**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

# Evaluación geohidrológica de la fracción norte del acuífero Valparaíso, Zacatecas

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

DANIA ISAURA PASILLAS PASILLAS

Ensenada, Baja California, México, 2012.

TESIS DEFENDIDA POR

**Dania Isaura Pasillas Pasillas**

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Rogelio Vázquez González
*Director del Comité*

M. en C. Juan Manuel Espinosa C.
*Miembro del Comité*

M. en C. Francisco Suárez Vidal
*Miembro del Comité*

Dr. Jorge Torres Rodríguez
*Miembro del Comité*

Dr. Antonio González Fernández
*Coordinador del programa de posgrado en Ciencias de la Tierra.*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
*Director de Estudios de Posgrado*

23 de mayo de 2012

**RESUMEN** de la tesis de **Dania Isaura Pasillas Pasillas,** presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales. Ensenada, Baja California. Mayo de 2012.

**EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LA FRACCIÓN NORTE DEL ACUÍFERO VALPARAÍSO, ZACATECAS.**

Resumen aprobado por:

Dr. Rogelio Vázquez González.
Director de Tesis

En el presente trabajo se analiza información geofísica, hidrogeoquímica e hidrogeológica del sector norte del acuífero Valparaíso, en el estado de Zacatecas, con clave 3204, de la Región Hidrológica número 12, con el objetivo de identificar factores geológicos que controlan y favorecen el flujo de agua subterránea, definir el comportamiento del nivel piezométrico, así como analizar la calidad de agua.
Mediante la aplicación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se organizó y analizó información disponible de geología regional y local, estratigráfica, hidrogeológica y de magnetometría aérea, para identificar las estructuras geohidrológicas presentes en la zona. En tanto que para establecer la clasificación y características físico-químicas del agua y determinar la relación entre el recurso y la geología del lugar, se realizaron visitas de campo para la recopilación y análisis de muestras de agua, provenientes de pozos y norias.
Una vez analizados los datos hidrológicos, hidrogeoquímicos y geofísicos, se procedió a correlacionar los resultados identificándose las estructuras geohidrológicas y parámetros físico-químicos que permitieron determinar que: el agua que se extrae en la zona corresponde a un mismo acuífero, conos de abatimiento bastante pronunciados en los pozos situados en la cabecera municipal de Valparaíso y sus alrededores, aguas muy duras en su mayoría, parámetros fisicoquímicos (Flúor 8.2 ppm y Magnesio 24.7 ppm) fuera del rango de concentración regulado por NOM-127-SSA1-1994, y en general no aptas para el consumo humano si éstas no son sometidas a un proceso de purificación.

**Palabras Clave:** geohidrología, magnetometría aérea, análisis físico-químicos, acuífero Valparaíso.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Dania Isaura Pasillas Pasillas** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Earth Sciences. Ensenada, Baja California, México. May 2012.

**GEOHYDROLOGICAL EVALUATION OF THE NORTH FRACTION OF VALPARAÍSO, ZACATECAS AQUIFER.**

The present work analyzes geophysical, hydrogeochemical and hydrogeological information in the northern sector of Valparaiso aquifer, at the State of Zacatecas, with code 3204 of the hydrological region number 12, in order to identify geological factors that control and favor groundwater flow, define the behavior of the piezometric level, as well as analyze water quality.

Through the application of geographic information systems (GIS) tools available information from regional and local geology, hydrogeology, stratigraphic and air magnetometry, was organized and analysed to identify the geohydrological structures present in the area. As for the classification and physico-chemical characteristics of the water and determine the rock-water interactions of the site, field trips were conducted for sampling and analysis of water samples, from wells and draw-wells.

Once hydrogeochemical, geophysical and hydrological data was analyzed, we proceed to correlate the results identifying geohydrological structures and physico-chemical parameters that allowed us to determine that: the water that is extracted in the area corresponds to ~~a~~ the same aquifer, quite pronounced abatement cones in the wells located in the municipality of Valparaiso and its surroundings, very hard water mostly, physicochemical parameters (fluorine 8.2 ppm and magnesium 24.7 ppm) outside the range of concentration regulated by NOM-127-SSA1-1994, and generally unfit for human consumption if there are not subject to purification process.

**Keywords:** geohydrology, air magnetometry, physicochemical analysis, Valparaíso aquifer.

## Dedicatorias

***A***hora, luego de diez años alejada de ustedes.

***M***i corazón se extasía de saber completados sueños, quimeras e
***I***lusiones, que sin su confianza, cariño, apoyo, esperanza y

***F***ortaleza, jamás hubiera sido posible continuar luchando y
***A***ferrándome a mis ideales, porque a veces parecía ser
***M***ejor regresar al mismo sendero, que continuar con las duras pruebas que
***I***mplica el osar seguir soñando hasta alcanzar la meta,
***L***a cual se acerca veloz en este arduo recorrido. En mente llevaré
***I***nolvidables experiencias que han coadyuvado a lograrlo. GRACIAS A MIS
***A***MORES! Siempre serán el combustible de mi vida.

***Mamá, Papá, Nidia, Rosy, Vilma, Doris, Abelito, Nita y muy en especial a mi Ángel Centinela, la estrella más luminosa en el Cielo (Mi Nen). Para ustedes este pequeño, pero sustancioso fruto de la aventura que aquí concluye.***

***Con cariño a la persona especial que motiva mi vida.***

## Agradecimientos

A Dios por otorgarme vida y salud, en estos años transcurridos, la experiencia adquirida, la sabiduría proporcionada y la dicha de haber llegado hasta aquí.

A CICESE por brindarme la oportunidad de realizar el postgrado y a CONACyT por el apoyo económico durante 2 años, para que este fuera posible, siendo registrada con el número de becario 237142.

A mi asesor y amigo Dr. Rogelio Vázquez González por el todo el apoyo recibido de manera incondicional coadyuvando a efectuar este anhelo. Quién desinteresadamente otorgó todo lo que estuvo a su alcance para que se facilitara la realización de este proyecto.

A los miembros de mi comité de tesis M en C Juan Manuel Espinosa Cardeña, M en C Francisco Suárez Vidal, Dr. Jorge Torres Rodríguez, por sus comentarios, observaciones, sugerencias, enseñanza y tiempo invertido en este trabajo.

Al Dr. Thomas Gunter Kretzschmar y al M en C Mario Vega, por sus aportaciones y asesorías en el área de Hidrogeoquímica.

Al M en C Mario Alberto Fuentes Arreazola por su colaboración en el trabajo de campo.

A todo el departamento de Ciencias de la Tierra, especialmente a Martha Barrera y Guadalupe Zepeda, por su apoyo para la fluidez de tramites administrativos.

A mis compañeros y amigos por su cariño. En especial a Chanes por soportar en cada momento mis cambios de temperamento.

A los colegas Ing. Héctor Santana Estrada, Ing. Claudio Monsiváis Bermúdez, Ing. Martín De Santiago Moreno e Ing. Eliza Esparza Terrazas, por ser participes del proceso para el acceso a información clave para esta investigación.

A la Lic. Sandra Luna Navejas quién funge como síndico municipal en Valparaíso, por el préstamo del vehículo que nos facilitó la colecta de muestras de agua. Así mismo a los encargados de operar los pozos en las respectivas localidades y/o personas que otorgaron las muestras de agua; Sr. Víctor Hugo Huizar García, Sr. Melquiades Pacheco, Sr. Ramiro Hurtado, Sr. Ramiro Argomaniz, Sr. Tino Padilla, Sr. Luis Fernández, Sr. Domingo Arias, Sr. Luis Cabral, Sr. Melquiades Alamillo, Sr. Alejandro Carrillo, Sr. Alberto del Hoyo, Sr. Jorge Flores, Sr. Miguel Cortes, Sr. Baltazar Vidales, Sr. Cruz Aguirre, Sr. Jesús Hernández, Miguel Soto, Sr. Lino Castañeda Barrios, Sra. Amelia Ibarra Sánchez, Sr. Adrián Aros y Sr. Antonio Luna, por mencionar algunos.

# CONTENIDO

**Resumen español** ..... i
**Resumen ingles** ..... ii
**Dedicatorias** ..... iii
**Agradecimientos** ..... iv
**Lista de figuras** ..... viii
**Lista de tablas** ..... xi
**I. INTRODUCCIÓN** ..... 1
I.1 Localización y vías de acceso ..... 1
I.2 Justificación ..... 2
I.3 Objetivos ..... 3
**II. ANTECEDENTES** ..... 4
II.1 Fisiografía y climatología ..... 4
II.2 Marco geológico ..... 5
*II.2.1 Estratigrafía* ..... 5
*II.2.2 Geología estructural* ..... 7
II.3 Hidrogeología ..... 8
II.4 Uso y administración del recurso hídrico en valparaíso. ..... 9
II.5 Trabajos previos ..... 11
*II.5.1 Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de valparaíso, estado de zacatecas. s.a.r.h., 1980.* ..... 11
*II.5.2 Reactivación de la red de monitoreo piezométrico en el acuífero de valparaíso, cna, 2004.* ..... 11
*II.5.3 Evaluación hidrogeoquímica* ..... 13
*II.5.4 Estudios geohidrológicos-geofísicos en diferentes sitios en el área del acuífero valparaíso. ceapa.* ..... 13
**III. METODOLOGÍA** ..... 20
III.1 Recopilación, revisión y depuración de información previa en la zona ..... 20
III.2 Selección del área de estudio ..... 21
III.3 Exploración geofísica ..... 22
*III.3.1 Reinterpretación de sondeos eléctricos verticales* ..... 23
*III.3.2 Adquisición y análisis de datos aeromagnéticos* ..... 23
III.4 Trabajo de campo ..... 25

# CONTENIDO (Continuación)

*III.4.1 Fase de campo* ..... *26*
*III.4.2 Fase de laboratorio* ..... *27*
III.5 Interpretación e integración de resultados ..... 28
**IV. HIDROGEOQUÍMICA ..... 29**
IV.1 Hidrogeoquímica ..... 29
IV.2 Iones analizados ..... 30
IV.3 Clasificación química del agua subterránea ..... 31
IV.4 Calidad de los análisis químicos ..... 32
IV.5 Rockware aqqa ..... 33
**V. RESULTADOS ..... 34**
V.1 Geofísica ..... 34
*V.1.1 Reinterpretación de SEV's* ..... *34*
*V.1.1 Magnetometría* ..... *40*
V.2 Elaboración de perfiles del nivel piezométrico ..... 44
V.3 Parámetros fisico-químicos in situ ..... 45
*V.3.1 STD y CE* ..... *46*
*V.3.2 pH y Temperatura* ..... *49*
V.4 Parámetros fisico-químicos de laboratorio ..... 50
*V.4.1 Aniones* ..... *53*
*V.4.2 Cationes* ..... *54*
*V.4.3 Diagrama de Piper* ..... *55*
*V.4.4 Diagramas Stiff* ..... *57*
**VI. RELACIÓN DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN ..... 59**
VI.1 Mapas y perfiles aeromagnéticos ..... 59
VI.2 Comportamiento del nivel piezométrico ..... 60
VI.3 Tipos de agua, de acuerdo a sólidos totales disueltos, iones principales y dureza ..61
*VI.3.1 Análisis y distribución de resultados obtenidos* ..... *61*
VI.4 Correlación entre el tipo y calidad del agua con la litología, variación espacial de las familias de agua. ..... 63
*VI.4.1 Correlación: tipo de agua y calidad química-litología* ..... *64*
*VI.4.2 Variación espacial de las familias de agua* ..... *66*

# CONTENIDO (Continuación)

**VII. CONCLUSIONES** ..... **68**
**Referencias bibliográficas** ..... **70**
**ANEXOS** ..... **72**

# LISTA DE FIGURAS


| *Figura* | | *Página* |
|---|---|---|
| 1 | Ubicación del acuífero Valparaíso. El mapa muestra la topografía del terreno, red de drenaje superficial, cuerpos de almacenamiento de agua, estaciones climatológicas alrededor de área, localidades rurales y urbanas, así como las principales vías de comunicación. | 2 |
| 2 | Geología del acuífero Valparaíso. Muestra tipos de rocas en la región, red de drenaje superficial, cuerpos de almacenamiento de agua, localidades rurales y urbanas, así como las principales vías de comunicación. | 6 |
| 3 | Configuración de la profundidad al Nivel Estático a lo largo del cause principal del río Valparaíso (CNA, 2004). | 12 |
| 4 | Ubicación geográfica de los SEV's y cortes litológicos de los pozos en la comunidades de Las Pomas, Mala Noche, Vicente Escudero y Mimbres el cual coincide con el SEV 1. | 19 |
| 5 | ÁREA DE ESTUDIO. Subcuenca Río Valparaíso. Muestra el relieve del terreno, corrientes de agua superficial, localidades rurales y urbanas. | 22 |
| 6 | Sitios de muestreo. Representa el relieve de la subcuenca Río Valparaíso, la ubicación de localidades rurales, urbanas y localización de pozos muestreados. | 26 |
| 7 | Muestra la curva de resistividades obtenida en campo y la del modelado considerando 4 capas sobre el semiespacio. | 36 |
| 8 | Muestra la curva de resistividades obtenida en campo y la de modelado, considerando 5 capas sobre el semiespacio. | 37 |
| 9 | Muestra la curva de resistividades obtenida en campo y la de modelado, considerando 4 capas sobre el semiespacio. | 39 |
| 10 | Mapa aeromagnético de la subcuenca Río Valparaíso (fuente SGM) y perfiles modelados A y B. | 41 |
| 11 | Mapa aeromagnético de la subcuenca Río Valparaíso (fuente GeoNet). | 41 |

# LISTA DE FIGURAS (continuación)


| *Figura* | | *Página* |
|---|---|---|
| 12 | Perfil A, Perfil A. [a] La línea color azul indica la curva del modelo, mientras que los puntos color rosa los datos medidos. [b] Las líneas verde inferior y superior indican la topografía y la altura de vuelo, respectivamente. Los polígonos representan los posibles cuerpos en el subsuelo con sus respectivas susceptibilidades indicadas en la barra de colores. | 42 |
| 13 | Perfil B, [a] La línea color azul indica la curva del modelo, mientras que los puntos color rosa los datos medidos. [b] Las líneas verde inferior y superior indican la topografía y la altura del vuelo, respectivamente. Los polígonos representan los posibles cuerpos en el subsuelo con sus respectivas susceptibilidades indicadas en la barra de colores. | 43 |
| 14a | Localización de pozos de la red piezométrica de la CNA. | 45 |
| 14b | Perfiles que indican la evolución del nivel estático en el periodo 2004 a 2010, de los cuales sólo se tiene información viable para los años 2004, 2005, 2007, 2008 y 2010. | 45 |
| 15 | Representación gráfica de los valores medidos de STD y geología de la subcuenca. | 48 |
| 16 | Representación gráfica de los valores medidos de CE y campo total de la subcuenca. | 49 |
| 17 | Representación gráfica de los valores medidos de pH y geología de la subcuenca. | 50 |
| 18 | Representación gráfica de los valores medidos de temperatura y geología de la subcuenca. | 51 |
| 19 | Diagrama de Piper, esquematiza los resultados obtenidos en cada muestra. Las muestras quedan en el área del trapecio, correspondiente a agua interaccionando con arenisca (Zuurdeeg and Van Der Weiden, 1985). | 56 |

# LISTA DE FIGURAS (continuación)


| *Figura* | | *Página* |
|---|---|---|
| 20 | Diagrama de Stiff, esquematiza los resultados obtenidos en cada muestra correlacionados con la geología del lugar. | 58 |

# LISTA DE TABLAS


| *Tabla* | | *Página* |
|---|---|---|
| I | Número de obras y volumen de extracción por uso. | 10 |
| II | Interpretación cuantitativa del primer sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Maíz Prieto¨ propiedad del Sr. Florencio Hernández del Hoyo. | 14 |
| III | Interpretación cuantitativa del segundo sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Llano¨, propiedad de la señora Clara Huizar viuda de Hurtado. | 15 |
| IV | Interpretación cuantitativa del tercer sondeo eléctrico vertical, ubicado en el pozo agrícola No.1 en el predio Monte de los Lobos. | 16 |
| V | Interpretación del corte litológico del pozo realizado en el sitio localizado del primer sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Maíz Prieto¨ propiedad del Sr. Florencio Hernández del Hoyo. | 16 |
| VI | Interpretación del corte litológico del pozo realizado en el área de recreación de la escuela primaria Miguel Hidalgo en la comunidad de Vicente Escudero. | 17 |
| VII | VII. Interpretación del corte litológico del pozo realizado en la comunidad de Mala Noche, ubicado en las cercanías del arroyo que cruza la localidad. | 18 |
| VIII | Interpretación del corte litológico del pozo realizado en la localidad de Las Pomas, situado a pocos metros del puente, con el mismo nombre, sobre la carretera Valparaíso-Fresnillo. | 18 |
| IX | Clasificación del agua subterránea basándose en la concentración de STD. Uso principal para el que se recomienda el agua en función de dicha concentración (según NOM-127-SSA1-1994). | 31 |
| X | Clasificación química del agua subterránea de acuerdo a los iones dominantes. | 32 |

# LISTA DE TABLAS (continuación)


| *Tabla* | | *Página* |
|---|---|---|
| XI | Clasificación química del agua de acuerdo a su dureza. | 32 |
| XII | Interpretación cuantitativa del primer sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Maíz Prieto¨ propiedad del Sr. Florencio Hernández del Hoyo. | 36 |
| XIII | Interpretación cuantitativa del segundo sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Llano¨. | 38 |
| XIV | Interpretación cuantitativa del tercer sondeo eléctrico vertical, ubicado en el pozo agrícola No.1 en el predio Monte de los Lobos. | 39 |
| XV | Coordenadas UTM de los sitios de muestreo y parámetros in situ. | 47 |
| XVI | Resultados obtenidos en el balance iónico de los datos obtenidos en cada muestra y la clasificación de acuerdo al ion dominante. | 52 |
| XVII | Resultados obtenidos en el análisis de aniones realizado en el laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE. | 53 |
| XVIII | Resultados obtenidos en el análisis de cationes, realizado por analítica del noroeste S.A. de C.V. | 55 |

# Capítulo I

# INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta información del área de estudio, justificación y los objetivos que se pretenden cumplir con el desarrollo del trabajo de tesis. Una vez que sean definidos los conceptos anteriores, se procederá a describir los antecedentes, procedimientos y resultados que conforman el estudio, para finalmente obtener las conclusiones y proponer algunas recomendaciones que conduzcan a un mejor manejo del acuífero. La presentación del trabajo se ha dividido en VII capítulos, los cuales se desarrollarán más adelante.

## I.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El acuífero Valparaíso se ubica en la porción suroeste del Estado de Zacatecas, comprende una superficie de 4,367 $km^2$ (5.44% del territorio estatal), con coordenadas geográficas entre 22°15'00" - 23°15'00" latitud norte y 103°00´00" - 104°00'00" longitud oeste, esta zona cubre en su totalidad el municipio de Monte Escobedo y de manera parcial a los municipios de Susticacán y Valparaíso, en los límites con el estado de Jalisco (figura 1). Pertenece a la región hidrológica No. 12 "Lerma-Chapala-Santiago", en la cuenca hidrológica "Río Bolaños" y forma parte de las subcuencas Río Valparaíso, San Mateo y Río Colotlán. El cauce de mayor importancia es el Río Valparaíso el cual es afluente del Río Santiago.

La zona se encuentra comunicada por la carretera estatal No. 54, que la cruza de NE a SW, enlazando las poblaciones de Fresnillo y Valparaíso. Las restantes vías terrestres consisten de terracerías y caminos vecinales que comunican con los poblados y rancherías de toda el área.

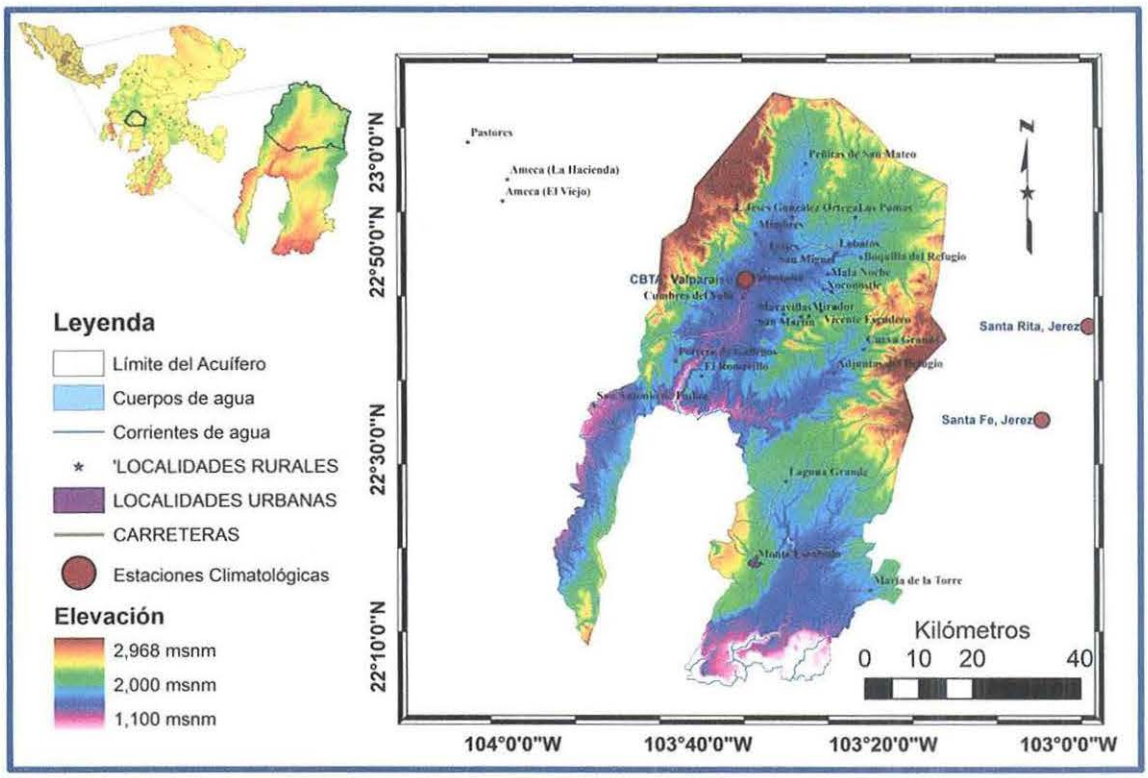


**Figura 1.** ***Ubicación del acuífero Valparaíso. El mapa muestra la topografía del terreno, red de drenaje superficial, cuerpos de almacenamiento de agua, estaciones climatológicas alrededor del área, localidades rurales y urbanas, así como las principales vías de comunicación.***

Las actividades económicas de importancia que se desarrollan en esta región son la agricultura de riego y temporal, el valle de Valparaíso y zonas bajas son propicios para el cultivo de chile, frijol, maíz, vid y árboles frutales como el durazno y manzana. Otra actividad es la ganadería, siendo la cría de ganado bovino y caprino de las principales que se llevan a cabo en esta región (INEGI 2010).

## *I.2 JUSTIFICACIÓN*

Durante los últimos 40 años, uno de los problemas ambientales que más ha afectado al planeta es la falta de agua dulce y la sobreexplotación de los acuíferos, ya que son una de las fuentes más importantes de agua para consumo humano. México tiene una realidad hídrica complicada; el centro, norte y noroeste del país, contiene el 77% de la población y solamente el 31% del agua renovable, mientras que el sureste contiene el 23% de la población y dispone del 69% del

agua restante (CONAGUA 2007), además posee alrededor de 653 acuíferos en todo el país y más de 101 se encuentran en estado de sobreexplotación (INEGI 2007), lo que pone en peligro el suministro de agua de varias ciudades y poblaciones. El riesgo no es solo por la escasez, sino por la contaminación en diversos sectores productivos como el agrícola y el industrial, además de la basura y deshechos de cualquier índole que se generan en las zonas urbanas. Nuestra zona de estudio es extensamente rural con una densidad demográfica relativamente baja y gran escasez del recurso. Por lo cual se infiere que los problemas de abastecimiento no radican en causas antropogénicas, sino que están relacionados con las características físicas del lugar y/o las condiciones climatológicas predominantes en la zona.

## I.3 OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es conocer el origen de la problemática con el suministro de agua en la región, caracterizar la fracción norte del acuífero Valparaíso, identificar las condiciones geológicas que pudieran favorecer el flujo de agua subterránea, determinar el comportamiento del nivel piezométrico, así como analizar la calidad de agua y los factores más importantes para explicar las condiciones del acuífero. Se pretende que los resultados obtenidos puedan servir de soporte y referencia para el apropiado manejo del recurso hidráulico subterráneo teniendo en cuenta su calidad.

# Capítulo II

# ANTECEDENTES

El presente capítulo contiene información a la que se tuvo acceso durante la investigación e indica los principales rasgos a considerar a la hora de hacer uso de la misma, además de otorgar una breve descripción de características y condiciones físicas de Valparaíso y el acuífero del mismo nombre, con el fin de tener un panorama general y en ocasiones detallado, de términos y datos que se manejan en este trabajo. Por lo que el capítulo se dividió en 4 apartados: 1) Fisiografía y Climatología, 2) Marco Geológico, 3) Hidrogeología, 4) Uso y administración del recurso en la zona. A continuación se presenta la descripción de cada uno de ellos.

## II.1 FISIOGRAFÍA Y CLIMATOLOGÍA

El acuífero Valparaíso se ubica en el extremo sureste de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, cerca del límite con la provincia fisiográfica de la Meseta Central (Anexo I.1, figura 21). La zona está caracterizada por la presencia de rocas ígneas extrusivas principalmente de composición riolítica del Terciario, las cuales se encuentran constituyendo las elevaciones topográficas que predominan en la región. En algunos sitios, coronando a las rocas riolíticas, se presentan derrames de lavas de composición basáltica y edad del Terciario. Ocupa en forma parcial la Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos. Los sistemas de topoformas que se presentan en el área son: un piso amplio de valle que se encuentra delimitado al oriente por una sierra baja y al poniente por mesetas pequeñas con cañadas (CONAGUA, 2009).

En la dirección norte del valle de Valparaíso, el clima se clasifica en semiseco-templado, hacia el sur en semiseco-semicálido. Hacia las mayores elevaciones

topográficas, principalmente hacia el noroeste y sureste, el clima se clasifica como templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2011) (Anexo I.1, figura 22).

El valle de Valparaíso tiene forma alargada en donde la precipitación oscila entre 500 y 800 mm (Anexo I.1, figura 23). Hacia las regiones topográficamente más elevadas que circundan al valle la precipitación media anual es ligeramente mayor a los 500 mm (INEGI, 2010). En la región solo existe una estación climatológica, donde se registró precipitación pluvial media anual que varía de 400 a 850 mm durante los últimos 8 años (INIFAP, 2010) (Anexo I.1, figura 24).

La temperatura media anual en el valle de Valparaíso es de 17° C y disminuye hacia las elevaciones topográficas, donde ésta es de alrededor de 14° C (INEGI 2010). Registrando máximos y mínimos de 27°C y 7°C respectivamente, en el mismo lapso de historial de registro en la estación del INIFAP (Anexo I.1, figura 25).

## II.2 MARCO GEOLÓGICO

### *II.2.1 ESTRATIGRAFÍA*

En la zona se tienen identificadas unidades que representan un registro geológico que comprende del Cretácico al Reciente. Las rocas más antiguas que afloran corresponden a una secuencia sedimentaria marina constituida por calizas y calizas arcillosas que subyacen de manera discordante a una secuencia de rocas volcánicas de edad Terciaria. El Cuaternario está representado por depósitos lacustres, aluvión y conglomerados (figura 2).

