res. Lett. 38 (3) L03403-n/a.
- FAO (1976). *A Framework for Land Evaluation, Soils Bulletin 32*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- FAO, (2017). *Watershed management in action – Lessons learned from FAO field projects*. Rome 2017.
- FEA, (2015). *El agua en México: lo que todas y todos debemos saber*. Ciudad de México, Primera Edición: 2006.
- Figueroa-Vega G.E. (1993). *Actualización de la información de los acuíferos del Alto Lerma y la adaptación de su modelo DAS al lenguaje Basic*. CNA.
- Fonseca-Montes de Oca, R.M.G., Ramos-Leal, J.A., Morán-Ramírez, J., Esquivel-Martínez, J.M., Álvares-Bastida, C., Fuentes-Rivas, RM. (2020). *Hydrogeochemical Characterization and Assessment of Contamination by Inorganic and Organic Matter in the Groundwater of a Volcano-Sedimentary Aquifer*. Bulletin of Environmental

- Contamination and Toxicology (2020). 104:520-531. DOI: 10.1007(s00128-020-02819-8.
- Foster, S., Hirata, R. (1988). *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. CEPIS, Tech. Report (WHO-PAHO-CEPIS), Lima.
  - Foster, S.S.D., Hirata, R.C.A., Gomez, D., Dyelia, M. & Paris, M. (2002). *Groundwater quality protection: a guide for wáter utilities, municipal authorities, and environment agencies*. Washington, D.C. The World Bank.
  - Francés A.P., Ramalho E.C., Fernandes J., Groen M., Hugman R., A. Khalil M., De Plaen J., Monteiro Santos F.A. (2015). *Contributions of hydrogeophysics to the hydrogeological conceptual model of the Albufeira-Ribera de Quarteira coastal aquifer in Algarve, Portugal*. Hydrogeology Journal (2015) 23: 1553-1572.
  - Franco, R. (2002). *Adecuación del método de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos (DRASTIC), mediante el uso del trazado de partículas en el acuífero del curso alto del río Lerma, Estado de México*. Tesis de maestría. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
  - García E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía-UNAM. Serie libros No. 6. 5ta edición.
  - García-Palomo A., Macías J., Garduño V (2002). *Miocene to Holocene structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, central Mexico*. Tectonophysics, vol. 318, pp. 281-302.
  - García-Palomo A., Zamorano J., López C., Galván-García A., Carlos V., Ortega r., Macías J. (2008). *El arreglo morfoestructural de la Sierra de las Cruces, México central*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 25, pp. 158-178.
  - Geofísica Juayek (2020). *Base de datos correspondiente al periodo 2002-2020 de estudios y registros geofísicos de pozos en el valle de Toluca*. Villa Guerrero, Estado de México.
  - Geometrics, 2009. *SeisImager 2D, Manual User Guide*. Version 3.3.
  - Geosystem SRL (2008). *A guide to using WinGLink by Geosystem SRL*. Milan, 2008.
  - Geotomo Software, 2010. *Geoelectrical imaging 2D and 3D. Manual User Guide*. Penang, Malaysia.
  - Gleeson, T. Wada, Y., Bierkens, M.F.P., Van Beek, L.H.P. (2012b). *Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint*. Nature 488 (7410), 197-200.

- Goodchild M. F. (1987). *A spatial analytical perspective on geographical information systems*. International Journal of Geographical Information Systems, 1(4), pp. 327–334.
- Griebler, C., Avramov, M. (2015). *Groundwater ecosystem services*. A review. Freshwater Sci. 34 (1), 355-367.
- Grimshaw D. J. (1994). *Bringing geographical information systems into business*. Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex.
- Harter, T. & Walker, L. (2001). *Assessing vulnerability of groundwater*. EE.UU. University of California.
- Harry Vereecken, Andrew Binley, Giorgio Cassini, André Revil and Konstantin Titov (2006). *Applied Hydrogeophysics. NATO Science Series. IV. Earth and Environmental Sciences - Vol. 71*. Springer, The Netherlands.
- Henriot, J.P. (1976). *Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys*. Geophys. Prospect. 24: 344-353.
- Hernández-Conde, I. (2014). *Análisis de subsidencia del terreno en el Valle de Toluca, a partir del método de Dual Pair Interferometry (DPI)*. Tesis de licenciatura, UAEMEX. Toluca, Estado de México.
- Herrera-Casseres, J.C. *Modelado magnetoteléurico tridimensional del campo geotérmico de los Humeros*. Tesis de grado de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Juriquilla, Querétaro, 2018.
- Hubbard S. y Linde N. (2010). *Hydrogeophysics. In: Treatise on Water Science* (ed. S. Unlenbrook), pp. 401-434. Elsevier, Amsterdam.
- Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM), (1994). *Carta geológica del Estado de México*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2020). *Principales resultados del Censo de Población y Vivienda, 2020*.
- INEGI (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V*.
- Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. (1977). *Investigaciones geofísicas para la detección de grietas en los valles de Toluca e Ixtlahuaca-Atzacomulco*. CAVM-SARH.
- Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. (1977). *Actualización del levantamiento de grietas en los valles de Toluca e Ixtlahuaca-Atzacomulco*. CAVM-SARH.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2008a). *Levantamiento geofísico en el Valle de Toluca, Estado de México. Sitio San Pedro*. Dic. 2008.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2008b). *Levantamiento geofísico en el Valle de Toluca, Estado de México. Sitio Almoloya*. Dic. 2008.
- Jachens, C.R. y Holzer, L.T. (1982). *Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona*. Geological Society of America Bulletin. 93: 998-1012.
- Jakeman, A.J., Barreteau, O. Hunt, R.J., Rianudo, J.D. and Ross, A. (2016). *Integrated groundwater management concepts approach and challenges*. Cham: Spinger International Publishing.
- Jamin, P., Dollé, F., Chisala, O.P., Popescu, I.C., Hérivaux, C., Dassargues, A., Brouyère, S. (2012). *A regional flux-based risk assessment approach for multiple contaminated sites on groundwater bodies*. Journal of contaminant hydrology. 127:65-75.
- Kalinski, R.J., Kelly, W.E., Bogardi, I. & Pesti, G. (1993). *Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers*. Journal of applied geophysics, 30 (1993). 161-173.
- Kattaa, B., Al-Fares, W., Al-Charideh., A.R. (2010). *Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method*. Journal of the environmental management, 91: 1103-1110.
- Kelly, W.E. and Mares, S. (1993). *Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice*. Developments in water science. 44. Elsevier Science publishers B.V. Amsterdam, The Netherlands.
- Kirsch R. (2009). *Groundwater geophysics, a tool for hydrogeology*. Second edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. DOI 10.1007/978-3-540-88405-7.
- Lamoreaux, P.E. (1991). *Environmental effects to overexploitation in a karst terrane*. XXIII IAH Congress, pp. 103-113. Puerto de la Cruz.
- Laurini R. and D. Thompson (1996). *Fundamentals of Spatial Information Systems*, Academic Press Inc., London.
- Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (1987). *Geohidrología del valle de Lerma*. DGCOH.
- Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (1992). *Estudio para el diagnóstico del acuífero del valle de Toluca, para implementar la reglamentación de la extracción del agua subterránea*. GEM.

- Linde N. (2014). *Falsification and corroboration of conceptual hydrological models using geophysical data*. Wiley Interdiscip. Rev. Water 1 (2), 151-171.
- Loehnberg A. (1960). *Plan que se propone para incrementar el abastecimiento de la ciudad de México por medio del sistema Lerma*. DGCOH.
- Loke, M.H. and Barker R.D. (1995). *Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections*. Geophysics, 60 (60), 1682-1690.
- López M.A. (2019). *Cartografía geológico-ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca con énfasis en controles estructurales y su influencia en las características hidrogeológicas del área*. Tesis, Facultad de Geografía-UAEM.
- López-Ramos E., (2008). *Geología general y de México*. México. Trillas, 1993 (reimpreso en 2008).
- Lugo Hubp J & Códova Carlos (1992). *Regionalización geomorfológica de la República Mexicana*. Instituto de Geografía, UNAM. Ciudad de México. 1992.
- Llamas, M.R. (1989). *Hidrogeología de las zonas áridas: usos y abusos de las aguas subterráneas*. R.A.C.E.F.N., pp: 239-251. Madrid.
- Llamas, M.R. (1991). *Groundwater exploitation and conservation of ecosystems*. XXIII IAH Congress, pp. 115-131. Puerto de la Cruz.
- Llamas, M.R. y Custodio, E. (1999). *Aguas subterráneas*. *Afters Internationals*, 45-46: 35-67.
- Llamas, M.R., Custodio, E. (2003). *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. Lisse, Países Bajos, Balkema, 478 p.
- Maillet, R. (1947). *The fundamental equations of electrical prospecting*. Geophysics, 12 (4): 529-556.
- Malczewski J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Jhon Wiley and Sons, Toronto.
- Malczewski J. (2006). *Integrating multicriteria analysis and geographic information systems: the ordered ewighted averaging (OWA) apporach*. Int. J. Environmental Technology and Management. 6 (1/2), pp. 7 - 19.
- Malczewski J. & Riiner C. (2005). *Exploring multi criterio decission strategies in GIS with linguistic quantifiers: a case of study of residential quality evaluation*. Journal of geographical systems. 7(2). pp, 249-268.
- Margat J., (1968). *Vulnerabilité des nappes d'eau souterraines á la pollution*. Bases de la cartoigraphie. BRGM No. 68. SLG 198 HYD. Orléans, France.
- Margat, J., Van der Gun, J. (2013). *Groundwater around the world*. CRC Press.

- Martín del Campo, M.A., Esteller, M.V., Expósito, J.L. & Hirata, R. (2014). *Impact of urbanization on groundwater hydrodynamics and hydrochemistry of the Toluca Valley Aquifer (Mexico)*. Environ Monit Assess (2014). 186:2979-2999.
- Mejía, J.A., Rodríguez, R., Armienta, A., Mata, E., Fiorucci, A. (2007). *Aquifer vulnerability zoning, an indicator of atmospheric pollutants input? Vanadium in the Salamanca aquifer, Mexico*. Water, air and soil pollution, 185(1-4): 95-100.
- Musset, A.E. and Khan, M.A. (2000). *Looking into the earth. An introduction to geological geophysics*. Cambridge University Press.
- Milsom J. (2003). *Filed geophysics, the geological field guide series*. Third edition. Jhon Wiley & Sons Ltd. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- National Research Council (2000). *Seeing into the earth*. National Academy Press, Washington D.C., 2000.
- Oficina de Estudios Especiales de la CHCVM-SRM. (1970). *Estudios de los acuíferos del alto Lerma*. Pub. No. 7, 1970.
- Ortiz Madrid, F.H. (2010). *Estimación de la recarga en el acuífero del Valle de Toluca con la aplicación de un SIG*. Tesis de maestría. CIRA-UAEMEX. Toluca, Estado de México.
- Pacheco, M.J. (2007). *Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*. Tesis doctoral. Querétaro, México: UNAM.
- Pacheco-Martínez J, Hernández-Marín M, Burbey T.J, González-Cervantes N, Ortíz-Lozano J.A, Zermeño-De-León M.E, Solís-Pinto A. (2013). *Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico*. Engineering Geology 164 (2013) 172-186.
- Palmstrom A. (2001). *Measurement and characterization of rock mass jointing*. Ovre Smestad vei 35e, N-0378 Oslo, Norway.
- Paredes, T.J. (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero del valle de Toluca, mediante el método SINTACS modificado*. Tesis de maestría. Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEMex, Toluca, Estado de México, 2010.
- Paredes-Bartolomé, C. y Flórez-Baquedano, F. (2001). *Evaluación eficiente de la densidad de fracturación*. Boletín Geológico y Minero. Vol. 112-1, 51-64. ISSN 0366-0176.
- Patoni, M.K y Sánchez L.E.D. (2018). *Estimación de la recarga del acuífero del Valle de Toluca, Estado de México, mediante los métodos Rudo y Análisis de las*

- variaciones del nivel de agua subterránea*. Tesis de Licenciatura, UAEMEX. Toluca, Estado de México.
- Perforaciones Leor, S.A. (1989). *Cuantificación del agua subterránea en el valle de Lerma, para determinar las causas de la disminución de caudales de extracción*. DGCOH.
  - Pizzol, L., Critto, A., Agostini, P., MARcomini, A. (2011). *Regional risk assessment for contaminated sites, part 2: ranking of potentially contaminated sites*. Environmental international, 37: 1307-1320.
  - Poland, J.F. (1984). *Mechanics of land subsidence due to fluid withdrawal: Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal. Prepared for the international Hydrological Programme, Working group 8.4, Joseph F. Poland Chairman and Editor*. Pg. 37-54.
  - Prokopovick, N. (1979). *Genetic classification on land subsidence*. En: Saxena, S.K. (ed.) *Evaluation and prediction of subsidence*. Proc. of the Int. Conf., Pensacola Beach, Florida, 1978, Am. Soc. Civ. Eng. New York. pp. 389-399.
  - Promotora Agrícola Industrial S.A. de C.V. (1990). *Reporte técnico del corte litológico del pozo Geovillas de San Mateo*. Toluca, estado de México.
  - Prudhomme K.D., A. Khalil M., Shaw G.D., Speece M.A., Zodrow K.R., Malloy T.M. (2019). *Integrated geophysical methods to characterize urban subsidence in Butte, Montana, U.S.A*. journal of Applied Geophysics 164 (2019) 87-105.
  - Pulido Bosh, A. (1993). *Sobreexplotación y contaminación de acuíferos*. V. Reun. Nac. Geol. Amb. Y Orden. Territ. I: 75-92. Murcia.
  - QGIS Development Team (2020). *QGIS Geographic Information System*. Open-Source Geospatial Foundation. 2009.
  - Raisz, E. (1964). *Landforms of Mexico (mapa en escala 1:3,000,000)*. Cambridge, Mass.
  - Rao M., S. V. C. Sastry, P. D. Yadar, K. Kharod, S. K. Pathan, P. S. Dhinwa, K. L. Majumdar, D. S. Kumar (1991). *A Weighted Index Model for Urban Suitability Assessment – A GIS Approach*. Bombay Metropolitan Regional Development Authority, Bombay.
  - Richey, A.S., Thomas, B.F., Lo, M.H., Reager, J.T., Famiglietti, J.S., Voss, K., et al. (2015). *Quantifying renewable groundwater stress with grace*. Water Resour. Res. 51 (7), 5217-5238.

- Rockware. Earth Science Software, Consulting and Training (2016). *Rockworks 16 tutorial: Borehole Manager*. RockWare Inc. 2221 East St. # 1 Golden CO. USA.
- Ross, A.L. & Frohlich R.K. (1993). *Fracture trace analysis with a geographic information system "GIS"*. *Bulletin of the association of engineering geologists*. Vol. XXX, No. 1, 1993. pp. 87-98.
- Rubin Y. y Hubbard S. (2005). *Hydrogeophysics*. Springer, The Netherlands.
- Saaty T. L. (1977). *A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures*. *J. Math. Psychology*, 15, pp. 234–281.
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy processes*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty. T.L. and Vargas L.G. (2012). *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. 2<sup>nd</sup> Edition. Springer.
- Samo Drobne and Anka Lisec (2009). *Multi.attribute decisión analysis in GIS: Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging*. *Informatica* 33. 459-474.
- Sánchez Hernández, J.M. (2013). *Redes de monitoreo del agua subterránea en el acuífero del Valle de Toluca. Propuesta de su distribución espacial mediante el manejo de factores hidrogeológicos, ambientales y socioeconómicos*. Tesis de licenciatura, UAEMEX, Toluca, estado de México.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano (SEDUYM) (2019). *Plan estatal de desarrollo urbano del estado de México 2019*. Gobierno del Estado de México.
- Sendrós, B.I.A. (2016). *Uso de técnicas geofísicas en la planificación de recursos hídricos subterráneos. Aplicación en acuíferos mediterráneos*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. Barcelona, 2016.
- Sendrós A., Himi, M., Lovera, R., Rivero, L., García-Artigas, R., Urruela, A. & Casas, A. (2020). *Electrical resistivity tomography monitoring of two managed aquifer recharge ponds in the alluvial aquifer of the Llobregat River (Barcelona, Spain)*. *Near surface geophysics*, 2020, 18, 353-368.
- Servicios Geológico S.A. (1996). *Estimación preliminar de los recursos de agua subterránea en la cuenca alta del Río Lerma hasta el estrechamiento de Atlacomulco*.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2002). *Carta geológico-minera Ciudad de México (E14-2)*. Primera Edición. Pachuca. Hgo.
- Sheng, Z. and Helm, D.C. (1995). *Conceptual models for earth fissuring in Las Vegas Valley, Nevada, USA*. Land subsidence (proceeding of the 5<sup>th</sup> international

- symposium of land subsidence, The Hague, Oct. 1995). IAHS Publ. no. 234, 1995: 381-387.
- Simon H.A. (1977). *The new science of management decision, upper saddle river*. NJ: Prentice Hall, 3rd edition.
  - Srinivasamoorthy, K., Vijayaraghavan, K., Vasanthavigar, M., Rajivgandhi, R., Sarma, V.S. (2011). *Integrated techniques to identify groundwater vulnerability to pollution in a highly industrialized terrain, Tamilnadu, India*. Environmental monitoring and assessment. 182: 47-60.
  - Steelman C.M., Arnaud E., Pehme P., Parker B.L. (2016). *Geophysical, geological and hydrogeological characterization of a tributary buried bedrock valley in southern Ontario*. NRC Research Press. Can. Earth Sci. 55: 641-658 (2018).
  - Sudicky E.A. (1986). *A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer: spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process*. Water Resources Research 22, 2069-2082.
  - Terhemba, B.S., Obiora, D.N., Josiah, C.U., Paul, E.O., Hilary, J. & Ibout, J.C. (2016). *Aquifer vulnerability mapping in Katsina-Ala area, central Nigeria using integrated electrical conductivity (IEC)*. Journal of environment and earth science. Vol. 6, No. 6, 2016.
  - Terzaghi, K. (1956). *Theoretical soil mechanics*: John Wiley and Sons Inc. New York.
  - Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., Peña, F. (2009). *Subsidencia del terreno*. Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra. Vol. 1. pp. 173.
  - United Nations, (2019). *Department of economic and social affairs, Populations division (2019). World populations prospects 2019, online edition. Rev.1*.
  - Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) (2013). *Estudio de la subsidencia y agrietamientos en el acuífero Valle de Toluca en el Estado de México*. Elaborado para Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico de la Comisión Nacional del Agua (Dirección Local Colima), Convenio No. CGPEAYS-UAEM-07/2013, reporte interno, 229 p.
  - Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), (1994). *Mapa geológico del estado de México*.
  - U.S. Department of Energy's Environmental Management Science Program, National Research Council. *Research Needs in Subsurface Science*. National Academy Press, Washington D.C., 2000.

- U.S. Global Change Research Program, USGCRP Water Cycle Study Group. *A plan for a new science initiative on the global water cycle*. 2001.
- Valcarce-Ortega, R.M., Rodríguez-Miranda, W.R. & Jorge-Díaz, Z. (2020). *Aplicación de parámetros geoelectrónicos en el estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas*. Minería y geología. Vol. 36, No. 4, oct-dic, 2020, p. 390-403.
- Van Stempvoort, D., Ewert, L., Wassenaar, L. (1992). *Aquifer vulnerability index (AVI): a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping*. Canadian Water Resources Journal. 18:25-37.
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthi, K., Prasanna, M.V. (2012). *Evaluation of groundwater suitability for domestic, irrigational and industrial purposes: a case study from Trirumanimuttar river basin, Tamilnadu, India*. Environmental monitoring and assessment. 184: 405-420.
- Vergara, V., Gutiérrez, G. & Flores, H. (2009). *Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Morroa a contaminación por plaguicidas aplicando la metodología DRASTIC*. Ingeniería y Desarrollo. (26), 51-64.
- Veytia B.M. (1960). *Estudio geohidrológico de la parte alta de la cuenca del río Lerma*. DGCOH. Dic. 1960.
- Vlaicu, M. & Munteanu, C.M. (2008). *Karst groundwater vulnerability assessment methods*. Travaux de l'Institut de Speologie Emile Racovitza, 47, 107-118.
- Vrba, J. & Adams, B. (2008). *Groundwater early warning monitoring strategy: A methodological guide*. UNESCO.
- Wang, G.Y., You G., Zhu J., Yu J. Li W. (2016). *Earth fissures in Su-Xi-Chang, Region, Jiangsu, China*. Surv Geophys. 37: 1095-1116.

