



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**CÁLCULO DEL ÍNDICE DE POBREZA DEL AGUA
EN EL ACUÍFERO DE SANTO DOMINGO, S. L. P.**

Tesis que presenta
Zenón Rizo Fernández

Para obtener el grado de
Maestro en Geociencias Aplicadas

Director de la Tesis:
Dr. José Alfredo Ramos Leal

San Luis Potosí, S.L.P., Febrero de 2015



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Cálculo del Índice de Pobreza del Agua en el Acuífero de Santo Domingo, S.L.P.**" presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Zenón Rizo Fernández** y aprobada el **cuatro de enero del dos mil quince** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Alfredo Ramos Leal
Director de la tesis

Dr. Vsevolod Yutsis
Miembro del Comité Tutorial

Dr. Germán Santacruz de León
Miembro del Comité Tutorial

Dra. Briseida López Alvarez
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Alfredo Ramos Leal.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (279165) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 003 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 4 días del mes de febrero del año 2015, se reunió a las 16:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. Vsevolod Yutxis	Presidente	IPICYT
Dr. Germán Santacruz de León	Secretario	COLSAN
Dra. Briseida López Alvarez	Sinodal externo	COLSAN
Dr. José Alfredo Ramos Leal	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

Zenón Rizo Fernández

sobre la Tesis intitulada:

Cálculo del Índice de Pobreza del Agua en el Acuífero de Santo Domingo, S.L.P.

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Alfredo Ramos Leal

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 17:20 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 4 días del mes de febrero de 2015.

Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado

Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



A mis padres:

M. de Jesús Fernández Juárez y José Víctor Manuel Rizo Rodríguez, por su apoyo incondicional, consejos, comprensión y sacrificio. Gracias a ustedes y a su ejemplo, soy la persona y el hombre que ha llegado a estas instancias de la vida.

A mi hermano:

Guadalupe de Jesús Rizo Fernández, por ser uno de los ángeles terrenales que me acompañara por el resto de mi vida y ser un gran hermano, así como un gran amigo.

A mis familiares y amigos:

Quienes han estado al pendiente, en su apoyo y consejo, durante esta etapa de mi vida.

A mis amigos(as) y camaradas de la División de Geociencias Aplicadas y otras divisiones:

*Con quienes he vivido y convivido en mi estancia en San Luis Potosí, y que la hicieron mucho más agradable, placentera y enriquecedora; a nivel personal como profesional. **GRACIAS POR TODO.***

Agradecimientos

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), por el apoyo brindado durante la maestría.

Al Centro Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada.

A la División de Geociencias Aplicadas, por el apoyo brindado y por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A todas las doctoras y doctores de la división de Geociencias que me impartieron clase y que, además, dejaron una gran enseñanza en mí.

Al Dr. José Alfredo Ramos Leal, por ser guía en este objetivo. Además de compartir sus experiencias, regaños, conocimientos, enseñanzas y por siempre tener la disponibilidad de tender la mano a los demás.

A la Dra. Briseida López Álvarez y Janete Moran Ramírez, quienes también forma parte importante del desarrollo de este trabajo al compartir sus experiencias, conocimientos y enseñanzas.

A Simón Eduardo Carranco Lozada, Sonia Torres Rivera, María Elizabeth Hernández Zavala, David Ernesto Torres Gaytán, Juan Manuel González Piña, Jesús Galván Pineda, Alejandro Cruz Rosas Palafox, María de los Ángeles Martínez Ramírez, María Rosarí Cruz Mateo, Claudia Rigel Peredo Mancilla, Fred Yoan Pérez Corona, Jaime Francisco Segovia Zamorano, Ángeles Juárez Ramírez, que con su ayuda, consejo han enriquecido el proyecto al aportar sus conocimientos y disposición. Así como compartir momentos muy agradables dentro y fuera del aula, al formar un equipo deportivo, organizar una fiesta, etc.

A Gabriela Pérez Assaf, asistente y mi amiga del área de Geociencias, por siempre tener la disposición de ayudar y brindar una sonrisa.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	x
Anexos	xii
Resumen	xiii
Abstract	xiv
1.- Generalidades	1
1.1.-Introducción	1
1.2.- Objetivo principal	3
1.3.- Objetivos específicos	3
1.4.- Justificación	4
1.5.- Hipótesis	5
1.6.- Área de estudio	5
1.7.- Clima y vegetación	7
1.8.- Hidrografía	8
2.- Metodología	10
2.1.- Protocolo del Índice de Pobreza del Agua (IPA)	10
2.1.1.- Componente de Recurso	11
2.1.1.1 Piezometría	11
2.1.1.2 Exploración geofísica	12
2.1.2.- Componente de Calidad	15
2.1.2.1 Campaña de muestreo de agua subterránea	15
2.1.3.- Componente de Uso	20
2.1.4.- Componente de Acceso	21
2.1.5.- Componente de Capacidad	21
2.1.6.- Componente de Ambiente	22
3.- Marco hidrogeológico	26
3.1.- Geología	26
3.2.- Hidrogeología	39
4.- Resultados y discusión	42
4.1 - Componente Recurso	42
4.1.1.- Piezometría	42
4.1.2.- Exploración geofísica	44
4.1.2.1.- Sección 1 (SEV16-SEV1)	44
4.1.2.2.- Sección 2 (SEV17-SEV2)	47
4.1.2.3.- Sección 3 (SEV18-SEV3)	50
4.2.- Componente Calidad	54