Sistema Cretácico

La formación Indidura de edad Cretácico Superior, está constituida por una alternancia de calizas y lutitas dispuestas en capas delgadas y medianas. Las calizas son arenosas y las lutitas de composición calcárea. La unidad se presenta muy plegada con fracturamiento intenso; está intrusionada por diques de composición félsica. Sobreyace en forma concordante a la unidad calcárea del cretácico inferior, y subyace de manera discordante a rocas volcánicas. Esta secuencia aflora al oeste de la comunidad Calera de San Miguel.

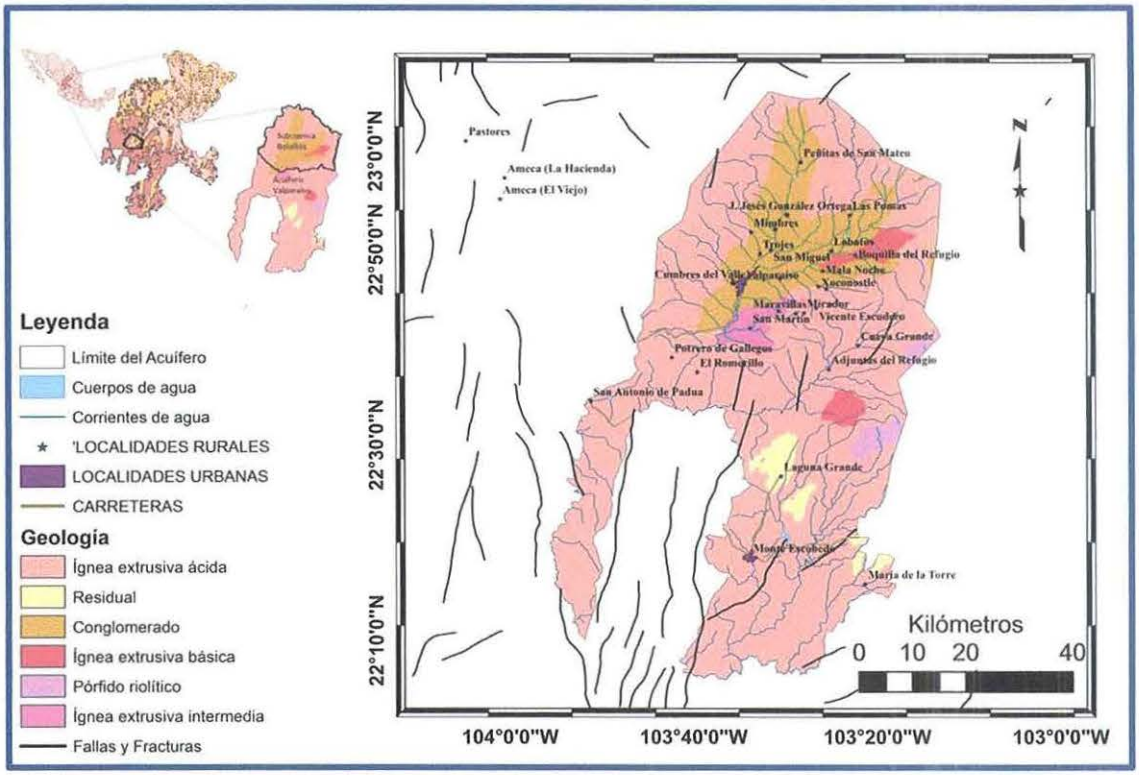


**Figura 2.** ***Geología del acuífero Valparaíso. Muestra tipos de rocas en la región, red de drenaje superficial, cuerpos de almacenamiento de agua, localidades rurales y urbanas, así como las principales vías de comunicación.***

Sistema Terciario

La unidad riolita y toba está integrada por una secuencia de riolitas con intercalaciones de tobas félsicas, su color es rosa claro e intemperiza en rosa oscuro; presenta textura afanítica. La unidad sobreyace discordantemente a rocas calcáreas del Cretácico y subyace a conglomerados y aluviones. Es la unidad que tiene mayor área de exposición en la zona de estudio.

De manera general, las riolitas presentan una textura afanítica y solo localmente en algunos afloramientos presentan textura porfídica. Su estructura es fluidal y en menor proporción esferulítica, su fracturamiento varía de moderado a intenso, de acuerdo a la localidad.

La unidad pórfido andesítico presenta fenocristales de plagioclasa y de hornblenda, de color gris con vivos blancos y con un fracturamiento en bloques. El

pórfido está emplazado en la unidad de riolitas y tobas félsicas por lo que se le asigna una edad correspondiente al Terciario. Se relaciona con la unidad de andesitas y aflora al sureste del poblado Valparaíso.

La secuencia de andesitas consiste en andesitas y andesitas basálticas de textura afanítica y de color gris oscuro con tonos ocre. Se presentan muy fracturadas y con intemperismo esferoidal profundo. En la porción sureste de la zona se manifiesta como mesetas moderadamente disectadas. Aflora de manera importante al sur del poblado Valparaíso.

Sistema Cuaternario

El conglomerado, está constituido por fragmentos de rocas volcánicas félsicas, sobreyace a rocas cretácicas y rocas volcánicas ácidas y subyace a los depósitos lacustres y aluviales. Los aforamientos de esta unidad se presentan en la porción central del valle de Valparaíso.

Basalto, roca de textura afanítica, color gris oscuro a negro, se presenta generalmente en coladas masivas; en algunas localidades se observa lajeado o con estructura columnar. Se presenta formando pequeños lomeríos y mesetas de poca altura y reducido espesor. Sobreyace discordantemente a rocas cretácicas y en algunos lugares de manera concordante a rocas volcánicas ácidas. Su fracturamiento varía de moderado a intenso. Aflora en los alrededores de la localidad Calera de San Miguel.

Aluvión, unidad de suelo de origen aluvial, el cual según la localidad, varía en su granulometría, presentándose el más grueso en los flancos de las sierras y hacia los valles el más fino. En algunos lugares se encuentra cubierto por una costra de caliche de espesor variable, su edad es del reciente. Los afloramientos de esta unidad son de poca extensión, estos se presentan en el cauce de arroyos y del Río Valparaíso.

### *II.2.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL*

Los rasgos tectónicos regionales que caracterizan el área de estudio, son las fallas y fracturas con orientaciones NNE – SSW, que se observan en el valle de

Valparaíso. Las aberturas que presentan las fracturas persisten a profundidades de al menos de 10 a 12 m, originando en algunos sitios de las sierras, zonas en donde se definen verdaderos apilamientos de bloques, de forma más o menos cúbica, esta situación se presenta en algunas áreas de la Sierra de Valparaíso. En las zonas de valles, como el de Valparaíso, es posible que éstos coincidan con trazas de fallas normales de escaso desplazamiento, ya que no alcanzan a poner en contacto vertical rocas de diferentes tipos. Este fallamiento es la impresión de la última manifestación tectónica que afectó a la región, a la cual se le ha dado una edad de 5 millones de años, esto es, de la cima del Mioceno a la base del Pleistoceno; tiempo durante la cual se originaron intrusiones en forma de diques de composición basáltica (SGM, 2005).

## II.3 HIDROGEOLOGÍA

El acuífero Valparaíso está alojado en tobas arenosas del Terciario Inferior que por su extensión se le considera de carácter regional. Tiene forma alargada, con orientación norte - sur, longitudinalmente mide alrededor de 100 km y tiene un ancho máximo de 50 km. Los depósitos granulares del Terciario y Cuaternario se encuentran conformando un acuífero de tipo libre por la alta permeabilidad que los caracteriza, cuyas barreras laterales impermeables y basamento están compuestas por andesitas, calizas y rocas volcánicas, descritas anteriormente. La profundidad del basamento varía de 30 m en los bordes laterales de la porción norte del acuífero, a más de 300 m en la porción sur, en los límites con el estado de Jalisco. La roca que constituye el basamento del acuífero y subyacen al mismo, se consideran de tipo andesítico, puesto que es la roca ígnea más antigua que se ha detectado en la Sierra Madre Occidental, así como en las cercanías del área de estudio (CNA, 2009).

La recarga del acuífero es inducida a través de las rocas ignimbríticas fracturadas y de los depósitos arenosos del Cuaternario. Ambos tipos de rocas suprayacen a las areniscas y conforman las sierras que delimitan el valle, los volúmenes de agua precipitados sobre estos afloramientos percolan hasta las areniscas,

produciéndose la recarga. Otra componente de la recarga es la infiltración de agua que se precipita sobre el mismo valle, la cual fluye de manera superficial por los cauces de los ríos San Mateo (Valparaíso) proveniente de la presa Pajaritos, hoy día atraviesa la mancha urbana en dirección noreste-suroeste, mientras que en sentido este-oeste los arroyos Atotonilco, El Jaral, el Gachupín y los Roldan, cada afluente lleva agua de julio a octubre, además pequeñas escorrentías provenientes del oriente, donde el patrón de drenaje que predomina es de tipo dendrítico subparalelo. Los arroyos se pierden al llegar a la unidad de planicie pues son de régimen intermitente y avenidas torrenciales, su escurrimiento laminar es lento, lo que permite mayor infiltración en el material granular, esto a pesar de que la evaporación es mas alta que en otras unidades, constituye la principal área de recarga de los acuíferos libres. Así mismo, un volumen pequeño proviene de los retornos del riego por bombeo.

La descarga natural puede ser producida por flujo subterráneo, siguiendo la dirección del Río Valparaíso, drenando hacia el sur, hacia el estado de Jalisco. La otra descarga del acuífero, es a través de la explotación que se efectúa por medio de pozos y norias concentrados en el valle.

## II.4 USO Y ADMINISTRACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN VALPARAÍSO.

La actualización del inventario de aprovechamientos hidráulicos subterráneos realizado por la Gerencia Estatal Zacatecas, de la Comisión Nacional del Agua, en febrero de 2005, reveló la existencia de 84 pozos, de estos, atendiendo su uso, 51 son destinados a la agricultura, 29 son para abastecimiento de agua potable y uso doméstico y los 4 restantes son utilizados con fines pecuarios.

En conjunto, estas obras extraen un volumen anual de 14.56 $hm^3$/año, del cual 13.67 $hm^3$/año es utilizado para uso agrícola, 0.89 $hm^3$/año en agua potable, y 0.004 $hm^3$/año para fines pecuarios.

El volumen de agua que se extrae por bombeo del acuífero, se estimó de acuerdo al siguiente criterio:

En el caso de aprovechamientos de uso agrícola, se asignó un volumen de 6,000 m³/año por hectárea, que implica una lámina de riego promedio de 0.60 m, independientemente del cultivo realizado, a este volumen se le aplicó un valor de eficiencia total de acuerdo al tipo de riego.

Para uso público urbano, se le asignó a cada habitante, una dotación de 150 litros por día, (54.75 m³/año).

Para uso pecuario se estimó, aplicando un promedio de 50 litros por cabeza de ganado mayor, (18.25 m³/año), y 5 litros por cabeza de ganado menor, (1.825 m³/año).

La tabla I, muestra la clasificación por usos del agua subterránea. Donde se aprecia que la mayor cantidad del recurso se destina a la agricultura.

**Tabla I.** ***Número de obras y volumen de extracción por uso.***

| Uso | Número de obras | Volumen ($hm^3$/año) | Porcentaje (%) |
|---|---|---|---|
| Agrícola | 51 | 13.67 | 93.86 |
| Público urbano | 29 | 0.89 | 6.11 |
| Pecuario | 4 | 0.004 | 0.03 |
| Total | 84 | 14.56 | 100 |

Para el abastecimiento de agua en domicilios, en la mayoría de los casos la distribución se lleva a cabo utilizando un contenedor de concreto o metal situado en la parte alta de cada poblado, del cual es conectada la red de distribución domiciliaria y en el que se controla la actividad bacteriana suministrando cloro como agente desinfectante ya que actúa como un biocida general, exterminando microorganismos. La operación de la bomba de extracción se controla por personal designado en cada localidad, quien tiene un horario fijo en el caso de pozos para uso y consumo humano, para los de actividades pecuarias y agrícolas los usuarios son quienes controlan la demanda y horario de operación. Esto es en localidades rurales, donde además no se cuenta con medidores de consumo por

lo que el mantenimiento de la red se realiza con cuotas establecidas por los usuarios, destinadas a tal actividad y en algunos lugares sirve como salario para el operador de la bomba.

## II.5 TRABAJOS PREVIOS

Algunos de los estudios de carácter hidrogeológico realizados en la zona son los siguientes:

### *II.5.1 SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA DE VALPARAÍSO, ESTADO DE ZACATECAS. S.A.R.H., 1980.*

Éste estudio comprendió una superficie de 12,000 km², tomando como centro el Valle de Valparaíso. Los trabajos consistieron en la realización de levantamientos geológicos, censo de aprovechamientos durante el cual se censaron 171 captaciones que incluyen tanto al valle del Valparaíso como sus alrededores, muestreo de agua para análisis físicoquímico y toma de lecturas piezométricas, descripción de unidades hidrogeológicas, funcionamiento hidráulico superficial y subterráneo. El estudio concluye que el acuífero regional está alojado en sedimentos areno-tobáceos, de espesor superior a los 200 m, el basamento lo constituyen rocas andesíticas de edad Terciaria. Los trabajos no incluyeron la realización de un balance hidráulico de aguas subterráneas ya que su objetivo fue conocer las posibilidades acuíferas del valle de Valparaíso, definiendo además áreas favorables para la perforación de pozos.

### *II.5.2 REACTIVACIÓN DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO EN EL ACUÍFERO DE VALPARAÍSO, CNA, 2004.*

Los primeros datos relativos a la posición del nivel del agua fueron tomados durante el estudio del año 1980, en el 2004 se realizó el estudio para la reactivación de redes de monitoreo, durante el cual se estableció la red piezométrica actual del acuífero, formada por 22 pozos piloto.

Con los datos de la profundidad al nivel estático medidos durante recorrido de campo realizado en junio de 2004 para los pozos de la red piezométrica, se

construyó la configuración que se presenta en la figura 3, donde se observa que el nivel estático se encontraba entre 10 y 40 metros de profundidad.

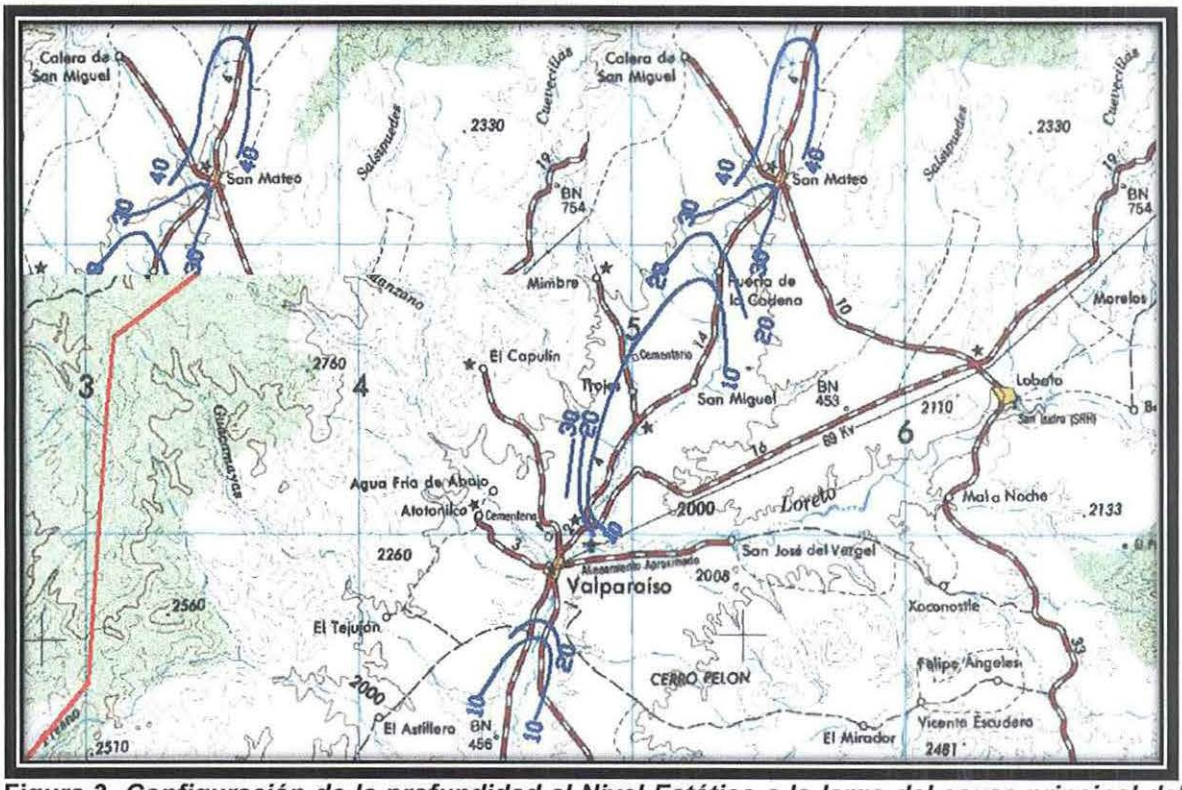


**Figura 3.** ***Configuración de la profundidad al Nivel Estático a lo largo del cause principal del río Valparaíso (CNA, 2004).***

En el extremo norte del valle, entre las comunidades El Molino y San Mateo, se presentaron valores de 40 metros de profundidad, valores que disminuyen hacia el sur hasta llegar a profundidades del nivel estático de 10 metros, observadas en las cercanías de las comunidades El Resbalón y Peña Blanca. En la porción central, alrededor de la Cabecera Municipal de Valparaíso, el nivel se encontraba entre 10 y 20 metros de profundidad.

Para determinar la evolución del nivel estático, se consideró el período de enero de 1980 a junio de 2004, en este período prácticamente no se registraron variaciones importantes en la posición de los niveles del agua subterránea, únicamente se presentaron dos valores aislados de 6 m de abatimiento, uno de

ellos en un pozo ubicado en la porción norte, cercano a la comunidad El Molino, y el otro en una obra que se localiza en la parte central, en la localidad San Miguel.

### *II.5.3 EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA*

Para la determinación de las características químicas del agua, durante el estudio de prospección realizado en el año 1980, fueron recolectadas y analizadas 6 muestras de agua provenientes de pozos. Los resultados indicaron que, para ese año, las concentraciones de sales variaban de 315 a 429 partes por millón (ppm) de sólidos totales disueltos. Así mismo, las familias de agua definen que la circulación se ha llevado a cabo en rocas de constitución ácida, en donde los feldespatos que las constituyen son sódico-cálcicos y sódico-potásicos, dando como resultado que la familia de agua predominante sea la bicarbonatada-sódica, en donde el bicarbonato indica la reciente infiltración del agua extraída (CNA, 2009).

### *II.5.4 ESTUDIOS GEOHIDROLÓGICOS-GEOFÍSICOS EN DIFERENTES SITIOS EN EL ÁREA DEL ACUÍFERO VALPARAÍSO. CEAPA.*

Para conocer las condiciones hidrogeológicas de la zona y con el fin de determinar la posibilidad de realizar un pozo profundo, en las cercanías de las localidades rurales, durante los últimos 10 años, se implementó la realización de sondeos eléctricos verticales, efectuándose estos en puntos estratégicos donde las condiciones tanto geológicas como topográficas presentan altas posibilidades de saturación de aguas subterráneas. Se tuvo acceso a datos de quince sondeos eléctricos verticales de los cuales sólo tres están ubicados dentro del área a estudiar, específicamente en la comunidad de Mimbres. Además de cuatro registros eléctricos de pozos realizados en el lugar con su respectiva interpretación de cortes geológicos localizados en diferentes comunidades rurales, tal como se muestra en la figura 4, de los cuales se hace la descripción detallada a continuación:

Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's)

Los sondeos eléctricos verticales realizados en la zona fueron tres y se llevaron a cabo utilizando un equipo de resistividad de la marca Scintrex, transmisor y receptor Saris, con el arreglo tipo Schlumberger a una abertura máxima entre electrodos de corriente de 600 metros. Del análisis de las curvas obtenidas de los SEV's mediante el ajuste de las curvas logarítmicas elaboradas e interpretadas con el programa Resix plus v2, los cortes geoeléctricos se enuncian a continuación:

- SEV 1, ubicado en la parcela conocida como ¨El Maíz Prieto¨ propiedad del Sr. Florencio Hernández del Hoyo, con coordenadas 103°32'50¨ longitud oeste, 22°51'06¨ latitud norte y 1,992 msnm de altitud. La interpretación realizada se presenta en la tabla II, donde se indica el número de capas con sus respectivas resistividades y las posibles formaciones existentes.

**Tabla II.** ***Interpretación cuantitativa del primer sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Maíz Prieto¨ propiedad del Sr. Florencio Hernández del Hoyo.***

| CAPA | ESPESOR (m) | PROFUNDIDAD ACUMULADA (m) | RESISTIVIDAD (Ohm/m) | PROBABLE FORMACION |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 3 | 173.12 | Esta capa se relaciona con la cobertura superficial, compuesta por materiales de depósito aluvial y vegetal. |
| 2 | 7 | 10 | 75.54 | Esta capa se puede relacionar con materiales de depósito como boleos, gravas y conglomerados. |
| 3 | 24 | 34 | 17.72 | Estas dos capas se asocian a materiales de depósito como conglomerados, gravas y arenas con horizontes arcillosos. |
| 4 | 72 | 106 | 14.81 | |
| 5 | 154 | 260 | 23.00 | Esta capa puedes ser una secuencia de rocas volcánicas extrusivas como tobas e ignimbritas fracturadas con posibilidades de saturación de aguas subterráneas. |
| 6 | – | – | 14.93 | Esta capa se puede asociar a una secuencia de rocas volcánicas extrusivas como tobas e ignimbritas fracturadas con algunos horizontes arcillosos. |

- SEV 2, ubicado en la parcela conocida como ¨El Llano¨, propiedad de la señora Clara Huizar viuda de Hurtado, con coordenadas geográficas de 103°32'34¨ longitud oeste, 22°50'29¨ latitud norte y altitud de 1,951 msnm. La interpretación realizada se presenta en la tabla III, donde se indica el número de capas con sus respectivas resistividades y las posibles formaciones existentes.

**Tabla III.** ***Interpretación cuantitativa del segundo sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Llano¨, propiedad de la señora Clara Huizar viuda de Hurtado.***

| CAPA | ESPESOR (m) | PROFUNDIDAD ACUMULADA (m) | RESISTIVIDAD (Ohm/m) | PROBABLE FORMACION |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 2 | 19.68 | Esta capa se identifica con la cobertura superficial, compuesta por materiales de depósito aluvial y material vegetal. |
| 2 | 10 | 12 | 6.82 | Estas dos capas por su bajo valor resistivo se pueden asociar a secuencias de depósitos granulares, como conglomerados, boleos y gravas en matriz areno – arcillosa. |
| 3 | 18 | 30 | 4.58 | |
| 4 | 40 | 70 | 10.05 | Estas dos capas se pueden relacionar a una secuencia de materiales de depósito como conglomerados y gravas en matriz areno- arcillosa, o bien, a una estructura de rocas volcánicas como tobas e ignimbritas con horizontes arcillosos. |
| 5 | 138 | 208 | 9.13 | |
| 6 | _ | _ | 6.05 | Esta capa puede ser una secuencia de rocas volcánicas extrusivas como tobas e ignimbritas muy alteradas y con presencia de horizontes arcillosos. |

- SEV 3, sondeo testigo realizado en el pozo agrícola No.1 en el predio Monte de los Lobos, con coordenadas geográficas de 103°32'47¨ longitud oeste, 22°51'59¨ latitud norte y altitud de 2,056 msnm. La interpretación realizada se presenta en la tabla IV, donde se indica el número de capas con sus respectivas resistividades y las posibles formaciones existentes.

**Tabla IV.** ***Interpretación cuantitativa del tercer sondeo eléctrico vertical, ubicado en el pozo agrícola No.1 en el predio Monte de los Lobos.***

| CAPA | ESPESOR (m) | PROFUNDIDAD ACUMULADA (m) | RESISTIVIDAD (Ohm/m) | PROBABLE FORMACION |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 2 | 30.23 | Estas dos capas se pueden asociar a la cobertura superficial, compuesta de gravas, boleos, material aluvial y vegetal. |
| 2 | 8 | 10 | 36.10 | |
| 3 | 34 | 44 | 50.81 | Esta capa se puede relacionar con secuencias de conglomerados, gravas y arenas. |
| 4 | 95 | 139 | 11.30 | Esta capa puede relacionarse con una secuencia de rocas volcánicas extrusivas como tobas e ignimbritas con horizontes arcillosos. |
| 5 | 194 | 333 | 6.21 | Esta capa por su bajo valor resistivo se puede asociar a un horizonte arcilloso. |
| 6 | _ | _ | 18.52 | Esta capa se asocia a una estructura de rocas volcánicas extrusivas como tobas e ignimbritas con fracturamiento. |

- Corte litológico obtenido de la perforación realizada en el SEV 1 practicado en la parcela ¨El Maíz Prieto¨ es el observado en la tabla V.

**Tabla V.** ***Interpretación del corte litológico del pozo realizado en el sitio localizado del primer sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Maíz Prieto¨ propiedad del Sr. Florencio Hernández del Hoyo.***

| De | A | Formación en Mimbres |
|---|---|---|
| 000 | **010** | Materiales de depósito compuestos por gravas y boleos. |
| 010 | **040** | Materiales de depósitos compuestos por conglomerados y gravas en matriz limo-arenosa. |
| 040 | **052** | Materiales de depósito compuestos por gravas y conglomerados de granulometría mediana. |
| 052 | **152** | Materiales de depósito compuestos por gravas y conglomerados en matriz arenosa. |
| 152 | **174** | Secuencia de rocas volcánicas compuestas de tobas e ignimbritas semifracturadas. |
| 174 | **240** | Secuencia de rocas volcánicas compuestas de ríolitas fracturadas. |
| 240 | **286** | Secuencia de rocas volcánicas compuestas de ríolitas con proceso de alteración. |
| 286 | **300** | Secuencia de rocas volcánicas compuestas de ríolitas semifracturadas. |

- Además de este, se tiene el correspondiente al proyecto realizado en Vicente Escudero (Las Viudas) en el año 2003, el cual se ubica en la intersección del meridiano 103°26'07¨ con el paralelo 22°43'36¨ a una altitud de 2,190 msnm, la interpretación del registro eléctrico del pozo es la observada en la tabla VI.