#### Sitio Web

- Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) (2021). Consultado en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=reporte>
- Real Academia Española (2021). *Subsidencia*. Consultado en: <https://dle.rae.es/subsidencia>

# Anexos

**Anexo 1.** Coordenadas de localización de los piezómetros, pozos de extracción y sondeos geofísicos utilizados para la elaboración del modelo hidrogeofísico.

ID	Nombre	Coordenadas		
		X (m)	Y (m)	Z (msnm)
<b>Multipiezómetros</b>				
01	PL-106, Almoloya del Río	448358.69	2118457.18	2571.3
02	PL-109-1, Rancho el Pastor	447654.97	2119565.66	2572.3
03	PL-113, Casco Hacienda Atenco	446176.25	2121291.14	2573.9
04	PL-118, San Mateo Mexicaltzingo	438235.13	2123870.35	2604.1
05	PL-119, Zócalo San Pedro Tlaltizapán	447553.65	2122946.88	2575.0
06	PL-120-1, Rancho las Palomas La Gloria Pozo 24 (DDF)	449877.97	2122866.61	2575.3
07	PL-122-1, Ejido Capulhuac	450122.94	2123815.68	2572.8
08	PL-126, Ganadería Atenco Oeste de la Hacienda Atenco	443597.33	2122220.97	2573.6
09	PL-128, Rancho Tabachin. Hoy Rancho El Carmen	449797.85	2127726.17	2571.6
10	PL-130, San Pedro Cholula	449262.76	2130583.02	2573.2
11	PL-137, San Matías Transfiguración	422298.36	2131181.98	2770.4
12	PL-140, Metepec	435903.61	2128528.80	2628.1
13	PL-141, Sta. María Nativitas	433927.07	2124469.38	2694.0
14	PL-142, Calimaya	435811.03	2119603.25	2669.2
15	PL-143, San Antonio la Isla	439792.57	2119721.92	2586.6
16	PL-144, Tenango de Arista	438283.23	2112107.46	2599.9
17	PL-145, San Pedro Techuchulco	445292.27	2113760.41	2573.3
18	PL-156, San Lucas Tunco	443301.76	2126740.09	2573.9
19	PL-158, Capultitlán	430479.55	2129378.53	2705.9
20	PL-162, San Pablo Autopan	429459.80	2141203.96	2608.8
21	PL-163, San Diego Linares	432417.27	2144112.75	2585.8
22	PL-164, San Agustín de los Mimbres, Oztolotepec	441597.93	2150750.75	2617.0
23	PL-165, San Isidro Km. 14.900, Toluca	423542.33	2142395.95	2626.4
24	PL-166, Ex-Hacienda del Rio Almoloya de Juárez.	421744.33	2151625.03	2563.5
25	PL-169	426923.52	2127733.91	2798.0
26	PL-170, Desviación a Tepejalpa Zinacantepec.	419254.40	2128038.44	2880.5
27	PL-171, La Puerta Zinacantepec.	413099.19	2123618.88	3117.1
28	PL-175, Ejido de la Laguna Almoloya de Juárez.	404230.35	2144814.57	2601.8
29	PL-176, La Unión de Ocoyotepec	410911.18	2153264.43	2566.6
30	PL-177, Entrar al Valle Bajo Ejido del Hospital Villa	404616.99	2148990.01	2575.6
31	PL-179, Rancho la Manga Xonacatlán	442659.16	2145183.98	2572.3

**Anexo 1.** Coordenadas de localización de los piezómetros, pozos de extracción y sondeos geofísicos utilizados para la elaboración del modelo hidrogeofísico.

ID	Nombre	Coordenadas		
		X (m)	Y (m)	Z (msnm)
32	PL-201, Jardín Reforma Toluca	432581.30	2133280.38	2642.9
33	PL-202, AUTOMEX Toluca.	436266.28	2132895.21	2610.1
34	PL-203, COLORQUIM, S.A. Toluca.	443757.98	2132670.77	2572.9
35	PL-205, Km. 58+500 Dos Pinos Toluca - San Bartolo	435602.79	2137584.91	2601.0
36	PL-206, Rio Lerma, Oztolotepec	443082.78	2140756.57	2569.9
37	PL-212, Naucalpan-Toluca Km. 53, México	439845.64	2141135.84	2576.6
38	PL-218-1, Poste 414 Sta. María Tetitla Hacienda Buena	439196.61	2147684.97	2583.2
39	PL-225, Temoaya.	437609.29	2152516.11	2660.4
40	PL-226, Rancho Rosalinda II Temoaya.	425039.54	2151703.26	2573.6
42	PL-358, Santa Juana Almoloya de Juárez.	420590.70	2147880.00	2576.2
43	PL-359, San Agustín Citlalli Almoloya de Juárez.	416010.79	2153925.44	2555.0
44	PL-361, Hacienda Tabernillas Almoloya de Juárez.	408983.47	2153172.61	2598.8
45	PL-362, Ejido El Cerrillo, Almoloya de Juárez.	409716.98	2148840.87	2589.1
46	PL-363, Cieneguillas Almoloya de Juárez.	410630.76	2145488.87	2588.2
47	PL-364, San Diego Almoloya de Juárez	416372.45	2147022.96	2595.5
48	PL-366, Santa Elena Camino a Cerrillos	425508.26	2145154.17	2601.7
49	PL-367, Poblado de Almoloya de Juárez	420563.89	2141763.25	2606.4
50	PL-368, El Pino, Almoloya de Juárez.	415767.96	2139325.81	2639.8
51	PL-369, San Pedro Toltepec, Toluca.	434387.34	2140386.32	2592.9
<b>Registros geofísicos (pozos de extracción)</b>				
01	Pozo Ahuehuetes	439185.0	2133571.0	2594
02	Pozo Bosch 1	434889.0	2133819.0	2610
03	Pozo Bosch 2	434796.0	2133415.0	2620
04	Pozo Bosch 3	434880.0	2133576.0	2623
05	Pozo Bosques del Nevado	420867.0	2127372.0	2909
06	Pozo Las Brujas	426489.0	2141472.0	2633
07	Pozo Calimaya	436710.0	2121166.0	2648
08	Pozo Casa Blanca	436386.0	2131577.0	2620
09	Pozo Casa de Cultura	437504.0	2111816.0	2626
10	Pozo Cervecera	437294.0	2132861.0	2603
11	Pozo Chrysler	436183.0	2132913.0	2612
12	Pozo CIRA	425032.0	2145186.0	2612
13	Pozo Concepción	443993.0	2131382.0	2577
14	Pozo Convertex 1	445287.0	2132429.0	2574
15	Pozo Dogo 1	440310.0	2141662.0	2579
16	Pozo Ecosistemas 1	439188.0	2142969.0	2578

**Anexo 1.** Coordenadas de localización de los piezómetros, pozos de extracción y sondeos geofísicos utilizados para la elaboración del modelo hidrogeofísico.

ID	Nombre	Coordenadas		
		X (m)	Y (m)	Z (msnm)
17	Pozo Ecosistemas 2	439469.0	2142886.0	2578
18	Pozo Ecosistemas 3	439127.0	2143063.0	2579
19	Pozo El Olimpo	438086.0	2134032.0	2596
20	Pozo Envidias	441678.0	2138274.0	2581
21	Pozo Ex Hacienda de San Cayetano	425043.0	2146572.0	2604
22	Pozo Fisher	436536.0	2133618.0	2607
23	Pozo Fraccionamiento El Trigo	427296.0	2133226.0	2708
24	Pozo Geovillas	437452.0	2135484.0	2600
25	Pozo Guadalupe Victoria	438569.0	2143213.0	2579
26	Pozo Holliday Inn	434296.0	2132753.0	2632
27	Pozo Industrias Químicas del Centro	443393.0	2134347.0	2577
28	Pozo La Joya	437890.0	2121273.0	2621
29	Pozo Lerma 4	444060.0	2135125.0	2575
30	Pozo Lerma Norte 42	425105.0	2153867.0	2593
31	Pozo Lerma Norte 89	422449.0	2158032.0	2605
32	Pozo Lerma Sur 4-A	450993.0	2130308.0	2584
33	Pozo Lerma Sur 61	443424.0	2127547.0	2578
34	Pozo La Loma	433876.0	2127462.0	2681
35	Pozo Los Faroles	437018.0	2135886.0	2600
36	Pozo Manzanita	435197.0	2133284.0	2619
37	Pozo Maquinita	432288.0	2134869.0	2635
38	Pozo María Rosas	432131.0	2130902.0	2674
39	Pozo Marinas 11	437233.0	2131335.0	2611
40	Pozo Moderna Cruz	430871.0	2130402.0	2696
41	Pozo Nestlé	435382.0	2132881.0	2621
42	Pozo No. 2 Relocalización	436210.0	2133530.0	2611
43	Pozo Ocotitlán	435166.0	2127071.0	2645
44	Pozo Pablo Sidar	431353.0	2131677.0	2675
45	Pozo La Palma	420944.0	2148085.0	2598
46	Pozo Palmillas	427784.0	2139892.0	2632
47	Pozo Parque Industrial	439799.0	2142973.0	2578
48	Pozo Pilares	437363.0	2132472.0	2606
49	Pozo Providencia	435567.0	2130689.0	2630
50	Pozo Química Amtex	450006.0	2131666.0	2580
51	Pozo Rancho La Peña	456926.0	2136946.0	2977
52	Pozo Presa Alzate	424057.0	2150182.0	2581
53	Pozo Rinconada del Valle	439802.0	2146401.0	2579
54	Pozo Ruba	439371.0	2141371.0	2580
55	Pozo Safmex 3	439847.0	2133390.0	2589
56	Pozo San Andrés	434387.0	2140231.0	2596

**Anexo 1.** Coordenadas de localización de los piezómetros, pozos de extracción y sondeos geofísicos utilizados para la elaboración del modelo hidrogeofísico.

ID	Nombre	Coordenadas		
		X (m)	Y (m)	Z (msnm)
57	Pozo San Antonio La Isla	439891.0	2119523.0	2592
58	Pozo San Bartolomé	433630.0	2126407.0	2699
59	Pozo San Blas	439974.0	2142576.0	2578
60	Pozo San Carlos II	435235.0	2130281.0	2637
61	Pozo San Cayetano	425944.0	2144177.0	2616
62	Pozo San Cristóbal	431925.0	2138887.0	2611
63	Pozo San Diego	434722.0	2142271.0	2588
64	Pozo San Diego Linares	436173.0	2131783.0	2618
65	Pozo San Javier	449806.0	2129982.0	2578
66	Pozo San Lorenzo	421827.0	2135156.0	2764
67	Pozo San Luis Mextepec	422505.0	2134887.7	2720
68	Pozo San Pablo Autopan	427875.0	2143641.0	2614
69	Pozo San Pablo Autopan Centro	430373.0	2140413.0	2615
70	Pozo Sanofi Pasteur	448869.0	2131634.0	2578
71	Pozo Sansient 2	444122.0	2133142.8	2574
72	Pozo Tollocan 3	438499.0	2132697.0	2598
73	Pozo Lovera	438678.0	2135032.0	2595
74	Pozo Vimo	436589.0	2135700.0	2602
75	Pozo Vivatex 2	441231.0	2135310.0	2583
76	Pozo Xinantécatl	432888.0	2129783.0	2669
77	Pozo La Y	436918.0	2143041.0	2582
78	Pozo Zinacantepec	423891.0	2127950.0	2835
79	Pozo Zona Militar	436334.0	2115460.0	2653
Sondeos Geofísicos				
1	Almoloya T1	451294.0	2114889.0	2600
2	Almoloya T2	448248.0	2117948.0	2576
3	Almoloya T3	448229.0	2118945.0	2574
4	Barrio Panteón S1	434697.0	2142295.0	2588
5	Barrio Panteón S2	434722.0	2142263.0	2588
6	Barrio Panteón S3	435141.0	2142056.0	2589
7	Constitución S1	442941.0	2139109.0	2576
8	Constitución S2	443209.0	2139231.0	2575
9	Constitución S3	443310.0	2139277.0	2574
10	Mexicaltzingo S1	439493.0	2124216.0	2592
11	Mexicaltzingo S2	440480.0	2124131.0	2587
12	Mexicaltzingo S3	441407.0	2123913.0	2585
13	Mexicaltzingo S4	440487.0	2124662.0	2583
14	Mexicaltzingo S5	439814.0	2125093.0	2588
15	Palma S1	426323.0	2138713.0	2658

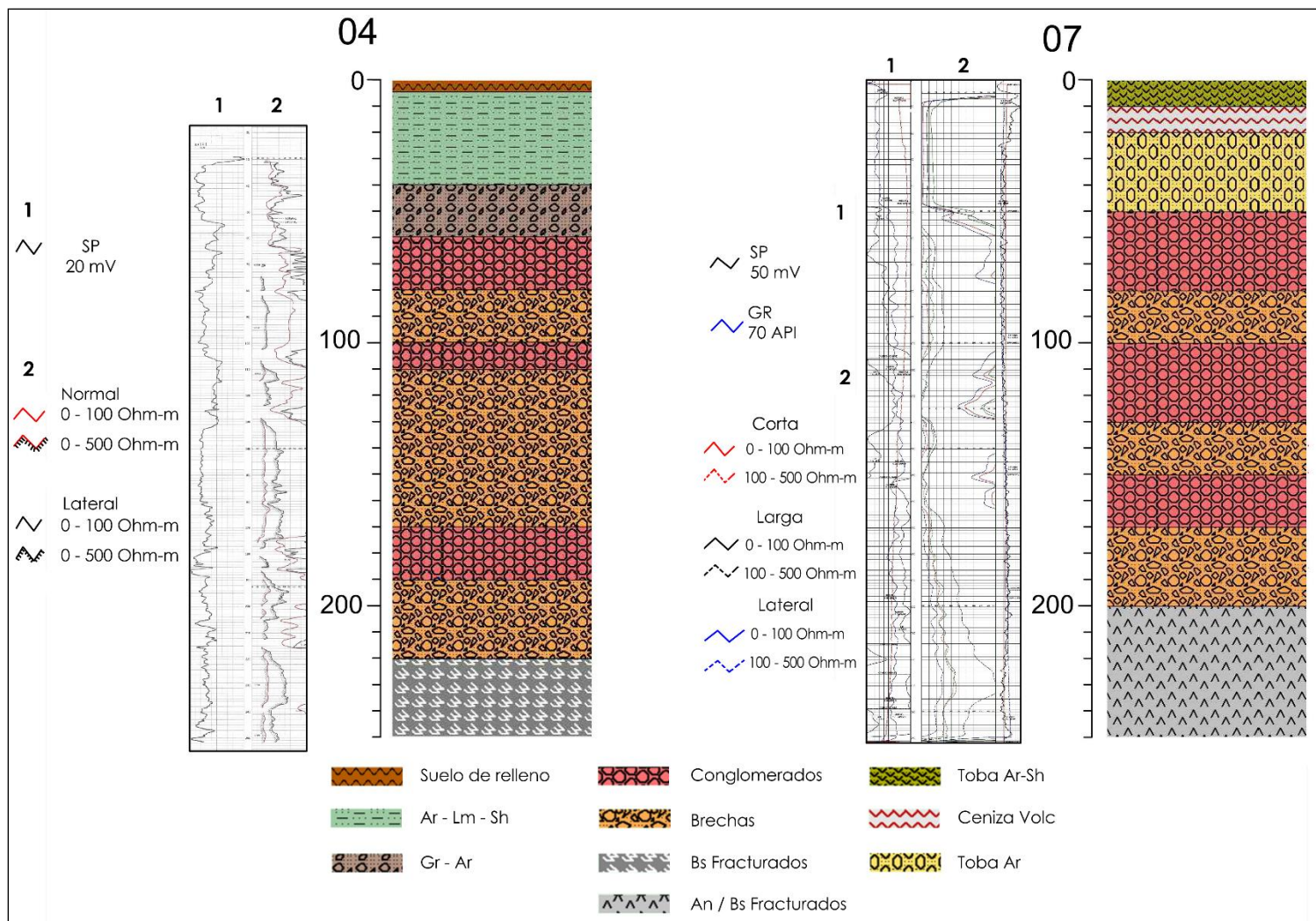
**Anexo 1.** Coordenadas de localización de los piezómetros, pozos de extracción y sondeos geofísicos utilizados para la elaboración del modelo hidrogeofísico.

ID	Nombre	Coordenadas		
		X (m)	Y (m)	Z (msnm)
16	Palma S2	426324.0	2138546.0	2657
17	Palma S3	426333.0	2138770.0	2658
18	Pozo Viejo S1	440851.0	2139406.0	2581
19	Pozo Viejo S2	440795.0	2139380.0	2581
20	Pozo Viejo S3	440681.0	2139338.0	2581
21	Rosa Morada T1	409343.0	2132725.0	3108
22	Rosa Morada T2	409300.0	2132987.0	3088
23	Rosa Morada T3	409249.0	2132283.0	3153
24	Rosa Morada T4	408732.0	2133058.0	3046
25	Rosa Morada T5	409651.0	2133925.0	3012
26	San Pedro T1	439602.0	2134585.0	2590
27	San Pedro T2	439606.0	2134730.0	2591

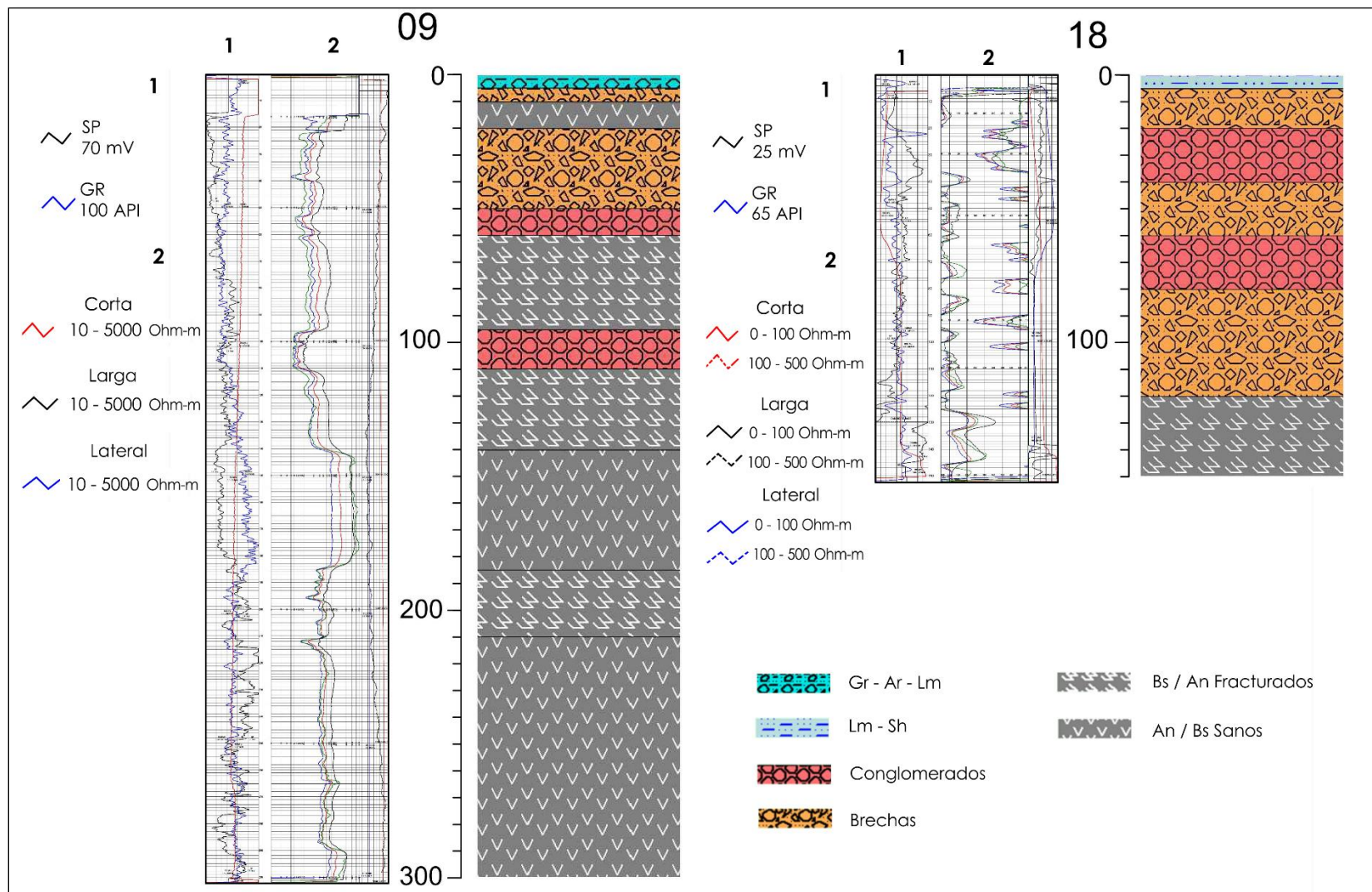
**Anexo 2.** Descripción de la litología identificada en las columnas utilizadas para la elaboración de los modelos hidrogeológico e hidrogeofísico.