4.2.1.- Hidrogeoquímica	54
4.2.2.- Calidad del agua para uso humano y agrícola	59
4.3.- Componente Uso	64
4.4.- Componente Acceso	65
4.5.- Componente Capacidad	66
4.6.- Componente Ambiente	68
4.7.- Índice de Pobreza del Agua para el Acuífero de Santo Domingo	72
5. Conclusiones	75
6. Referencias	77
7 Anexos	80

Lista de tablas

Tabla 2.1.- Componentes del Índice de Pobreza del Agua (IPA).	10
Tabla 2.2.- Clasificación del Índice de Calidad del Agua (ICA).	18
Tabla 2.3.- Clasificación de la conductividad eléctrica.	19
Tabla 2.4.- Clasificación de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS).	19
Tabla 4.1.- Balance hidrológico en el acuífero el Barril.	53
Tabla 4.2.- Valores obtenidos para cada componente del IPA para el acuífero de Santo Domingo, S.L.P.	72

Lista de figuras

Figura 1.1- Mapa de localización del área de estudio, Mpio. de Santo Domingo, SLP.	6
Figura 1.2.- Tipo de vegetación en el área de estudio, Mpio. de Santo Domingo, S.L.P.	8
Figura 1.3.- Hidrografía del área de estudio. Mpio. de Santo Domingo. S.L.P.	9
Figura 2.1- Esquema del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).	12
Figura 2.2- Carretes, electrodos, receptor y transmisor SYSCAL KID.	13
Figura 2.3.- Campaña de sondeos eléctricos verticales en el área de estudio. Mpio. de Santo Domingo. S.L.P.	14
Figura 2.4.- Campaña de muestreo de agua subterránea en el área de estudio. Municipio de Santo Domingo. S.L.P.	16
Figura 2.5.- Diagrama conceptual de la relación triangular entre LST-NDVI para determinar el Índice de Humedad del Suelo.	24
Figura 2.6.- Diagrama del Índice de Pobreza del Agua (IPA).	25
Figura 3.1.- Mapa geológico en el Municipio de Santo Domingo, S.L.P. Tomado del SGM.	27
Figura 3.2.- Columna estratigráfica en la zona de estudio, Municipio de Santo Domingo, S.L.P. Tomado del SGM.	38
Figura 4.1.- Cota del nivel estático en norias y pozos en el Municipio de Santo Domingo, S.L.P. Tomado del INEGI.	42
Figura 4.2.- Cota del nivel piezométrico en norias y pozos durante la campaña de muestreo de agua subterránea en el Municipio de Santo Domingo, S.L.P.	43
Figura 4.3.- Sección 1 (SEV16-SEV1); a) Pseudosección de resistividad aparente, b) Sección geoelectrica, c) Sección geológica.	46
Figura 4.4.- Sección 2 (SEV17-SEV2); a) Pseudosección de resistividad aparente, b) Sección geoelectrica, c) Sección geológica.	49
Figura 4.5.- Sección 3 (SEV18-SEV3); a) Pseudosección de resistividad aparente, b) Sección geoelectrica, c) Sección geológica.	52
Figura 4.6.- Diagrama de Piper. Municipio de Santo Domingo, S.L.P.	55
Figura 4.7.- Diagramas de Stiff. Municipio de Santo Domingo, S.L.P.	57
Figura 4.8.- Diagramas de Schoeller. Municipio de Santo Domingo, S.L.P.	58
Figura 4.9 Concentración de Arsénico en las muestras del área de estudio con respecto a la NOM-127-SSA1-1994.	60
Figura 4.10 Concentración de Flúor en las muestras del área de estudio. con respecto a la NOM-127-SSA1-1994.	60
Figura 4.11 Concentración de Nitratos en las muestras del área de estudio con respecto a la NOM-127-SSA1-1994.	61
Figura 4.12 Concentración de Sólidos totales disueltos en las muestras del área de estudio con respecto a la NOM-127-SSA1-1994.	61
Figura 4.13.- Relación de Salinidad y Sodicidad en muestras de agua del Municipio de Santo Domingo, S.L.P.	63

Figura 4.14 Índice de Humedad del suelo (SWI) en el mes de Abril del 2001. Mpio. de Santo Domingo.	69
Figura 4.15 Índice de Humedad del suelo (SWI) en el mes de Abril del 2011. Mpio. de Santo Domingo.	69
Figura 4.16 Índice de Humedad del suelo (SWI) en el mes de Octubre del 2001. Mpio. de Santo Domingo.	70
Figura 4.17 Índice de Humedad del suelo (SWI) en el mes de Octubre del 2011. Mpio. de Santo Domingo.	71
Figura 4.18.- Hexágono del IPA normalizado para para el acuífero de Santo Domingo, S.L.P.	73
Figura 4.19. Hexágono del IPA normalizado para acuífero de Santo Domingo (VStoDgo) y Valle de San Luis Potosí (VSLP).	74