**Tabla VI.** ***Interpretación del corte litológico del pozo realizado en el área de recreación de la escuela primaria Miguel Hidalgo en la comunidad de Vicente Escudero.***

| De | A | Formación |
|---|---|---|
| 000 | **004** | Materiales de depósito compuestos por gravas, arenas y boleos. |
| 004 | **036** | Depósitos compuestos por gravas de granulometría pequeña de origen riolítico e ignimbrítico. |
| 036 | **042** | Depósitos compuestos por gravas de granulometría pequeña y angulosa de origen riolítico e ingnibrítico. |
| 042 | **072** | Secuencias de depósitos compuestos de gravas y boleos de granulometría media, en matriz limo-arcillosa. |
| 072 | **084** | Secuencias de rocas volcánicas extrusivas (ríolitas e ingnimbrítas) semifracturadas en matriz arcillosa. |
| 084 | **098** | Secuencia de rocas volcánicas extrusivas (ríolitas e ingnimbrítas) semifracturadas. |
| 098 | **102** | Horizontes de ignimbritas en matriz arcillosa. |
| 102 | **112** | Secuencia de rocas volcánicas extrusivas (ríolitas e ingnimbrítas) semifracturadas. |
| 112 | **120** | Secuencia de rocas volcánicas extrusivas (ríolitas e ingnimbrítas) en matriz arenosa. |
| 120 | **140** | Secuencia de rocas volcánicas extrusivas ríoliticas sanas. |
| 140 | **156** | Secuencia de rocas volcánicas extrusivas ríoliticas en matriz arcillosa. |
| 156 | **162** | Secuencia de tobas alteradas y arenosas. |
| 162 | **176** | Secuencia de rocas volcánicas extrusivas (ríolitas e ingnimbrítas) en matriz arcillosa. |
| 176 | **184** | Roca volcánica extrusiva (riolita) sana. |
| 184 | **194** | Roca volcánica extrusiva (riolita) semifracturada. |
| 194 | **202** | Horizontes de material de origen volcánico en matriz arcillosa. |
| 202 | **236** | Roca volcánica extrusiva (riolita) semifracturada. |
| 236 | **268** | Secuencia de rocas volcánicas ingnimbrítas en matriz arcillosa. |
| 268 | **286** | Rocas volcánicas extrusivas (ríolitas e ingnimbrítas) fracturadas en matriz arenosa. |
| 286 | **302** | Secuencia de rocas volcánicas ingnimbríticas semifracturadas en matriz arcillosa. |
| 302 | **366** | Secuencia de tobas arenosas. |
| 366 | **400** | Secuencia de tobas e ignimbritas en matriz arcillosa. |

- Así mismo, el de la comunidad denominada Mala Noche, el pozo está ubicado en las coordenadas geográficas 103°25'44¨ longitud oeste, 22°47'28¨ latitud norte y 2,050 msnm de altitud. La interpretación realizada del registro de pozo se muestra en la tabla VII.

**Tabla VII.** ***Interpretación del corte litológico del pozo realizado en la comunidad de Mala Noche, ubicado en las cercanías del arroyo que cruza la localidad.***

| De | A | Formación |
|---|---|---|
| 000 | **020** | Cubierta aluvial. |
| 020 | **086** | Grava. |
| 086 | **138** | Arena. |
| 138 | **182** | Arcilla. |
| 182 | **240** | Arena. |
| 240 | **333.6** | Toba riolítica. |

- Finalmente el correspondiente a Las Pomas, ubicado en las coordenadas geográficas 103°22'00¨longitud oeste, 22°53'25¨ latitud norte y altitud de 2,060 msnm. La interpretación realizada se encuentra contenida en la tabla VIII.

**Tabla VIII.** ***Interpretación del corte litológico del pozo realizado en la localidad de Las Pomas, situado a pocos metros del puente, con el mismo nombre, sobre la carretera Valparaíso-Fresnillo.***

| De | A | Formación |
|---|---|---|
| 000 | **012** | Cubierta aluvial. |
| 012 | **032** | Toba riolítica. |
| 032 | **074** | Riolíta sana. |
| 074 | **100** | Toba lítica. |
| 100 | **138** | Toba riolítica. |
| 138 | **148** | Toba arcillosa. |
| 148 | **200** | Riolíta sana. |
| 200 | **240** | Toba riolítica. |
| 240 | **300** | Riolíta sana. |

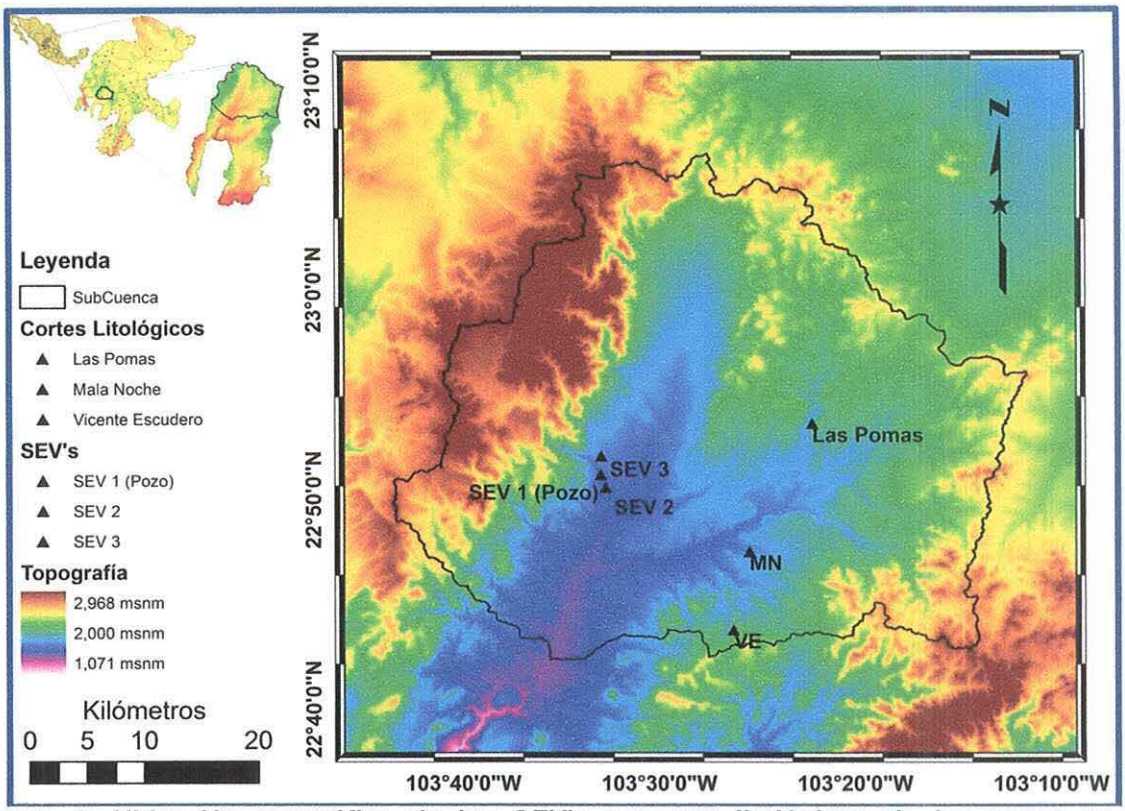


**Figura 4.** ***Ubicación geográfica de los SEV's y cortes litológicos de los pozos en la comunidades de Las Pomas, Mala Noche, Vicente Escudero y Mimbres el cual coincide con el SEV 1.***

# Capítulo III

# METODOLOGÍA

La realización de este trabajo consta de actividades realizadas en campo, laboratorio y escritorio, a fin de alcanzar los objetivos propuestos. En éste capítulo se describen los métodos y procedimientos empleados en el desarrollo del proyecto, por lo que se ha dividido en cinco etapas fundamentales, las cuales se especifican a continuación:

## III.1 RECOPILACIÓN, REVISIÓN Y DEPURACIÓN DE INFORMACIÓN PREVIA EN LA ZONA

Se recopiló, revisó, organizó, depuró y sistematizó toda la información disponible sobre la zona en estudio: publicaciones, informes, tesis, cartas topográficas, cartas geológicas, cartas de uso de suelo y vegetación, cartas de campo magnético total, bases de datos, entre otros. A fin de establecer un panorama general de la información disponible sobre las condiciones hidrogeoquímicas, geológicas y geohidrológicas del área. Ésta etapa sirvió para caracterizar el área de estudio y programar el trabajo de campo.

Las fuentes más importantes para nuestras bases de datos fueron: Comisión Estatal de Agua Potable y Alcantarillado en Zacatecas (CEAPA) a través del Ing. Alejandro Martínez Guerrero director del Departamento de Gerencia de Pozos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), a través del Dr. Guillermo Medina García responsable de la Red de Monitoreo de Estaciones Climatológicas. Comisión Nacional del Agua (CNA), mediante el Ing. Claudio Monsivais Bermúdez y Sr. Ricardo Enrique Morán Faz. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) con el uso, consulta y revisión de bases de datos relacionados con el tema. Servicio Geológico Mexicano (SGM) directamente al departamento de ventas, donde se adquirieron los datos

aeromagnéticos en formato ASCII de las nueve cartas escala 1:50,000 que cubren la zona.

Entre la cantidad de información a la que se logró acceso se encuentran estudios geohidrológicos – geofísicos de San Pedro de la Sierra, Las Amecas (Hacienda y la Vieja), Mimbres, Romerillo (I y II), Corralitos, Vicente Escudero, Mala Noche, Las Pomas, Palmitos y Peñitas de Oriente. Base de datos de las estaciones climatológicas circundantes en la zona incluyendo los estados de Durango, Nayarit y Jalisco, puesto que la densidad de las mismas es escasa, aunque la distancia entre una y otra es amplia y el relieve topográfico diferente, se conservaron como referencia para el análisis de precipitación y temperatura en la región. Además nos fue proporcionado el historial de la red de monitoreo piezométrico puesta en marcha por CNA en el año 2004.

## III.2 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Una vez que se colectó y geoposicionó la mayor cantidad de información, se procedió a seleccionar el área de estudio la cual es donde se concentra mayor población y por tanto información, pues se logró identificar al menos una obra de abastecimiento de agua por cada comunidad, donde en su mayoría fueron pozos. La fracción del acuífero a estudiar corresponde de manera superficial a la subcuenca Río Valparaíso (San Mateo), perteneciente a la cuenca Río Bolaños, la clave de la subcuenca es RH12Ka, cuya superficie drenada es aproximadamente de 1,640 $km^2$, las elevaciones topográficas oscilan entre los 1,838 y 2,939 msnm. Se encuentra entre los meridianos 103°10'00¨-103°50'00¨ y los paralelos 22°40'00¨-23°10'00¨. La longitud del cauce principal es de aproximadamente 43 km. Existen 2 principales obras de almacenamiento las cuales se identifican como: El Salitre capacidad de 3.5 $Mm^3$ y Manuel Felgueres (Lobatos) capacidad de 7.5 $Mm^3$. Según se observa en la figura 5.

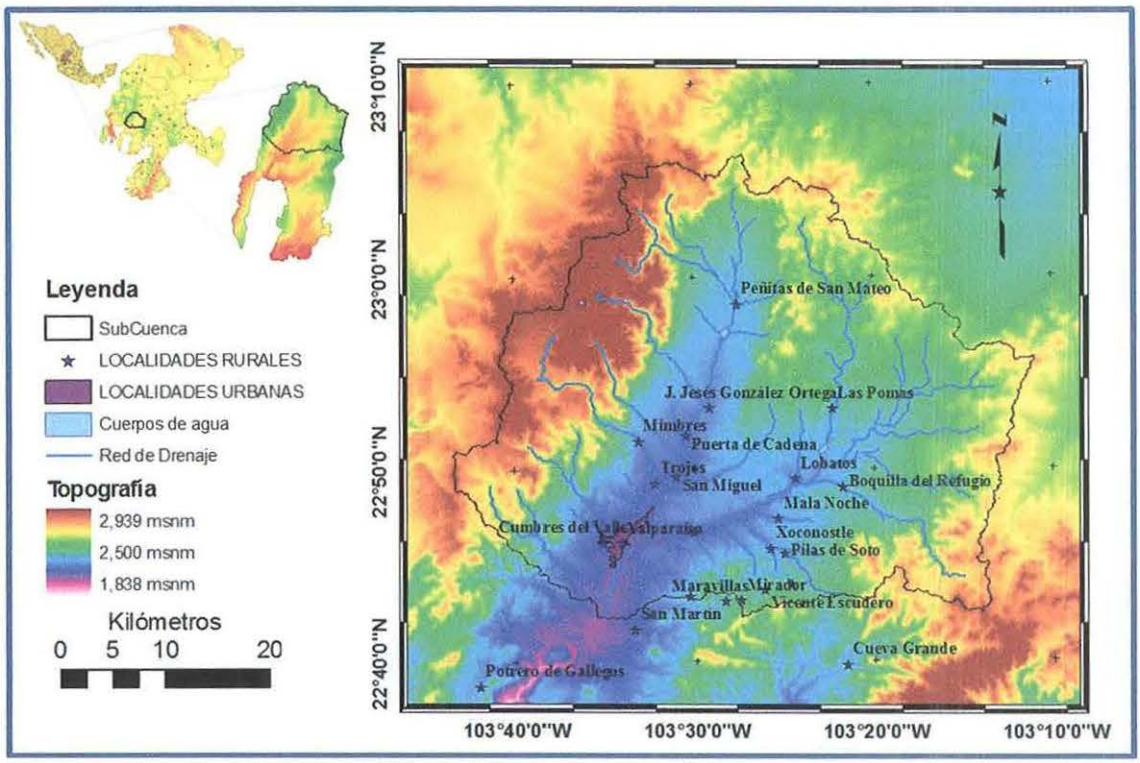


**Figura 5.** ***ÁREA DE ESTUDIO. Subcuenca Río Valparaíso. Muestra el relieve del terreno, corrientes de agua superficial, localidades rurales y urbanas.***

## III.3 EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

Se tomaron en consideración los resultados y algunos datos adquiridos de la realización de estudios geofísicos en el área, puesto que sirven para investigar zonas sin acceso directo, como las estructuras subterráneas. Estos se basan en el estudio de las propiedades físicas de las rocas y proporcionan una estimación de la magnitud y distribución de éstas, que puede ser utilizada para identificar cuerpos situados en el subsuelo (Orellana, 1972). El método geofísico que se ha utilizado en el área de estudio es el de resistividad eléctrica, el cual es la modalidad de investigación geofísica más antigua y es utilizada por geólogos, geofísicos e ingenieros para distinguir y caracterizar las estructuras en el subsuelo, puesto que implica obtener estimaciones de la resistividad aparente del terreno. En aplicaciones hidrogeológicas este método es utilizado en técnicas de SEV's y barridos dipolares, los primeros permiten medir la variación vertical de la resistividad aparente debajo de un punto único, y son útiles para estimar la

posición y espesor de capas litológicas horizontales en profundidad, la segunda técnica permite obtener un perfil a lo largo de una línea de puntos, tiene la ventaja de analizar la variación lateral y en profundidad de la resistividad eléctrica del cuerpo geológico estudiado. Haciendo posible la interpretación electoestratigráfica, para diferenciar los límites y propiedades de los estratos subterráneos (Vázquez, 1980).

### *III.3.1 REINTERPRETACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES*

Como se mencionó anteriormente en el área de estudio, se realizaron quince sondeos eléctricos verticales, ubicados en puntos estratégicos o con altas posibilidades de almacenar agua subterránea. Como no fue posible complementar los datos, el enfoque del presente trabajo se giró en torno a la calidad del agua en el lugar. Sin embargo, se realizó la reinterpretación de los SEV's ubicados dentro de la zona de estudio, los cuales se encuentran ubicados en la localidad de Mimbres, fueron denominados como 1, 2, y 3, en la interpretación se utilizó el programa RJR3, para obtener las resistividades y profundidades de los estratos del subsuelo. El programa fue desarrollado en el Departamento de Geofísica Aplicada del CICESE, el cual utiliza la teoría de los filtros de Gosh (1970). Debido a la variación de la solución dada por el criterio del interpretador es posible elegir, entre un juego de soluciones equivalentes, la que mayor se ajuste tanto a los datos geofísicos (la que produzca un menor error de ajuste) como a los datos geológicos (sección geoeléctrica en correspondencia a la información geológica). Mediante la comparación de varias definiciones de la estructura geológica a lo largo de un perfil y no del resultado de un sondeo aislado se determina la mejor aproximación. Esta aproximación provee la oportunidad de utilizar la información geológica a priori, extrayendo la mayor cantidad de datos posible en situaciones geológicas complejas.

### *III.3.2 ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS AEROMAGNÉTICOS*

Debido al poco número (3) de sondeos geoeléctricos, se utilizó como método geofísico complementario el de magnetometría aérea, que es útil para prospección

del subsuelo ya que se obtiene información acerca de la profundidad de las rocas pertenecientes al basamento impermeable, localización de barreras geohidrológicas y estructuras contenedoras de agua subterránea. También anomalías magnéticas producidas por contrastes laterales de susceptibilidad magnética debidos a rocas de basamento y estructuras contenedoras de agua subterránea son detectables con mediciones aeromagnéticas. La susceptibilidad magnética es una medida de cuán magnetizable es un material, en las rocas ésta dependerá directamente de la forma, tamaño y tipo de los granos que la conforman y, por ende de la magnetización remanente, así como también de la magnitud del campo externo. Rocas con contenido relativamente alto en magnetita, como el basalto y la andesita, tienen una susceptibilidad magnética más alta que rocas con menos contenido de magnetita, como las calizas y las riolitas. Los datos magnéticos utilizados fueron adquiridos por compra al Servicio Geológico Mexicano (SGM), estos fueron tomados en vuelos realizados con un avión ISLANDER BN2-B27, utilizando un magnetómetro SCINTREX CS-2, bombeo óptico del vapor de cesio, el sistema PICODAS PDAS-1000, cámara de video, JVC TK-1080U, radar altímetro Sperry RT-220 y sistema de navegación NOVATEL GPS-911R, 40 M. El vuelo se realizó a 450 m de altura constante sobre el nivel del terreno, con línea de exploración de rumbo N-S y separación de 1,000 m. Distancia entre líneas de control de 20,000 m. Los datos se manejan con la clave de las cartas escala 1:50,00 de INEGI y las que cubren el área de estudio son: F13-B44 Milpillas de la Sierra, F13-B45 Corrales, F13-B46 Presa Gobernador Leobardo, F13-B54 San Pedro de la Sierra, F13-B55 Valparaíso, F13-B56 Presa Santa Rosa, F13-B64 Huejuquilla, F13-B65 Cueva Grande y F13-B66 Ermita de Guadalupe. Tales datos corresponden a valores de anomalía magnética ya que se han corregido por variación diurna y el campo geomagnético se les ha restado.

Obtenidos los datos se organizaron utilizando algunas herramientas de ArcGIS, específicamente del modulo ArcMap, permitiendo superponer al mapa magnético generado, capas adquiridas de información topográfica y geológica, facilitando su correlación. A partir del mapa compuesto se extrajeron dos perfiles magnéticos y

topográficos para su posterior modelación bidimensional, con el objetivo de identificar las presencia de cuerpos o diques en dichas secciones, los cuales pudieran favorecer o limitar el flujo de agua subterránea o que por su composición, al interactuar con el agua, reaccionan químicamente y contribuyen a la contaminación de la misma.

## III.4 TRABAJO DE CAMPO

Se realizó un viaje de campo a la ciudad de Valparaíso, donde se recorrió en su conjunto la extensión total de la subcuenca para verificar información geológica, geohidrológica, identificación de los pozos de los que se poseía información y de los que sólo se conocía su existencia, a fin de colectar 60 muestras de agua (2 por cada pozo) en recipientes NALGENE® de polietileno con una capacidad aproximada de 125 ml, previamente higienizados. El procedimiento para la toma de muestra se basó en la Norma Oficial Mexicana (NOM-014-SSA1-1993) referente a "Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados". Cabe destacar que en la mayoría de los casos la muestra se tomó con el pozo operando de manera ordinaria por lo que el agua está mezclada con la almacenada en el pozo a manera de reserva, sin embargo, se consideraron representativos los resultados pues como la norma antes mencionada lo indica, esas son justo las condiciones en las que el agua es suministrada en las tomas domiciliarias. Para garantizar, valorar y validar una nueva fuente de abastecimiento son aplicables otro tipo de consideraciones, las cuales de igual manera se encuentran establecidas en la norma correspondiente.

La ubicación de cada sitio se obtuvo en coordenadas UTM y se tomaron fotografías a fin de conservarlas como memorias para apreciar descripciones del lugar. La representación grafica de los sitios muestreados se observa en la figura 6.

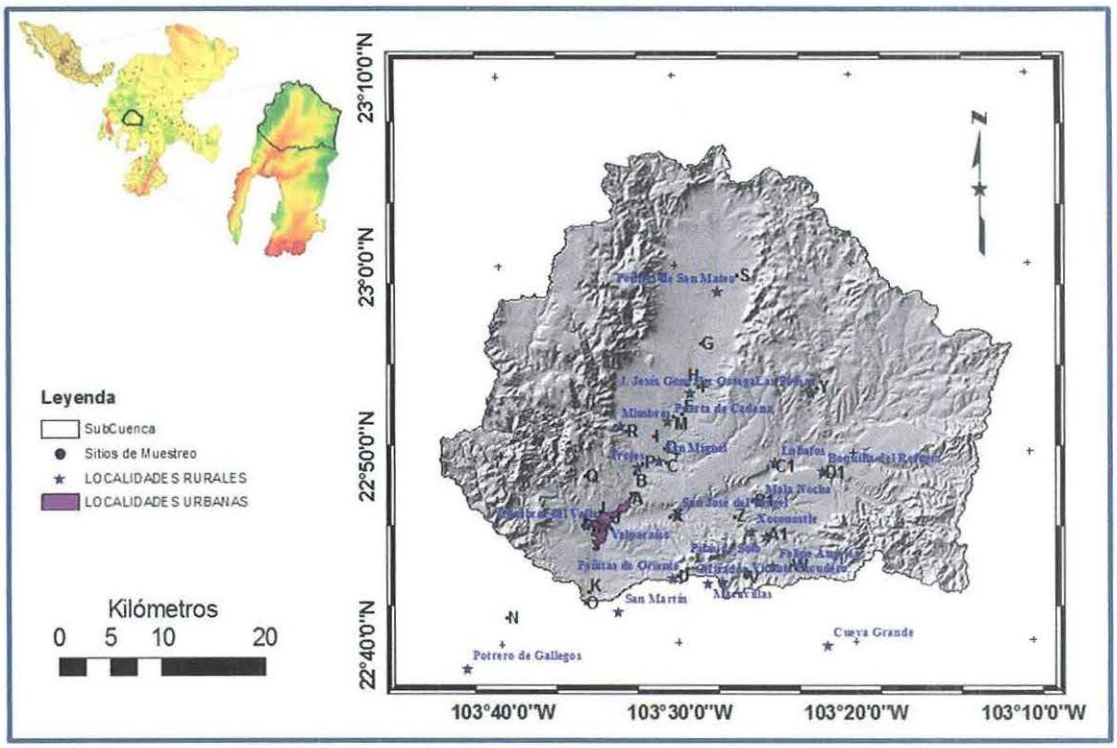


**Figura 6.** ***Sitios de muestreo. Representa el relieve de la subcuenca Río Valparaíso, la ubicación de localidades rurales, urbanas y localización de pozos muestreados.***

*III.4.1 FASE DE CAMPO*

En campo fueron medidos los siguientes parámetros físicos de cada muestra, tales como pH, conductividad, porcentaje de cloruro de sodio (NaCl), temperatura y sólidos totales disueltos (STD), utilizando un pHmetro marca HANNA, modelo HI-99141 y un electrodo de la misma marca que mide los otros parámetros antes mencionados. Alcalinidad y bicarbonatos ($HCO_3^-$) no fue posible medir en campo pero se conservó la muestra en óptimas condiciones a tal grado que el pH en campo fue muy similar, o en algunos casos el mismo, comparado con el medido en el laboratorio una vez que se llevó a cabo el proceso de cuantificación de tales sustancias tomando como base lo establecido en métodos de calculación de alcalinidad en United States Geological Survey (USGS).

Las concentraciones de carbonato ($CO_3^{2-}$) y bicarbonato ($HCO_3^-$) en la muestra se calcularon utilizando un simple balance de masas por el método de especiación. La medición de la alcalinidad de la muestra es un recuento directo del ácido

clorhídrico (HCl) utilizado para neutralizar la muestra, con buretas de precisión y soluciones de tal ácido. La ecuación para calcular la alcalinidad se documenta en el Manual de Campo del USGS y la expresión utilizada es la siguiente:

$$Alk_o \text{ (meq / L)} = 1000 \text{ (B) } C_a \text{ (CF) / } V_o \quad (1)$$

$$CaCO_3\text{(mg / L)} = 50044 \text{ (B) } C_a \text{ (CF) / } V_o \quad (2)$$

donde:

Alk es la alcalinidad de la muestra

$CaCO_3$ como dureza por calcio

B es el volumen de reactivo (HCl) necesario para alcanzar pH de 4.3 (ml)

$C_a$ es la normalidad (0.1) del ácido reactivo (meq/L)

CF es el factor (1) de corrección del ácido

$V_o$ es el volumen inicial de la muestra (ml)

*III.4.2 FASE DE LABORATORIO*

Una vez que se tenían las muestras de agua se conservaron a una temperatura aproximada de 4°C a fin de conservarlas y trasladarlas a la ciudad de Ensenada, de donde 30 fueron enviadas a la Analítica del Noroeste S.A. de C.V. en el estado de Sonora, para el análisis de cationes y de las 30 restantes se analizaron los aniones, en el laboratorio de Hidrogeoquímica de la División de Ciencias de la Tierra de CICESE, donde se filtraron utilizando una bomba de vacío con filtros de membrana de celulosa nítrica de 0.45µm de abertura de poros, a fin de eliminar sólidos no disueltos e impurezas en el agua, ya que estos pueden bloquear las líneas de conducción de fluido en el equipo para la determinación de iones. Posteriormente se analizaron las muestras con el cromatógrafo ICS-2000 DIONEX Ion Cromatographer, el software Chromeleon 6.5. Inicialmente se calibró el equipo a fin de encontrar la solución de hidróxido de sodio (eluente) óptima para el tipo de

agua a examinar, ya que se emplea como fase móvil en el aparato, la concentración del eluente utilizado fue de 4mM, los tiempos de corrida fueron de 11 minutos cada muestra durante toda la secuencia, para verificar y corroborar resultados las muestras fueron medidas 5 veces, cada 10 análisis se inyectaba dos veces agua mQ y un estándar para revisar y asegurar el tiempo de lectura de cada compuesto. Una vez adquiridos los resultados se hicieron cálculos estadísticos para obtener el resultado final de cada compuesto.

## III.5 INTERPRETACIÓN E INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

Posterior al análisis se obtuvieron mapas temáticos que muestran la distribución espacial de la información disponible así como de los pozos seleccionados, su clasificación por familia de agua, la concentración de sólidos totales disueltos y la concentración de algunos iones principales. Además se analizó y describió a detalle cada mapa, quedando plasmada esta información en el capitulo V. De esta forma se obtuvo la caracterización hidrogeoquímica del acuífero en el tiempo y bajo las condiciones en las que se tomaron las muestras. La interpretación e integración de los datos se basó en los datos obtenidos y en la información consultada, esto dio como resultado las bases y elementos necesarios para deducir algunas conclusiones y recomendaciones que posteriormente se presentarán.

# Capítulo IV

# HIDROGEOQUÍMICA

En este capítulo se detallan algunos aspectos importantes en cuanto a los iones analizados, los esquemas de clasificación química utilizados y la calidad de los análisis químicos obtenidos. También se describe de forma sintetizada las características principales del programa utilizado para la obtención de las representaciones gráficas de las muestras de agua.