Simbología	Clave utilizada	Descripción	Valor de G
	An	Roca volcánica de composición andesítica	9
	Ar	Arenas limpias de granulometría variada	5
	Brch	Brechas volcánicas empacadas en matriz arenosa, areno-limosa o limo-arcillosa	7.8
	Bs	Roca volcánica de composición basáltica	10
	Bs-Frc	Roca volcánica de composición basáltica con diferentes grados de fracturamiento	9.5
	Cnz	Cenizas volcánicas	2.8
	Cong	Conglomerados y boleos de diferente tamaño empacados en matriz arenosa, areno-limosa o limo-arcillosa	7.5
	Gr	Gravas limpias de granulometría variada	8
	Gr-Ar	Intercalación de gravas y arenas	7
	Gr-Lm-Ar	Intercalación de gravas, limos y arenas	3.5
	Gr-Ar-Sh	Intercalación de gravas y arenas con arcillas en diferentes cantidades	4
	Lm-Ar	Limos y arenas sin presencia de arcillas	2
	Lm-Ar-Sh	Intercalación de limos y arenas con presencia de arcillas en diferentes cantidades	1.5
	Lm-Sh	Intercalación de limos y arcillas	1
	Pmz	Pómez	8.5
	Sh	Arcillas limpias	0.5
	Sh-Ar	Intercalación de arcillas con poca arena	3
	Suelo	Suelo de relleno (natural y/o artificial)	2.5
	Tb-Ar	Toba arenosa	4.5
	Tb-Ar-Sh	Toba areno-arcillosa	4.2
	Tz	Tezontle	6
	Tz-Ar	Tezontle arenoso	6.5

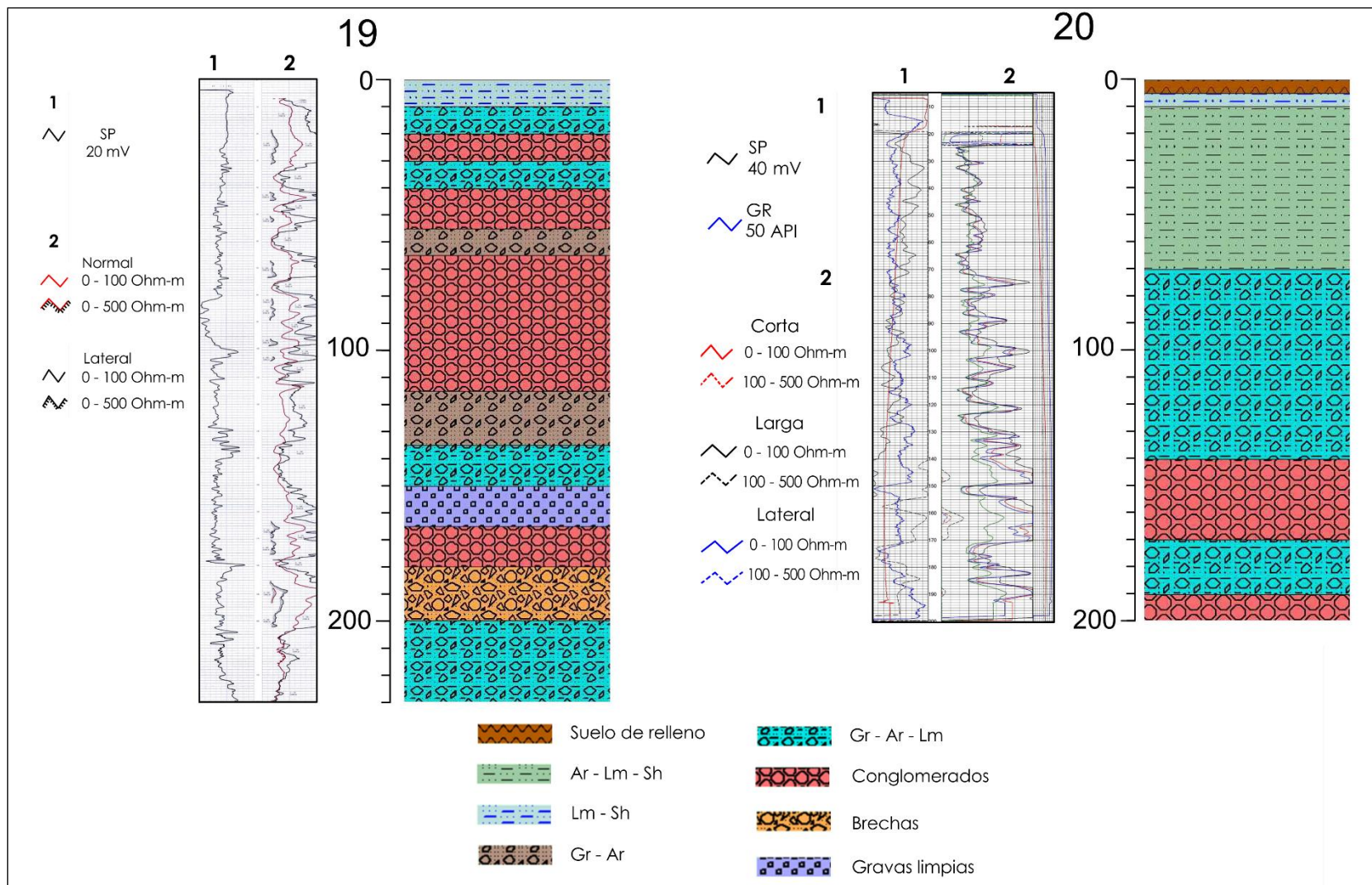
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente.



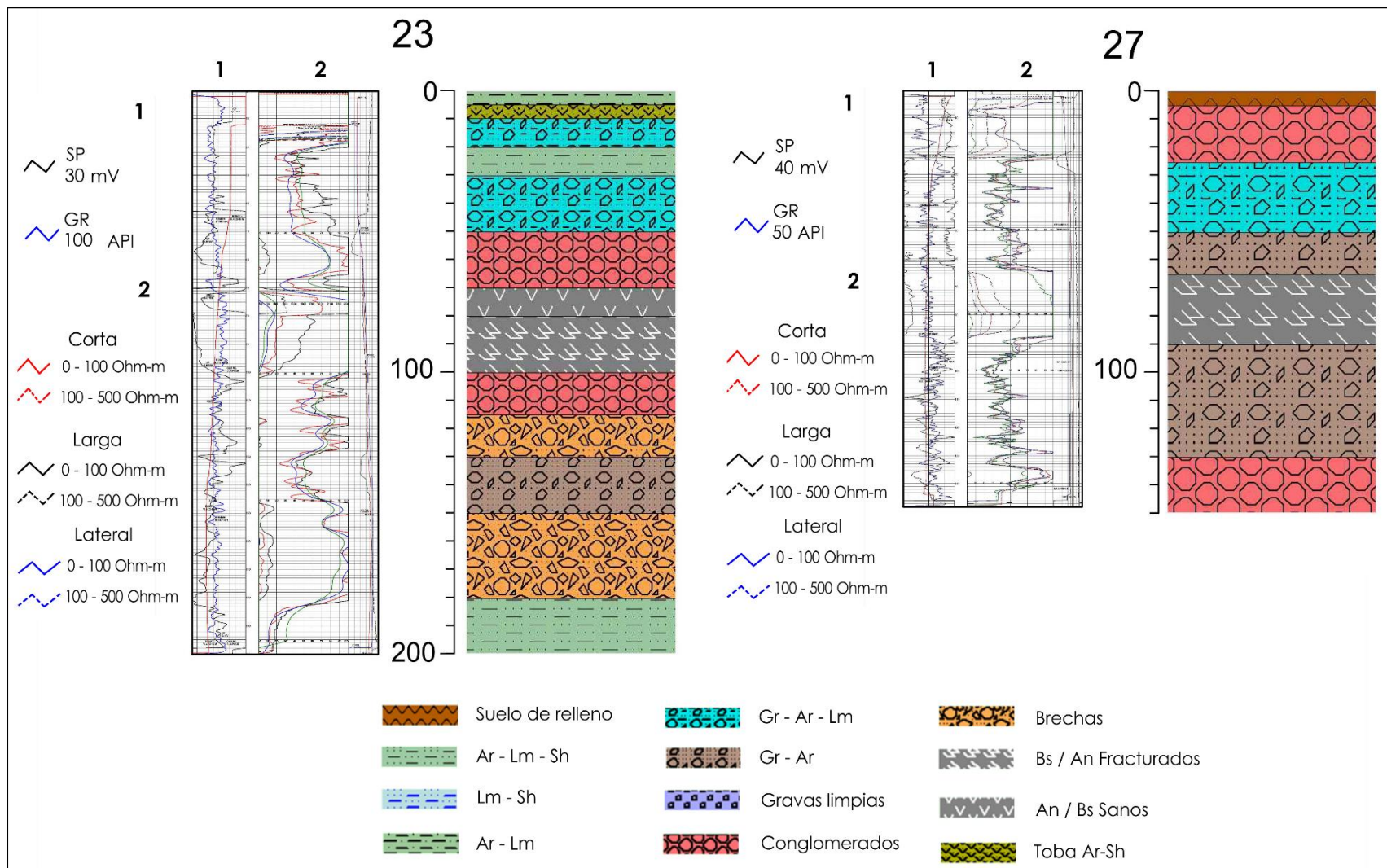
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



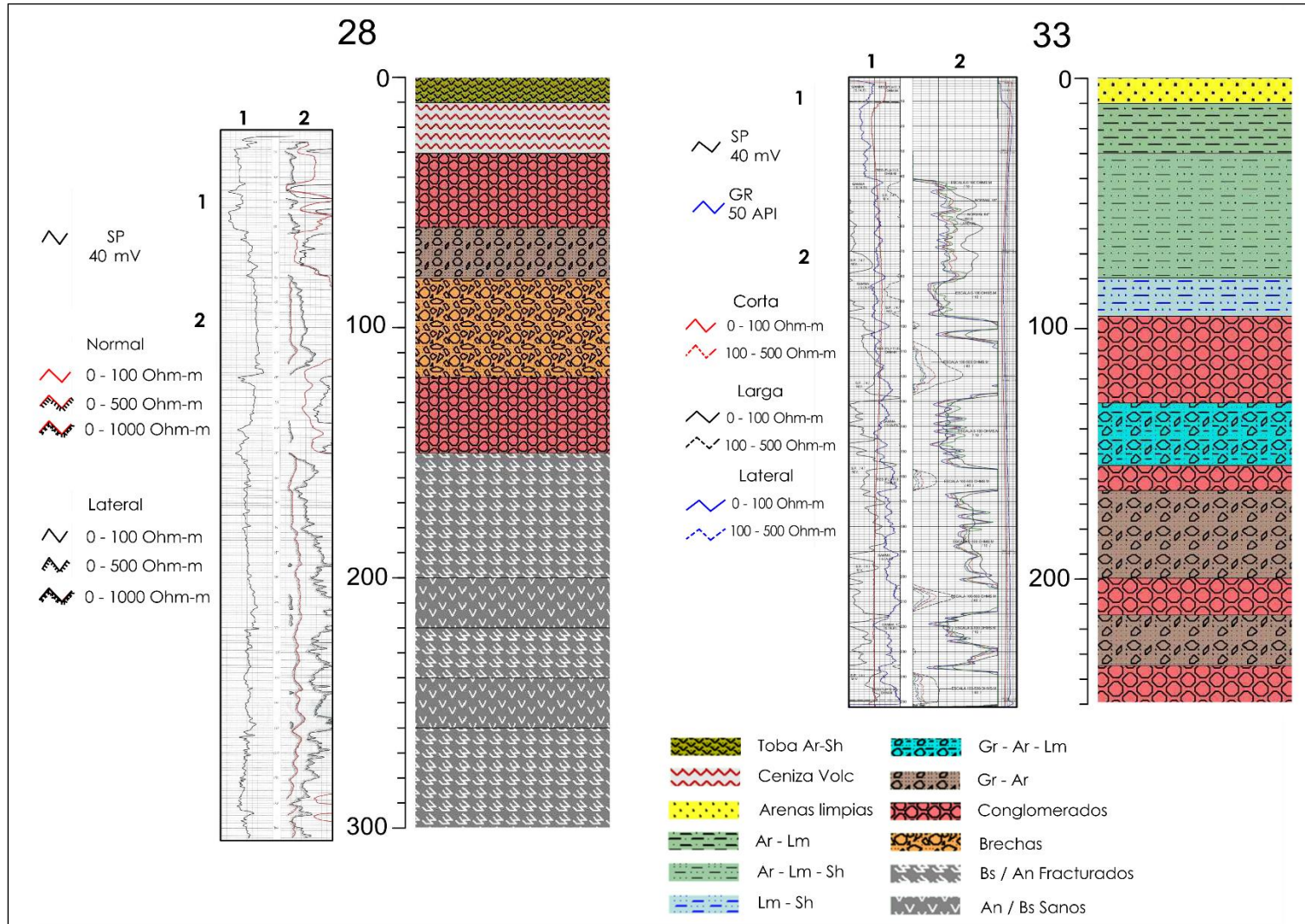
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



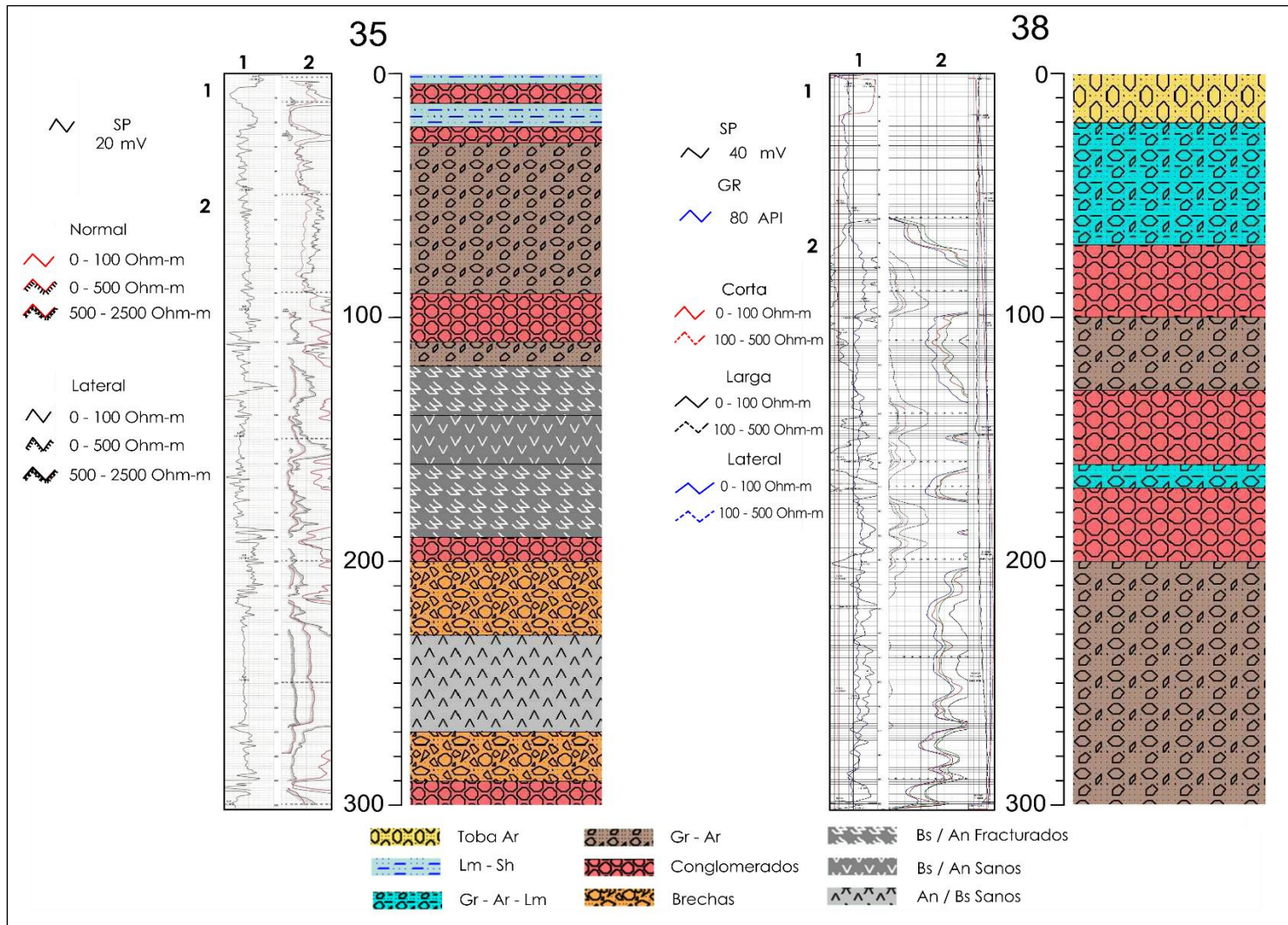
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



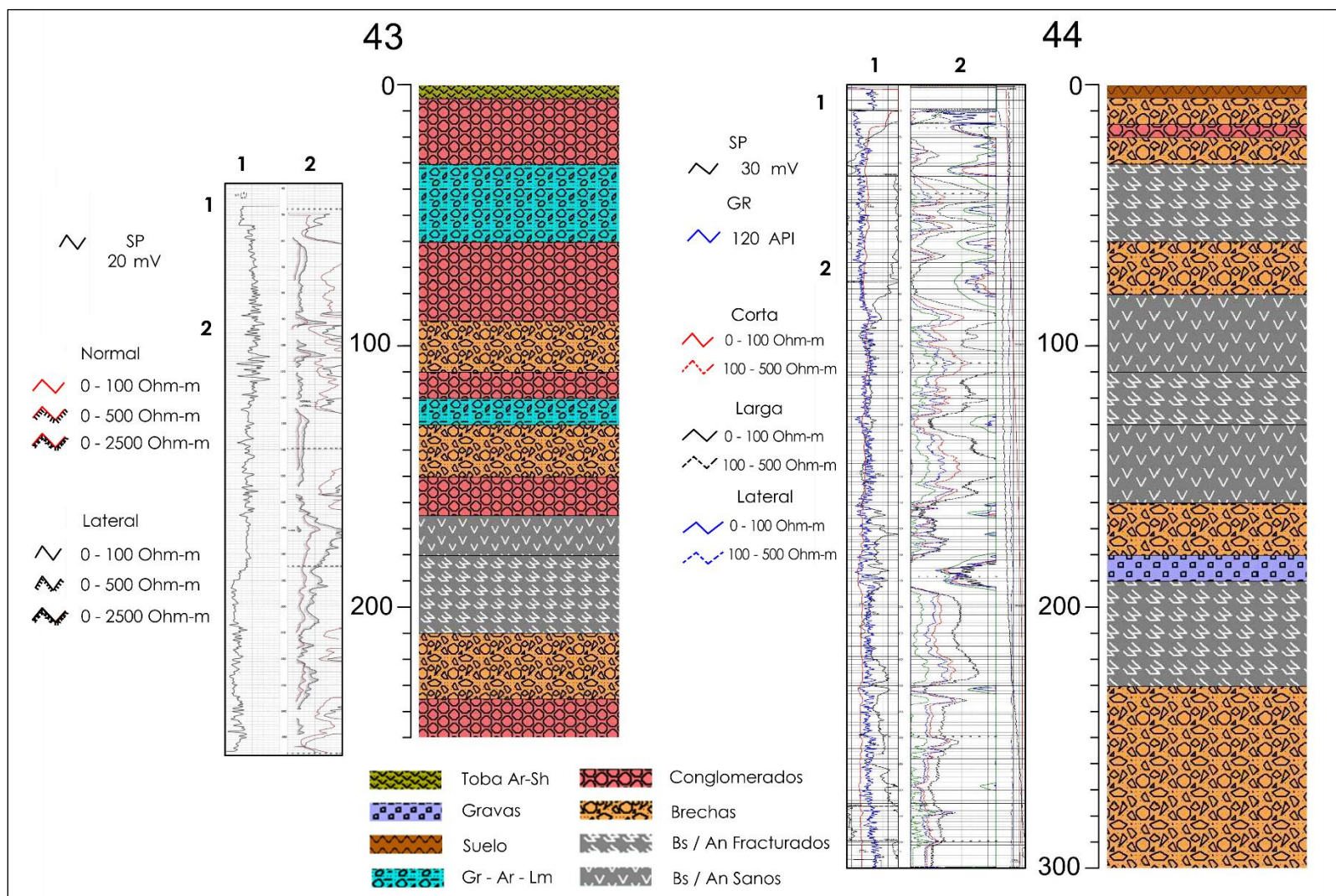
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