Anexos (opcional)

Sondeo eléctrico vertical # 1	81
Sondeo eléctrico vertical # 2	82
Sondeo eléctrico vertical # 3	83
Sondeo eléctrico vertical # 4	84
Sondeo eléctrico vertical # 5	85
Sondeo eléctrico vertical # 6	86
Sondeo eléctrico vertical # 7	87
Sondeo eléctrico vertical # 8	88
Sondeo eléctrico vertical # 9	89
Sondeo eléctrico vertical # 10	90
Sondeo eléctrico vertical # 11	91
Sondeo eléctrico vertical # 12	92
Sondeo eléctrico vertical # 13	93
Sondeo eléctrico vertical # 14	94
Sondeo eléctrico vertical # 16	95
Sondeo eléctrico vertical # 17	96
Sondeo eléctrico vertical # 18	97

Resumen

“CÁLCULO DEL ÍNDICE DE POBREZA DEL AGUA EN EL ACUÍFERO DE SANTO DOMINGO, S. L. P.”

La compleja interrelación que existe entre el hombre y el agua es muy estrecha pues, este último, brinda beneficios de bienestar, producción y desarrollo. Lo que conlleva a un análisis de evaluación, de mayor detalle, en los factores que intervienen en ello, como: agua, clima, suelo, roca y el ser humano.

Por lo que en este estudio, se aplicó una herramienta multidisciplinaria que refleja el bienestar de dicha relación. Dicha metodología se denomina Índice de Pobreza del Agua (IPA) permite evaluar la pobreza de agua tomando en cuenta tanto factores físicos como socioeconómicos relacionados con la disponibilidad de agua. Los factores físicos que se analizaron fueron el recurso hídrico, la calidad del mismo y el ambiente de la zona; que se refieren a la regulación de la presencia y condición del agua. Por otro lado, los factores socioeconómicos se relacionan a las condiciones en que se encuentra la población respecto al aprovechamiento del agua, definiéndose como: acceso, capacidad y uso.

Esta herramienta se aplicó para una zona rural localizada en el Altiplano Potosino al noroeste del Estado de San Luis Potosí, dentro del Municipio de Santo Domingo. Esta zona se caracteriza por presentar condiciones climáticas extremas; así como bajos niveles socioeconómicos de la población. Por lo que nuestro objetivo es estimar el IPA de una región semiárida y vincular el bienestar de los hogares con la disponibilidad de agua.

Como resultado, el IPA para el acuífero de Santo Domingo se obtuvo un valor muy bajo de 0.28, lo cual refleja las condiciones adversas en la mayoría de los componentes donde el recurso se localiza; así como las condiciones ambientales y socioeconómicas vulnerables que muestra una región rural de San Luis Potosí.

PALABRAS CLAVE: vulnerabilidad, aprovechamiento, semidesértico, área rural, economía, agricultura, agua potable.

Abstract

“EVALUATION OF THE WATER POVERTY INDEX IN THE AQUIFER OF SANTO DOMINGO, S. L. P.”

The complex interplay between the humanity and water is very close since the water provides welfare benefits, production and development. Therefore, the investigation of this interplay needs an exhaustive evaluation analysis on the factors involve such as water, climate, soil, rock and humanity. In this investigation, Water Poverty Index (API) method is used. API is a multidisciplinary tool that allowing to evaluate the water shortage taking into account physical factor and socioeconomic related with the water availability. The physical factor such as water resource, water quality, and environment are analyzed which are indicators of the presence and water regulation condition. Furthermore, population socioeconomic level is closely related with the access, capacity, and water usage. The present study is performed on a rural area of the Altiplano Potosino, located in the northwest of the State of San Luis Potosi, in the municipality of Santo Domingo. This rural area is characterized by extreme climatic conditions with a population of low socioeconomic level. The main purpose of the present investigation is to determine IPA and correlated with quality life of the population and water availability. Our results reveal that the IPA value for the aquifer of Santo Domingo is 0.28 which is a very low value compared with standard IPA values, thus demonstrating that the components of IPA are strong related with the environment resource.

KEY WORDS: vulnerability, exploitation, semi-desert, rural area, economy, agriculture, potable water.

1. Generalidades

1.1 Introducción

El agua, como uno de los elementos naturales, es parte fundamental de la vida en el planeta; aunque, era considerada como un recurso renovable hasta hace algunos años. Según datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (2014), sólo una parte (0.6251%) del 2.8% del agua dulce a nivel mundial puede ser utilizada en actividades del hombre. Este porcentaje se acota aún más por efecto de la interacción de factores antropogénicos (deforestación, pérdida de biodiversidad, el cambio de uso de suelo, el desarrollo urbano no planificado, contaminación, deficiente gestión hidráulica e infraestructura, etc.) y naturales (litología, erosión, condiciones climáticas, topografía, tipo de vegetación, tipo de suelo, etc.), que con el paso de los años, alteran la dinámica del ciclo hidrológico y, que a la vez, genera graves estragos en la dinámica de los ecosistemas de la Tierra y donde el hombre forma parte de ella.