## IV.1 HIDROGEOQUÍMICA

La hidrogeoquímica permite rastrear los orígenes y la historia del agua, dado que la composición cambia mediante reacciones químicas con el medio ambiente y su calidad. Puede proporcionar información acerca de las formaciones geológicas por cuales el agua ha circulado. Por lo que resulta importante analizar y caracterizar hidrogeoquimicamente un acuífero para determinar y distinguir los tipos de agua predominantes y su respectiva calidad. Esta acción se considera necesaria porque la calidad y composición varía con el tiempo. Para esto se requieren análisis químicos de muestras de agua que sean representativas del acuífero y que sean extraídas del mayor número de pozos en el área, a fin de identificar familias de agua que predominan en la zona. La calidad del recurso se determina a partir de análisis físicos, químicos y bacteriológicos, los cuales pueden variar desde sencillos hasta muy complejos. El tipo de análisis dependerá del uso a que se destine el agua (agropecuario, abastecimiento publico, industrial, generación de energía eléctrica, entre otros), así como de algunas características observadas en la zona donde ésta se encuentre (por ejemplo; contenidos de nitratos y organismos coliformes en poblados cercanos a establos).

Para sistematizar de alguna manera la información química del agua, se cuenta con distintos esquemas de clasificación, un ejemplo es el que considera el contenido de sólidos totales disueltos (agua dulce, salobre, salada y salmuera), y otro el que toma en cuenta los iones dominantes presentes (agua clorurada, sulfatada, bicarbonatada, sódica, cálcica y magnésica). Para determinar si alguna fuente de agua puede ser apta para un uso especifico se utilizan los límites máximos permisibles establecidos por la Secretaria de Salud, la Organización Mundial de la Salud, las Normas Oficiales Mexicanas, entre otros ordenamientos legales.

## IV.2 IONES ANALIZADOS

Cuando una sal se disuelve en agua, su molécula se disocia en iones electropositivos (cationes) y electronegativos (aniones) de los cuales se requiere conocer su concentración en cada una de las muestras colectadas. Esto se logra mediante la realización de análisis químicos al agua muestreada. La exhaustividad del análisis está en función de los usos a los que se pretenda destinar el agua. Para el presente trabajo, se consideró una base de datos hidrogeoquímicos provenientes de 28 pozos y 2 norias, identificados con clave alfabética y numérica para los casos en que la letra ya había sido asignada, coordenadas UTM para su ubicación y el análisis químico del agua procedente de la obra. Para cada muestra de agua se reportó la determinación de 14 iones principales: Calcio ($Ca^{2+}$), Magnesio ($Mg^{2+}$), Potasio (K), Fósforo (P), Sodio ($Na^{+}$), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Fluoruro ($F^{-}$), Cloruro ($Cl^{-}$), Bromuros ($Br^{-}$), Sulfato ($SO_4^{2-}$) y Bicarbonatos ($HCO_3^{-}$), que son los que propician al agua la mayor parte de la salinidad, además de ser de interés para este estudio. La concentración de los iones determinados se expresa en partes por millón (ppm), sin embargo, hay equivalencia en miligramos por litro (mg/L) si la densidad de la muestra de agua es de 1 gramo por centímetro cubico ($g/cm^3$).

La profundidad de muestreo es considerada de tipo integrada y no de tipo especifica, por lo tanto, la composición química refleja una muestra representativa

del intervalo ranurado del pozo. En este tipo de muestreo se identifican patrones regionales en la composición química del agua y su relación con el tipo de roca con la que ha estado en contacto; el muestreo a profundidad especifica es utilizado para estudiar procesos hidrogeoquímicos con más detalle, por lo cual en este trabajo nos limitaremos a considerar los resultados obtenidos para las condiciones en las que se tomaron las muestras.

## IV.3 CLASIFICACIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El objetivo principal de clasificar el agua subterránea es proporcionar información acerca de su composición química y su origen. Existen numerosos esquemas de clasificación, en el presente trabajo se utilizaron tres: el que toma en cuenta la concentración de sólidos totales disueltos (STD) (Custodio y Llamas, 1983), que determina cuatro tipos, según se muestra en la tabla IX; el que clasifica de acuerdo a los iones dominantes presentes, dando nueve familias, permitiendo conocer los aniones y cationes dominantes (tabla X) y la clasificación de acuerdo a la dureza ($CaCO_3$) del agua (tabla XI), resultando cinco tipos, con base en la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes (calcio, estroncio, bario y magnesio en forma de carbonatos o bicarbonatos) o alcalinotérreos, se expresa en equivalentes de carbonato de calcio y constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas (NMX-AA-072-SCFI-2001).

**Tabla IX.** ***Clasificación del agua subterránea basándose en la concentración de STD. Uso principal para el que se recomienda el agua en función de dicha concentración (según NOM-127-SSA1-1994).***

| **Clasificación** | **Concentración de STD en ppm** | **Principal uso del agua** |
|---|---|---|
| Agua dulce | 0-1,000 | Recomendables para consumo humano |
| Agua salobre | 1,000-10,000 | Recomendables para uso agrícola si STD son menores a 3,000 ppm.<br>No recomendable para consumo humano. |
| Agua salada | 10,000-100,000 | No recomendable para consumo humano ni para uso agrícola. |
| Salmuera | Mayor a 100,000 | |

**Tabla X.** ***Clasificación química del agua subterránea de acuerdo a los iones dominantes.***

| **Bicarbonatada** | | | **Sulfatada** | | | **Clorurada** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ca | Mg | Na | Ca | Mg | Na | Ca | Mg | Na |

**Tabla XI.** ***Clasificación química del agua de acuerdo a su dureza.***

| **Clasificación** | **Concentración (mg/L)** |
|---|---|
| Blanda | $\leq$ 17 |
| Levemente dura | $\leq$ 60 |
| Moderadamente dura | $\leq$ 120 |
| Dura | $\leq$ 180 |
| Muy dura | > 180 |

Es importante señalar que para la primera clasificación, los STD son simplemente la suma de todos los constituyentes disueltos en la muestra de agua (en este caso, aniones más cationes) y determina los usos a los que es factible destinar el agua. La segunda consiste en nombrar el agua por el anión y el catión que sobrepasan al 50% de sus sumas respectivas (por ejemplo, clorurada-sódica). Si ninguno de los cationes y/o aniones supera este porcentaje, se nombran los dos iones más abundantes.

## IV.4 CALIDAD DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

De acuerdo con Appelo y Postma (1993) se distinguen en general dos tipos de errores en los análisis químicos: a) error estadístico, que reflejan fluctuaciones aleatorias en los procesos analíticos y b) errores sistemáticos, que muestran desviaciones sistemáticas debido a procedimientos defectuosos o interferencias durante el análisis.

La exactitud de los análisis químicos realizados se estimó mediante la siguiente expresión conocida como Electro-Neutralidad (EN):

$$EN\ (\%) = \frac{(\sum cationes - \sum aniones)}{(\sum cationes + \sum aniones)} x100 \quad (3)$$

Ésta considera que la suma de cargas positivas y negativas en el agua tiene que estar balanceada. Las sumatorias se realizaron tomando en cuenta los cationes y los aniones; todos expresando su concentración en miliequivalentes por litro (meq/L). Se consideró como análisis aceptable aquel cuya EN fuera menor del 15%, los que superaron este porcentaje fueron considerados pero con la precaución debida. Dado que la concentración de nuestros análisis está dada en ppm y para la ecuación se requiere meq/L, fue necesario recalcular cada uno de los resultados en los análisis químicos para expresarlos en estas unidades.

## IV.5 ROCKWARE AQQA

AqQA es un software desarrollado por RockWare, Inc. (Golden, CO, Estados Unidos) y se encuentra alojado en su portal web. RockWare, Inc. Este programa fue desarrollado para el reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos subterráneos y para el agrupamiento de masas de agua en forma cuantitativa. Además de automatizar muchas de las tareas básicas en la evaluación de los análisis de agua, puede comprobar la consistencia interna entre las muestras de agua y entre los valores medidos y calculados para una amplia gama de propiedades, calcular un número de propiedades de los análisis de datos sobre el agua, incluyendo el balance iónico, sólidos totales disueltos, contenido de carbono orgánico, alcalinidad, carbono total, saturación de minerales, y la proporción de sodio intercambiable. Permite visualizar gráficamente los resultados de los análisis en diagramas ternarios, diagramas de Piper, diagramas Durov, diagramas Schoeller, y varios más, dependiendo de la aplicación y finalidad del análisis.

# Capítulo V

# RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta una síntesis descriptiva de los resultados obtenidos con las diferentes disciplinas utilizadas en el desarrollo del estudio, tanto en los aspectos de campo, laboratorio y escritorio, la interpretación se presenta en el capítulo VI.

## V.1 GEOFÍSICA

En este trabajo se utilizaron los datos de estudios geofísicos de resistividad, en la modalidad de sondeos eléctricos verticales (SEV's), realizados por otras dependencias, que por lo general sirvieron de soporte en la evaluación de sitios potenciales para la ubicación de pozos. Los SEV's analizados fueron 15 de los cuales solo tres se encontraban dentro de la zona de estudio (figura 4), sin embargo, sirvieron como soporte y punto de comparación para hacer un diagnóstico de la complejidad geológica, propia de zonas volcánicas, puesto que para ningún caso se percibió estratificación en capas horizontales continuas, aunque tal efecto puedo ser generado también por deficiencias de calidad en los datos.

### *V.1.1 REINTERPRETACIÓN DE SEV's*

El proceso de reinterpretación consintió en ajustar una curva de resistividad aparente, generada por un modelo geoeléctrico inicial propuesto, a la que nos referiremos como teórica, a los datos obtenidos en campo los cuales son la curva observada. El número de capas del modelo inicial es igual al número de puntos de inflexión de la curva de resistividad aparente observada, en base a esto se corren los datos en el programa utilizado y se obtiene un error promedio el cual se intenta minimizar en cada iteración que se realiza hasta encontrar similitud en ambas

curvas, en este caso la mayoría de los datos presentaban cambios de inflexión bastante pronunciados por lo que se opto por hacer la interpretación considerando cuatro o cinco capas horizontales, puesto que solo en el caso de San Pedro de la Sierra las curvas de los SEV's son muy parecidas y no presentan tal característica. A continuación se muestran las curvas de resistividad observada y calculada de acuerdo a la interpretación que se realizó considerando 4 o 5 capas horizontales para las cuales se determinaron las resistividades y espesores. La asociación de resistividades al tipo de litología se muestra en la tabla correspondiente a cada sondeo.

- SEV 1, ubicado en las coordenadas 103°32'50¨ longitud oeste, 22°51'06¨ latitud norte y 1,992 msnm de altitud. El error de ajuste promedio entre la curva teórica y la observada es de 6%, obteniéndose un modelo de cuatro capas horizontales con una profundidad máxima del orden de 80.0 metros. Las rocas a las que se puede relacionar al modelo geoeléctrico de resistividades y espesores se presentan en la tabla XII.

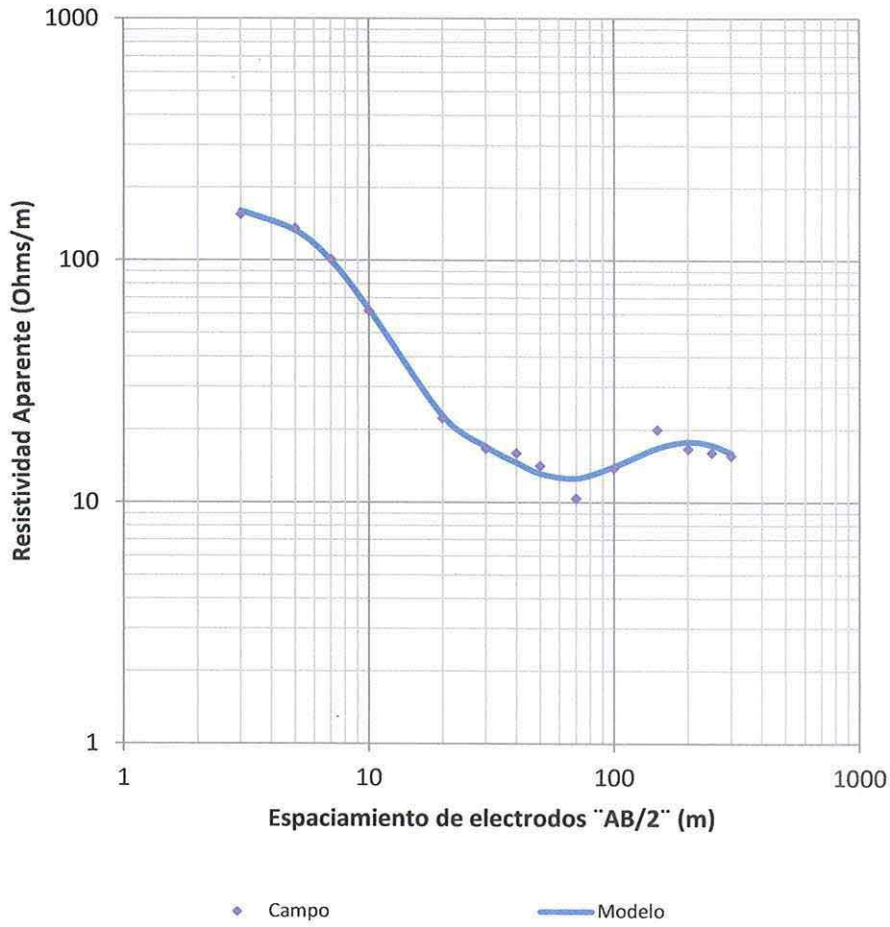


**Figura 7.** ***Muestra la curva de resistividades obtenida en campo y la del modelado considerando 4 capas sobre el semiespacio.***

**Tabla XII.** ***Interpretación cuantitativa del primer sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Maíz Prieto¨ propiedad del Sr. Florencio Hernández del Hoyo.***

| CAPA | ESPESOR (m) | PROFUNDIDAD ACUMULADA (m) | RESISTIVIDAD (Ohm/m) | LITOLOGÍA ASIGNADA |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.8 | 3.8 | 172 | Aluvión |
| 2 | 19.5 | 23.3 | 20 | Conglomerados |
| 3 | 19.0 | 42.3 | 4 | Gravas y conglomerados |
| 4 | 38.4 | 80.7 | 105 | Gravas y Arenas (capa acuífera) |
| 5 | - | - | 4 | |

- SEV 2, ubicado en las coordenadas geográficas de 103°32'34¨ longitud oeste, 22°50'29¨ latitud norte y altitud de 1,951 msnm. El error de ajuste promedio entre la curva teórica y la observada es de 4%. La interpretación se realizó considerando cinco capas geoeléctricas y se despreció el dato correspondiente a 20 metros. En la tabla XIII se indican las rocas a las que se puede asociar la resistividad obtenida.

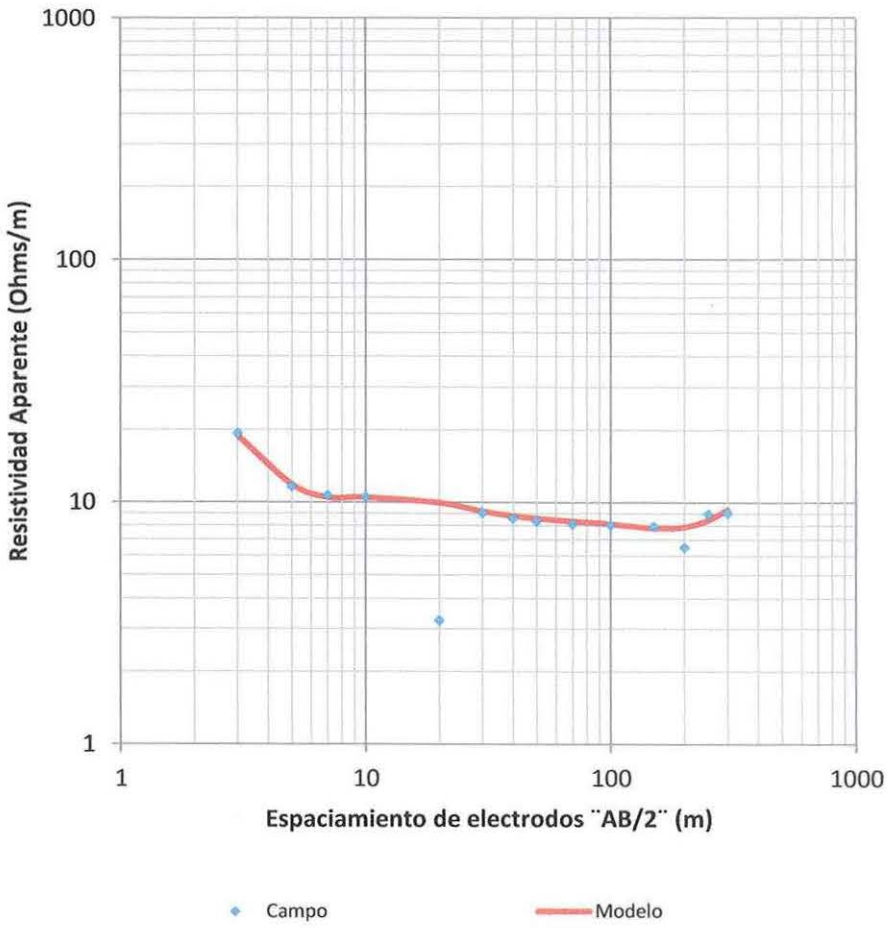


**Figura 8.** ***Muestra la curva de resistividades obtenida en campo y la de modelado, considerando 5 capas sobre el semiespacio.***

**Tabla XIII.** ***Interpretación cuantitativa del segundo sondeo eléctrico vertical, ubicado en la parcela conocida como ¨El Llano¨, propiedad de la señora Clara Huizar viuda de Hurtado.***

| CAPA | ESPESOR (m) | PROFUNDIDAD ACUMULADA (m) | RESISTIVIDAD (Ohm/m) | LITOLOGÍA ASIGNADA |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.5 | 1.50 | 34 | Aluvión |
| 2 | 1.3 | 2.8 | 4 | |
| 3 | 1.6 | 4.4 | 30 | Conglomerados |
| 4 | 93.3 | 97.7 | 8 | Gravas (capa acuífera) |
| 5 | 64.7 | 162.0 | 3 | |
| 6 | - | - | 49 | Rocas volcánicas (basamento) |

- SEV 3, sondeo con coordenadas geográficas de 103°32'47¨ longitud oeste, 22°51'59¨ latitud norte y altitud de 2,056 msnm. El error promedio resultante ente la curva de resistividad aparente observada y la teórica es de 3%. La interpretación se realizó considerando un modelo de cuatro capas, las resistividades se asocian a las rocas que se presentan en la tabla XIV.

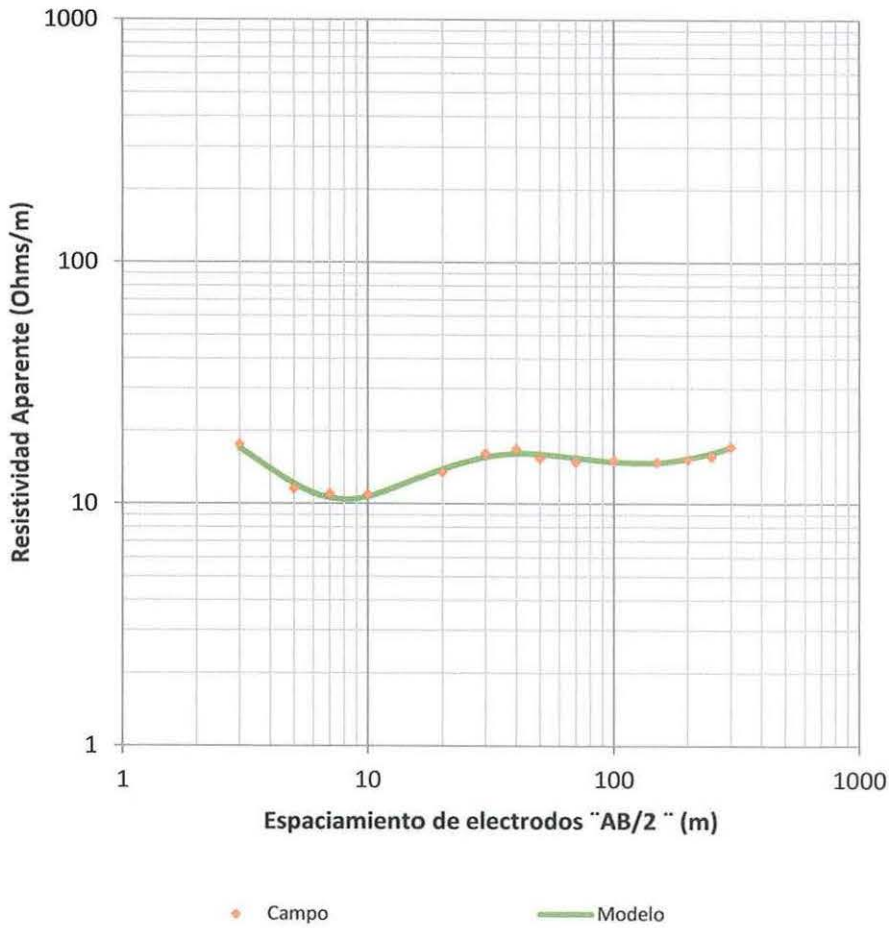


**Figura 9.** ***Muestra la curva de resistividades obtenida en campo y la de modelado, considerando 4 capas sobre el semiespacio.***

**Tabla XIV.** ***Interpretación cuantitativa del tercer sondeo eléctrico vertical, ubicado en el pozo agrícola No.1 en el predio Monte de los Lobos.***

| CAPA | ESPESOR (m) | PROFUNDIDAD ACUMULADA (m) | RESISTIVIDAD (Ohm/m) | LITOLOGÍA ASIGNADA |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.5 | 1.5 | 25 | Aluvión |
| 2 | 6.8 | 8.3 | 8 | Conglomerados |
| 3 | 4.4 | 12.7 | 52 | Gravas (capa acuífera) |
| 4 | 137.0 | 150.0 | 13 | |
| 5 | - | - | 28 | Rocas volcánicas (basamento) |

Dado el número de sondeos en el área de estudio y la separación entre los mismos, no es recomendable generar una sección geoeléctrica para definir la posible continuidad lateral de la estratificación, puesto que en los modelos obtenidos se observan inconsistencias que pueden ser asociadas a geología complicada en el área (ejemplo SEV 2). Con base en este análisis, incluyendo el de los que no se ubican en la zona de estudio, se propone una correlación de los resultados de la interpretación geoeléctrica con las formaciones geológicas presentes en la región, ya que, con la información obtenida de los SEV's, no puede hacerse un diagnóstico confiable, debido a la baja densidad en el número de sondeos, sin embargo, esta reinterpretación se realizó a fin de tenerlos como referencia y apoyo en el análisis del campo magnético en el área y el cual se analiza a continuación.

### *V.1.1 MAGNETOMETRÍA*

Con los datos aeromagnéticos adquiridos se conformó el mapa de campo magnético total del área de estudio (figura 10), el cual se comparó con el obtenido de la rejilla de datos descargada vía internet de la página GeoNet de la Universidad de El Paso, Texas, EUA, (figura 11), y se observó bastante concordancia entre ellos, esto porque la fuente es la misma ya que la UTEP ha recopilado e integrado datos de los Servicios Geológicos de EUA y México, la diferencia más significativa es que los datos del SGM son adquiridos a lo largo de líneas de vuelo, mientras que los de la UTEP son interpolados. Los datos, tanto de GeoNet como del SGM, no requirieron de un procesamiento previo para ser analizados debido a que los dipolos y lineamientos magnéticos identificados son los suficientemente claros y correlacionables con los rasgos litológicos y estructurales del área. En ambos mapas se puede observar la presencia de zonas con alto contraste en la intensidad magnética, siendo más visibles en los límites noreste y sur de la subcuenca.

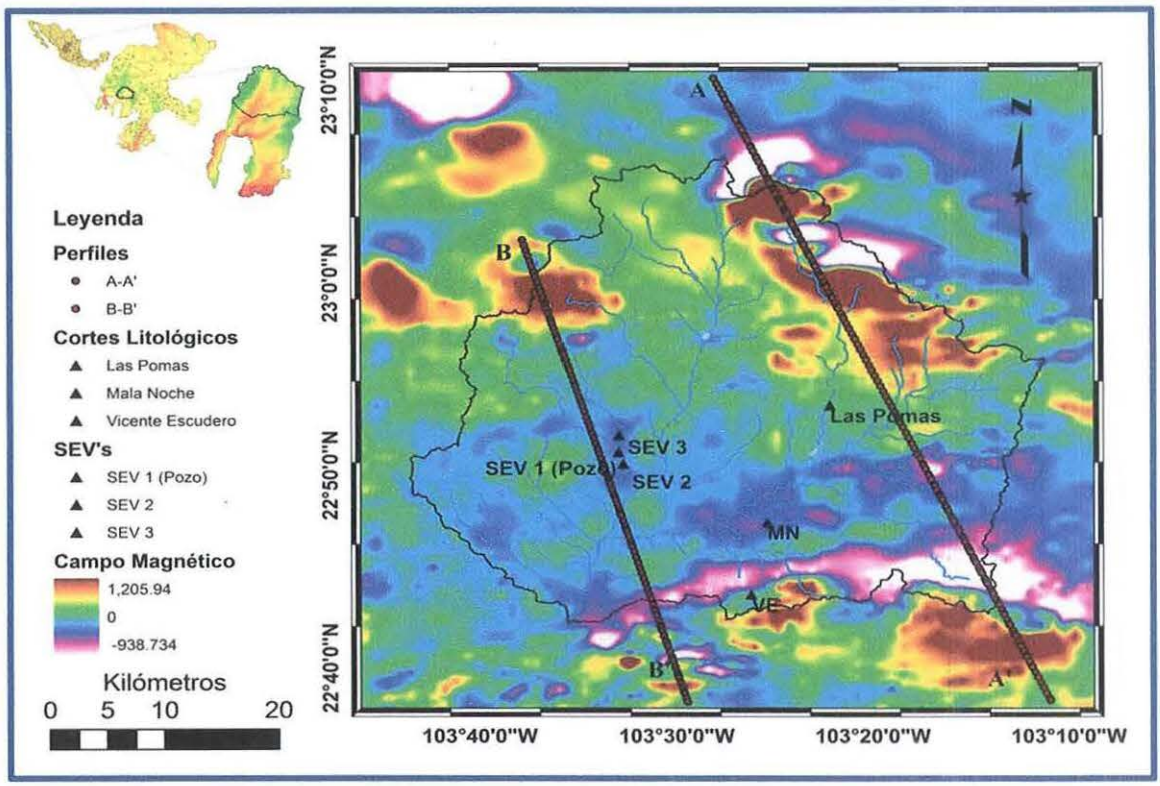


**Figura 10. Mapa aeromagnético de la subcuenca Río Valparaíso (fuente SGM) y perfiles modelados A y B.**

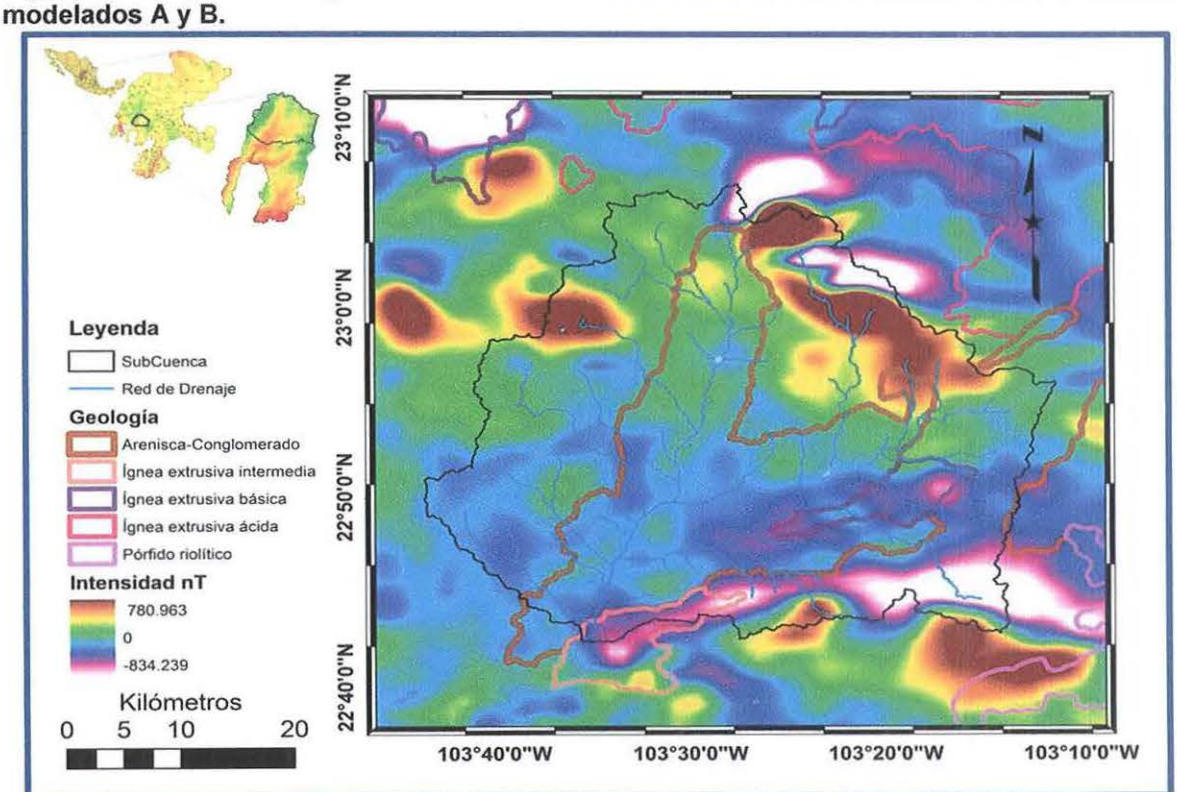


**Figura 11. Mapa aeromagnético de la subcuenca Río Valparaíso (fuente GeoNet).**

Los mapas de contornos, obtenidos de SGM, se utilizaron para la generación de perfiles (A-A', B-B', figura 10), con propósito de modelado. Mientras que los obtenidos de GeoNet, para correlacionar la geología en la zona, donde se aprecian que la zona centro de la subcuenca posee baja intensidad del campo magnético, mientras que las anomalías dipolares son visibles en los límites de la subcuenca. En el límite sur de la subcuenca se observa una franja de intensidad negativa altamente pronunciada.