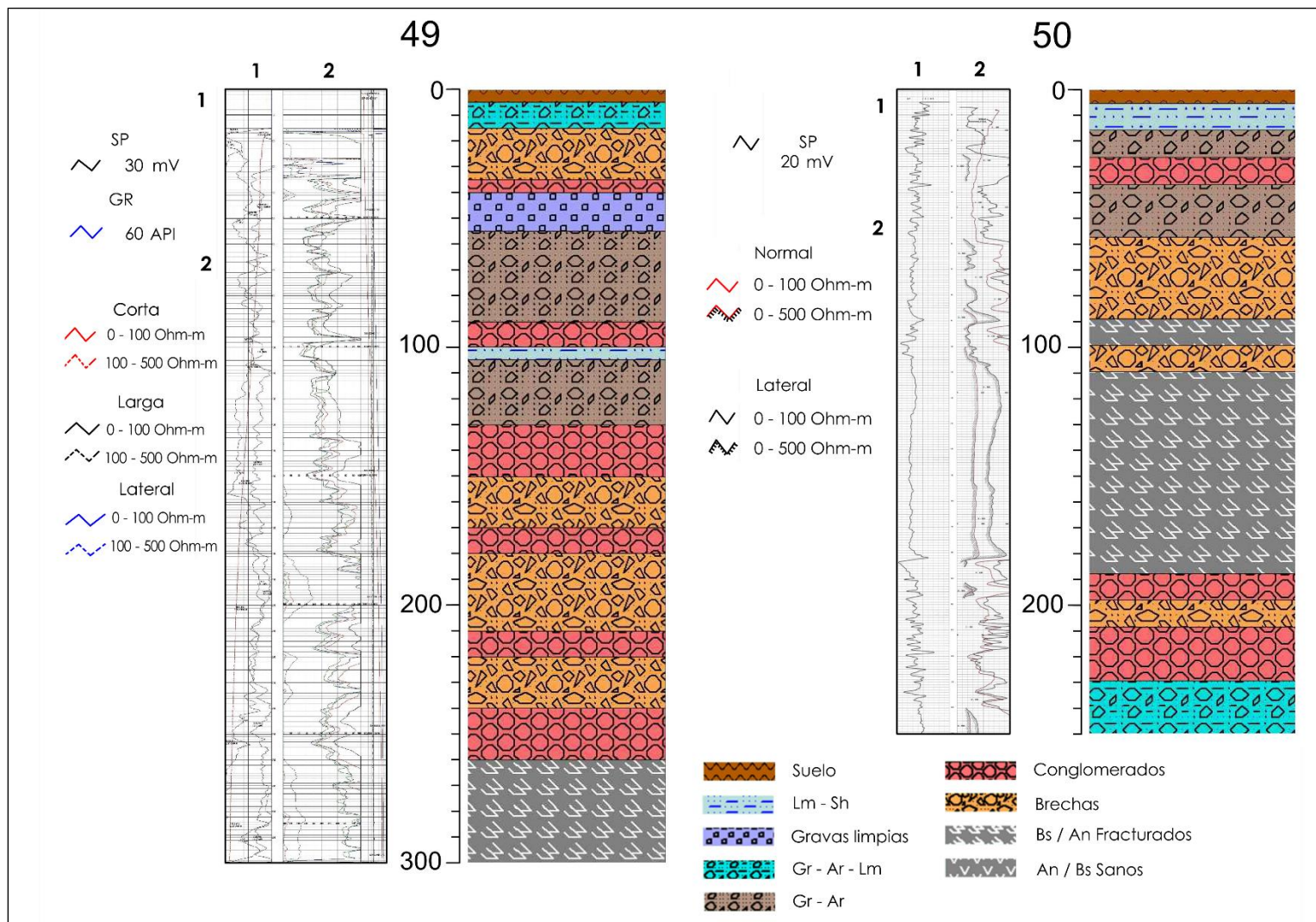
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



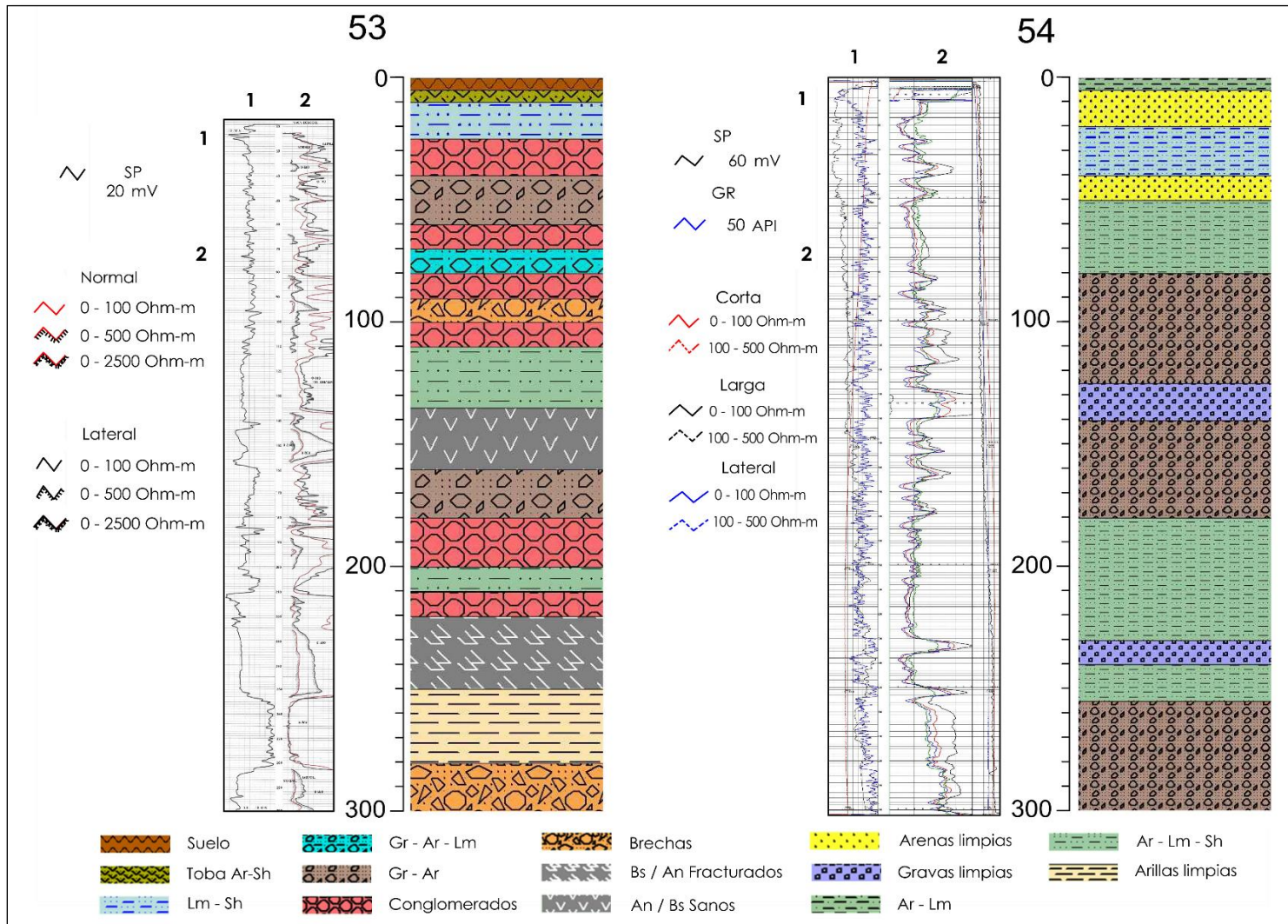
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



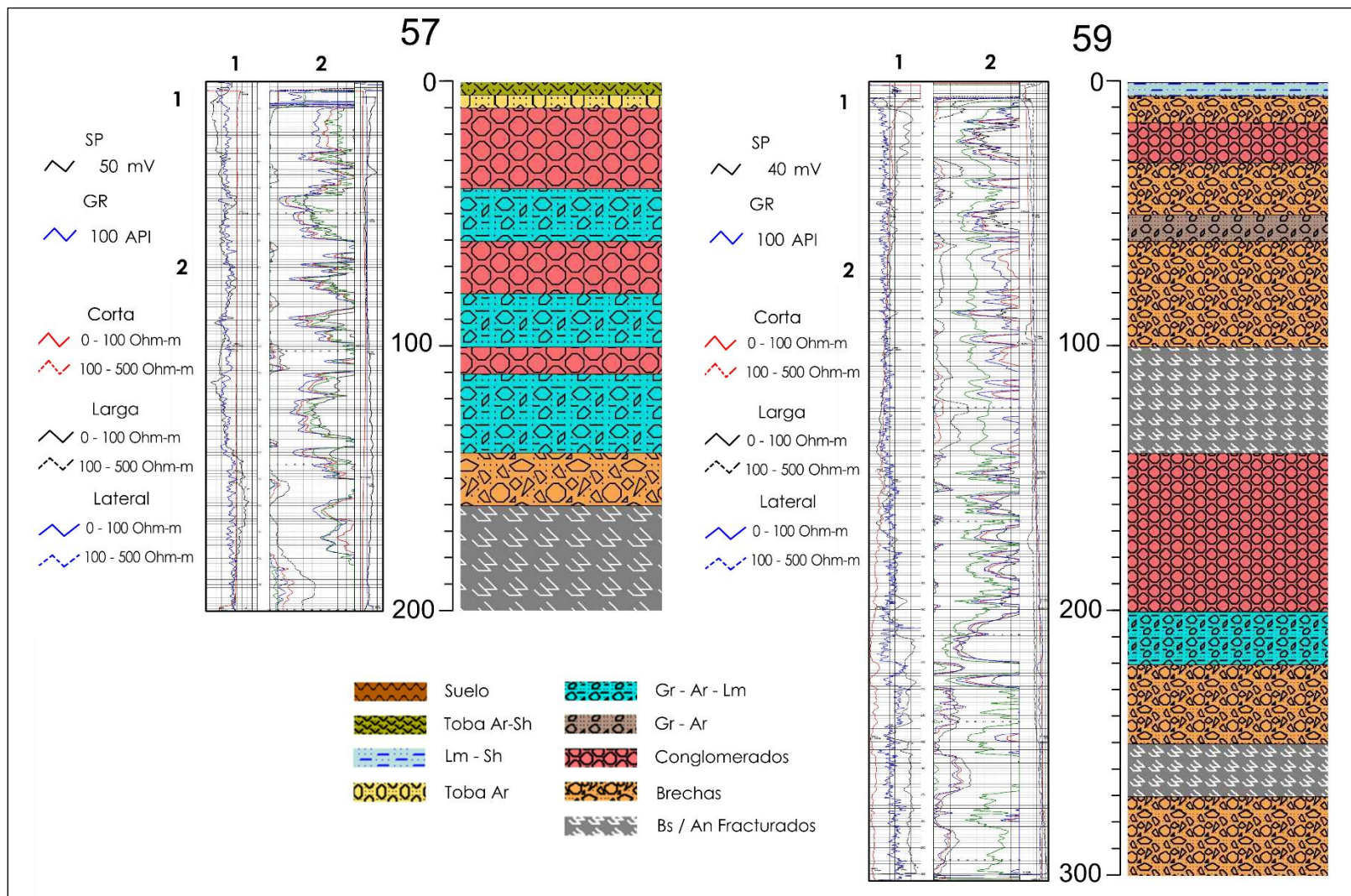
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



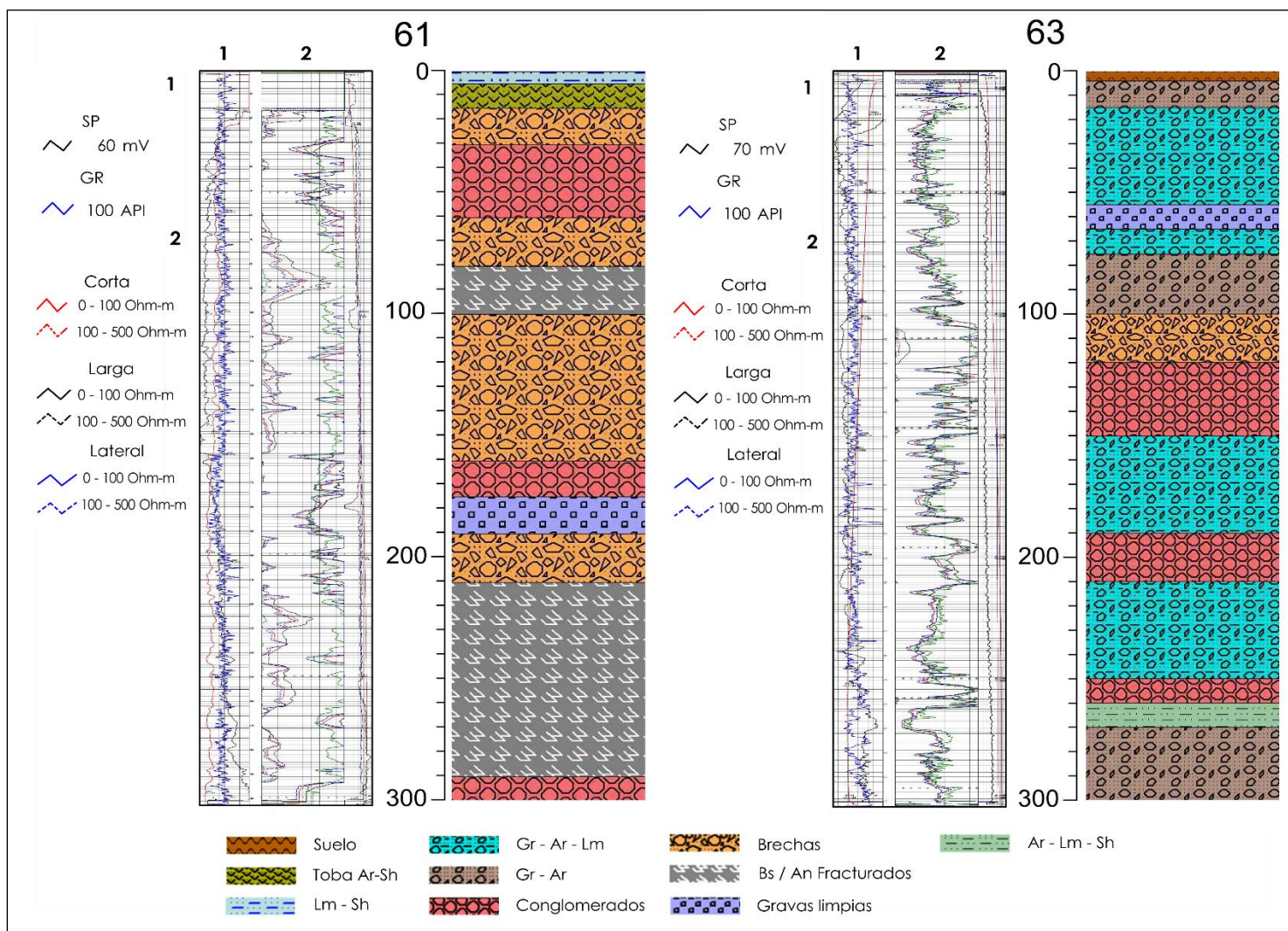
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



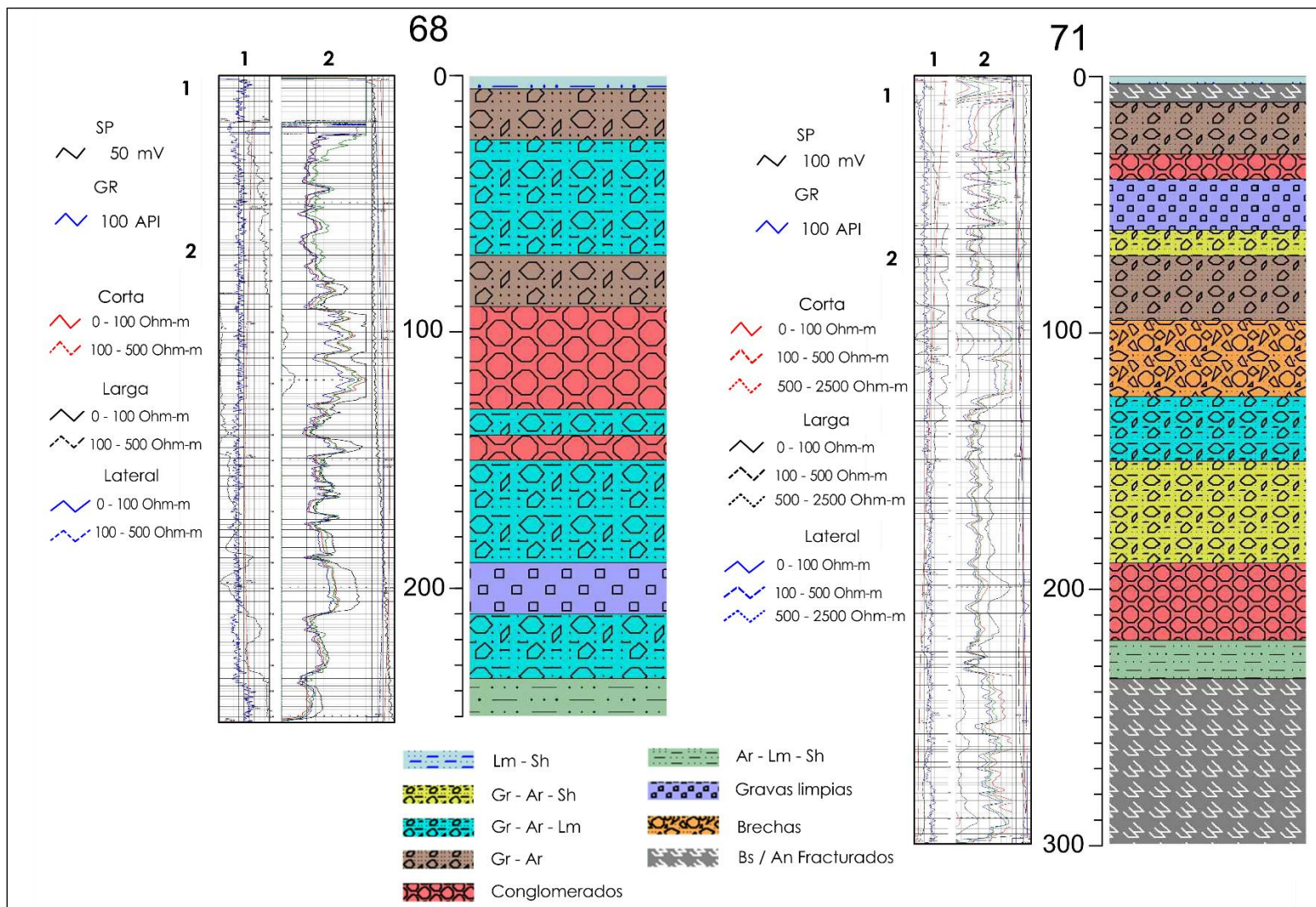
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