Específicamente, en el caso de la contaminación del agua, por actividad antropogénica ó de origen natural, representa un punto importante debido a que deteriora la calidad del recurso y, por ende, limita el tipo de aprovechamiento al que puede ser destinado, por ejemplo: público-urbano, doméstico, agrícola, pecuario e industrial, en el peor de los casos, ningún aprovechamiento. Por otro lado, el crecimiento demográfico y la diversidad de los niveles socioeconómicos son factores que influyen indirectamente en la escasez de agua debido a que requieren gran cantidad y alta calidad del recurso que en muchas ocasiones, no se logra debido a la falta de mantenimiento y tecnología empleada para este fin (IMTA, 2009). Aunado a esto, las herramientas de gestión en el manejo hidráulico son, en gran parte, inadecuadas ya que generan problemas en el abastecimiento y distribución del agua y que muchos de los casos impactan de manera importante en la población (López-Álvarez et al. 2013).

Por otra parte, las características naturales del medio como: litología, condiciones climáticas, topografía, tipo de clima, tipo de vegetación, etc., condicionan la disponibilidad del agua, pues las interacciones dadas entre la geosfera, biosfera y

atmósfera permitan que los procesos de regulación definan un ordenado flujo de materia y energía (Owen, 2000).

En general, si consideramos todas características anteriores como un conjunto, resulta un sistema viviente con dinamismo constante, movido por fuerzas naturales, antropogénicas y estabilizado a distintas tensiones del medio ambiente. Sin embargo, todo sistema viviente presenta un grado de equilibrio o viabilidad a lo largo de la expectativa de vida de cada sistema y, que dicha estabilidad, obedece a la capacidad de las poblaciones, comunidades, ecosistemas y sistemas humanos económicos, políticos y sociales para adaptarse a las nuevas condiciones (Miller, 2002).

En vista de que la conjunción de los factores antropogénicos y naturales determinan las características específicas de un medio, se supondría que al ser evaluados o valorados se permitirá obtener un grado de deficiencia o eficiencia en el medio y que sean mostrados de forma individual. Por tal motivo, la aplicación de una herramienta que permita abarcar de manera cuantitativa, cualitativa, gráfica, individual y global, a cada uno de los factores que intervienen en el medio, manifestará su clasificación como escasez y/o abundancia en el entorno.

Expuesto lo anterior, el presente trabajo se realizó en la porción norte del acuífero llamado El Barril, que pertenece al municipio de Santo Domingo dentro del Estado de San Luis Potosí y que forma parte del Altiplano Potosino. En esta zona se empleó una herramienta capaz de englobar y evaluar las características naturales del medio y socio-económicas de la población dando como resultado un grado de deficiencia y/o mejoría en la disponibilidad del agua, denominada Índice de Pobreza del Agua (IPA). Esta herramienta se define como una metodología holística, diseñada para contribuir a un efectivo manejo del agua (Sullivan et al. 2003). Se conforma de 5 componentes: recurso, acceso, capacidad, uso y ambiente; sin embargo, López et al. (2013), se añaden un componente extra definido como calidad. Dichos componentes definen las características naturales del medio y socioeconómicas de la población a analizar. Más adelante, se describirán con mayor detalle cada uno de estos componentes se describirán a

mayor detalle. Por lo tanto, el IPA contribuye a una asignación más equitativa de los recursos hídricos, teniendo en cuenta los problemas del agua desde las perspectivas tanto del suministro de agua, y la demanda de la misma, con el fin de identificar quién necesita agua, cuándo y dónde. Además, se establece una comprensión más completa de los factores que influyen en la relación entre los ecosistemas, el agua y la pobreza, y la naturaleza dependiente del tiempo de esta relación, por lo que permitirá a los organismos y autoridades correspondientes a tomar decisiones mejor informadas acerca de cómo los recursos financieros se pueden utilizar para dar mayor eficacia y equidad frente a problemas de asignación de agua (Sullivan C. A., 2001).

Para evaluar y entender las condiciones de los componentes Recurso y su Calidad, se realizó una campaña de muestreo de agua y técnicas de geofísica como estudios de apoyo para puntualizar, con mayor énfasis, algunos de los componentes naturales que emplea esta herramienta.

1.2 Objetivo principal

Determinar y cuantificar las limitaciones de los factores naturales y socioeconómicos que afectan el acceso del agua a una población del Altiplano Potosino ubicada en la porción norte del acuífero El Barril, en el municipio de Santo Domingo, mediante el Índice de Pobreza del Agua.