Por otra parte, perfiles magnéticos con sus correspondientes modelos interpretados se presentan a continuación:

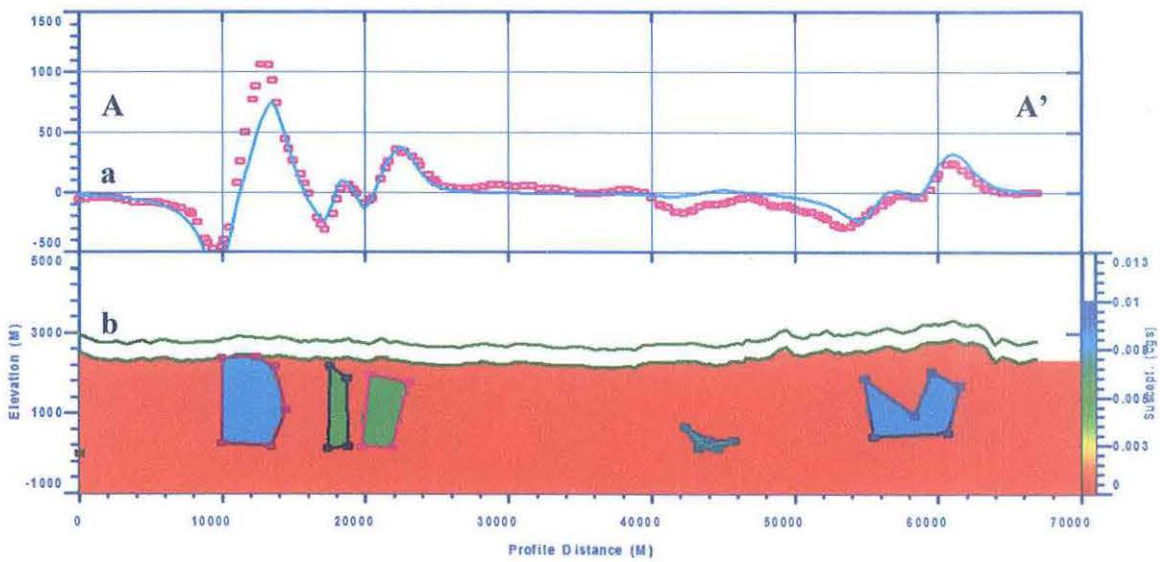


**Figura 12.** ***Perfil A. [a] La línea color azul indica la curva del modelo, mientras que los puntos color rosa los datos medidos. [b] Las líneas verde inferior y superior indican la topografía y la altura de vuelo, respectivamente. Los polígonos representan los posibles cuerpos en el subsuelo con sus respectivas susceptibilidades indicadas en la barra de colores.***

Perfil A (figura 12). En los extremos laterales aproximadamente a 10 km se presentan anomalías magnéticas positivas, las cuales terminan después de 25 km y se presentan nuevamente a los 50 km.

En la figura 12b se muestra el modelo obtenido, se aprecian cinco cuerpos emplazados a diferentes profundidades que reproducen las anomalías observadas. Las susceptibilidades (en unidades CGS) que se les asignó oscilan

entre $6{,}000x10^{-6}$ y $8{,}000x10^{-6}$ (basaltos y andesitas, respectivamente) mientras que al medio que las circunda, correspondiente a rocas riolíticas es $600x10^{-6}$.

Perfil B (figura 13). Al inicio del perfil se encuentra una anomalía magnética con extensión a 10 km, posterior a esta, en aproximadamente 30 km inicia nuevamente la presencia de anomalías.

En la figura 13b se muestra el modelo obtenido. La anomalía observada se ajustó con cinco cuerpos de susceptibilidades entre $4{,}000x10^{-6}$ y $8{,}000x10^{-6}$ (en unidades CGS) (basaltos y andesitas). Para este caso resultó un poco más complicado ajustar las curvas, se cree que fue debido a errores en los datos, ya que para el cuerpo del extremo derecho del perfil, tiene una profundidad mucho mayor a los demás y aunque se cambiaron los valores de la susceptibilidad, nunca se logró generar el descenso tan definido en la anomalía, aun cuando se generó la misma sección utilizando los datos de GeoNet.

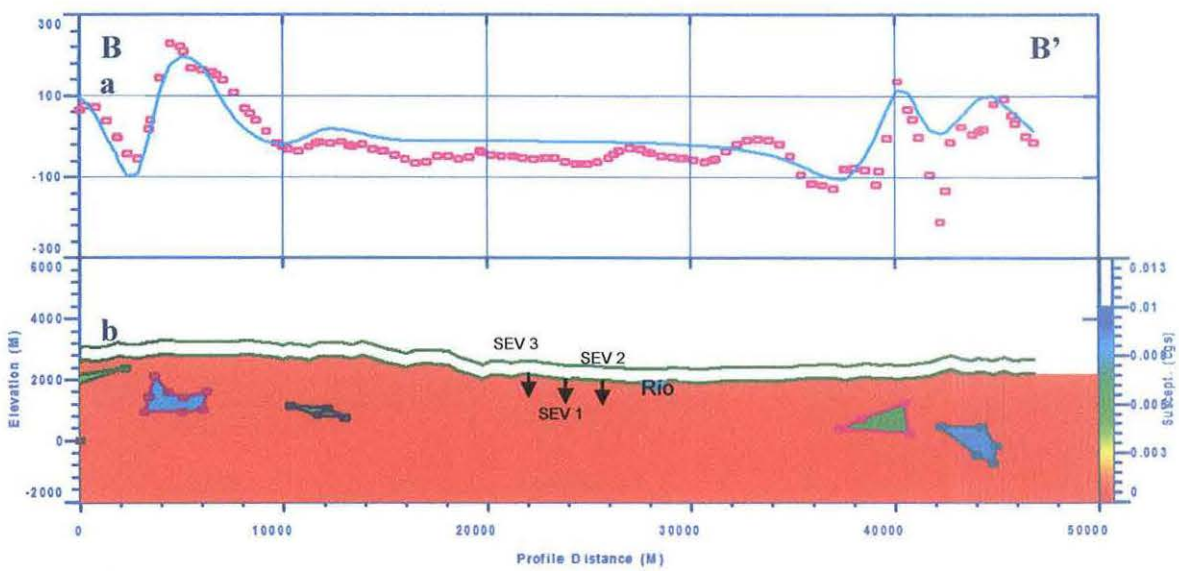


**Figura 13.** ***Perfil B, [a] La línea color azul indica la curva del modelo, mientras que los puntos color rosa los datos medidos. [b] Las líneas verde inferior y superior indican la topografía y la altura del vuelo, respectivamente. Los polígonos representan los posibles cuerpos en el subsuelo con sus respectivas susceptibilidades indicadas en la barra de colores.***

## V.2 ELABORACIÓN DE PERFILES DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO

El comportamiento del nivel piezométrico en lo referente a la variación espacial y temporal se obtiene considerando las mediciones del nivel estático en los pozos ubicados dentro de la zona. La localización de los sitios de medición corresponde a la red de monitoreo de la CNA, la cual está conformada por 22 pozos piloto (figura 14a), con los que se realizaron los perfiles del nivel estático a diferentes años, para lo cual se omitieron los pozos VA-12, VA-13, VA-21 y VA-22, porque están ubicados en elevaciones topográficas un poco más elevadas y a una distancia horizontal superior a 3 kilómetros respecto a los que se encuentran a lo largo del valle. Las mediciones se toman en condiciones estáticas, en eventos denominados "paro total" programados por la CNA que consiste en suspender el bombeo en la totalidad de los pozos en la zona. En la figura 14b, se muestran los perfiles del nivel del espejo del agua registrados en diferentes años. La serie que corresponde a la topografía está referida a la cota del brocal en cada pozo, misma que se tomó como referencia para convertir la profundidad del nivel estático, a metros sobre el nivel del mar (msnm).

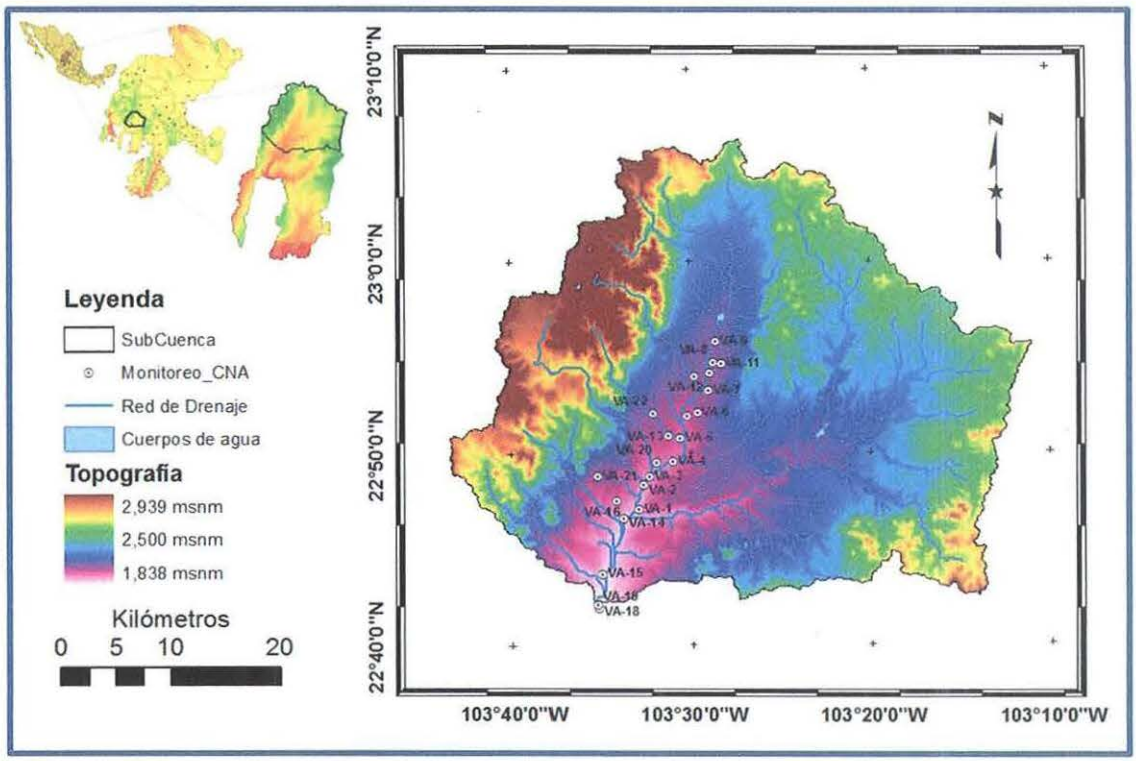


**Figura 14a.** ***Localización de pozos de la red piezométrica de la CNA.***

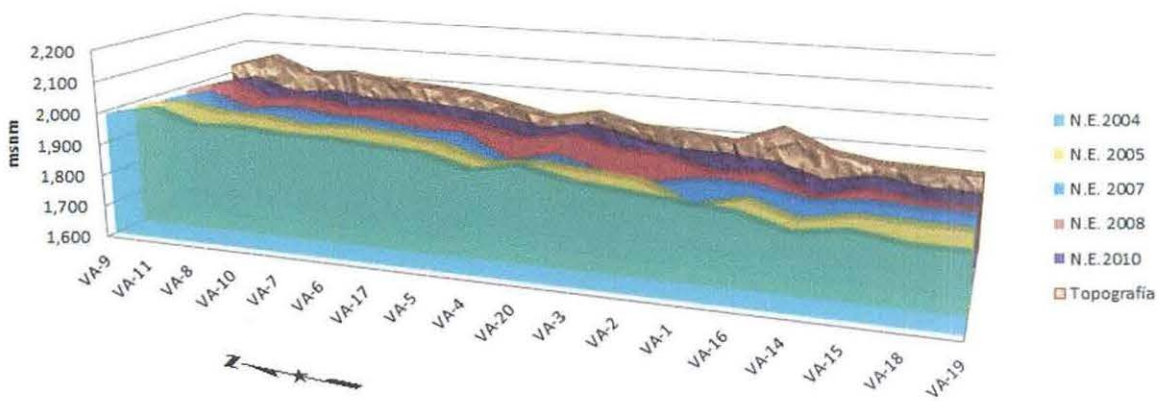


**Figura 14b.** ***Perfiles que indican la evolución del nivel estático en el periodo 2004 a 2010, de los cuales sólo se tiene información viable para los años 2004, 2005, 2007, 2008 y 2010.***

## V.3 PARÁMETROS FISICO-QUÍMICOS IN SITU

Una vez adquirida la muestra en cada sitio se procedió a medir los parámetros físico-químicos que fue posible cuantificar con el uso del equipo utilizado y bajo las condiciones especificadas en el capítulo III. Se tomó agua en un recipiente, se

introdujo el dispositivo de cada aparato por unos minutos hasta que se estabilizaron los valores para registrar la lectura de los parámetros tales como: conductividad eléctrica, pH, NaCl, temperatura y STD. Para conservar tales valores a fin de utilizarlos en análisis posteriores. Las muestras fueron etiquetadas para la identificación con el nombre de cada sitio, fecha, hora y valores de cada parámetro. Tales valores se presentan en la tabla XV. El nombre de los pozos se estableció durante la campaña de mediciones en campo realizada como parte del estudio, a fin de llevar un mejor control de la información puesto que era frecuente encontrar hasta tres etiquetas en cada obra, una para control de SAGARPA, otra de CONAGUA y la mayoría de CEAPA. Se optó establecer esta nomenclatura, una vez identificados y registradas las coordenadas UTM del sitio, las cuales están referidas en el sistema geodésico mundial 84 (WGS84 por sus siglas en ingles). Es importante mencionar que el pH y los STD se encuentran dentro de los límites máximos permisible establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) en vigilancia por la Secretaria de Salud, publicada en el año 2000, la cual indica que el pH debe estar en el rango de 6.5 – 8.5 y los STD, de agua para uso doméstico menos de 1,000 ppm.

*V.3.1 STD Y CE*

Existen dos métodos para obtener con precisión el contenido de sólidos totales disueltos (STD); pesando el residuo después de evaporar un peso conocido de agua, la otra alternativa es utilizando las concentraciones de iones y moléculas con base en un análisis químico completo (Hitchon et al., 1999). Por razones obvias en el presente trabajo, el contenido de sales se determinó a través del análisis químico de las muestras, aunque este parámetro también se midió en campo, y el valor sirvió para comparar y validar tal información, al observar que la medición resultó ser confiable, el dato que se utilizará en el desarrollo del proyecto, será siempre el tomado in situ. La distribución de los valores obtenidos es la mostrada en la figura 15, donde se realizó el análisis cualitativo de los datos traslapado con la geología del sitio.

**Tabla XV.** ***Coordenadas UTM de los sitios de muestreo y parámetros in situ.***

| POZO | COORDENADAS UTM | | | CE | T | pH | STD | NaCl |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | X | Y | Z | µS | °C | | ppm | % |
| A | 649,548 | 2522,035 | 1,915 | 360 | 32 | 8.5 | 180 | 0.7 |
| B | 649,889 | 2523,968 | 1,918 | 391 | 23 | 7.9 | 197 | 0.8 |
| C | 652,939 | 2525,035 | 1,919 | 348 | 23 | 7.5 | 174 | 0.5 |
| D | 652,726 | 2526,398 | 1,955 | 226 | 23 | 7.1 | 113 | 0.4 |
| E | 654,510 | 2529,795 | 1,994 | 366 | 29 | 8.0 | 183 | 0.7 |
| F | 656,099 | 2532,416 | 2,023 | 444 | 22 | 7.9 | 222 | 0.9 |
| G | 656,292 | 2536,642 | 2,025 | 269 | 21 | 7.2 | 134 | 0.5 |
| H | 654,978 | 2532,650 | 1,994 | 318 | 22 | 7.8 | 159 | 0.6 |
| I | 651,660 | 2527,558 | 1,971 | 325 | 23 | 7.8 | 163 | 0.6 |
| J | 647,516 | 2519,543 | 1,897 | 443 | 28 | 8.5 | 221 | 0.9 |
| K | 645,414 | 2512,304 | 1,852 | 398 | 22 | 8.7 | 199 | 0.8 |
| L | 646,474 | 2520,153 | 1,927 | 549 | 27 | 7.7 | 274 | 1.1 |
| M | 653,601 | 2529,448 | 1,981 | 390 | 37 | 7.7 | 195 | 0.8 |
| N | 637,373 | 2509,734 | 1,884 | 435 | 26 | 7.6 | 217 | 0.9 |
| O | 645,051 | 2511,215 | 1,880 | 361 | 17 | 8.4 | 181 | 0.7 |
| P | 650,653 | 2524,958 | 1,946 | 374 | 22 | 7.6 | 187 | 0.7 |
| Q | 645,020 | 2523,642 | 2,025 | 412 | 27 | 8.2 | 206 | 0.8 |
| R | 649,033 | 2528,028 | 1,957 | 371 | 29 | 7.5 | 185 | 0.7 |
| S | 659,831 | 2543,247 | 2,137 | 343 | 23 | 7.9 | 172 | 0.7 |
| T | 645,910 | 2518,497 | 1,906 | 381 | 28 | 8.7 | 191 | 0.7 |
| U | 653,987 | 2513,910 | 2,078 | 510 | 19 | 7.7 | 255 | 1 |
| V | 660,679 | 2513,729 | 2,152 | 789 | 22 | 7.3 | 396 | 1.6 |
| W | 664,952 | 2514,968 | 2,141 | 551 | 22 | 8.1 | 275 | 1.1 |
| X | 653,240 | 2519,749 | 1,940 | 348 | 26 | 7.7 | 175 | 0.7 |
| Y | 667,584 | 2532,316 | 2,092 | 400 | 25 | 7.6 | 201 | 0.8 |
| Z | 659,590 | 2519,752 | 1,979 | 377 | 24 | 7.5 | 189 | 0.7 |
| A1 | 662,655 | 2517,943 | 2,042 | 379 | 22 | 7.4 | 189 | 0.7 |
| B1 | 661,279 | 2521,250 | 2,010 | 461 | 27 | 8.2 | 232 | 0.9 |
| C1 | 663,300 | 2524,608 | 1,999 | 374 | 28 | 7.7 | 187 | 0.7 |
| D1 | 668,188 | 2524,023 | 2,046 | 383 | 26 | 7.5 | 192 | 0.7 |

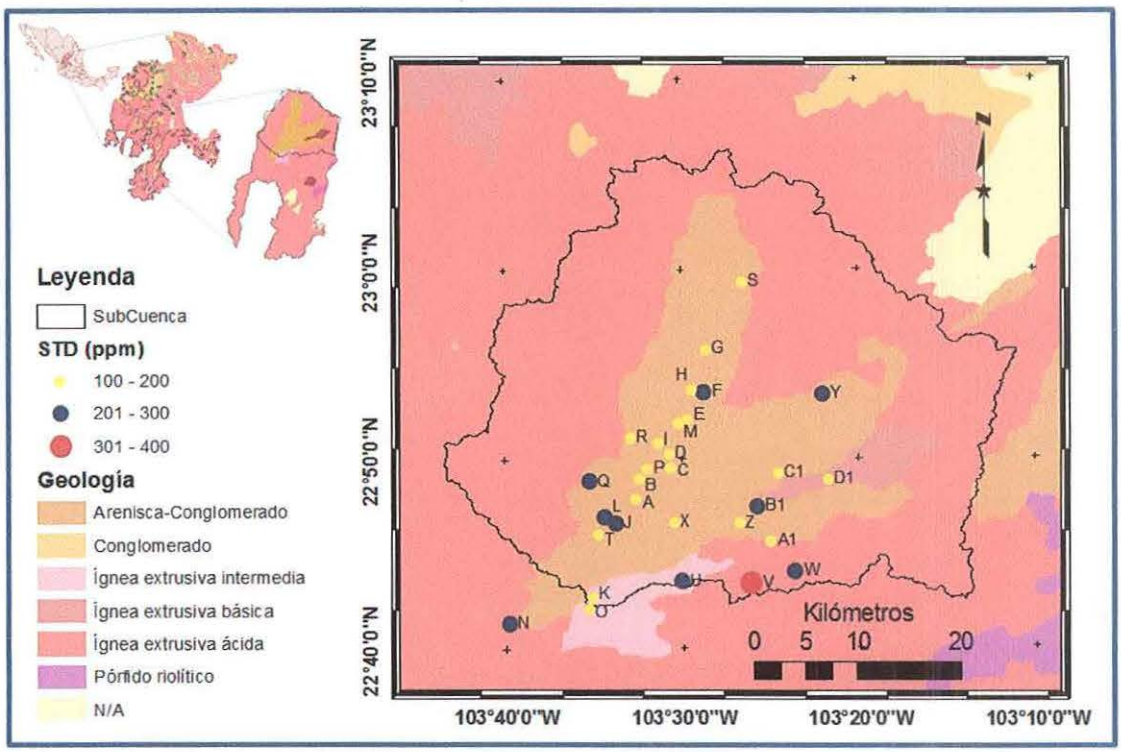


**Figura 15.** ***Representación gráfica de los valores medidos de STD y geología de la subcuenca.***

Dado que la conductividad eléctrica es la capacidad de una sustancia para transmitir la corriente eléctrica y depende principalmente de la concentración de STD (Hitchon et al., 1999), se realizó también el mapa de análisis cualitativo a fin de corroborar la información, pero esta vez traslapado con la configuración del campo magnético total, a fin de identificar diferencias en cuanto a la intensidad magnética de las rocas que están en contacto con el agua e influye en las concentraciones de sales, tal como se observa en la figura 16.

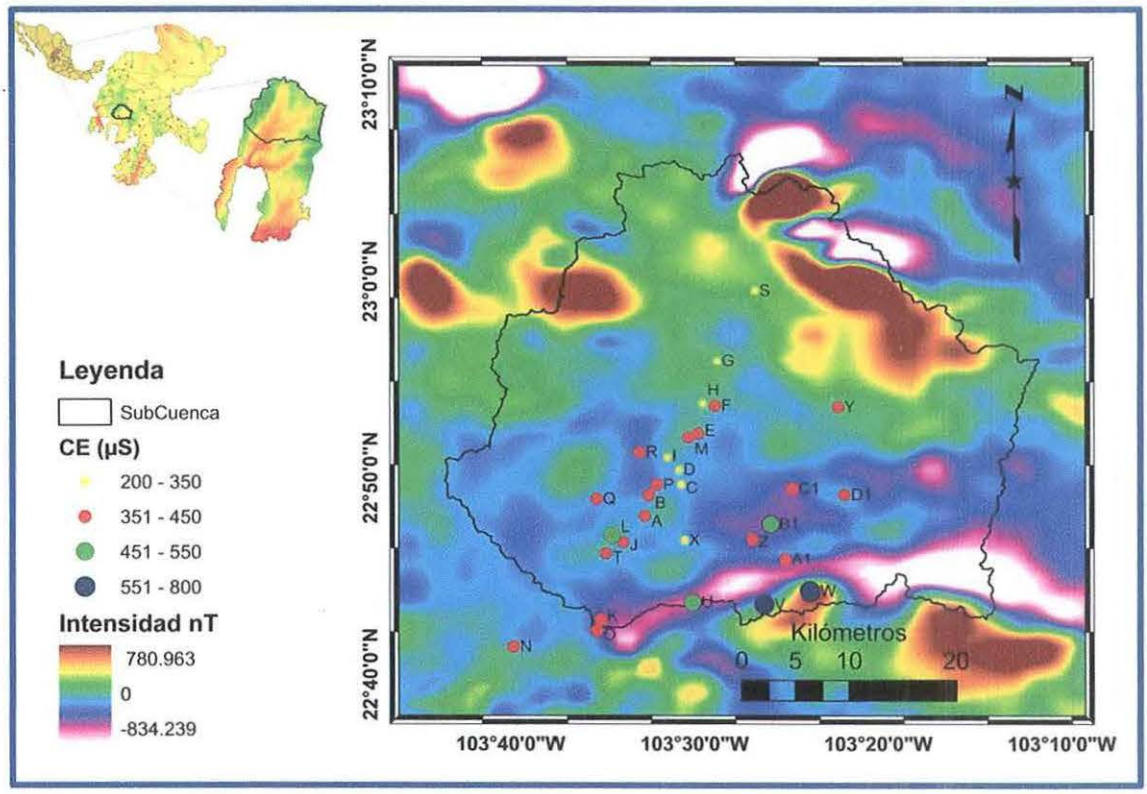


**Figura 16.** ***Representación gráfica de los valores medidos de CE y campo total de la subcuenca.***

*V.3.2 pH Y TEMPERATURA*

El potencial de hidrógeno (pH) es uno de los parámetros más importantes, puesto que, en función de los valores que presenta se determina la intensidad de los principales procesos químicos que ocurren en las aguas naturales, como las reacciones de ácido-base, la ceración de complejos químicos, oxidación-reducción, adsorción, disolución y precipitación química (Pankow, 1991).

El rango de pH para el agua superficial se encuentra entre 6.5 – 8.5, mientras que el agua subterránea fluctúa entre 6 – 8.5 (Hem, 1985). Los datos registrados se presentan en la figura 17, donde de igual manera se traslapa con la geología del área estudiada.