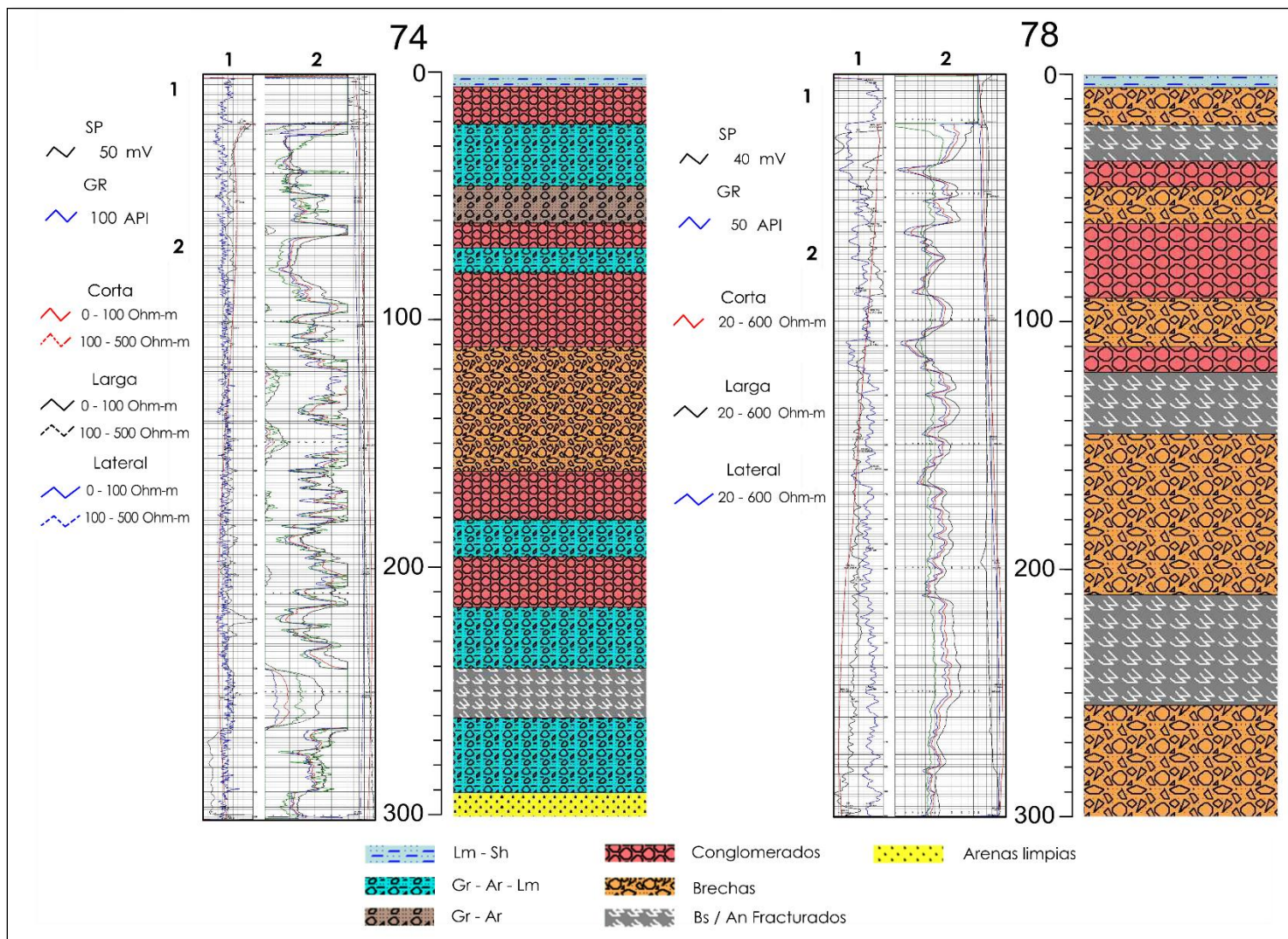
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



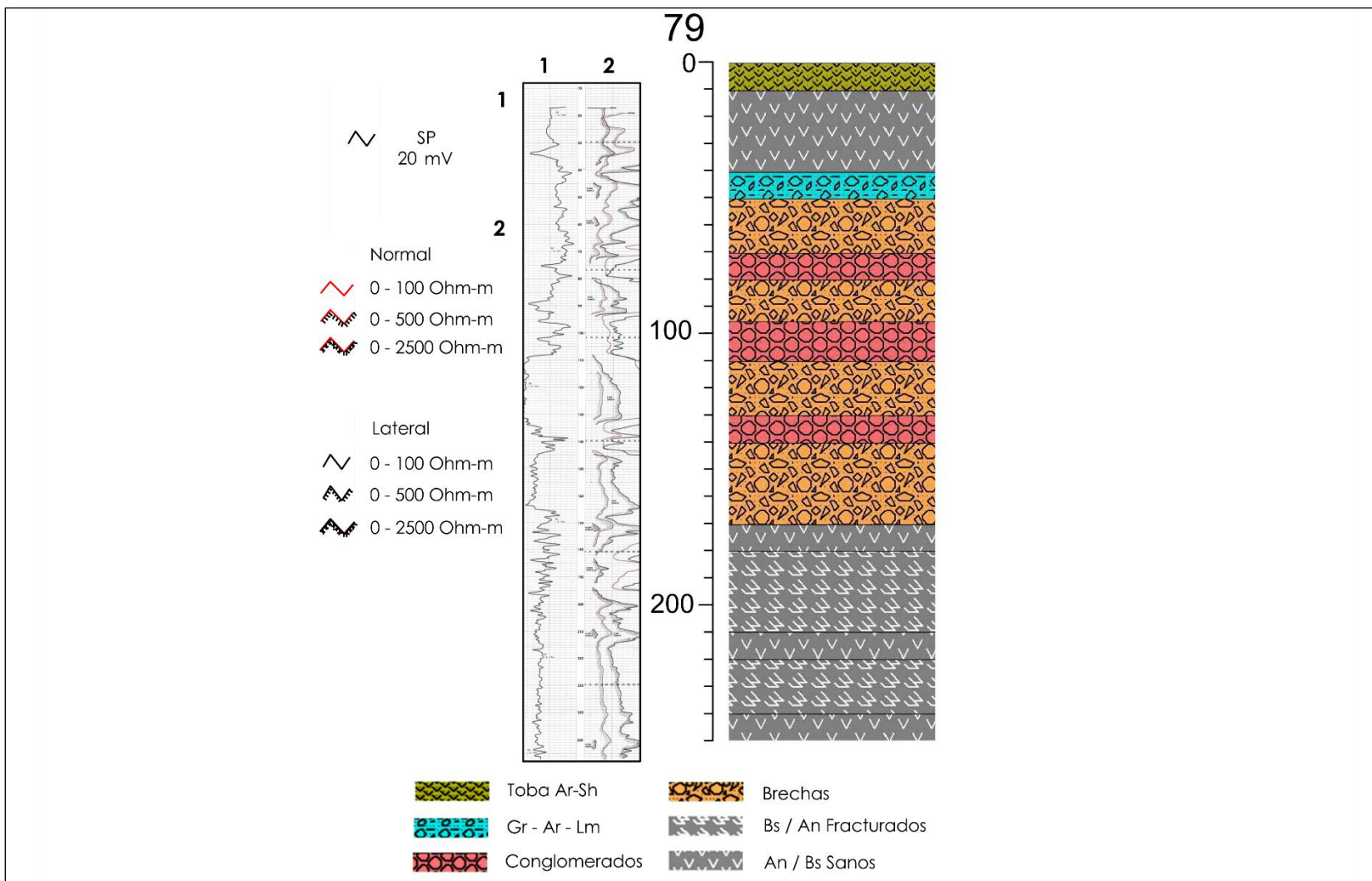
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



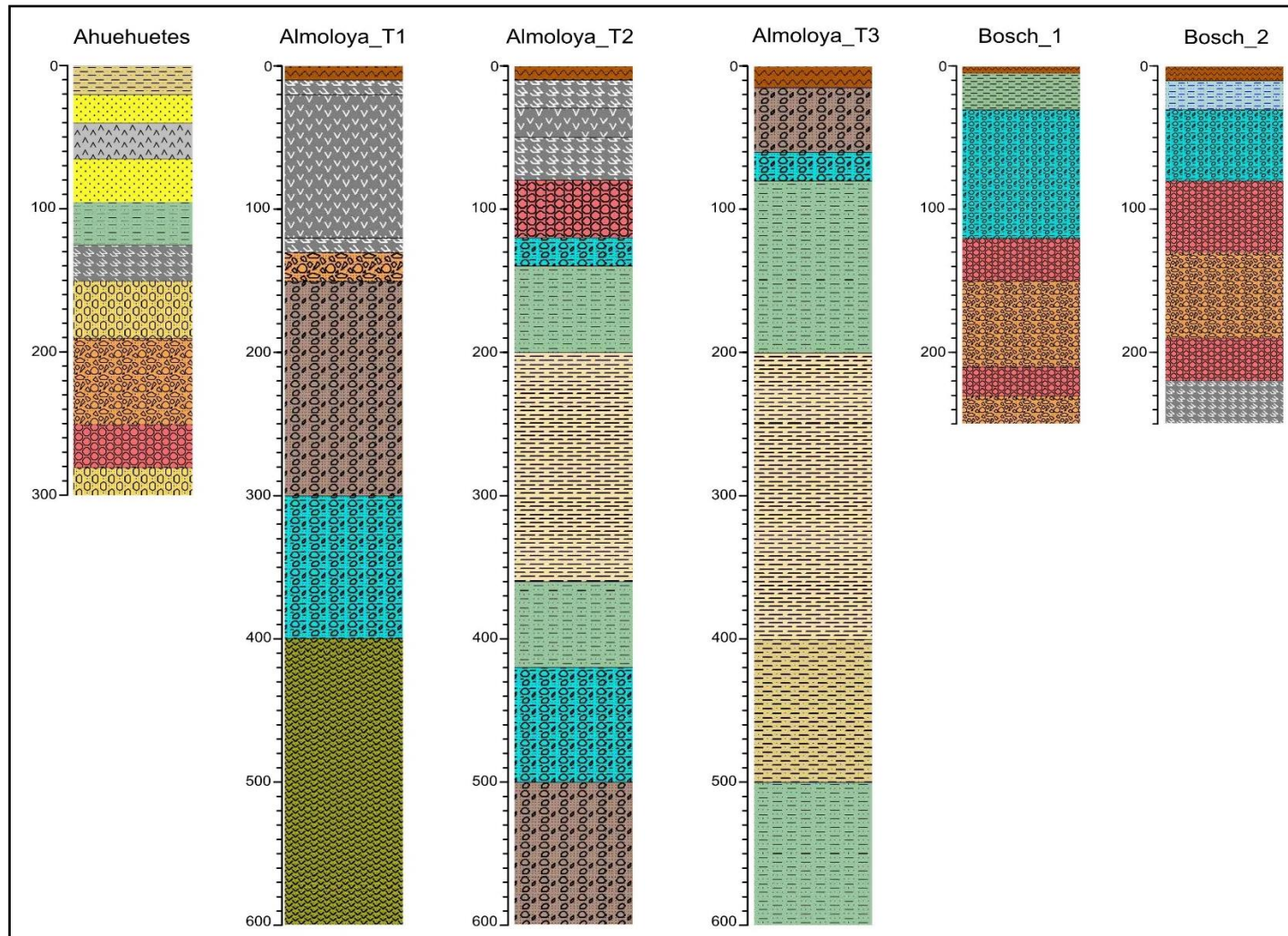
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



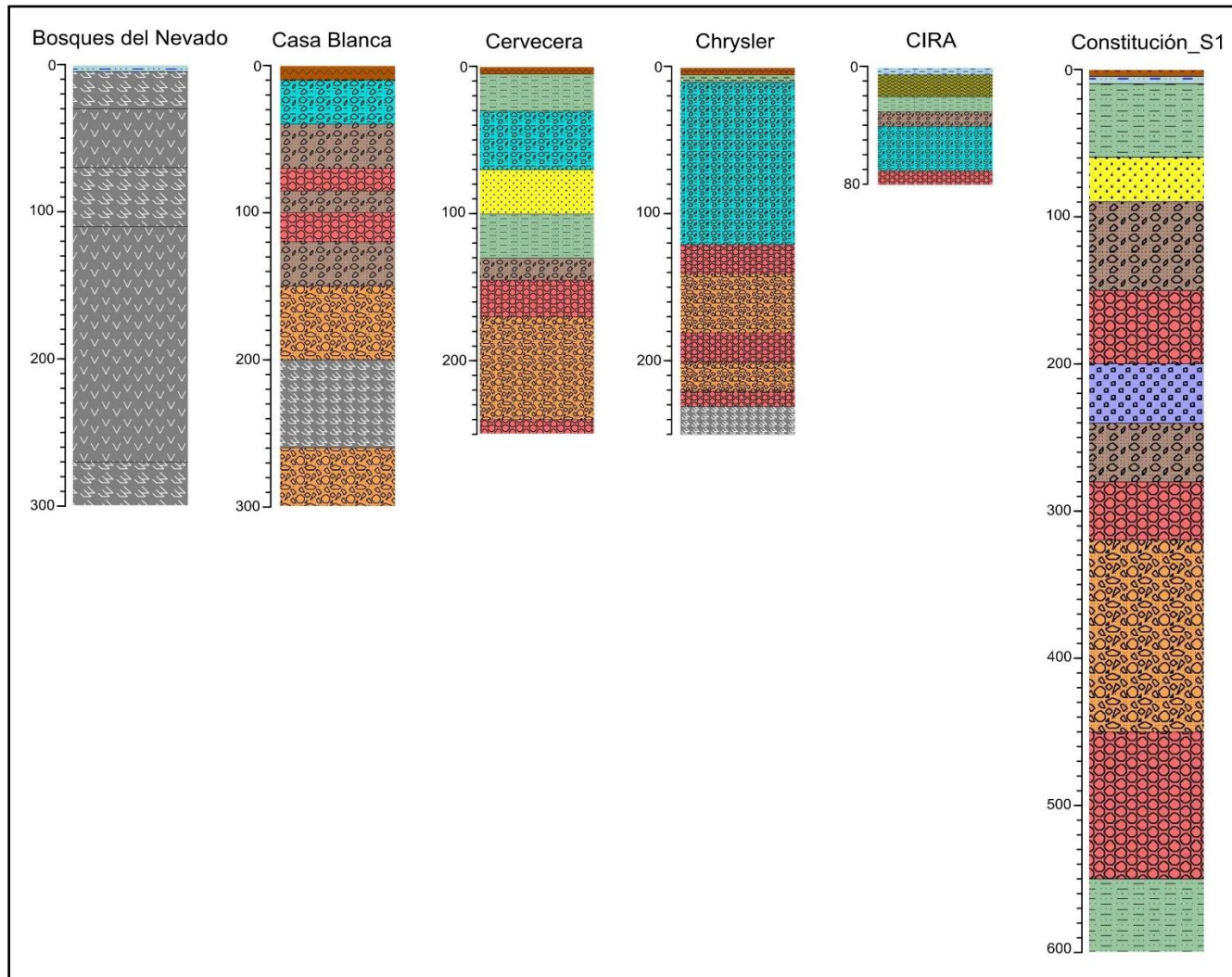
**Anexo 3.** Interpretación de algunos RGP y la elaboración de su columna litológica correspondiente (continuación).



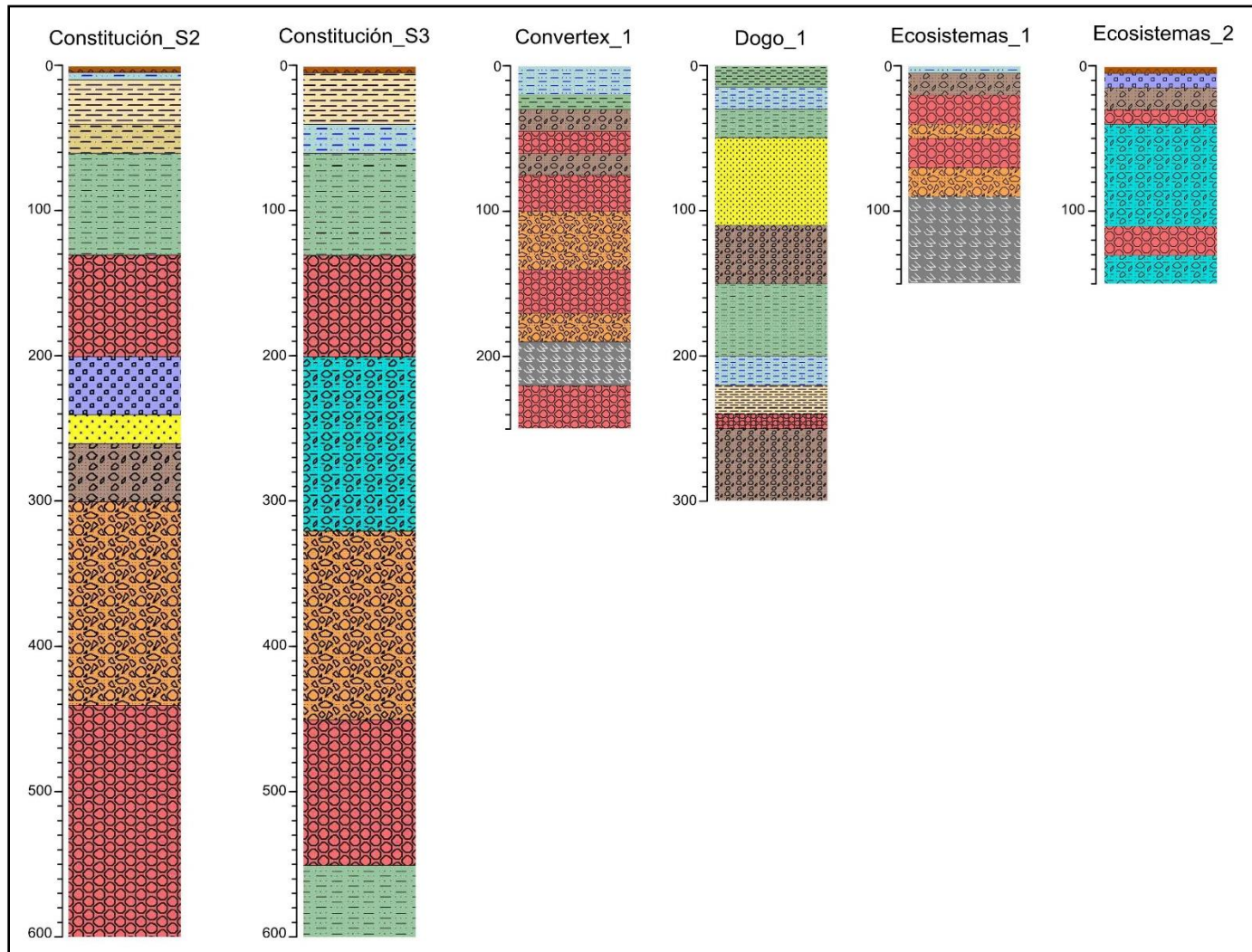
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico.