1.3 Objetivos específicos

- Evaluar el componente de Recurso Hídrico que conforma el IPA.
- Evaluar el componente de Uso del Recurso
- Evaluar el componente de Acceso al Agua

- Evaluar el componente de Capacidad que conforma el IPA.
- Evaluar el componente de Calidad del Agua apoyado con estudios de Hidrogeoquímica.
- Evaluar el componente de Ambiente que conforma el IPA.
- Determinar las dimensiones, conexión hidráulica, continuidad y disposición de la litología mediante métodos indirectos (Geofísica).

1.4 Justificación

El 73.7% del territorio mexicano está constituido por zonas áridas y semiáridas (SAGARPA, 2013), en dichas zonas, el agua subterránea es la fuente de mayor abastecimiento en las actividades económicas que se desarrollan. Aunado, a estas condiciones climáticas extremas, por lo regular las poblaciones que se encuentran alejadas de los principales centros poblacionales e industriales presentan mayor marginación a causa de la desigualdad en la distribución del recurso económico que destina el gobierno estatal y federal.

Dada la complejidad que presentan las interacciones entre el hombre y la naturaleza es relevante evaluarlas de manera individual como colectiva. Para ello, en este estudio se aplica una metodología que evalúa los factores físicos y socio-económicos del área de estudio con el fin de determinar la distribución y explotación del recurso y, así, mostrar cual componente del Índice de Pobreza del Agua (IPA) se necesita emplear mayor atención para su desarrollo y beneficio hacia la población. Este análisis se establece como una medida interdisciplinaria que vincula el bienestar de los hogares con la disponibilidad del agua, indica el grado de los efectos de la escasez de agua en las poblaciones humanas, permite establecer nexos entre pobreza, marginación social, integridad ambiental y salud. Esto permite dirigir políticas públicas a grupos de interés e identificar dónde existen problemas y proponer medidas apropiadas para encarar sus causas. Este

índice demuestra que no es la cantidad de recursos disponibles la que determina los niveles de pobreza en un país, sino la eficacia en el uso de estos recursos (López et al., 2013).

1.5 Hipótesis

El área de estudio se ubica en una zona semiárida, la cual presentan condiciones climáticas extremas que disminuyen la intensidad de la precipitación y por ende la recarga al acuífero, por lo cual, el acceso a este recurso es limitado.

1.6 Área de estudio

El área de estudio se localiza en la porción noroeste del Estado de San Luis Potosí dentro del Municipio de Santo Domingo, cubre una superficie de 574 Km². Las coordenadas UTM que cubren esta zona son 193343.95 a 225917.46 para el eje X y de 2572738.50 a 2590476.01 para el eje Y, como se muestra en la Figura 1.1.