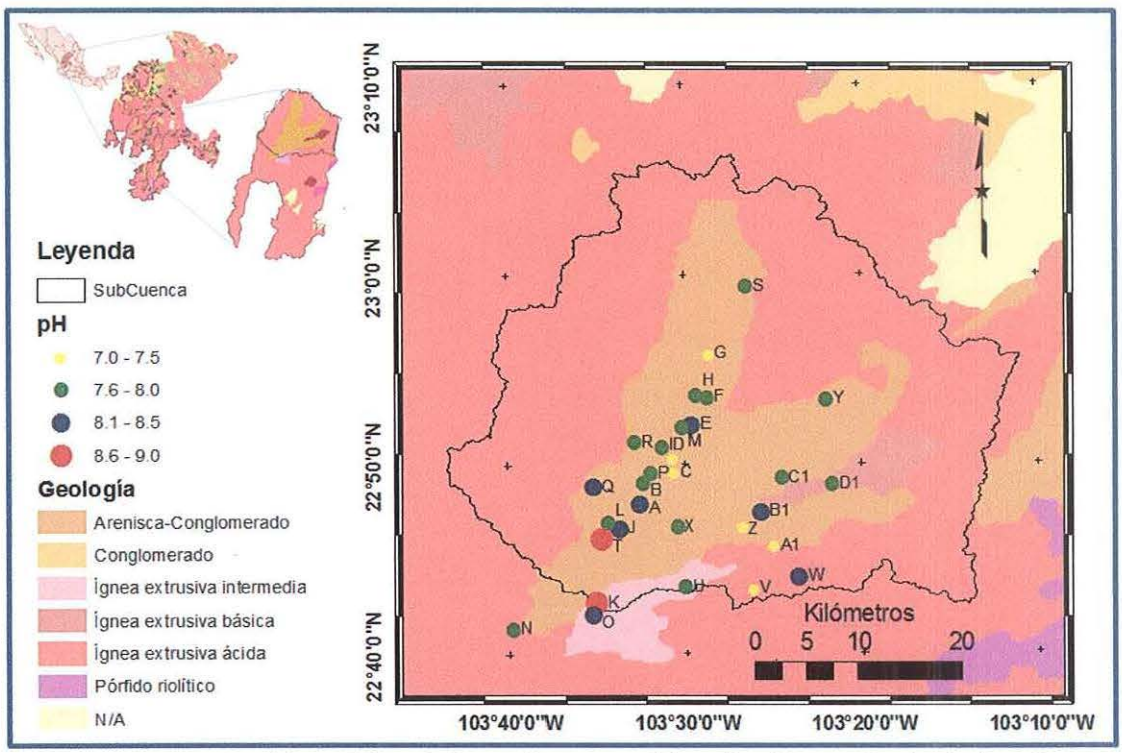


**Figura 17.** ***Representación gráfica de los valores medidos de pH y geología de la subcuenca.***

La importancia de medir la temperatura de las aguas subterráneas, aparte de los aspectos relacionados a termalismo o geotermia, radica en que gran parte de las reacciones químicas que ocurren en el agua, son propensas a aumentar de velocidad con el aumento de a temperatura (Langmuir, 1997). Otro factor importante es la composición química de las rocas, por tanto, en la figura 18 se presentan los valores obtenidos en cada pozo, correlacionando con la geología del lugar, a fin de tener un panorama general de las condiciones predominantes en el tiempo que se tomó la muestra.

## V.4 PARÁMETROS FISICO-QUÍMICOS DE LABORATORIO

Después de recolectadas las muestras y transportadas al laboratorio, se realizaron los análisis mencionados en el capítulo III, bajo las consideraciones señaladas y despreciando los valores adquiridos en parámetros degradables tales como los nitritos y nitratos ($NO_{2-}$ y $NO_{3-}$) con el objetivo de hacer la cuantificación considerando siempre las especificaciones dadas en la norma correspondiente.

Los resultados de laboratorio serán presentados en dos secciones:

1) Las concentraciones de aniones, obtenidas a través de la cromatografía de iones en el laboratorio de hidrogeoquímica del CICESE. Se incluye también el ion $HCO_3^-$ obtenido por titulación.
2) Los contenidos de cationes determinado por un laboratorio externo que cuenta con acreditación de la EMA (Entidad Mexicana de Acreditaciones) Analítica del Noroeste S. A. de C.V. Contar con esta acreditación implica que los análisis son válidos para cumplimiento de regulaciones ambientales y/o de salud.

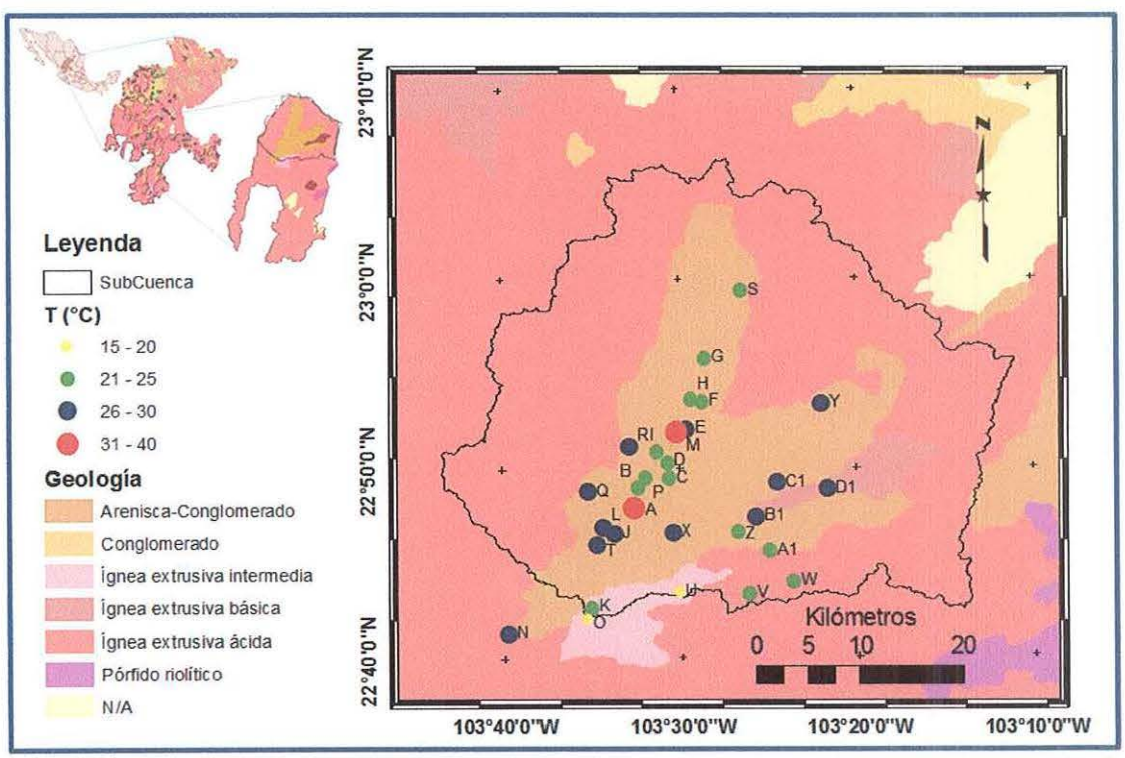


**Figura 18.** ***Representación gráfica de los valores medidos de temperatura y geología de la subcuenca.***

En la tabla XVI, se muestra el error de balance de carga de aniones y cationes o electronegatividad (EN), se puede observar que la mayoría de los resultados se encuentran dentro del rango de tolerancia, por lo que se afirma que los resultados

mostrados son confiables. En la columna adyacente se especifica el tipo de agua de acuerdo a la clasificación por iones dominantes, mencionado en el capítulo IV.

**Tabla XVI.** ***Resultados obtenidos en el balance iónico de los datos obtenidos en cada muestra y la clasificación de acuerdo al ion dominante.***

| POZO | COORDENADAS UTM | | | EN | TIPO |
|---|---|---|---|---|---|
| | X | Y | Z | % | |
| A | 649,548 | 2 522,035 | 1,915 | 13 | $HCO_3^-$ - Na |
| B | 649,889 | 2 523,968 | 1,918 | 36 | $HCO_3^-$ - Na |
| C | 652,939 | 2 525,035 | 1,919 | 42 | $HCO_3^-$ - Ca |
| D | 652,726 | 2 526,398 | 1,955 | 1 | $HCO_3^-$ - Ca |
| E | 654,510 | 2 529,795 | 1,994 | 3 | $HCO_3^-$ - Na |
| F | 656,099 | 2 532,416 | 2,023 | 11 | $HCO_3^-$ - Na |
| G | 656,292 | 2 536,642 | 2,025 | 62 | $HCO_3^-$ - Ca |
| H | 654,978 | 2 532,650 | 1,994 | 2 | $HCO_3^-$ - Ca |
| I | 651,660 | 2 527,558 | 1,971 | 35 | $HCO_3^-$ - Na |
| J | 647,516 | 2 519,543 | 1,897 | 53 | $HCO_3^-$ - Na |
| K | 645,414 | 2 512,304 | 1,852 | 6 | $HCO_3^-$ - Na |
| L | 646,474 | 2 520,153 | 1,927 | 7 | $HCO_3^-$ - Na |
| M | 653,601 | 2 529,448 | 1,981 | 4 | $HCO_3^-$ - Na |
| N | 637,373 | 2 509,734 | 1,884 | 2 | $HCO_3^-$ - Na |
| O | 645,051 | 2 511,215 | 1,880 | 15 | $HCO_3^-$ - Na |
| P | 650,653 | 2 524,958 | 1,946 | 25 | $HCO_3^-$ - Ca |
| Q | 645,020 | 2 523,642 | 2,025 | 20 | $HCO_3^-$ - Na |
| R | 649,033 | 2 528,028 | 1,957 | 42 | $HCO_3^-$ - Na |
| S | 659,831 | 2 543,247 | 2,137 | 34 | $HCO_3^-$ - Na |
| T | 645,910 | 2 518,497 | 1,906 | 4 | $HCO_3^-$ - Na |
| U | 653,987 | 2 513,910 | 2,078 | 4 | $HCO_3^-$ - Ca |
| V | 660,679 | 2 513,729 | 2,152 | 5 | $HCO_3^-$ - Ca |
| W | 664,952 | 2 514,968 | 2,141 | 1 | $HCO_3^-$ - Ca |
| X | 653,240 | 2 519,749 | 1,940 | 3 | $HCO_3^-$ - Ca |
| Y | 667,584 | 2 532,316 | 2,092 | 6 | $HCO_3^-$ - Ca |
| Z | 659,590 | 2 519,752 | 1,979 | 6 | $HCO_3^-$ - Ca |
| A1 | 662,655 | 2 517,943 | 2,042 | 3 | $HCO_3^-$ - Ca |
| B1 | 661,279 | 2 521,250 | 2,010 | 6 | $HCO_3^-$ - Ca |
| C1 | 663,300 | 2 524,608 | 1,999 | 1 | $HCO_3^-$ - Ca |
| D1 | 668,188 | 2 524,023 | 2,046 | 2 | $HCO_3^-$ - Ca |

### *V.4.1 ANIONES*

El resultado del análisis cromatográfico de las muestras recolectadas en campo se presenta en la tabla XVII, el contenido de aniones mayores incluye a los fluoruros ($F^-$), cloruros ($Cl^-$), bromuros ($Br^-$), sulfatos ($SO_4^{2-}$) y bicarbonatos ($HCO_3^-$), así como la concentración de carbonato de calcio ($CaCO_3$) ¨dureza¨. En la primera fila indica el límite máximo permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) (S.S.A., 2000).

**Tabla XVII.** ***Resultados obtenidos en el análisis de aniones realizado en el laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE.***

| POZO | $F^-$ | $Cl^-$ | $Br^-$ | $SO_4^{2-}$ | $HCO_3^-$ | $CaCO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L |
| NOM | 1.5 | 250 | - | 400 | 500 | 500 |
| A | 5.53 | 7.71 | 0.46 | 12.52 | 91.53 | 75.07 |
| B[1] | 4.06 | 2.64 | 0.69 | 10.59 | 61.02 | 50.04 |
| C | 0.62 | 2.71 | 4.29 | 3.17 | 61.02 | 50.04 |
| D | 0.33 | 0.82 | 4.45 | 2.99 | 122.03 | 100.09 |
| E | 4.39 | 4.54 | 0.56 | 11.92 | 152.54 | 125.11 |
| F | 3.43 | 2.82 | 0.75 | 7.01 | 152.54 | 125.11 |
| G | 0.10 | 0.76 | 1.58 | 4.21 | 30.51 | 25.02 |
| H | 0.47 | 1.80 | 3.73 | 14.15 | 152.54 | 125.11 |
| I | 4.04 | 1.36 | 0.69 | 4.55 | 61.02 | 50.04 |
| J | 5.15 | 3.65 | 0.55 | 10.43 | 30.51 | 25.02 |
| K | 8.21 | 9.60 | 0.33 | 26.81 | 152.54 | 125.11 |
| L | 6.86 | 7.59 | 0.56 | 34.62 | 183.05 | 150.13 |
| M | 4.43 | 4.21 | 0.39 | 10.77 | 152.54 | 125.11 |
| N | 1.12 | 1.30 | 0.62 | 2.45 | 274.58 | 225.20 |
| O | 0.95 | 0.51 | 0.37 | 0.57 | 274.58 | 225.20 |
| P | 2.07 | 2.01 | 0.88 | 20.86 | 91.53 | 75.07 |
| Q | 7.69 | 4.45 | 0.39 | 14.36 | 91.53 | 75.07 |
| R | 3.17 | 1.43 | 1.34 | 7.86 | 61.02 | 50.04 |
| S | 0.67 | 0.73 | 0.42 | 3.10 | 91.53 | 75.07 |
| T | 5.12 | 2.50 | 0.51 | 7.02 | 152.54 | 125.11 |
| U | 0.31 | *20.04 | 3.87 | 3.87 | 244.07 | 200.18 |
| V | 0.95 | 8.05 | 0.05 | 28.09 | 427.12 | 350.31 |
| W | 1.89 | 1.56 | 0.01 | 89.87 | 213.56 | 175.15 |
| X | 0.70 | 1.73 | 0.84 | 8.83 | 183.05 | 150.13 |
| Y | 0.53 | 1.44 | 0.87 | 1.90 | 213.56 | 175.15 |
| Z | 0.40 | 3.12 | 1.86 | 33.68 | 152.54 | 125.11 |
| A1 | 1.34 | 1.06 | 0.20 | 5.00 | 213.56 | 175.15 |
| B1 | 2.35 | 12.94 | 27.98 | 16.03 | 152.54 | 125.11 |
| C1 | 0.66 | 2.38 | 2.99 | 3.30 | 213.56 | 175.15 |
| D1 | 1.47 | 1.61 | 0.85 | 6.62 | 213.56 | 175.15 |

[1] *Fuera del límite de Cl en mg/L para agua subterránea (Langmuir,1997)

*V.4.2 CATIONES*

Los elementos mayores principales considerados en este estudio son el calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), cuyas formas disueltas en agua más comunes son $Ca^{2+}$, $K^{+}$, $Mg^{2+}$ y $Na^{+}$, respectivamente (Hem,1985). Además del cobre (Cu), cromo (Cr), fierro (Fe), manganeso (Mn) y fósforo (P). En la tabla XVIII, se observan las concentraciones obtenidas, la primera fila indica los límites máximos permisibles establecidos por la NOM para determinados iones, en el caso donde no se establece en la normatividad mexicana, se agregó el valor de referencia considerado por la Comunidad Europea (Hitchon et al., 1999). Se puede observar que varios de los parámetros están muy por debajo del límite permisible, incluso del límite cuantificable (L.C.) por el método utilizado para el análisis.

**Tabla XVIII.** ***Resultados obtenidos en el análisis de cationes, realizado por Analítica del Noroeste S.A. de C.V.***

| POZO | Ca | Mg | K | Na | Cu | Cr | Fe | Mn | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L |
| NOM | - | - | - | 200 | 2 | 0.05 | 0.3 | 0.15 | - |
| CE | 100 | 12 | 50 | 150 | - | - | - | - | - |
| A | 9.42 | < L.C. | < L.C. | 58.20 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| B | 16.50 | 1.01 | 3.98 | 50.60 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| C | 31.80 | 2.04 | 3.77 | 23.30 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| D | 21.70 | 2.08 | 3.23 | 12.60 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| E | 24.60 | 1.24 | 3.09 | 43.10 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| F | 30.10 | 1.70 | 3.41 | 42.00 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| G | 30.90 | 3.04 | 5.01 | 12.30 | 0.23 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| H | 27.40 | 1.63 | 4.69 | 24.40 | 0.51 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| I | 19.80 | 1.22 | 3.18 | 36.10 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| J | 9.79 | < L.C. | 3.92 | 68.80 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| K | 4.15 | < L.C. | 5.62 | 69.50 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| L | 21.20 | 0.94 | 3.11 | 81.80 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| M | 24.60 | 1.22 | 2.30 | 42.10 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| N | 36.00 | 2.34 | 5.76 | 48.40 | 0.10 | < L.C. | 0.04 | < L.C. | < L.C. |
| O | 10.60 | 1.20 | 3.51 | 61.30 | 0.08 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| P | 31.80 | 2.83 | 3.81 | 33.20 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| Q | 9.03 | < L.C. | 4.06 | 67.70 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| R | 28.50 | 2.05 | 4.29 | 35.20 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| S | 28.60 | 2.08 | 3.47 | 35.60 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| T | 3.66 | < L.C. | 5.04 | 68.60 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| U | 47.00 | 16.70 | 3.19 | 25.60 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | 0.08 |
| V | 84.90 | 24.70 | 3.28 | 36.50 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | 0.12 |
| W | 56.40 | 16.20 | < L.C. | 28.20 | < L.C. | < L.C. | 0.04 | 0.04 | < L.C. |
| X | 28.10 | 4.95 | 7.57 | 30.40 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| Y | 45.10 | 8.31 | 3.34 | 19.80 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| Z | 39.80 | 9.36 | 3.20 | 16.50 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| A1 | 35.00 | 6.84 | 2.44 | 28.90 | < L.C. | < L.C. | 0.03 | < L.C. | < L.C. |
| B1 | 38.80 | 7.30 | 5.61 | 32.50 | < L.C. | 0.01 | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| C1 | 40.30 | 6.09 | 5.60 | 19.00 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |
| D1 | 27.70 | 5.87 | 10.40 | 29.70 | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. | < L.C. |

### *V.4.3 DIAGRAMA DE PIPER*

Para obtener el tipo o familia de agua a que pertenece cada una de las muestras analizadas, se elaboraron diagramas triangulares o de Piper. Estos diagramas

consisten en dos triángulos equiláteros y un rombo tal como se observa en la figura 19. En el triángulo de la izquierda se grafica, en porcentaje de miliequivalentes por litro, a los principales cationes y, en triángulo de la derecha también en las mismas unidades, a los principales aniones. En los vértices de estos triángulos se definen aguas cálcicas, magnésicas, sódicas, etc., si la muestra se localiza en los vértices del triángulo con porcentajes mayores al 50% de calcio, magnesio, sodio, etc., respectivamente. Se define como agua mixta, a aquella que se grafica al centro del triángulo, por no existir un ion que predomine. El agua del acuífero Valparaíso se clasifica como cálcica - bicarbonatada y sódica – bicarbonatada, por la posición de las muestras se puede afirmar que es de reciente infiltración, dado que la posición de la mayoría de las muestras en la relación Na y K están por debajo del 50%, y esta tiende a aumentar con el tiempo de residencia debido a la interacción agua-roca (Appelo y Postma, 1993).

Diagrama de Piper

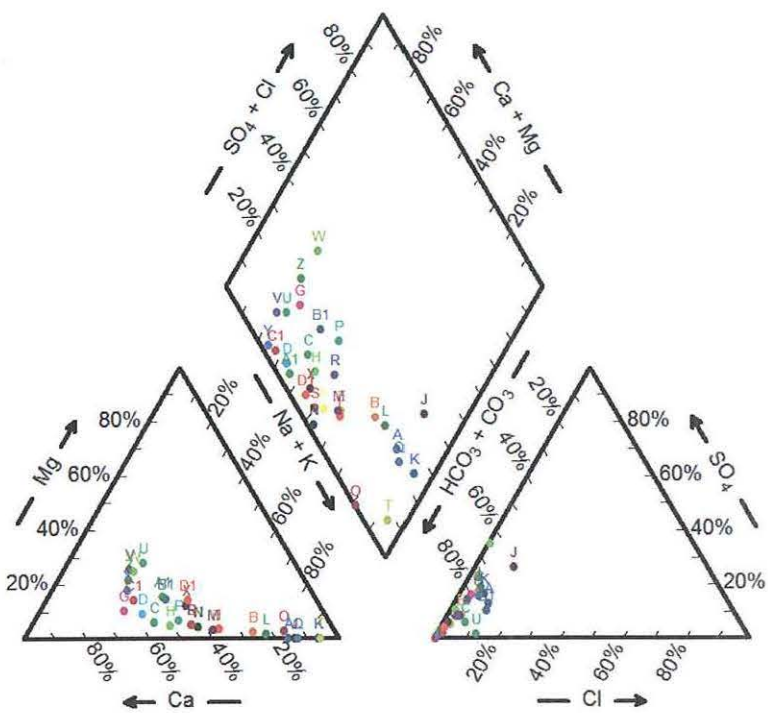


**Figura 19.** ***Diagrama de Piper, esquematiza los resultados obtenidos en cada muestra. Las muestras quedan en el área del trapecio, correspondiente a agua interaccionando con arenisca (Zuurdeeg and Van Der Weiden, 1985).***

*V.4.4 DIAGRAMAS STIFF*

Como complemento de las representaciones gráficas se formaron diagramas de Stiff, con el fin de comparar e identificar rápidamente similitudes químicas entre las muestras, ya que esquematiza los resultados de los análisis en patrones basados en sus concentraciones dadas en miliequivalentes por litro. Los iones graficados en estos diagramas son los cationes Na y K en conjunto, el Ca y el Mg, y los aniones Cl, $HCO_3^-$ y $SO_4^{2-}$ (Anexo I.2, figura 26). En ellos se confirma la familia de agua a que pertenece cada muestra, conforme se mencionó en el capitulo IV. Además en la figura 20, se posicionaron los diagramas sobre la geología, para visualizar mejor los resultados obtenidos. Y se observa que el agua de la parte norte del acuífero tiene mayor similitud en su composición química, la cual varia en la zona sur de la subcuenca, justo en la desembocadura del cause principal, donde disminuye la concentración de calcio e incrementa el sodio y el potasio.

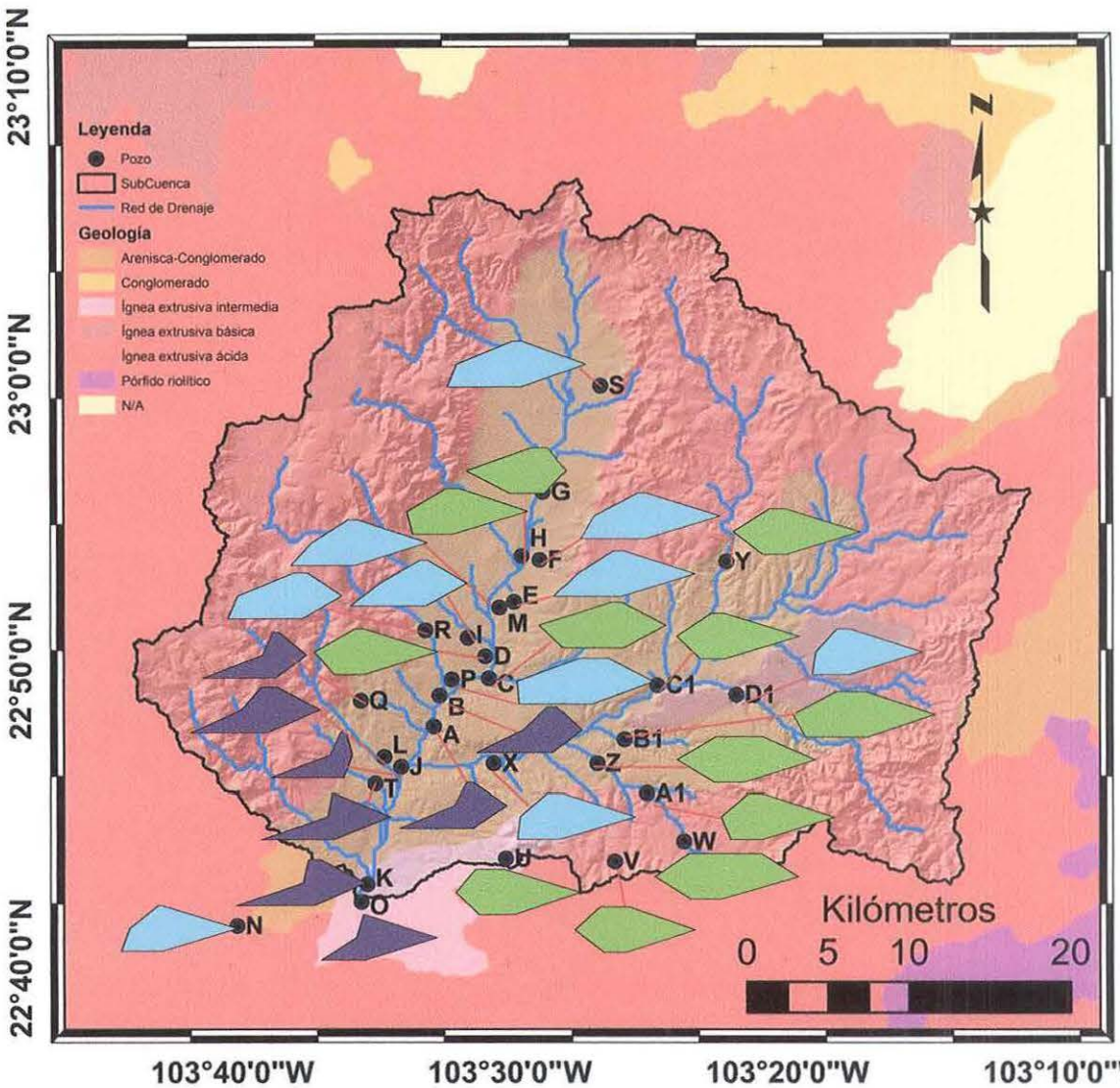


**Figura 20.** ***Diagrama de Stiff, esquematiza los resultados obtenidos en cada muestra correlacionados con la geología del lugar.***

# Capítulo VI

## RELACIÓN DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

La interpretación de los resultados de los análisis químicos del agua subterránea se utiliza junto con la geología e hidrogeología, como un auxiliar para entender y conocer de una forma más precisa el funcionamiento de los acuíferos y lograr la planeación de una mejor y más racional explotación de los recursos hidráulicos subterráneos. El agua que se encuentra en los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, parte de ésta, al precipitarse sobre la corteza terrestre, se infiltra y corre a través de las fracturas de los espacios porosos y permeables de las rocas. Al circular por el subsuelo entra en contacto con diferentes materiales disolviendo las sales y minerales que los forman y, produciendo cambios en su composición. Por lo tanto, la química de las aguas naturales dependerá de la solubilidad y composición de las rocas a través de las cuales circula, así como de factores que afecten la solubilidad, como la temperatura, el área de contacto, la velocidad de circulación, la longitud de recorrido, entre otros.