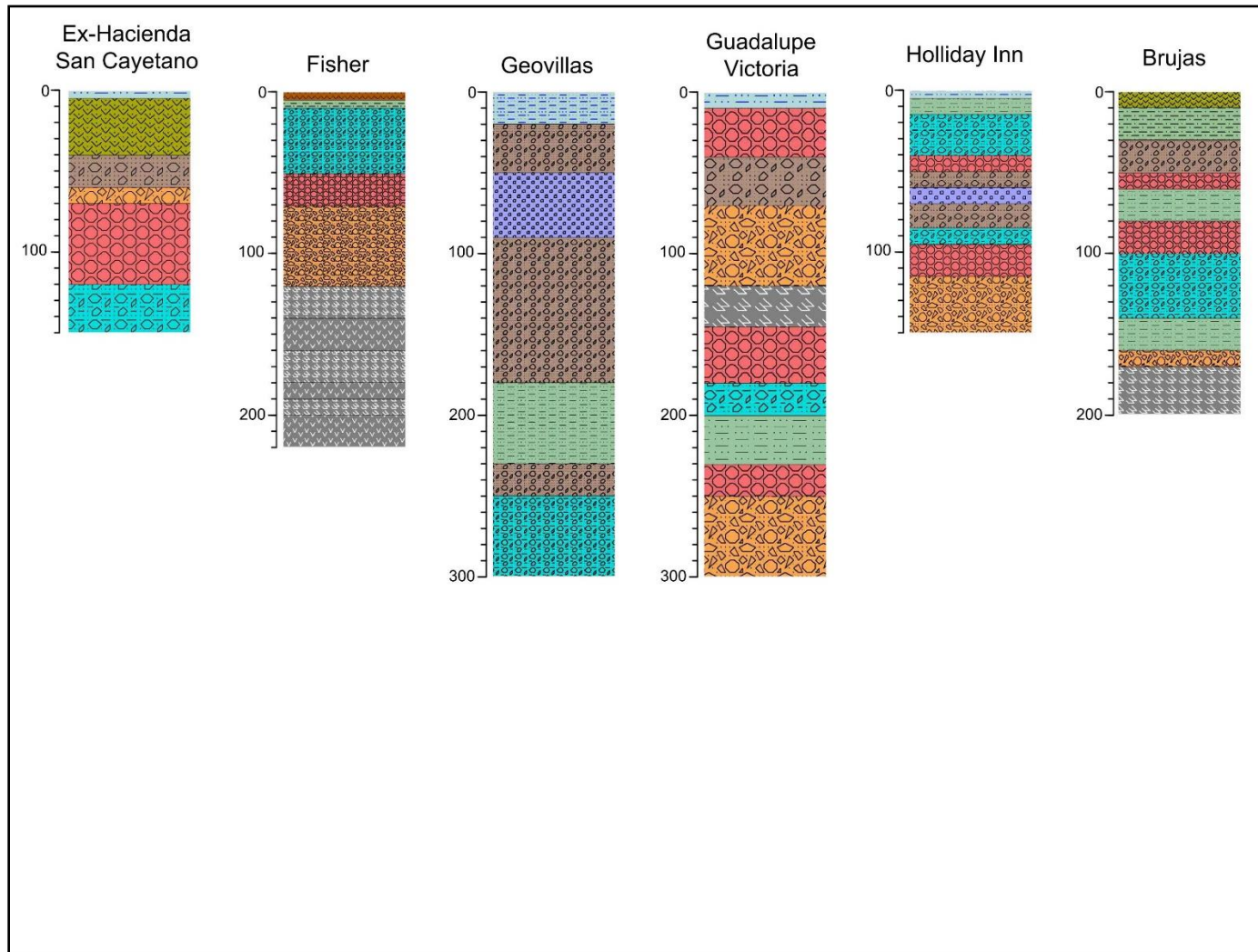
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



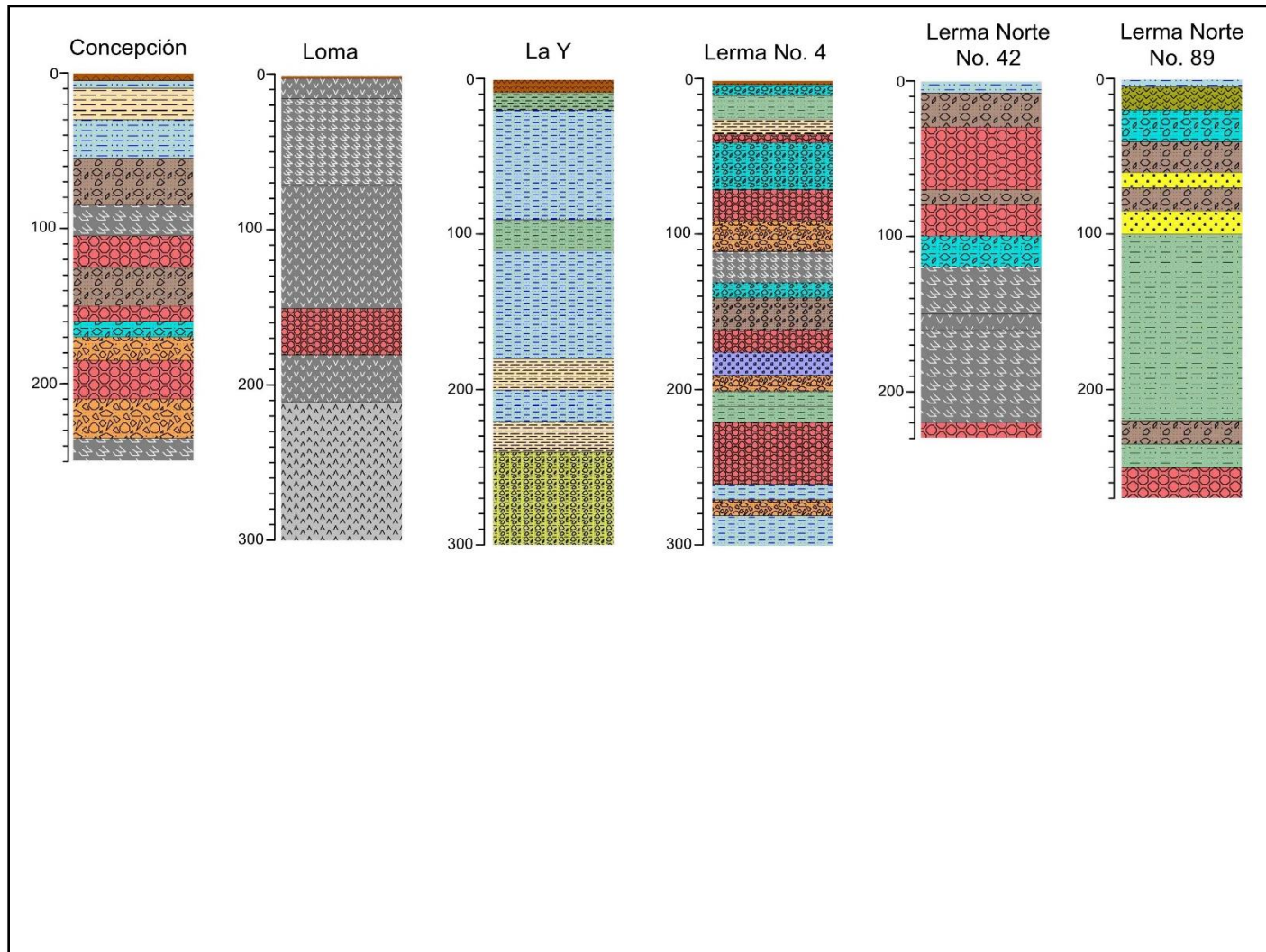
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



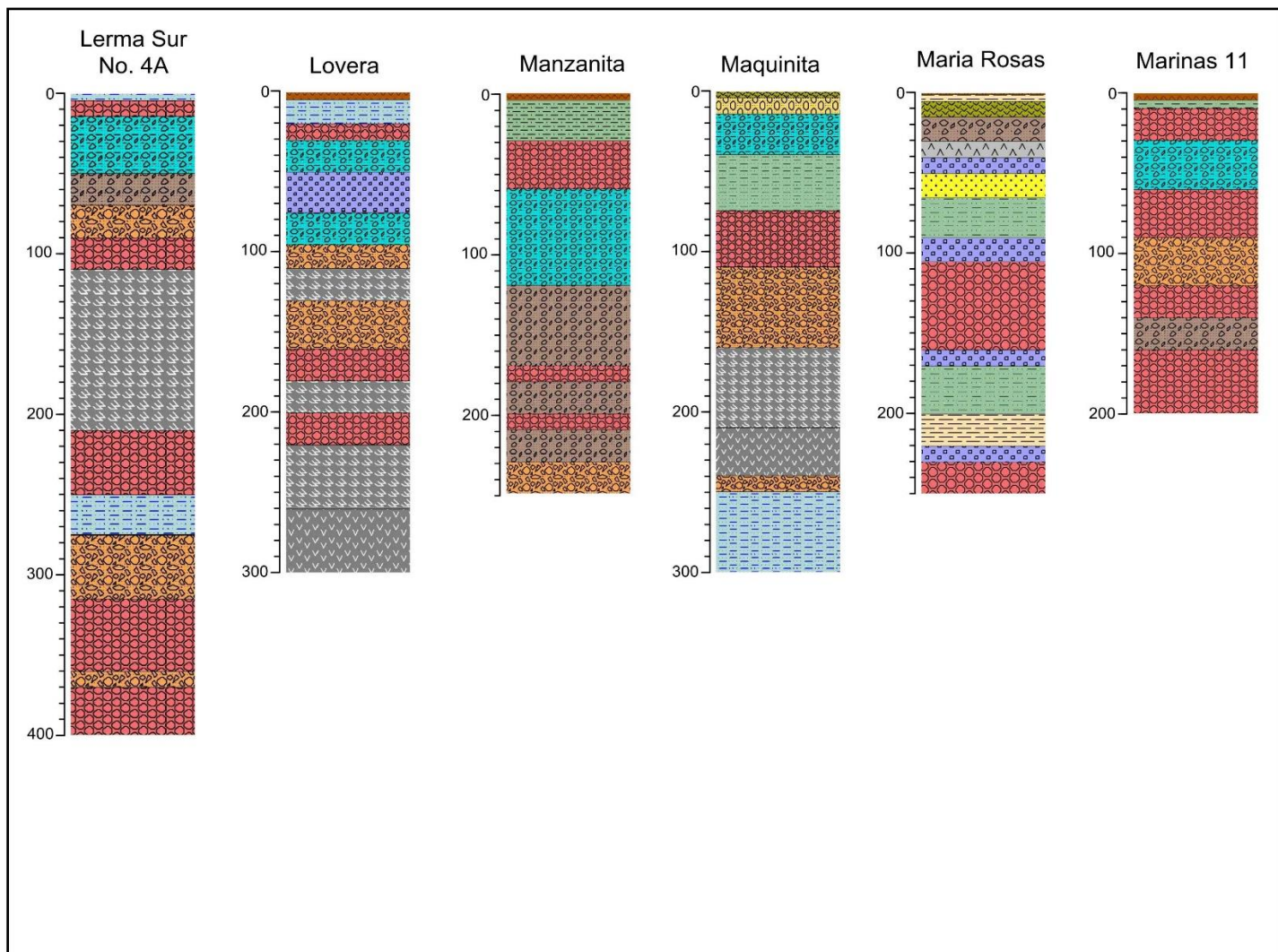
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



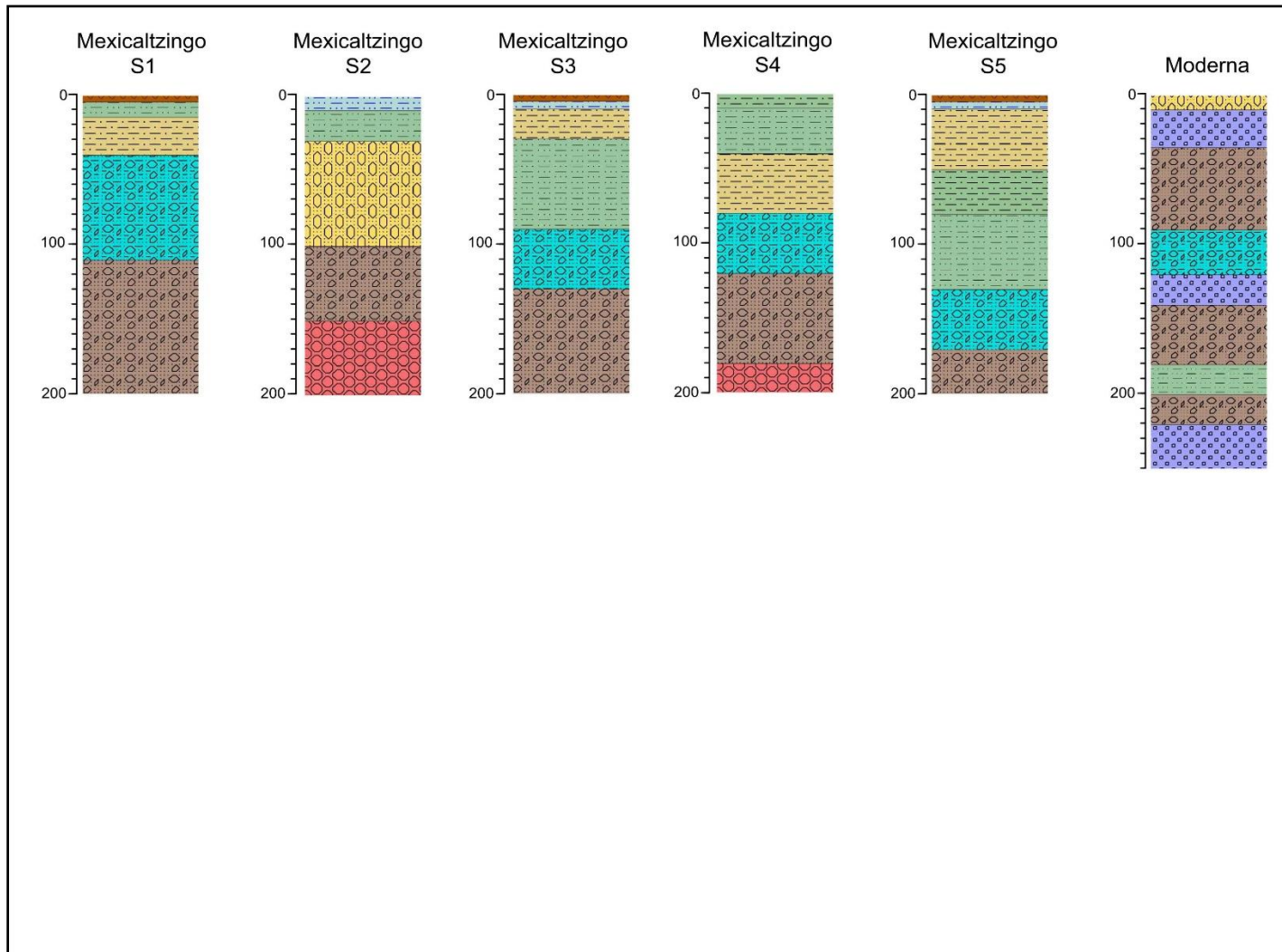
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



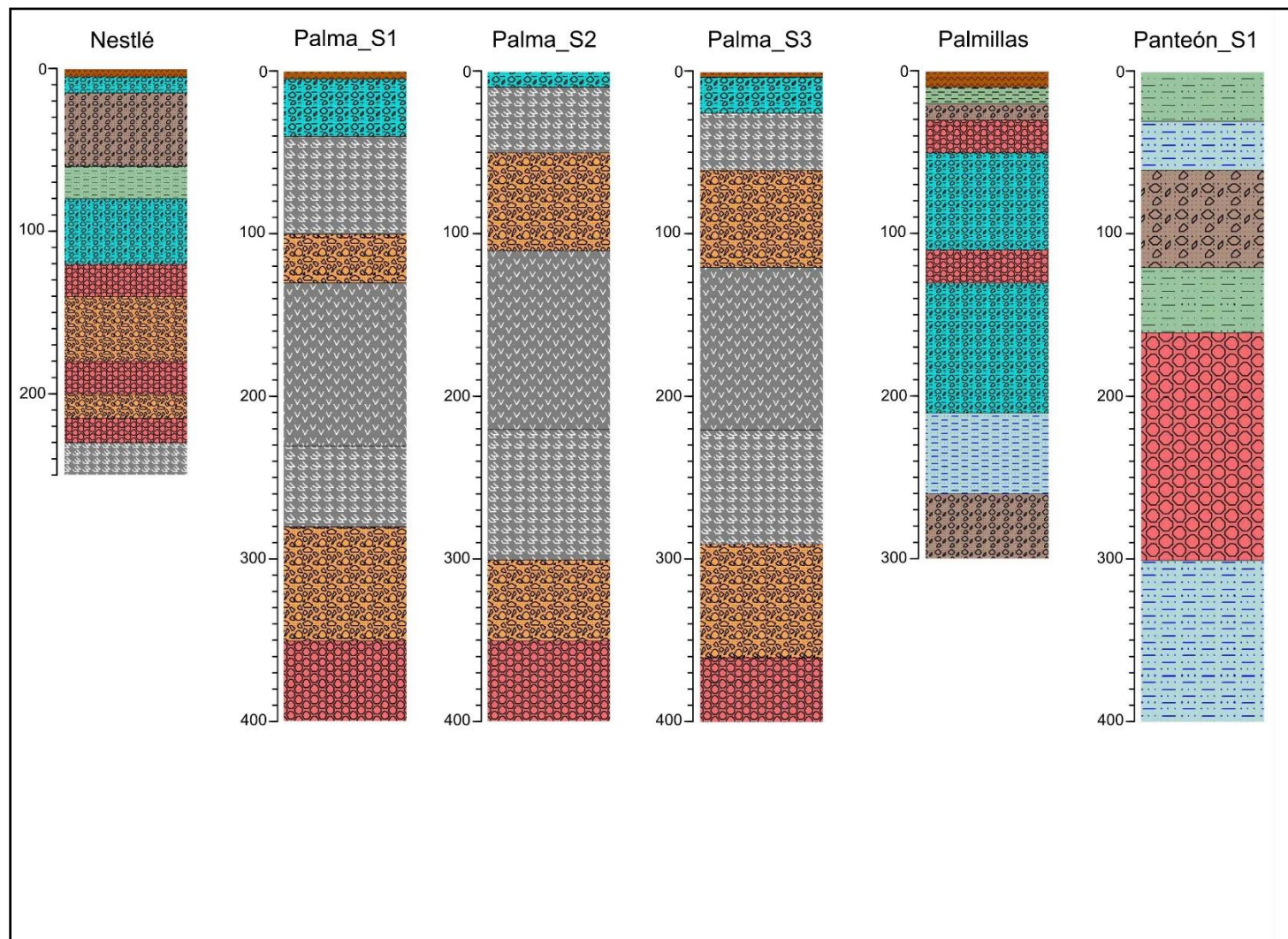
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



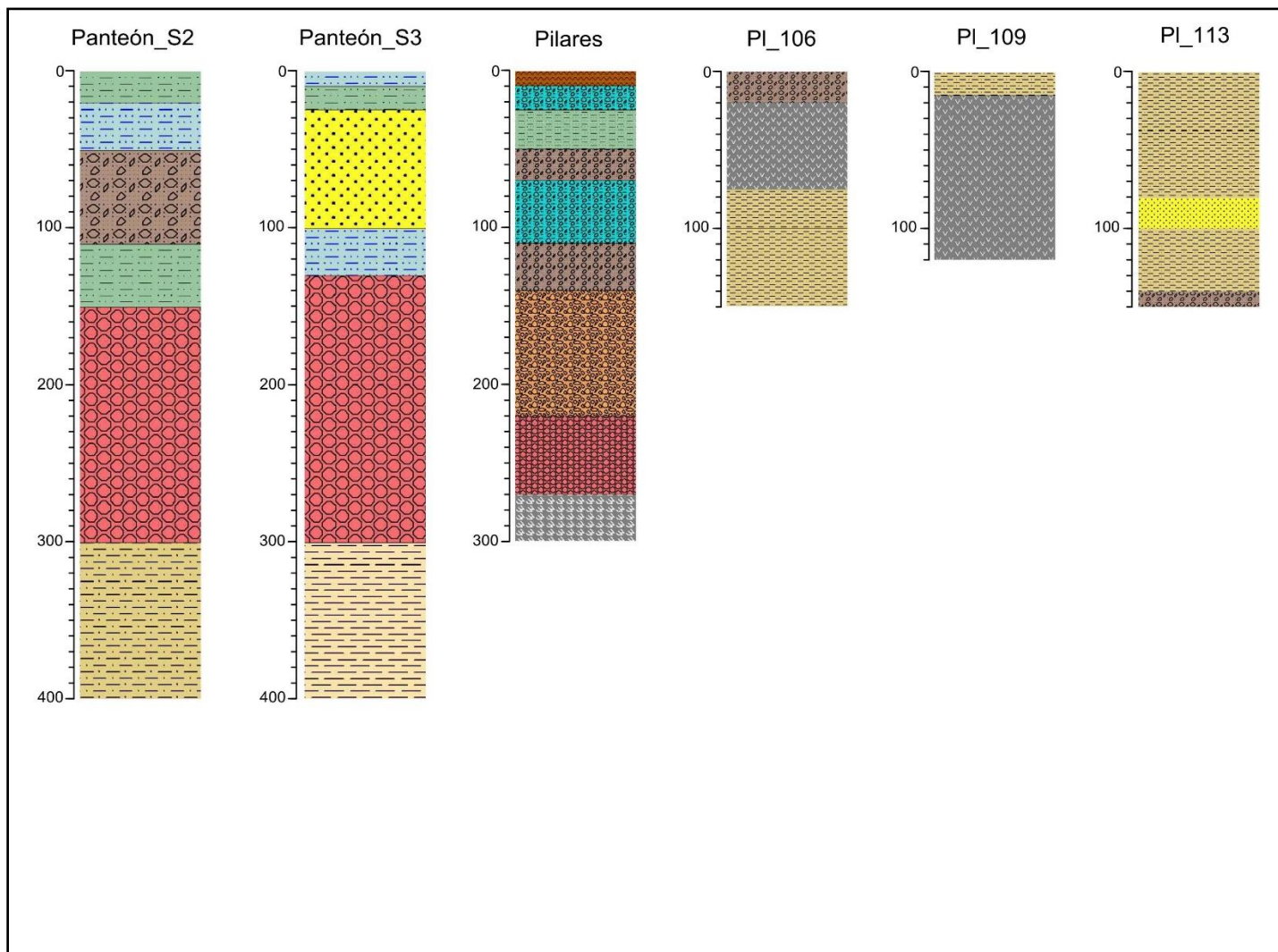
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