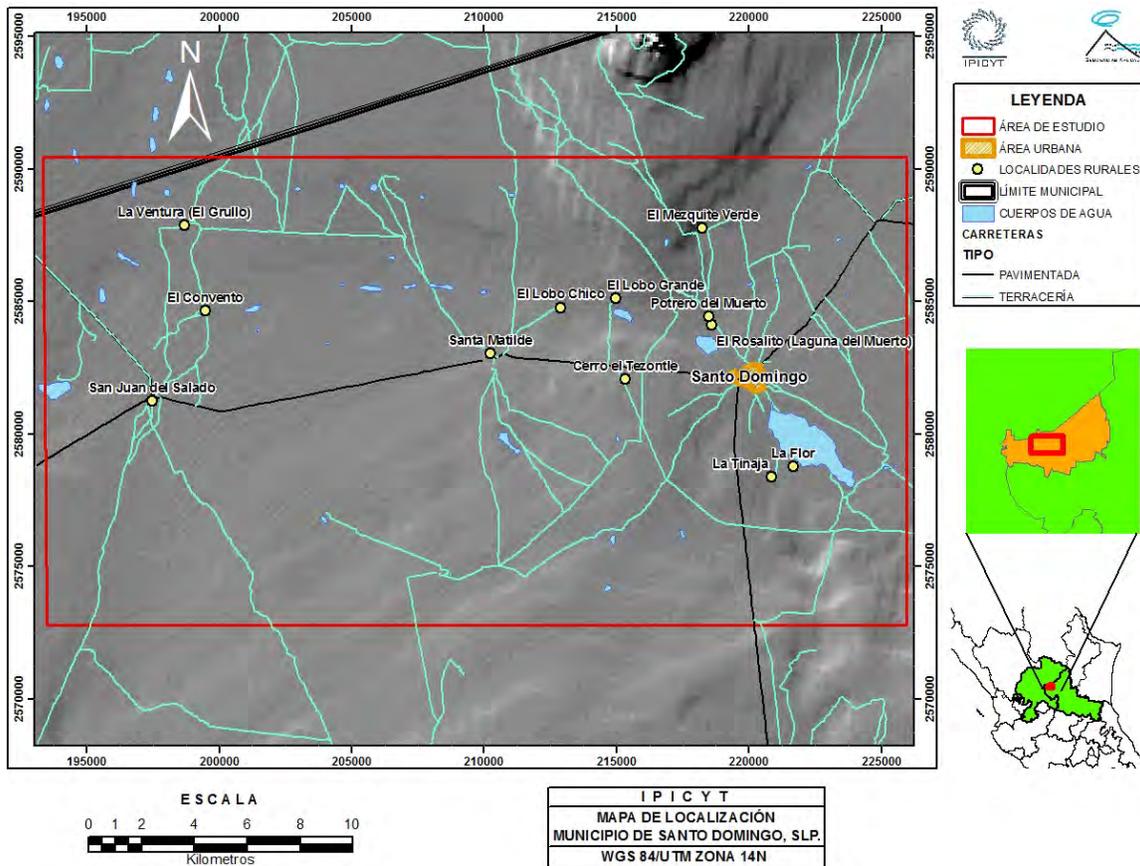


Figura 1.1. Mapa de localización del área de estudio, Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

El principal acceso, partiendo de la ciudad de San Luis Potosí, se efectúa por la carretera federal # 49 que comunica a la Cd. de Zacatecas. A la altura del kilómetro 98 hacia el norte se encuentra el camino que conecta a los poblados de Salinas de Hidalgo, La Herradura, San Antonio del Mezquite y Santo Domingo. El acceso hacia esta última se localiza al sureste de la Figura 1.1.

Por otra parte, el municipio de Santo Domingo cuenta con 12,043 habitantes, 6,022 son hombres y 6,021 son mujeres, se distribuyen de la siguiente manera: 3,668 son niños (≤ 14 años), 2,724 son jóvenes (15 – 29 años), 3,895 son adultos (30 – 59 años) y 1,753 son adultos mayores (≥ 60 años). De los 3,060 hogares

existentes, cierto número de éstos cuentan con agua entubada, energía eléctrica y drenaje; la gran mayoría cuenta con televisor, refrigerador y lavadora, por arriba de la mitad cuentan con camioneta u automóvil y, en una menor proporción, cuentan con teléfono fijo, computadora e internet. Se cuentan con 105 instituciones de educación, los cuales cubren los niveles básico y medio superior, ; así como, centros de educación especial. En este municipio se cuenta con dos centros de salud, un equipo de salud itinerante y seis unidades médicas del programa "IMSS Oportunidades" y 16 tiendas rurales DICONSA. Los sectores económicos más importantes de la región son el sector primario (agropecuario) y terciario (comercio y servicios), con 2, 248 y 784 personas dedicadas a estos sectores, respectivamente. El sector secundario (Industria minera, manufacturera, construcción y eléctrica) es el de menos importancia pues ocupa 296 personas de la población activamente económica (CEFIM, 2012).

1.7 Clima y vegetación

El clima característico del municipio de Santo Domingo es de tipo seco o árido, donde el más predominante es denominado BS1 y, en menor proporción, BS0 ubicado en la porción E del municipio. Estos climas son considerados con bajas precipitaciones, menores de 350 mm, en la temporada de verano. De acuerdo a la clasificación realizada por Enriqueta García, la subdivisión de estos se debe a la relación de la precipitación anual y la temperatura media anual (P/T) como un indicador del grado de aridez; por lo tanto, BS0 es el clima más seco mientras que BS1 es relativamente menos seco. En base, a la fuerte relación que existe entre la vegetación y el clima, los climas secos exhiben una vegetación caracterizada por matorrales desérticos, pastizales y bosques en menor medida (Pineda et al., 2007), como se muestra en la Figura 1.2.