### VI.1 MAPAS Y PERFILES AEROMAGNÉTICOS

Con el propósito de correlacionar la geología y la calidad de agua en la zona se conformó un mapa de anomalías aeromagnéticas (figuras 10 y 11). De la correlación de las anomalías magnéticas con la geología (figura 11) se deduce que la zona de baja intensidad del campo magnético es debido a las rocas sedimentarias presentes en los extremos laterales del cauce de los ríos principales, las anomalías dipolares en los límites de la subcuenca obedecen a los altos topográficos y la franja de mínimos de intensidad magnética alineada en dirección E-W se relaciona con la presencia de alguna estructura geológica, como puede ser un dique. Mientras que el afloramiento de andesitas que coincide con la

porción suroeste de la franja de intensidad magnética negativa posiblemente es debido a bajas concentraciones de minerales ferromagnéticos, así mismo a los que corresponden a contactos de rocas extrusivas básicas en este caso el basalto, donde también se observa bajo contraste de susceptibilidad magnética.

Del modelado 2D de dos perfiles magnéticos (figura 12 y 13) se infieren cuerpos que poseen mayor susceptibilidad magnética (2 órdenes de magnitud) respecto de la roca circundante de composición riolítica. Los cuales, por su composición basáltica y/o andesítica, podrían ser responsables del enriquecimiento de minerales del agua subterránea, sobre todo en el sector sur de la subcuenca. Haciendo la comparación con los resultados de los SEV's y los cortes litológicos se tiene que, para ninguno de los casos se lograron identificar tales cuerpos, puesto que la profundidad máxima alcanzada por las perforaciones fue de 450 metros, además los sondeos fueron realizados en zona donde no se aprecian anomalías magnéticas.

## VI.2 COMPORTAMIENTO DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO

En la figura 14b, se muestra la variación temporal en perfil del nivel del agua en el periodo 2004 a 2010. Se aprecia: en el año 2004, el nivel del agua presenta un comportamiento estable con abatimientos en los pozos VA-16 y VA-14, con 50 y 27 metros, respectivamente, de diferencia en relación con la media; en el año 2005 el cono de abatimiento se presenta en los pozos VA-1, VA-16 y VA-14 con 28, 49 y 31 metros en el mismo orden; para el año 2007 se observa cono de abatimiento bien identificado en el pozo VA-16 con una diferencia de 41 metros; el año 2008 exhibe abatimiento en los pozos VA-16 y VA-14, con 47 y 38 metros respectivamente; por último, en el año 2010 el nivel del agua fue casi paralelo con respecto a la topografía, presentando conos de abatimiento significativo en los pozos VA-16 con 51 metros y VA-14 con 29 metros con relación a la media (Anexo I.3, tabla XIX). Lo que induce a creer que no todas las lecturas fueron en condiciones de nivel estático o que los pozos VA-14 y VA-16 tienen una demanda exageradamente superior a los demás y el nivel no se logra estabilizar aun

estando fuera de operación. Haciendo la comparación del nivel en los diferentes años se observa que en el año 2004 presentó menor profundidad del nivel estático, lo cual se relaciona con el registro de mayor precipitación para ese año según el historial de la estación climatológica, el año de mayor depresión en el nivel es 2007, donde se registran lecturas más profundas en 12 de los 22 pozos, aunque tal año no es el que registra menor precipitación, se considera que es debido a que en el año 2005 se presentaron condiciones poco favorables en la recarga del acuífero, debido a la escasa precipitación, lo que es un factor importante además que se aumenta la extracción del recurso.

## VI.3 TIPOS DE AGUA, DE ACUERDO A SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS, IONES PRINCIPALES Y DUREZA

A continuación se analizan y describen los diferentes tipos de agua, obtenidos en función de la concentración de STD, iones dominantes y dureza, considerando la variación y distribución espacial en el área estudiada. Se señala además, su clasificación de acuerdo al parámetro STD y el uso principal para el cual se recomienda el agua según la clasificación de tabla VIII. Finalmente, se describen las concentraciones de los iones principales más abundantes en el área ($Cl^-$, $SO_4^{2-}$, $Na^+$, $Ca^{2+}$, $F^-$, $Br^-$ y $HCO_3^-$), indicando su distribución espacial y su comparación con los límites permisibles de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) referente a "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

Toda la descripción y los análisis realizados, son a partir de mapas generados de los datos químicos obtenidos, donde se observó detalladamente la distribución y agrupamiento de pozos por familia de agua, la concentración de STD y las concentraciones de los iones principales.

### *VI.3.1 ANÁLISIS Y DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS*

De acuerdo a los resultados obtenidos en los análisis químicos respecto a la concentración de STD, según se observa en la figura 10, varían entre 113 y 396

ppm, por lo que todos los valores son menores a 1,000 ppm, lo que implica tener aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano en toda la zona, especialmente en los sitios cercanos al cause principal del escurrimiento superficial.

El agua del acuífero Valparaíso se clasifica, en base a la interpretación química de sus análisis, en dos tipos o familias: *bicarbonatada-sódico* ($HCO_3^-$- Na) (15 de las 30 muestras), lo cual está en relación con el tipo de materiales que constituyen el subsuelo y que corresponden a productos volcánicos ácidos, donde predominan las plagioclasas sódicas. El intemperismo de las rocas volcánicas ocasiona que el principal anión corresponda a los bicarbonatos; *bicarbonatada-cálcica* ($HCO_3^-$-Ca) que puede ser originada por la interacción con rocas calizas con intercalaciones de lutitas, presentes en la zona norte del área.

El agua del acuífero Valparaíso de acuerdo a la dureza se clasifica en *ligera* (B, C, G, I, J y R), *moderadamente dura* (A, D, P, Q y S), *dura* (E, F, H, K, L, M, T, W, X, Y, Z, A1, B1, C1 y D1) y *muy dura* (N, O, U y V). Donde la ligera y moderadamente dura se encuentra hacia el noroeste de la subcuenca que corresponde a la zona comprendida entre las comunidades Peñitas de San Mateo, San Mateo, San Miguel, Puerta de Cadena, Mimbres y Trojes. Las muy duras se encuentran en el lado sur de la subcuenca correspondiente a la comunidad de Cruces, Peñitas de Oriente y Vicente Escudero, esta alta concentración de sales afecta la capacidad de formación de espuma de detergentes en contacto con agua y representa una serie de problemas de incrustación en equipo industrial y doméstico, además de resultar nociva para consumo humano.

Con relación a los iones principales, se tiene que el ion $Cl^-$ es uno de los iones más solubles en agua, presenta el mayor tiempo de residencia y es uno de los más inertes en solución (Langmuir, 1997). El límite de concentración en agua subterránea es 20 mg/L, dada esta condición observamos que en las muestras adquiridas solo la correspondiente al pozo ¨U¨ está 0.04 mg/L, fuera del rango. En relación a la NOM, todas las concentraciones están dentro del rango permisible en la zona muestreada, ya que los valores obtenidos oscilan entre 0.51 y 20.04 mg/L

(muestra del pozo ¨O¨ y ¨U¨, respectivamente), según se observa en la tabla XVI. En la misma tabla, el ion $SO_4^{2-}$ muestra valores entre 0.57 y 89.87 ppm y con referencia en la NOM, todas las concentraciones permisibles se encuentran muy por debajo del límite. El ion $Na^+$ (tabla XVII) exhibe valores entre 12.30 y 84.90 ppm, con base en la misma tabla todas las concentraciones permisibles se encuentran dentro del rango. Para el caso del ion $Ca^{2+}$, se despliegan valores entre 3.66 y 84.90 ppm, en la NOM no se establece límite o regula este parámetro, pero comparado con el indicado por la Comunidad Europea, el resultado se encuentra dentro del límite. De la misma forma, encontramos los $F^-$ (tabla XVI), los cuales se encuentran disueltos en el agua en cantidades pequeñas, no obstante es considerado como un soluto mayor por Hem (1985), ya que su concentración en el agua potable es determinante en formación de huesos y dientes de los organismos superiores y un exceso puede ocasionar el deterioro de los mismos (WHO, 2004). En el agua del acuífero Valparaíso se obtuvieron altas concentraciones de este anión, lo cual provoca estado de alerta, ya que la norma establece el límite máximo permisible de 1.5 mg/L y 15 de las 30 muestras se encuentran muy por encima de dicho valor, alcanzando máximos de 8.21 mg/L en el caso de la muestra correspondiente al pozo ¨K¨ el mínimo corresponde a la muestra del pozo ¨G¨, presentado una concentración de 0.10 mg/L. El ion Br despliega valores entre 0.01 y 27.98 mg/L presente en las muestras de los pozos ¨W¨ y ¨B1¨, respectivamente. Por último el ion $HCO_3^-$ presenta concentraciones que oscilan entre 30.51 y 427.12 mg/L en las muestras de los pozos ¨G¨ y ¨V¨, respectivamente.

## VI.4 CORRELACIÓN ENTRE EL TIPO Y CALIDAD DEL AGUA CON LA LITOLOGÍA, VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS FAMILIAS DE AGUA.

Estableciendo la correlación que hay entre el tipo de agua y su calidad con respecto a la litología presente en el área, y tomando en cuenta la dirección de flujo subterráneo, se describirá la variación de las 2 familias de agua presentes en la zona de estudio, esto es, respecto a la variación espacial se comentarán los cambios naturales que experimentan las aguas en su composición química. Por

tanto, se generan los siguiente apartados: 1) Correlación: tipo de agua y calidad química-litología, 2) Variación espacial de las familias de agua. A continuación se hace la descripción de cada uno de ellos.

### *VI.4.1 CORRELACIÓN: TIPO DE AGUA Y CALIDAD QUÍMICA-LITOLOGÍA*

Un objetivo común de muchos hidrogeoquímicos es establecer una relación entre litología y composición de las aguas subterráneas. Aunque indudablemente existe una relación, en ella, intervienen otros factores de origen externo, como composición iónica del agua de lluvia, evaporación, precipitación, entre otros. En consecuencia, las correlaciones establecidas por algunos autores han tenido un éxito limitado, y su aplicación está restringida a las zonas en las que fueron determinadas.

En el caso de la subcuenca Valparaíso, el propósito de correlacionar el tipo de agua subterránea y su calidad con la litología del área de estudio, tomando en cuenta la dirección de flujo subterráneo, es determinar si existe alguna correspondencia entre estos parámetros y las condiciones hidrogeológicas, lo cual es uno de los objetivos de este trabajo. Para ello se ha tomado como referencia la información descrita en los apartados anteriores. Es importante aclarar que la litología en el área está referida a la descripción textural (gravas, arenas, arcillas) de los sedimentos de la capa superficial (250 m) en el valle, y esto es debido a que la información litológica de los pozos con que se contó, está basada en este tipo de descripciones.

Para la correlación tipo de agua – litología se utilizó la figura 16, de aquí se determinó que los tipos de agua predominantes en el área del valle de Valparaíso; *bicarbonatadas-sódicas* ($HCO_3^-$ - Na) y *bicarbonatadas-cálcicas* ($HCO_3^-$ - Ca), se encuentran en un ambiente sedimentario dominado por procesos fluviales, siendo en este caso, el Río Valparaíso.

La relación entre litología y tipo de agua en general tiende a ser de la siguiente manera (Custodio y Llamas, 1983): aguas de terrenos sedimentarios de origen marino algo arcillosos son cloruradas-sódicas (Cl – Na); aguas de terrenos

evaporíticos son sulfatadas-cálcicas ($SO_4$ – Ca); aguas de terrenos sedimentarios de origen continental algo arcillosos son bicarbonatadas-cálcicas ($HCO_3^-$ – Ca); aguas de terrenos graníticos son bicarbonatadas-sódicas ($HCO_3^-$ – Na) y bicarbonatadas-cálcicas ($HCO_3^-$ – Ca) (presentes en la zona de estudio) y aguas de terrenos kársticos son bicarbonatadas-cálcicas ($HCO_3^-$ – Ca) y bicarbonatadas-magnésicas ($HCO_3^-$ – Mg). Señalado lo anterior, y como se mencionó al inicio del apartado, no es fácil establecer con detalle la relación entre la litología y las diversas familias de agua, menos aun cuando la información sobre estos parámetros es limitada. No obstante, se puede establecer que, de acuerdo a la información con la que se cuenta, los diferentes tipos de agua en Valparaíso pertenecen al mismo ambiente sedimentario (tipo fluvial). Lo mismo sucede con su calidad química.

En el agua subterránea, la concentración natural de fluoruro depende de aspectos geológicos, químicos y características físicas del acuífero, la porosidad y acidez de las rocas, la temperatura, la acción de otros elementos químicos, y la profundidad de los pozos de extracción. Las concentraciones del fluoruro en el agua subterránea pueden ir de 1 ppm a más de 35 ppm debido al número elevado de variables. Sin embargo en la zona se registran niveles por encima del límite máximo permisible establecido por la NOM, lo que pone en riesgo la salud de los usuarios, ya que, en bajas concentraciones se considera beneficioso pues inhibe las enzimas que producen ácidos en las bacterias de la placa dental, pero se ha comprobado que en altas concentraciones causa fluorosis dental (2 mg/L), lesiones óseas (6 mg/L), alteraciones tiroideas (50 mg/L), retraso en el crecimiento (100 mg/L), alteraciones renales (125 mg/L) y en ocasiones la muerte (dosis letal de NaF 32 a 62 mg/ kg masa corporal) (OMS, 1984), tales efectos nocivos son irreversibles y no hay tratamiento actual. La mejor alternativa para prevenirla es evitar la ingesta excesiva de tal ion.

*VI.4.2 VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS FAMILIAS DE AGUA*

La variación espacial es el cambio natural que experimentan las aguas subterráneas en su composición química. Esto se debe a la interacción agua – roca en los distintos ambientes geológicos por procesos de disolución de minerales y/o de materia orgánica y de la precipitación de nuevos componentes. Cabe señalar que en esta variación se considera la dirección de flujo subterráneo (Norte – Sur en la subcuenca Valparaíso, similar al superficial). Custodio y Llamas (1983) explican que el agua natural tiende a ir aumentando su mineralización hasta el punto de saturación de los diferentes iones. Así, entre los aniones, primero satura el ion $HCO_3^-$, lo que produce la precipitación de la calcita, incluso ya desde la infiltración. Posteriormente el ion $SO_4^{2-}$ que produce yeso; el ion $Cl^-$ no llega a saturar normalmente. Entre los cationes primero satura el ion $Ca^{2+}$, más difícilmente el ion $Mg^{2+}$, mientras que el ion $Na^+$ no llega a saturar normalmente.

De esta forma, la variación normal de un agua en vías de saturación es que sucesivamente vayan dominando los siguientes iones:

Aniones: $HCO_3 \rightarrow SO_4^{2-} \rightarrow Cl^-$

Cationes: $Ca^{2+} \rightarrow Mg^{2+} \rightarrow Na^+$

Esta variación tan sencilla admite excepciones. Se supone que en el agua infiltrada dominan los iones $HCO_3^-$ y $Ca^{2+}$, pero en ciertas condiciones estos iones no están presentes y entonces puede empezarse la secuencia en un lugar más avanzado o sufrir un retroceso para luego tomar la variación normal. Si el medio es fuertemente reductor se puede tener una reducción bacteriana del $SO_4^{2-}$ mucho más rápida que su disolución, en cuyo caso, este ion no llegará a niveles de saturación y será de pocas ppm. Si hay aporte de $CO_2$ durante la reducción de los sulfatos, por cualquier otro mecanismo, el contenido de $HCO_3^-$ y $Ca^{2+}$ puede aumentar de forma inesperada.

Al aumentar la concentración de sales, aumenta la fuerza iónica y por lo tanto la solubilidad de los iones se incrementa ligeramente. Los iones que antes saturaban pueden aumentar ligeramente su concentración. Los cambios de bases pueden

alterar la evolución de los cationes, no solo en la relación entre los elementos alcalinos y alcalinotérreos, sino también entre el $Ca^{2+}$ y $Mg^{2+}$.

Para el caso del acuífero Valparaíso se observa que efectivamente el incremento de tales iones ocurren de manera similar a la dirección del flujo subterráneo (N-S), ya que el agua incrementa su salinidad al aumentar el recorrido y tiempo de residencia en la roca encajonante y esto es evidente en las concentraciones de STD, que son mayores hacia el lado sur de la subcuenca. Aunque no se descarta la posibilidad de que la intensa actividad agrícola y las condiciones climáticas extremas puedan también tener influencia en el origen de las altas concentraciones sobretodo de alcalinotérreos.

# Capítulo VII

## CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados obtenidos en los diferentes datos analizados y estudios previos revisados se concluye:

- La capa impermeable en los pozos analizados está constituido por rocas volcánicas ácidas, las cuales se presentan de 30 a 400 metros de profundidad, dependiendo de la ubicación.
- Las anomalías del campo magnético se correlacionan con la geología, anomalías dipolares bien definidas coinciden con afloramientos de rocas volcánicas básicas en la parte norte del acuífero. En tanto que en la parte central, que corresponde a depósitos sedimentarios donde se aloja el acuífero, los valores de las anomalías son bajos, por lo que se deduce la presencia de una sola capa acuífera.
- La dirección del flujo subterráneo en el área de la subcuenca a nivel acuífero, es de N-S, de manera similar al escurrimiento superficial.
- El nivel piezométrico en los últimos siete años fluctúo entre los 10 y 95 metros de profundidad, el primer dato se ubica en la dirección sur del valle (VA-15), por lo que se relaciona con buena infiltración debido a pendientes poco pronunciadas y propiedades hidráulicas favorables en el medio, mientras que niveles más profundos del nivel estático se encuentran en la zona de intensa actividad agrícola y mayor densidad demográfica.
- Valores altos de Ca y Mg que posiblemente indican la interacción con una estructura geológica que favorece al incremento de las concentraciones en la porción este de la subcuenca.

- Clasificación del agua:
  - ✓ De acuerdo a su contenido iónico: bicarbonatada-sódica ($HCO_3^-$ – Na) segmento sur y bicarbonatada-cálcica ($HCO_3^-$ – Ca) dirección norte y noreste de la subcuenca.
  - ✓ De acuerdo a la dureza: moderadamente dura (6), ligeramente dura (5), dura (15) y muy dura (4).
- Dadas las concentraciones de STD (113 – 396 ppm) y que el agua predominante en la zona es bicarbonatada-sódica y bicarbonatada-cálcica, se determina que el agua que se extrae es de reciente infiltración.
- Algunos de los parámetros (F- y Mg) obtenidos en las muestras se encuentran fuera del límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994, por lo que se requiere un análisis minucioso para identificar los sectores de la población de mayor riesgo y establecer procesos de tratamiento y/o identificar fuentes alternas de abastecimiento.

Finalmente a manera de recomendaciones, sería importante realizar un estudio geofísico más a detalle para identificar y modelar el basamento del acuífero a fin de entender la inconsistencia entre la literatura y los datos analizados. Además de un balance hidrológico en el área, para determinar el comportamiento del acuífero considerando los diferentes aspectos, tales como precipitación, infiltración, escorrentía, evapotranspiración, permeabilidad, conductividad hidráulica, porosidad, entre otros, que intervienen en la recarga del mismo, con el objetivo de establecer y conjeturar la disponibilidad futura de agua en la zona.

## Referencias bibliográficas


- Appelo, C.A.J. y D. Postma. 1993. Geochemistry Groundwater and Pollution. A.A. Balkema Publishers. Brookfield, Vermont. Primera edición. 536 p.

- Astier, Jean Louis. 1975. Geofísica aplicada a la hidrogeología. Paraninfo, Madrid España. 344 p.

- Carmichael, Robert S. 1990. Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals. CRC Press, Inc. 741 p.

- CNA. 2009. Actualización de la determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valparaíso, estado de Zacatecas. México. 20 p.

- Custodio, E. y Llamas, R. 1983. Hidrología subterránea. Tomo I y II. Ed. Omega S.A. España.1157 p.

- Orellana, E.1982. Prospección Geoeléctrica en corriente continúa. Paraninfo. Madrid, España. Segunda edición. 578 p.

- Ghosh D. P. 1971. The Application Of Linear Filter Theory To The Direct Interpretation Of Geoelectrical Resistivity Sounding Measurements. Geophysical Prospecting. 19 (2): 192 – 217 p.

- Hem, J.D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254. Estados Unidos. Tercera edición. 264 p.

- Hitchon, B., E.H. Perkins y W.D. Gunter. 1999. Introduction to Ground Water Geochemistry. Geoscience Publishing Ltd. Alberta, Canadá. Primera edición, 310 p.

- INEGI. 2010. Censo de Población y Vivienda.

- Langmuir, D..1997. Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. Primera edición. 600 p.

- S.S.A. 2000. Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario. México. 7 p.

- Tejada, Bautista E. 2003. Análisis y caracterización hidrogeoquímica en el acuífero del Valle de Mexicali, BC, México. Tesis de maestría CICESE, Ensenada, B.C. México. 82 p.

- Vázquez, González R. 1980. Estudios de Métodos Potenciales con Aplicación a Geohidrología del valle de Maneadero, B.C. Tesis de maestría CICESE, Ensenada, B.C. México. 108 p.

- WHO. 2004. Guidelines for Drinking-Water Quality. World Health Organization. Ginebra, Suiza. Tercera edición. 515 p.

- Zuurdeeg B. W. and M. J. J. Van Der Weiden. 1985. Geochemical aspects of European bottled waters. In Geothermics, Thermal-Mineral Waters and Hydrogeology, Theophrastus Publications S. A., Athens, Greece. 235-264 p.

- http://www.conagua.gob.mx/oclsp/
  Disponibilidad del agua subterránea. Febrero 2011.

- http://www.inegi.org.mx/
  Atlas de acuíferos de México. Noviembre 2010.

- http://irpsrvgis00.utep.edu/repositorywebsite/
  Gravity and Magnetic Dataset Repository. Mayo 2011.

- http://www.usgs.gov/
  Calculation of alkalinity, hydroxide, carbonate, and bicarbonate. Septiembre 2011.

# ANEXOS

## I.1 Mapas

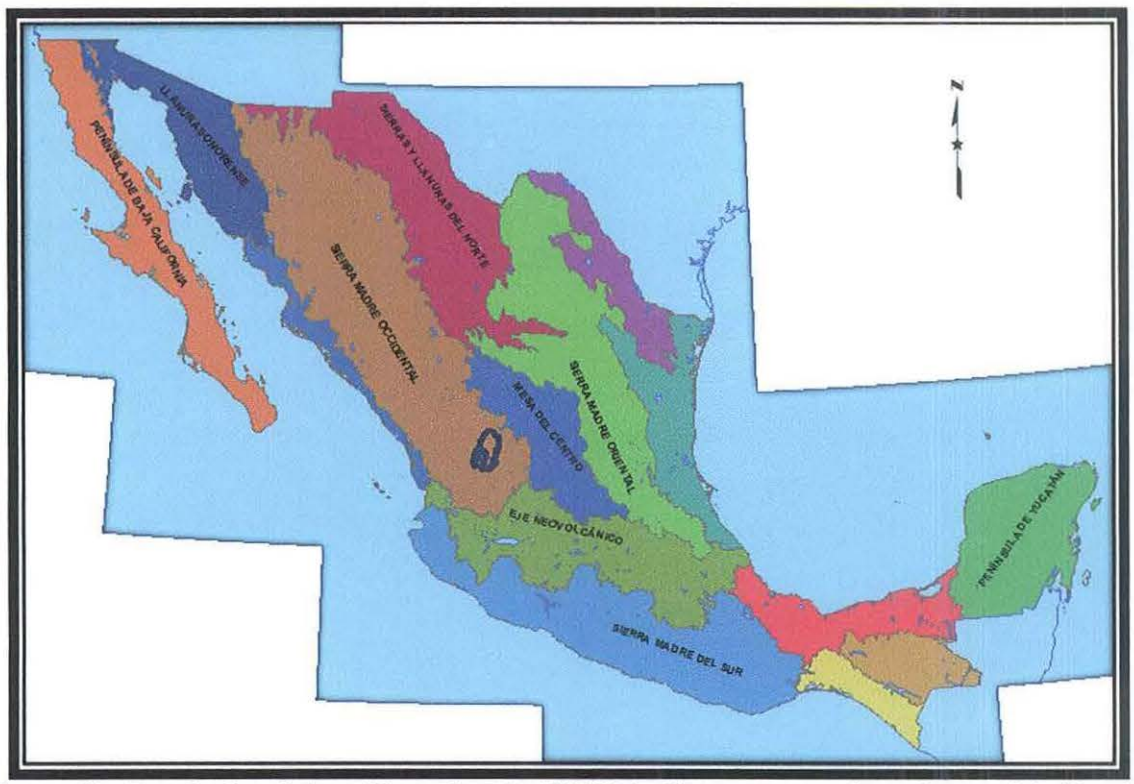


**Figura 21.** ***Provincias fisiográficas fuente INEGI la línea gruesa de color azul indica los límites del acuífero Valparaíso y los polígonos de distintos colores los terrenos tectonoestratigráficos de México.***

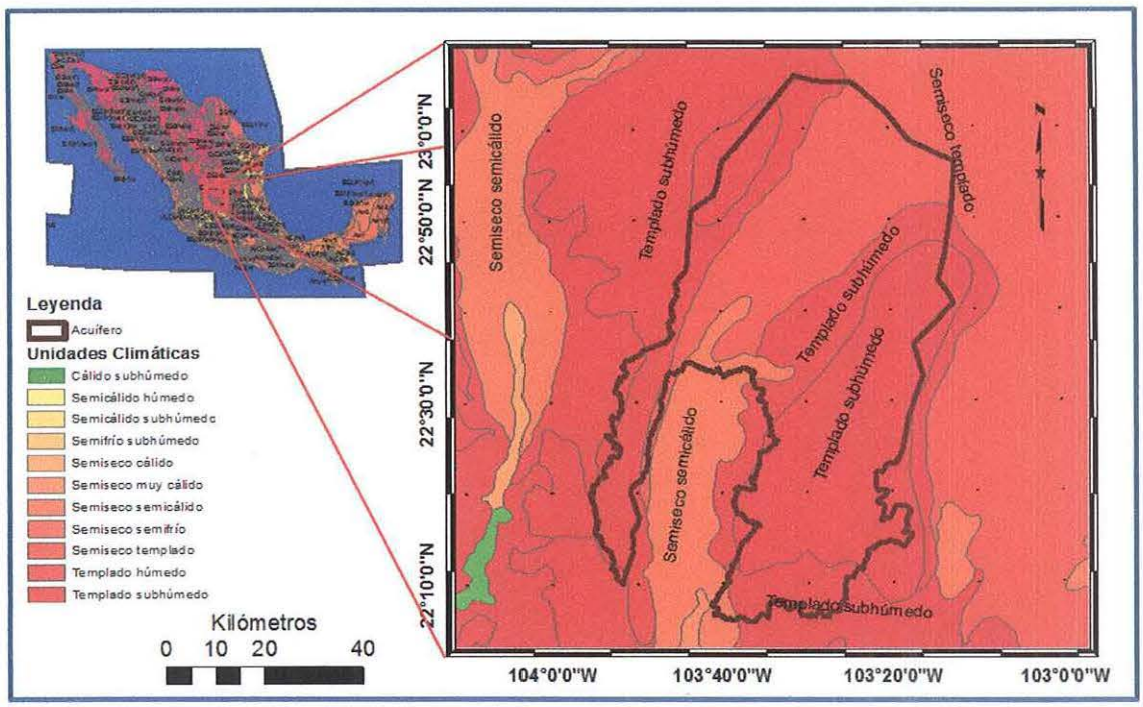


**Figura 22.** ***Unidades Climáticas el contorno en café es el área correspondiente al acuífero Valparaíso, los diferentes colores representan las zonas con diferentes condiciones climáticas según la leyenda del mapa.***