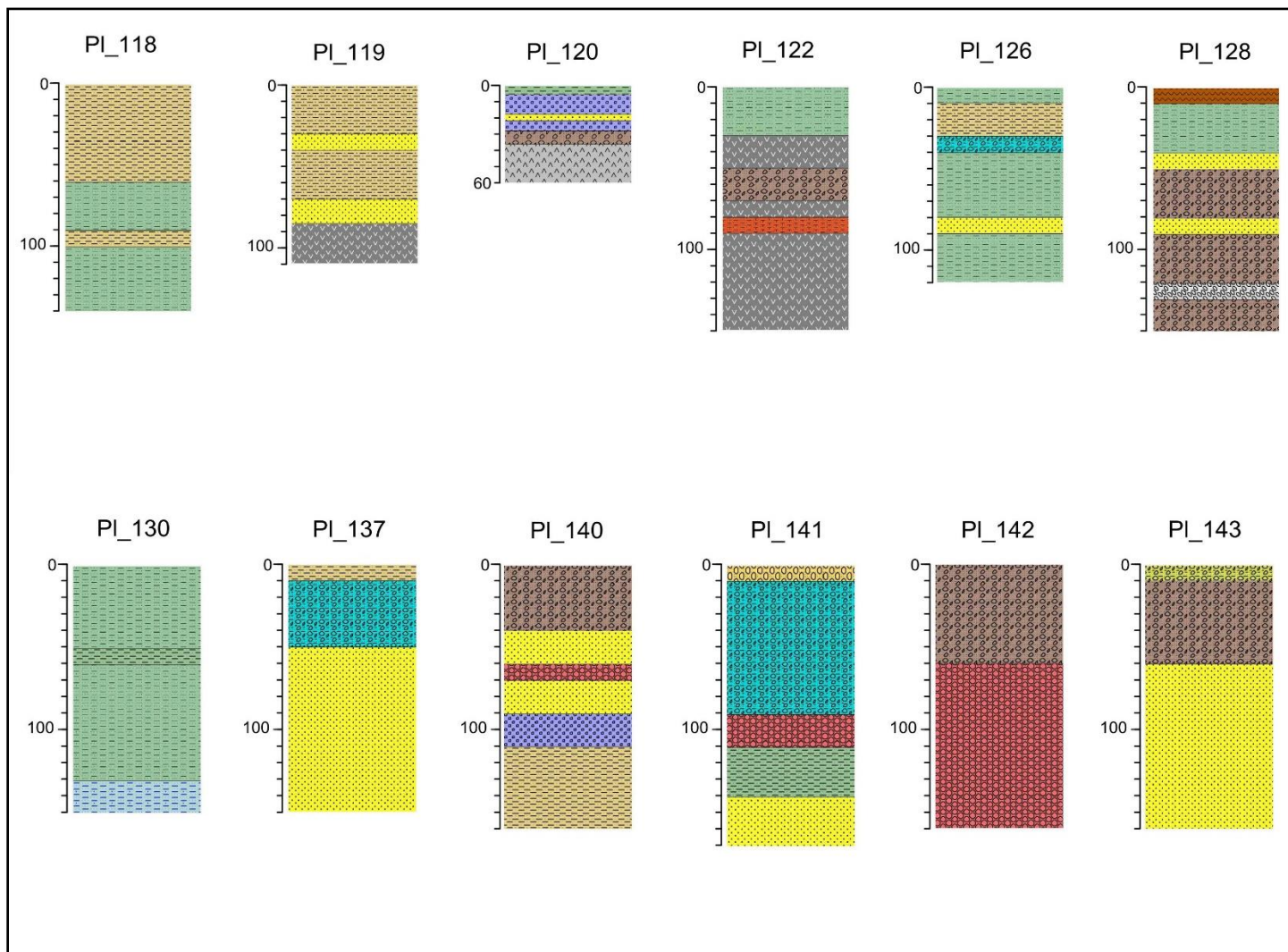
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



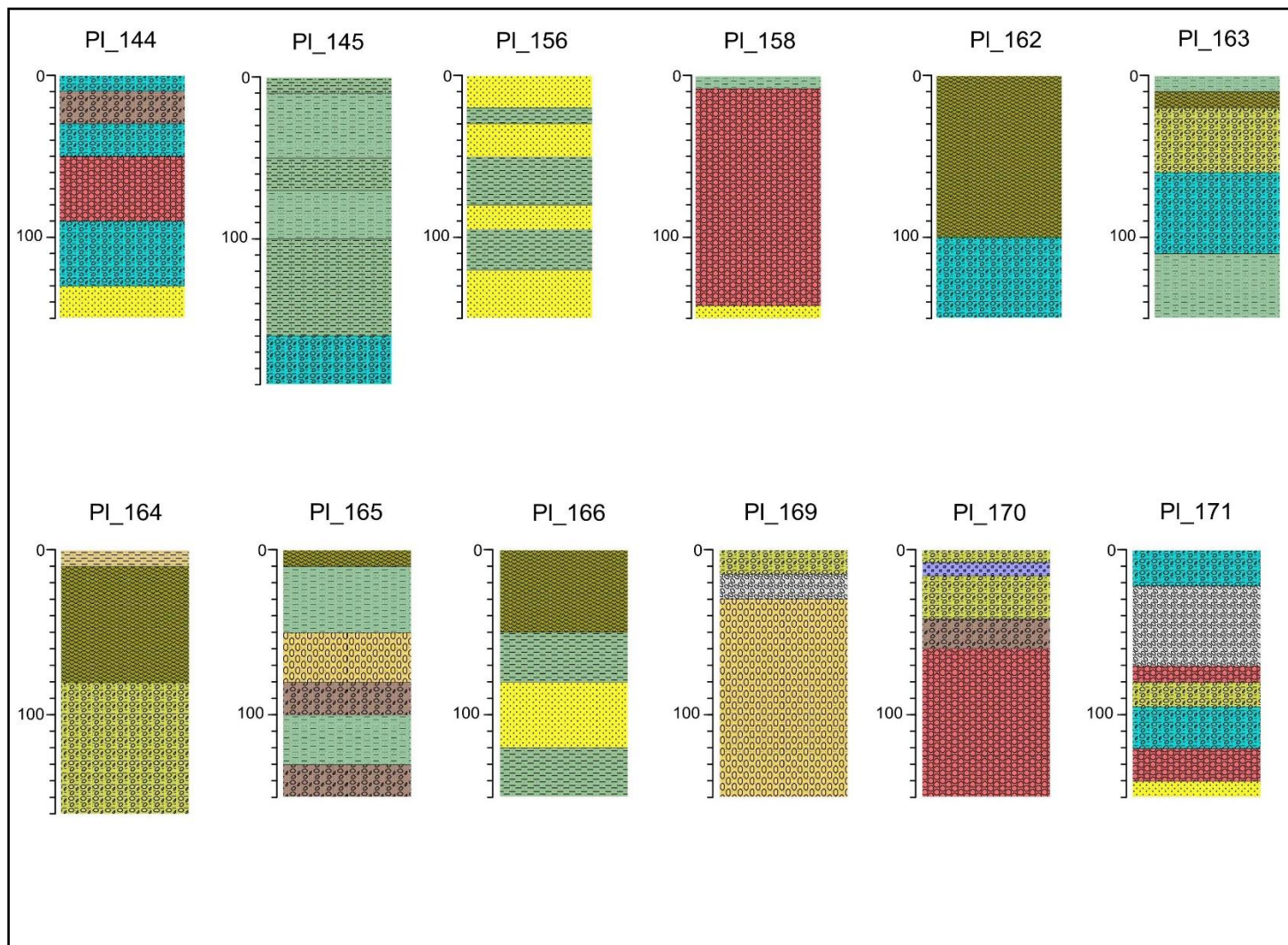
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



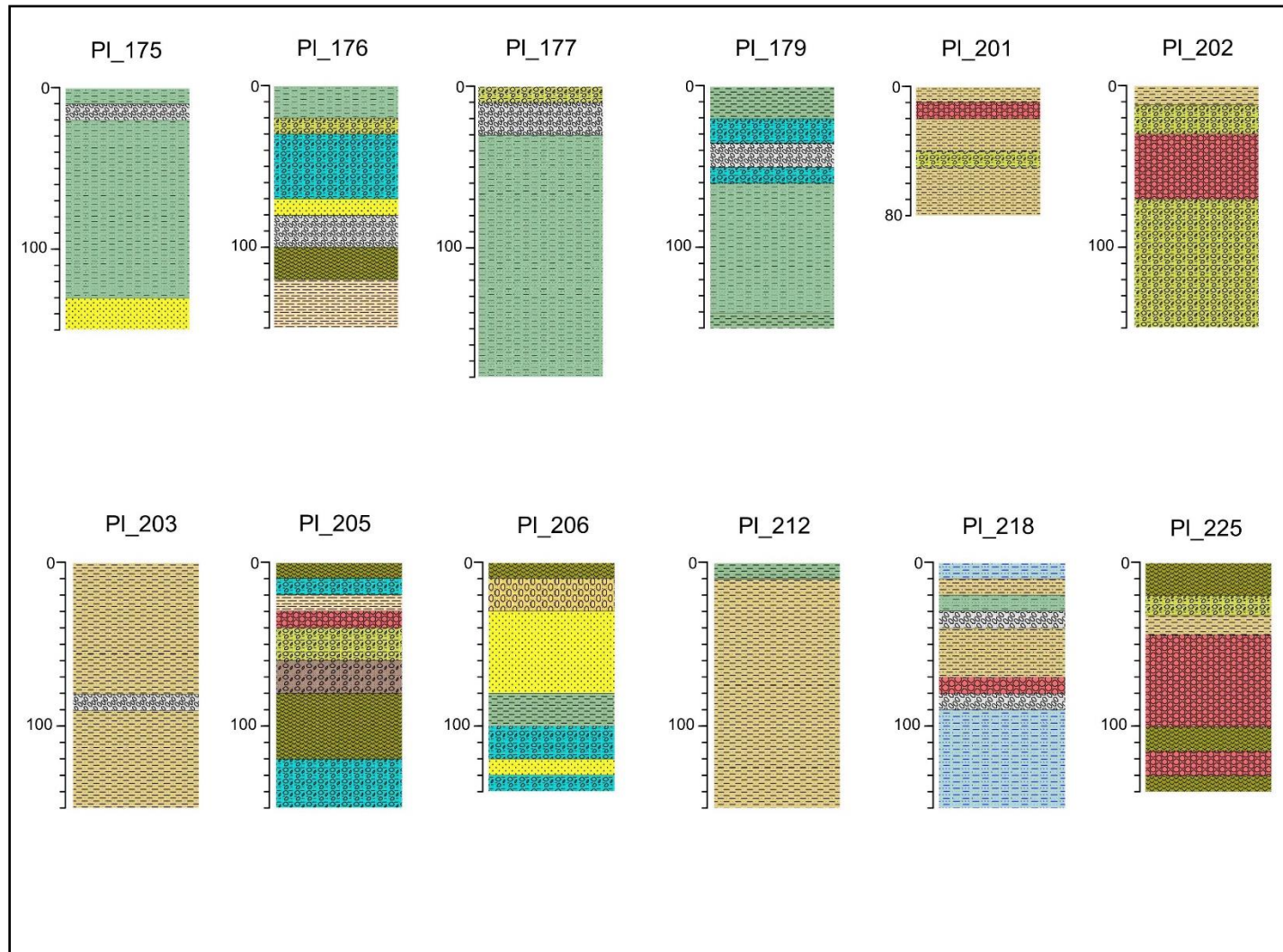
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



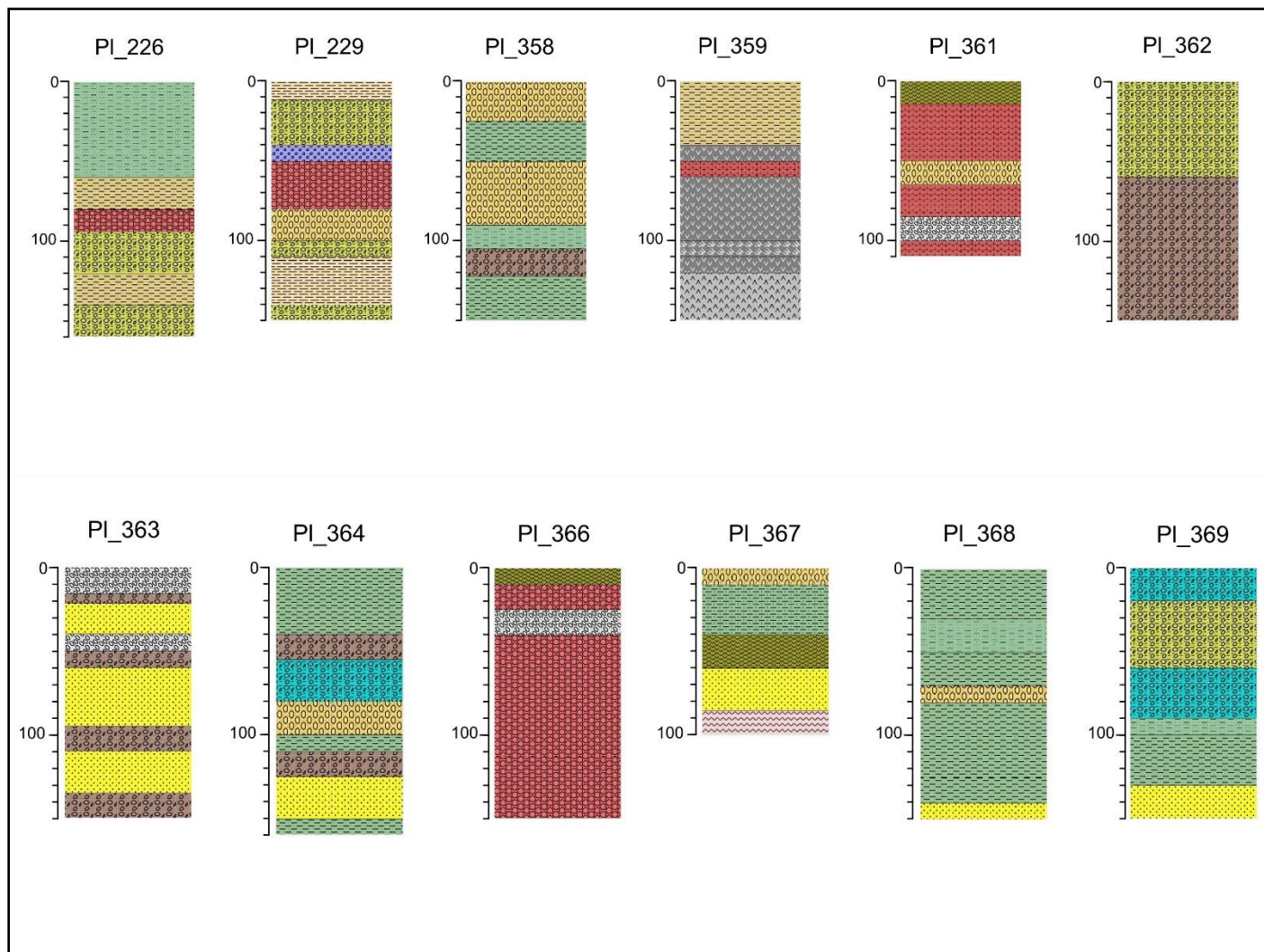
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



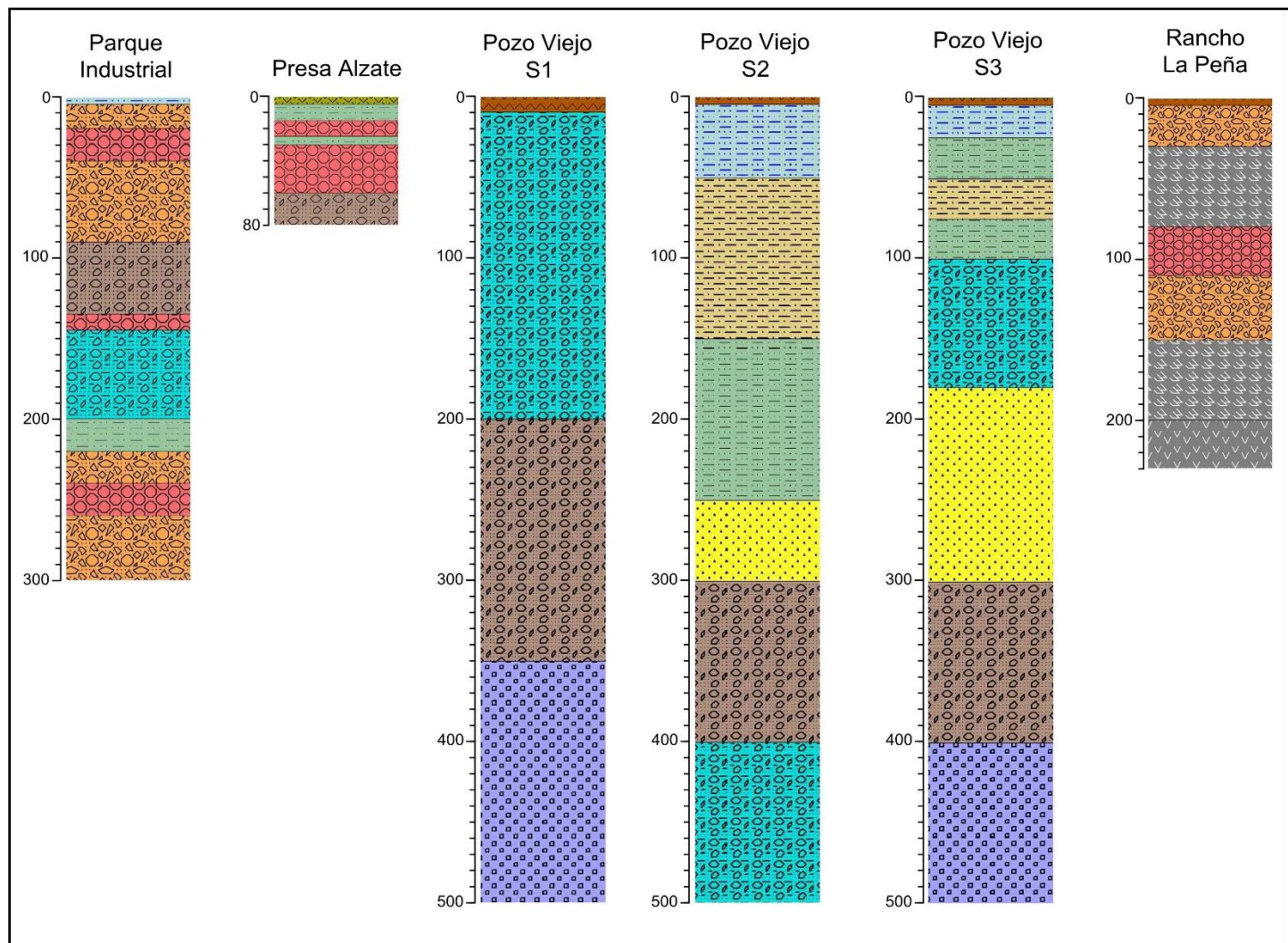
**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).