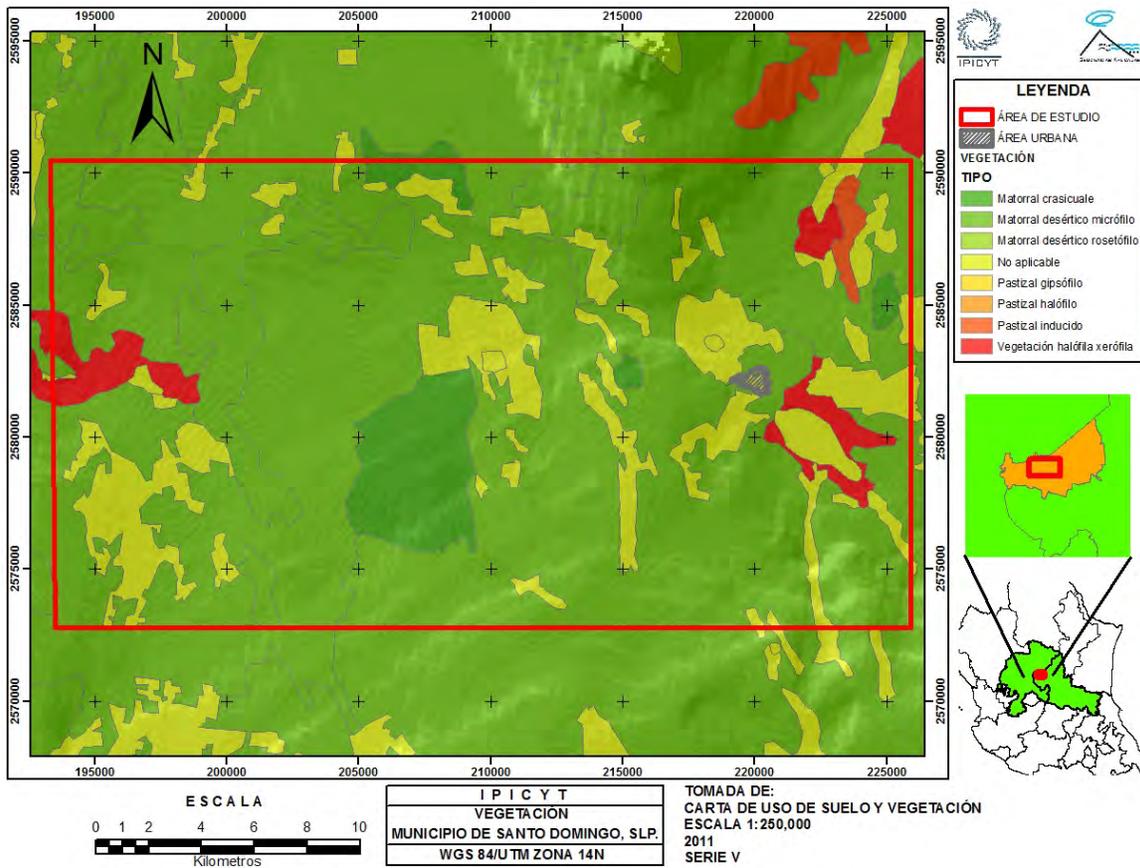


Figura 1.2. Tipo de vegetación en el área de estudio, Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

1.8 Hidrografía

La zona de estudio se localiza dentro la región hidrológica No. 37 nombrada “El Salado”; a su vez, entre dos cuencas: RH37E denominada Fresnillo-Yesca (subcuena RH37Ea – Yesca) y RH37F nominada San Pablo y otras (subcuena RH37Fb – Mesa Chiquihuitillo), como se muestra en la Figura 1.3.

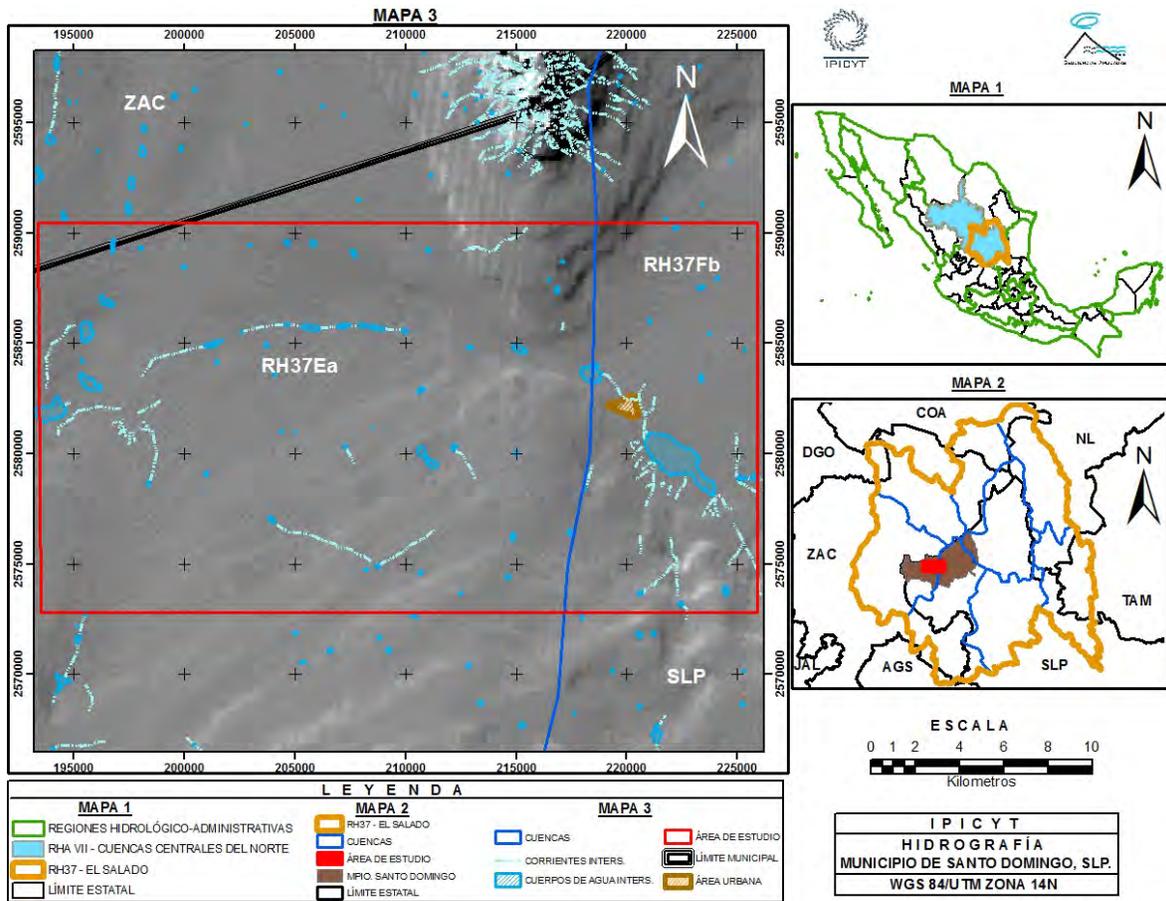


Figura 1.3.- Hidrografía del área de estudio. Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