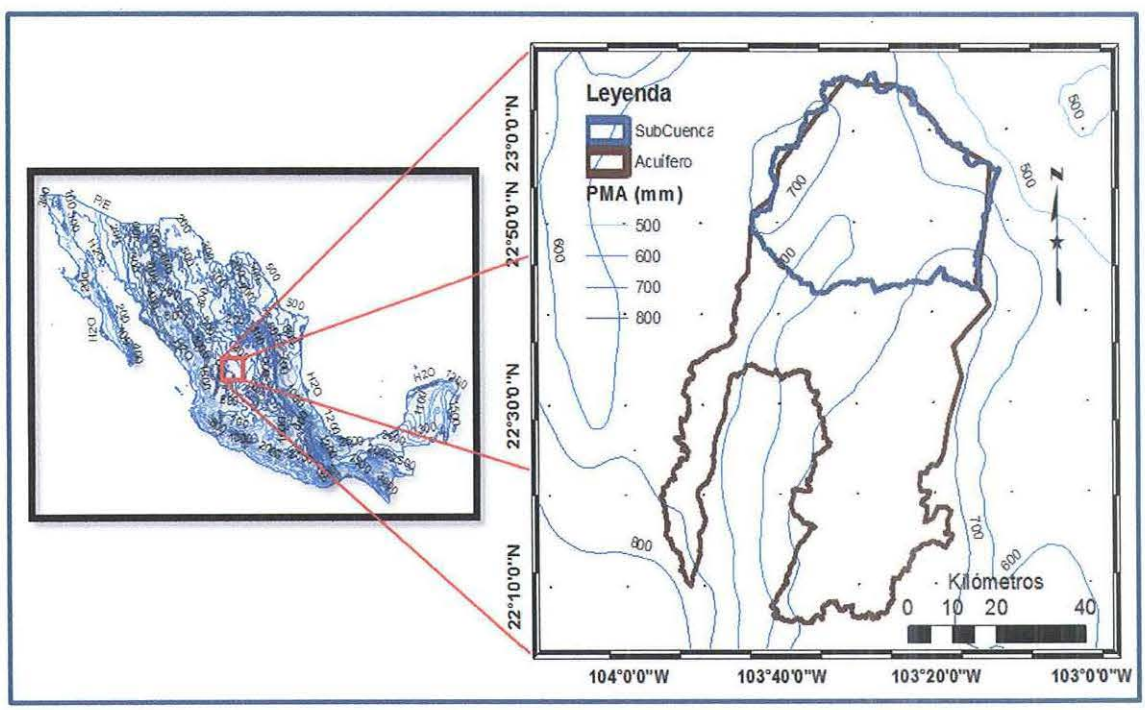


**Figura 23. Precipitación. Mapa de isoyetas en la republica mexicana durante los últimos 10 años (INEGI 2010).**

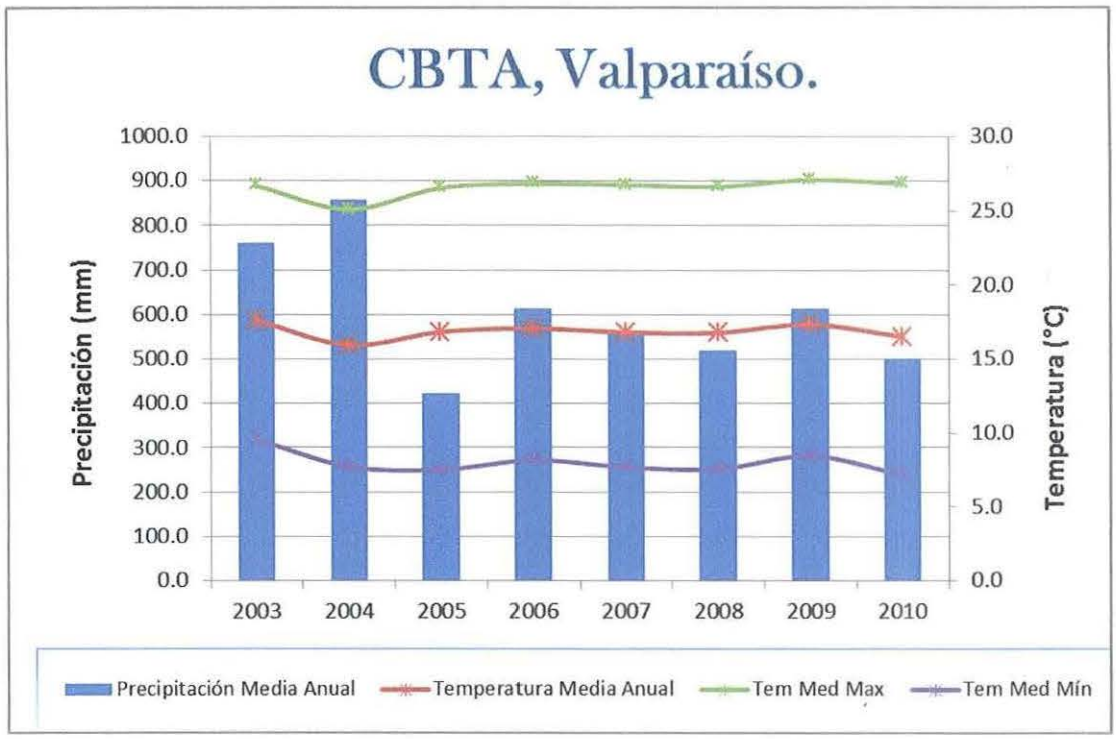


**Figura 24.** ***Gráfica del historial de registros en la estación climatológica del INIFAP ubicada dentro del acuífero Valparaíso, de la cual se obtuvo el historial de registro correspondiente desde el año (2003) de activación de la red de estaciones hasta el año 2010.***

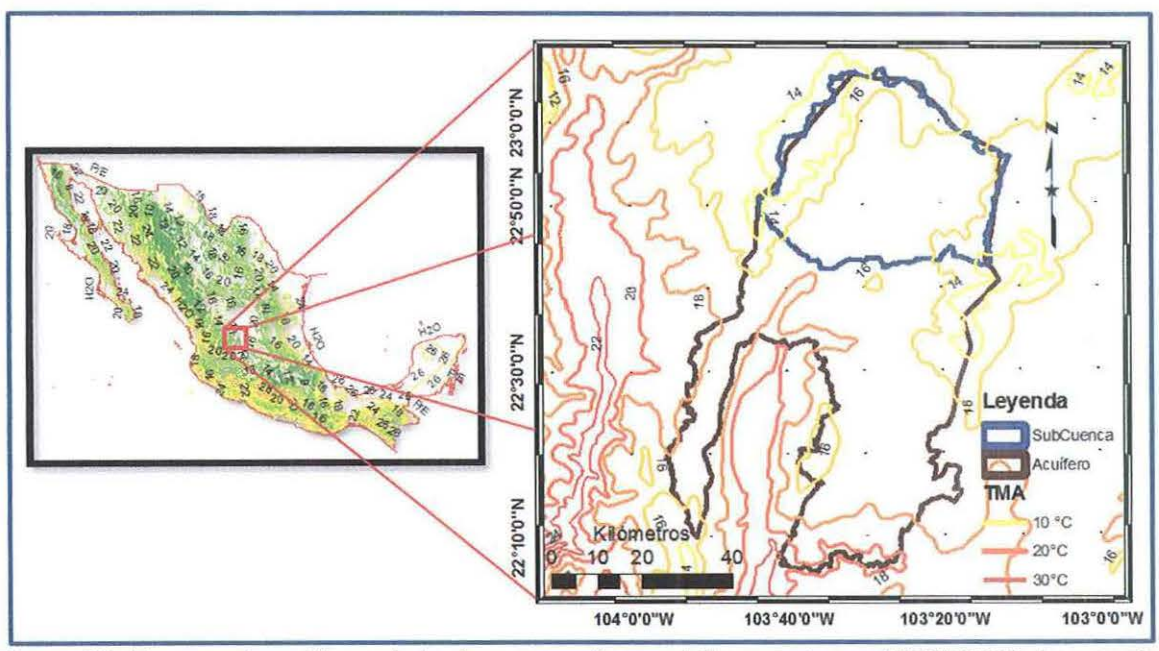


**Figura 25.** ***Temperatura. Mapa de isotermas en la republica mexicana INEGI 2010. Las cuales sirvieron de punto de referencia para las obtenidas de los datos de los últimos 10 años de la estación climatológica de INIFAP.***

## I.2 Diagramas Stiff

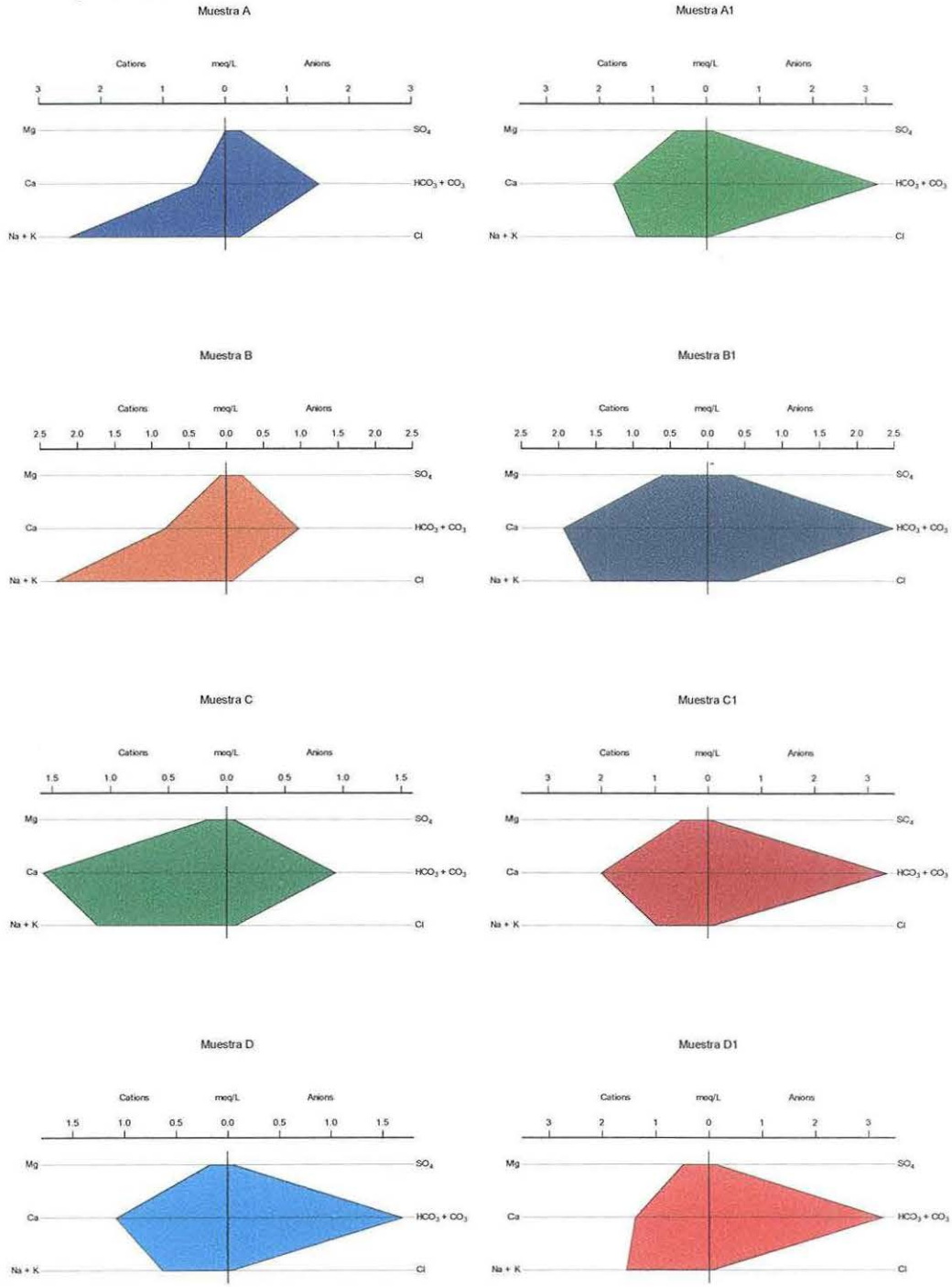


**Figura 26.** ***Diagramas de Stiff de las muestras A, A1, B, B1, C, C1, D y D1.***

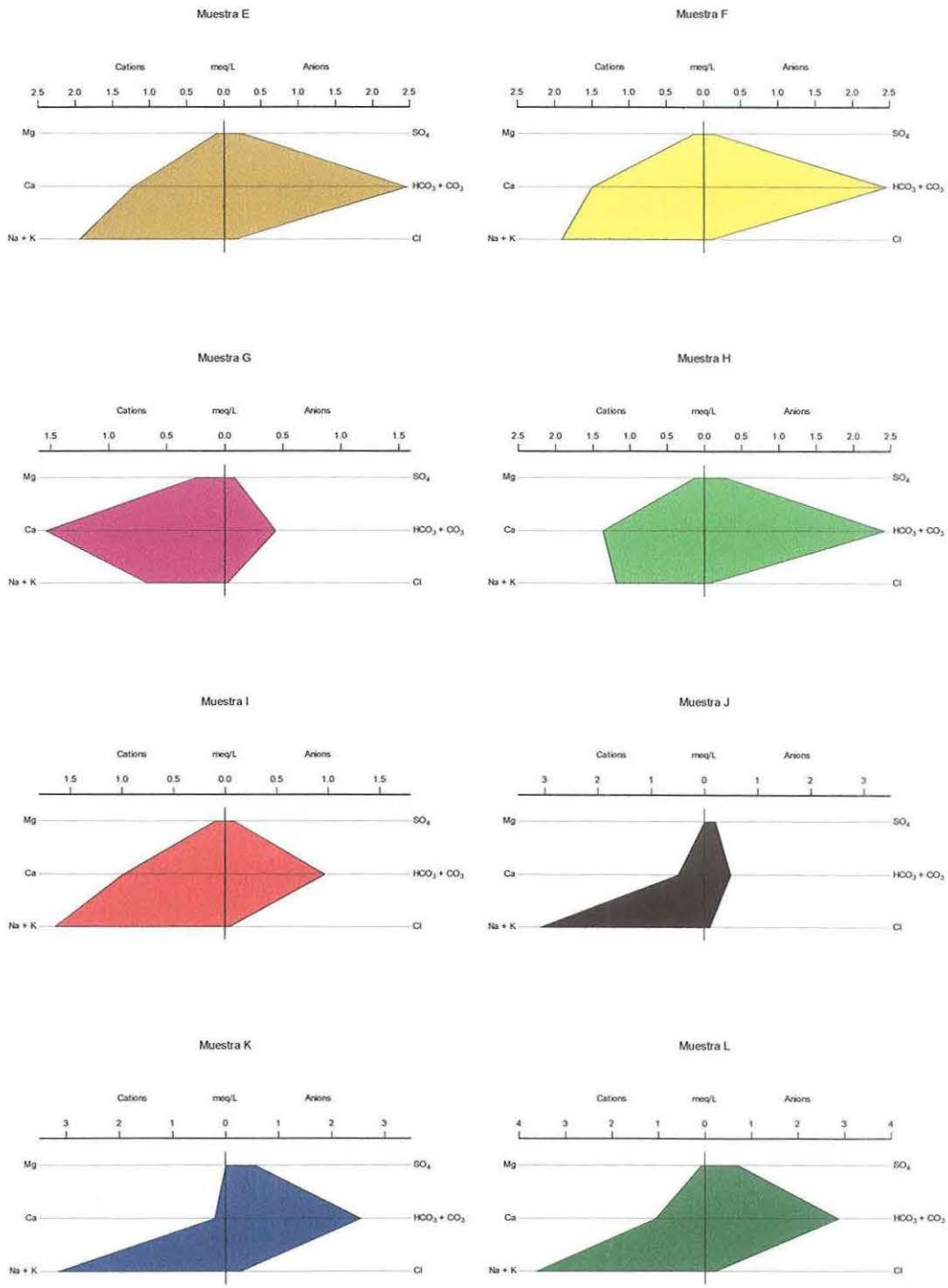


**Figura 26** ***(Continuación). Diagramas de Stiff de las muestras E, F, G, H, Y, J, K y L.***

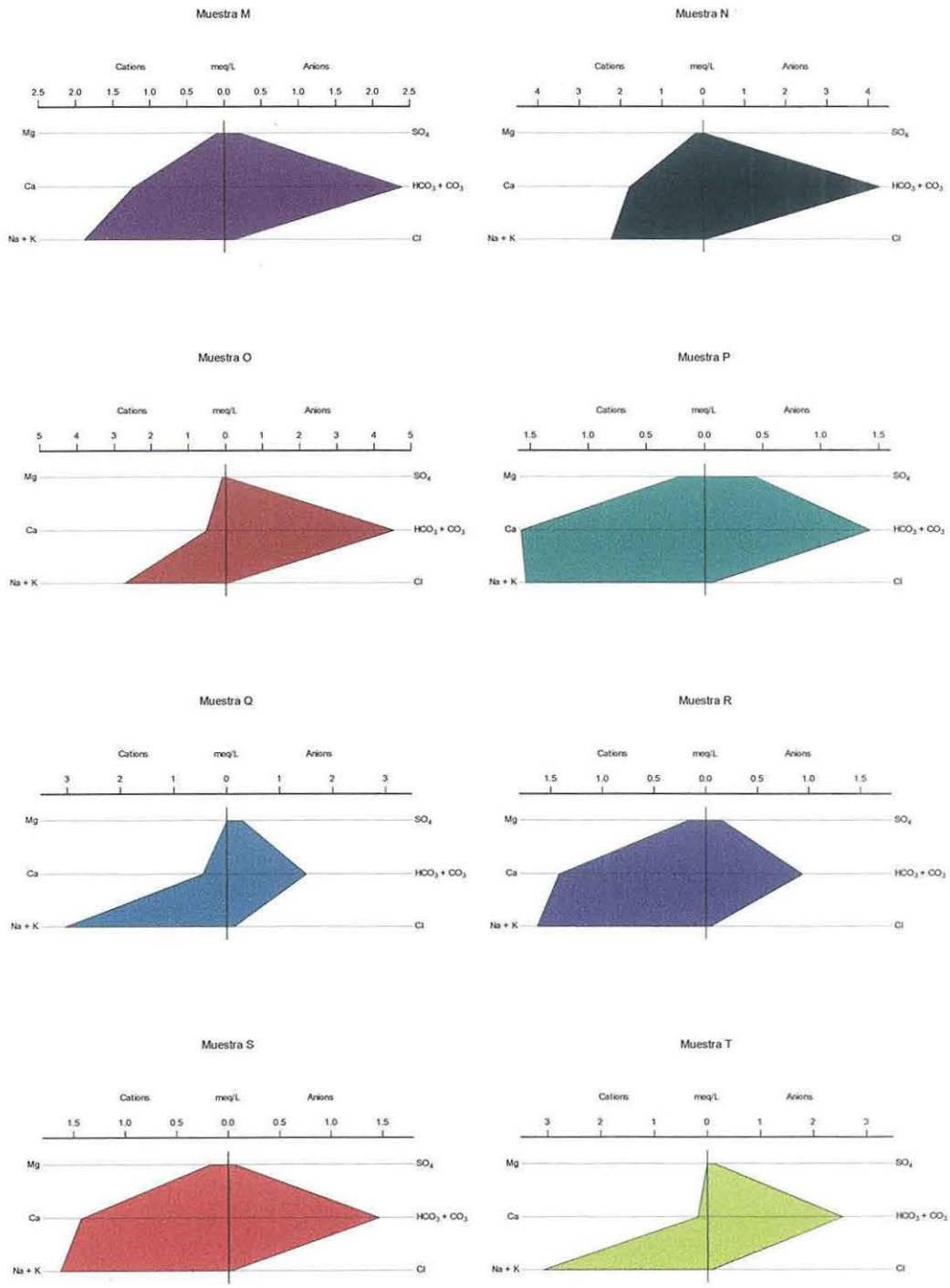


**Figura 26** ***(Continuación). Diagramas de Stiff de las muestras M, N, O, P, Q, R, S y T.***

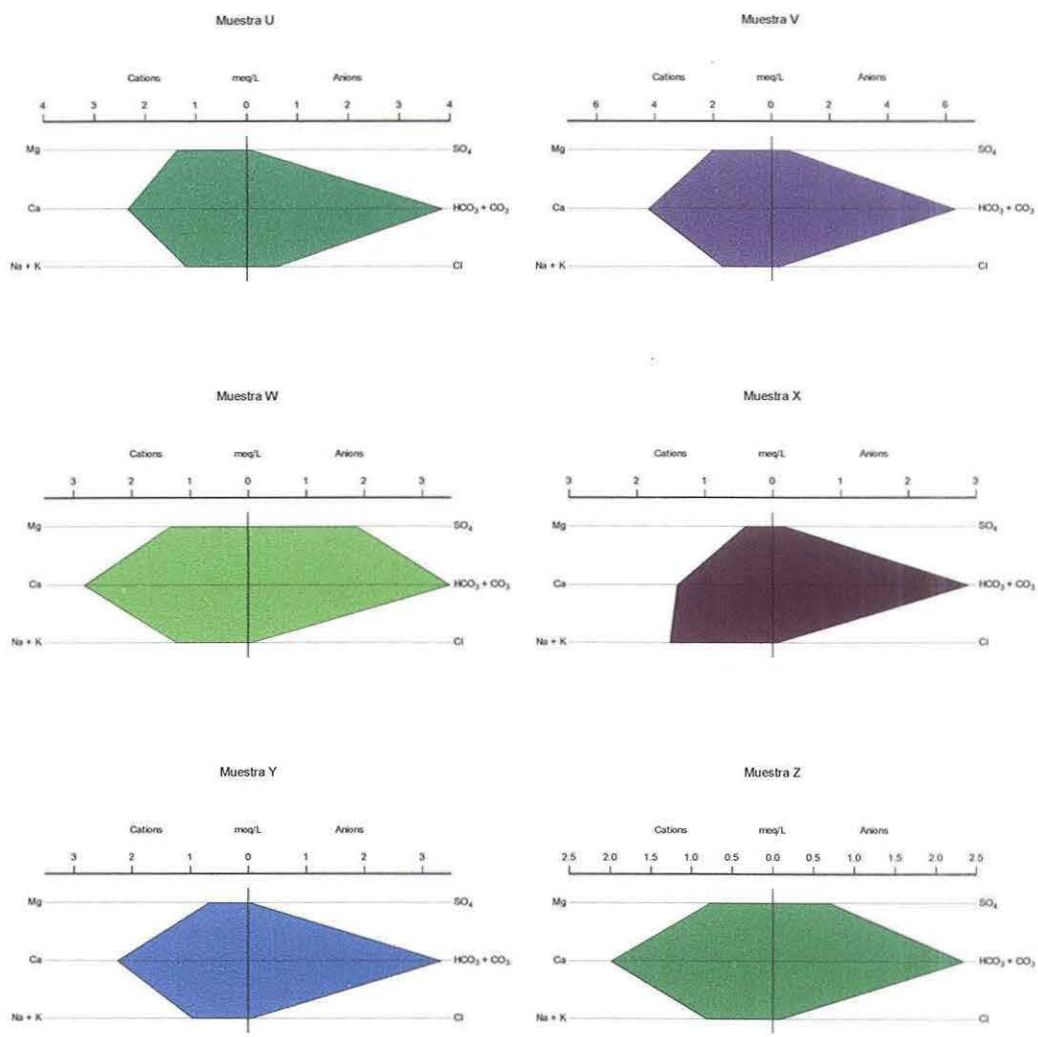


**Figura 26** ***(Continuación). Diagramas de Stiff de las muestras U, V, W, X, Y y Z.***

## I.3 Tablas

**Tabla XIX.** ***Monitoreo de CNA. La tabla contiene los valores obtenidos una vez realizados los cálculos estadísticos correspondientes para adquirir los datos donde de carecía de lectura del nivel estático en el pozo, el cual se restó de la cota del brocal para conseguir el nivel del agua referenciado al nmm.***

| No. POZO PILOTO | COTA DEL BROCAL (msnm) | COORDENADAS UTM | | N.E. 2004 JUN (m) | N.E. 2005 JUN (m) | N.E. 2007 MAYO (m) | N.E. 2008 MAYO (m) | N.E. 2010 DIC. (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Latitud | Longitud | | | | | |
| VA-9 | 2,025 | 2536642 | 656292 | 1,989 | 1,986 | 1,977 | 1,986 | 1,979 |
| VA-11 | 2,064 | 2534464 | 656799 | 2,017 | 2,011 | 2,012 | 2,025 | 2,013 |
| VA-8 | 2,011 | 2534609 | 655999 | 1,972 | 1,986 | 1,964 | 1,973 | 1,966 |
| VA-10 | 2,023 | 2533652 | 655696 | 1,978 | 1,982 | 1,978 | 1,983 | 1,983 |
| VA-7 | 2,002 | 2531960 | 655599 | 1,966 | 1,963 | 1,963 | 1,963 | 1,963 |
| VA-6 | 1,994 | 2529795 | 654510 | 1,966 | 1,971 | 1,959 | 1,969 | 1,968 |
| VA-17 | 1,981 | 2529448 | 653601 | 1,957 | 1,960 | 1,941 | 1,958 | 1,955 |
| VA-5 | 1,951 | 2527288 | 652939 | 1,947 | 1,942 | 1,941 | 1,940 | 1,941 |
| VA-22 | 2,016 | 2529660 | 650264 | 2,010 | 2,003 | 1,988 | 1,960 | 2,000 |
| VA-4 | 1,919 | 2525035 | 652220 | 1,911 | 1,898 | 1,866 | 1,908 | 1,909 |
| VA-20 | 1,946 | 2524958 | 650653 | 1,938 | 1,912 | 1,896 | 1,933 | 1,934 |
| VA-3 | 1,910 | 2523597 | 649925 | 1,903 | 1,901 | 1,855 | 1,900 | 1,902 |
| VA-2 | 1,899 | 2522793 | 649448 | 1,890 | 1,891 | 1,841 | 1,891 | 1,877 |
| VA-1 | 1,885 | 2520450 | 648929 | 1,876 | 1,827 | 1,865 | 1,852 | 1,873 |
| VA-16 | 1,942 | 2521229 | 646840 | 1,864 | 1,863 | 1,862 | 1,865 | 1,861 |
| VA-21 | 2,025 | 2523642 | 645020 | 1,966 | 1,964 | 1,928 | 1,930 | 1,977 |
| VA-14 | 1,877 | 2519514 | 647541 | 1,822 | 1,816 | 1,831 | 1,809 | 1,817 |
| VA-15 | 1,853 | 2514204 | 645509 | 1,844 | 1,845 | 1,844 | 1,844 | 1,844 |
| VA-18 | 1,848 | 2510847 | 645142 | 1,821 | 1,838 | 1,839 | 1,818 | 1,821 |
| VA-19 | 1,843 | 2511216 | 645053 | 1,818 | 1,835 | 1,835 | 1,815 | 1,817 |
| VA-13 | 1,994 | 2527491 | 651711 | 1,981 | 1,928 | 1,985 | 1,931 | 1,974 |
| VA-12 | 2,002 | 2533299 | 654246 | 1,962 | 1,956 | 1,986 | 1,907 | 1,962 |