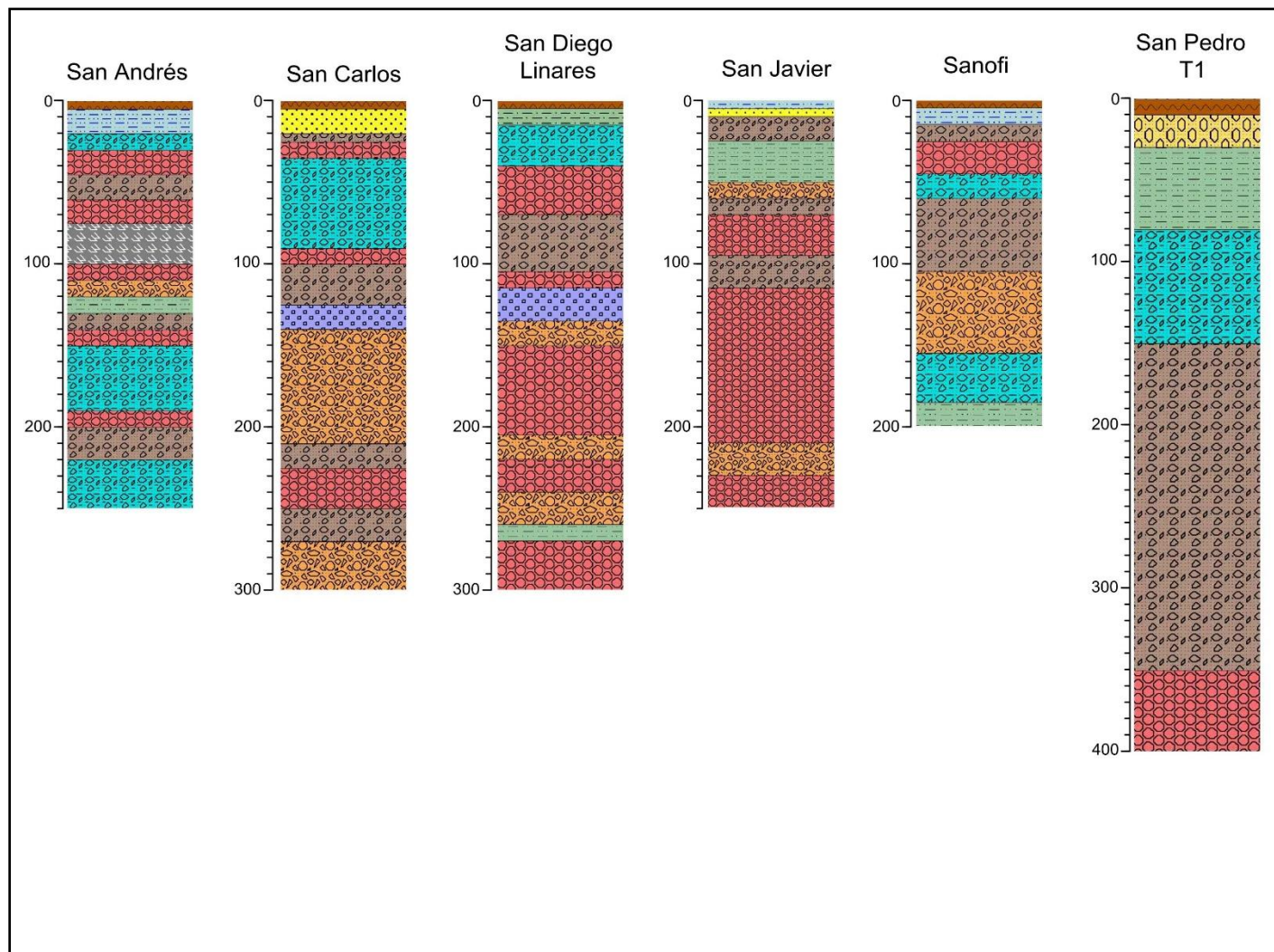


**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



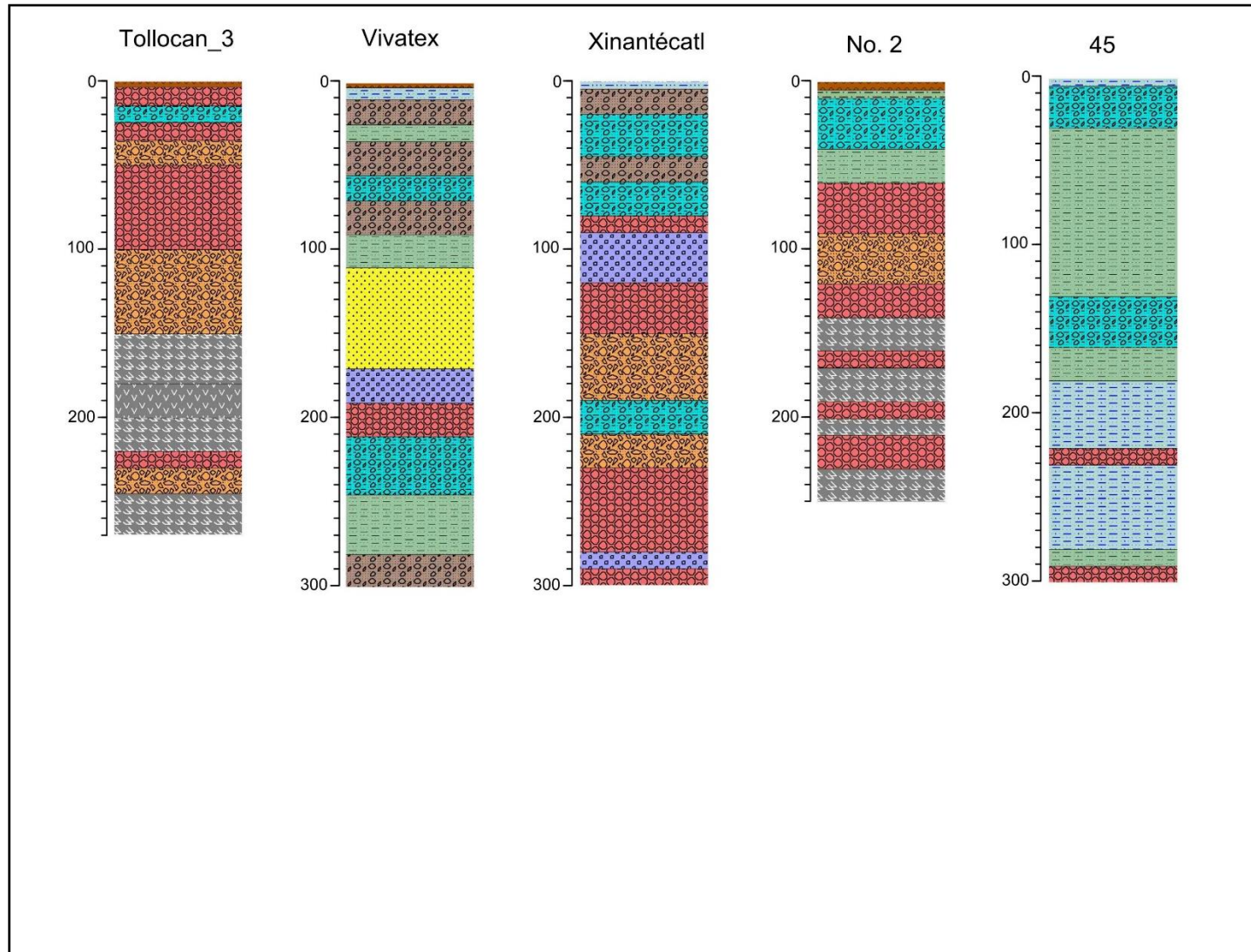


**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).





**Anexo 4.** Columnas estratigráficas utilizadas para la elaboración del modelo hidrogeofísico (continuación).



**Anexo 5.** Datos y parámetros correspondientes a los puntos y pozos obtenidos para el cálculo de la conductancia longitudinal (S, en Siemens).

Punto	X	Y	N.E.	Capas	h (m)	$\rho_a$ ( $\Omega m$ )	S Capas	S Total
Punto 01	432667	2135562	60	Ar-Sh	10	25	0.4000	2.0263
				Ar	10	55	0.1818	
				Ar-Sh	20	20	1.0000	
				Tb-Ar-Sh	20	45	0.4444	
Punto 02	432490	2134800	60	Suelo	5	70	0.0714	1.8791
				Ar-Sh	15	30	0.5000	
				Gr-Ar	20	65	0.3077	
				Ar-Sh	20	20	1.0000	
PI_201	432581	2133280	70	Ar-Sh	10	15	0.6667	3.3275
				Cong	10	95	0.1053	
				Ar-Sh	20	20	1.0000	
				Gr-Ar-Sh	10	45	0.2222	
				Ar-Sh	20	15	1.3333	
Punto 03	432480	2132687	50	Ar-Sh	10	15	0.6667	2.8667
				Sh	10	10	1.0000	
				Ar-Sh	30	25	1.2000	
Punto 04	433464	2132543	55	Suelo	5	60	0.0833	1.2857
				Lm-Sh	15	30	0.5000	
				Ar-Sh	10	35	0.2857	
				Gr-Ar-Lm	25	60	0.4167	
Punto 05	433430	2133572	50	Ar-Sh	10	25	0.4000	2.9152
				Sh	10	5	2.0000	
				Gr-Ar-Lm	10	55	0.1818	
				Ar	20	60	0.3333	
Punto 06	433446	2134538	55	Ar-Sh	10	20	0.5000	3.2000
				Sh	15	10	1.5000	
				Ar-Sh	30	25	1.2000	
Punto 07	433433	2135572	50	Ar-Sh	15	30	0.5000	2.2083
				Sh	20	15	1.3333	
				Ar-Sh	15	40	0.3750	
Punto 08	434439	2135585	60	Ar-Lm-Sh	5	35	0.1429	2.9307
				Ar-Sh	10	30	0.3333	
				Ar	25	55	0.4545	
				Sh	20	10	2.0000	

**Anexo 5.** Datos y parámetros correspondientes a los puntos y pozos obtenidos para el cálculo de la conductancia longitudinal (S, en Siemens).

Punto	X	Y	N.E.	Capas	h (m)	$\rho_a$ ( $\Omega m$ )	S Capas	S Total
Punto 09	434400	2134556	65	Ar-Lm-Sh	10	30	0.3333	3.5476
				Sh	25	10	2.5000	
				Ar-Sh	25	35	0.7143	
Bosch_02	434796	2133415	35	Suelo	5	110	0.0455	1.5326
				Lm-Sh	20	15	1.3333	
				Gr-Ar-Lm	10	65	0.1538	
Holliday Inn	434296	2132753	35	Lm-Sh	5	10	0.5000	1.7381
				Ar-Lm-Sh	10	15	0.6667	
				Gr-Ar-Lm	20	35	0.5714	
Nestlé	435382	2132881	40	Suelo	5	85	0.0588	0.6253
				Gr-Ar-Lm	10	55	0.1818	
				Gr-Ar	25	65	0.3846	
Manzanita	435197	2133284	50	Suelo	3	50	0.0600	0.8822
				Lm-Ar	27	45	0.6000	
				Cong	20	90	0.2222	
Punto 10	435473	2134577	55	Lm	10	20	0.5000	2.3500
				Ar	10	50	0.2000	
				Lm-Sh	10	25	0.4000	
				Sh	10	10	1.0000	
				Gr-Ar-Lm	15	60	0.2500	
Punto 11	435496	2135530	60	Suelo	5	80	0.0625	2.6928
				Lm-Sh	15	25	0.6000	
				Sh	10	10	1.0000	
				Lm-Sh	10	15	0.6667	
				Gr-Ar-Lm	20	55	0.3636	
Vimo	436589	2135700	40	Lm-Sh	5	10	0.5000	1.0511
				Cong	15	80	0.1875	
				Gr-Ar-Lm	20	55	0.3636	
Punto 12	436415	2134575	55	Gr-Ar-Lm	5	55	0.0909	0.9659
				Ar-Sh	15	40	0.3750	
				Gr-Ar-Lm	10	60	0.1667	

**Anexo 5.** Datos y parámetros correspondientes a los puntos y pozos obtenidos para el cálculo de la conductancia longitudinal (S, en Siemens).

Punto	X	Y	N.E.	Capas	h (m)	$\rho_a$ ( $\Omega$ m)	S Capas	S Total
				Cong	25	75	0.3333	
Fisher	436536	2133618	65	Suelo	3	130	0.0231	1.0476
				Lm-Ar	7	35	0.2000	
				Gr-Ar-Lm	40	60	0.6667	
				Cong	15	95	0.1579	
Chrysler	436183	2132913	45	Suelo	3	50	0.0600	0.8519
				Lm-Ar	7	45	0.1556	
				Gr-Ar-Lm	35	55	0.6364	
Pilares	437363	2132472	50	Suelo	5	95	0.0526	1.1360
				Gr-Ar-Lm	20	80	0.2500	
				Ar-Lm-Sh	25	30	0.8333	
Punto 13	437457	2133512	60	Lm-Sh	10	20	0.5000	1.5301
				Pmz	10	40	0.2500	
				Tz	10	55	0.1818	
				Pmz	20	45	0.4444	
				Gr-Ar-Lm	10	65	0.1538	
Punto 14	437414	2134600	65	Lm-Sh	5	25	0.2000	1.5690
				Pmz	10	35	0.2857	
				Lm	10	30	0.3333	
				Pmz	10	40	0.2500	
				Gr-Ar-Lm	30	60	0.5000	
Geovillas	437452	2135484	45	Lm-Sh	20	15	1.3333	1.7879
				Gr-Ar	25	55	0.4545	
Punto 15	438452	2135528	55	Lm	10	30	0.3333	0.9783
				Cnz	10	65	0.1538	
				Gr-Ar-Lm	20	70	0.2857	
				Tz	5	80	0.0625	
				Gr-Lm-Ar	10	70	0.1429	
Lovera	438678	2135032	35	Suelo	5	95	0.0526	1.7971
				Lm-Sh	15	10	1.5000	
				Cong	10	75	0.1333	

**Anexo 5.** Datos y parámetros correspondientes a los puntos y pozos obtenidos para el cálculo de la conductancia longitudinal (S, en Siemens).

Punto	X	Y	N.E.	Capas	h (m)	$\rho_a$ ( $\Omega m$ )	S Capas	S Total
Punto 16	438467	2134531	50	Gr-Ar-Lm	5	45	0.1111	0.8745
				Lm	10	30	0.3333	
				Cnz	5	65	0.0769	
				Gr-Ar-Lm	15	70	0.2143	
Olimpo	438086	2134032	50	Tz	20	80	0.2500	1.2727
				Lm-Sh	10	15	0.6667	
				Gr-Ar-Lm	10	55	0.1818	
				Cong	10	90	0.1111	
				Gr-Ar-Lm	10	45	0.2222	
Punto 17	438411	2133530	55	Cong	10	110	0.0909	0.9838
				Lm	10	30	0.3333	
				Cnz	5	55	0.0909	
				Cong	15	90	0.1667	
				Cnz	10	70	0.1429	
Tollocan 03	438499	2132697	40	Gr-Ar-Lm	15	60	0.2500	0.6192
				Suelo	3	110	0.0273	
				Cong	12	70	0.1714	
				Cong	10	80	0.1250	
				Brch	5	110	0.0455	
Punto 18	438387	2132540	60	Lm	5	30	0.1667	0.7133
				Tz	5	70	0.0714	
				Cong	15	110	0.1364	
				Gr-Ar-Lm	20	90	0.2222	
				Cong	10	120	0.0833	
				Brch	5	150	0.0333	
Punto 19	439424	2132498	65	Lm	10	30	0.3333	0.9554
				Cong	20	80	0.2500	
				Gr-Ar-Lm	10	70	0.1429	
				Cong	15	90	0.1667	
				Brch	10	160	0.0625	
Safmex	439847	2133390	45	Suelo	5	125	0.0400	1.3203

**Anexo 5.** Datos y parámetros correspondientes a los puntos y pozos obtenidos para el cálculo de la conductancia longitudinal (S, en Siemens).

Punto	X	Y	N.E.	Capas	h (m)	$\rho_a$ ( $\Omega$ m)	S Capas	S Total
03				Lm-Ar	5	30	0.1667	
				Gr-Ar	20	55	0.3636	
				Lm-Ar-Sh	15	20	0.7500	
San Pedro_01	439602	2134585	45	Suelo	5	100	0.0500	0.7375
				Tb-Ar	25	80	0.3125	
				Lm-Ar-Sh	15	40	0.3750	
Punto 20	439423	2135560	50	Lm	10	30	0.3333	1.1984
				Lm-Sh	10	20	0.5000	
				Cong	20	90	0.2222	
				Gr-Ar-Lm	10	70	0.1429	
Punto 21	440419	2135506	55	Lm	10	25	0.4000	1.8643
				Lm-Sh	10	15	0.6667	
				Ar-Sh	10	40	0.2500	
				Gr-Ar-Lm	15	70	0.2143	
				Lm	10	30	0.3333	
Punto 22	440458	2134529	50	Lm	5	30	0.1667	1.5417
				Lm-Sh	10	20	0.5000	
				Ar-Sh	5	40	0.1250	
				Ar	10	60	0.1667	
				Ar-Sh	10	40	0.2500	
				Lm	10	30	0.3333	
Punto 23	440431	2133605	55	Lm	10	30	0.3333	2.0190
				Lm-Sh	10	20	0.5000	
				Lm	15	30	0.5000	
				Ar-Sh	10	35	0.2857	
				Lm	10	25	0.4000	
Punto 24	440496	2132541	75	Lm	5	30	0.1667	1.8199
				Cong	15	100	0.1500	
				Lm-Sh	10	15	0.6667	
				Gr-Ar-Lm	10	60	0.1667	
				Cong	10	90	0.1111	
				Brch	10	170	0.0588	
				Lm	15	30	0.5000	

**Anexo 5.** Datos y parámetros correspondientes a los puntos y pozos obtenidos para el cálculo de la conductancia longitudinal (S, en Siemens).

Punto	X	Y	N.E.	Capas	h (m)	$\rho_a$ ( $\Omega$ m)	S Capas	S Total
Punto 25	441440	2132577	55	Lm	10	25	0.4000	1.5190
				Ar-Sh	15	45	0.3333	
				Ar-Lm-Sh	10	35	0.2857	
				Ar-Sh	20	40	0.5000	
Punto 26	441487	2133489	50	Lm	15	30	0.5000	1.6333
				Ar-Sh	15	45	0.3333	
				Lm	20	25	0.8000	
Punto 27	441398	2134551	55	Lm	15	30	0.5000	1.5536
				Ar-Sh	15	35	0.4286	
				Lm-Ar-Sh	25	40	0.6250	
Vivatex_02	441231	2135310	30	Suelo	3	100	0.0300	1.0717
				Lm-Sh	7	15	0.4667	
				Gr-Ar	15	40	0.3750	
				Lm-Ar-Sh	5	25	0.2000	
Punto 28	442322	2135574	60	Lm	15	30	0.5000	1.6786
				Ar-Sh	15	40	0.3750	
				Lm-Ar-Sh	15	35	0.4286	
				Ar-Sh	15	40	0.3750	
Punto 29	442326	2134656	65	Lm	15	30	0.5000	1.6036
				Ar-Sh	15	50	0.3000	
				Lm-Ar-Sh	15	35	0.4286	
				Ar-Sh	15	40	0.3750	
Punto 30	442347	2133627	55	Lm	15	30	0.5000	1.4061
				Ar-Sh	15	50	0.3000	
				Lm-Ar-Sh	15	45	0.3333	
				Ar-Sh	15	55	0.2727	
Punto 31	442329	2132563	50	Lm	15	40	0.3750	1.2811
				Ar-Sh	15	50	0.3000	
				Lm-Ar-Sh	15	45	0.3333	
				Ar-Sh	15	55	0.2727	