Todo el sistema se engloba en la región hidrológico-administrativa No. VII denominada Cuencas Centrales de México, la cual, se compone de cuencas endorreicas que se localizan en llanuras y planicies con una elevación promedio de 1,100 m.s.n.m., circundadas por cadenas montañosas con altitudes de 2,800 – 3,700 m.s.n.m. Además, de presentar una escasa precipitación media anual (200 – 350 mm) y alta evaporación potencial (1,896.9 mm), en conjunto con el tipo de clima, clasifican a esta región con muy baja disponibilidad de agua (CONAGUA, 2003).

2. METODOLOGÍA

2.1 Protocolo del Índice de Pobreza del Agua (IPA)

El propósito para determinar el Índice de Pobreza del Agua (IPA), es expresar una medida interdisciplinaria que relaciona el nivel socioeconómico de una población con la disponibilidad del agua e indicar el grado de impacto, en que la escasez de agua, ejerza sobre las poblaciones (Lawrence et al., 2002). Este índice permite clasificar entre países y comunidades, teniendo en cuenta factores físicos y socioeconómicos asociados con la escasez de agua. Para ello, se abarca la disponibilidad de agua, el acceso al agua, la capacidad de mantener el acceso, el uso del agua y los factores ambientales que influyen en la calidad del agua y la ecología que sustenta el agua, tales componentes se describen en la Tabla 2.1.

TABLA 2.1 Componentes del Índice de Pobreza del Agua (IPA).

COMPONENTE	DEFINICIÓN	DATOS DE SOPORTE
Recurso (R)	Disponibilidad física del agua superficial y subterránea, tomando en cuenta su uso y el balance hídrico.	-Agua superficial y subterránea. -Volumen de aprovechamiento. -Balance hidrológico. -Información Geofísica.
Calidad del agua (Q)	Evaluación de la calidad del agua (uso humano y agrícola).	-Información Hidrogeoquímica -ICA. -Diagrama de salinidad del suelo.
Uso (U)	Las formas en la cual es usada el agua para diferentes propósitos. Incluye los usos: doméstico, agrícola e industrial.	-Uso doméstico del agua en litros por día. -% de agua usada para la agricultura e industria ajustada a su participación como sector del PIB.
Acceso (A)	Nivel de acceso al agua segura para uso humano.	-% de población con acceso a agua potable. -% de población con acceso a drenaje. -% de tierras arables con acceso al riego.
Capacidad (C)	Eficacia de la capacidad de la población en el manejo de agua.	-Ingresos. -Tasa de mortalidad de niños menores de 5 años. -Índice de educación. -Coeficiente de Gini.
Ambiente (E)	Evaluación de la integridad ambiental relacionada al agua.	-Índice de humedad del suelo (SWI).

Tomado de López et al., 2013.

De forma matemática (López, 2013), se expresa como:

$$IPA_i = \frac{\sum_{i=1}^N w_{X_i} X_i}{\sum_{i=1}^N w_{X_i}} \quad (1)$$

Donde IPA es el índice de pobreza del agua para una región determinada, i representa el inésimo componente, w representa un valor de peso que pondera al valor de cada componente X_i que constituye al índice. La ecuación (1) puede ser escrita en forma desarrollada:

$$IPA_i = \frac{w_r R + w_a A + w_c C + w_u U + w_e E + w_q Q}{w_r + w_a + w_c + w_u + w_e + w_q} \quad (2)$$

Por lo tanto, el IPA_i está compuesto por la suma ponderada de los seis componentes: Recurso (R), Acceso (A), Capacidad (C), Uso (U), Ambiente (E) y Calidad del agua (Q). En cada uno de los componentes se obtiene una valoración de entre 0 a 1, dichos valores hacen referencia al grado de ineficiencia o eficiencia, respectivamente, del componente analizado. La ponderación de cada uno de estos es respecto a su importancia relativa, denominado W_{x_i} , que puede ser calculado como se muestra a continuación:

$$W_{x_i} = \frac{X_{r_i} * X_{w_i}}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (3)$$

Dónde:

X_{r_i} y X_{w_i} son las puntuaciones para cada componente X_i y sus pesos teóricos. W_i es la sumatoria de pesos teóricos.

Por otro lado, para el cálculo de cada componente se realizó de la siguiente manera:

2.1.1 Componente Recurso (R)

2.1.1.1 Piezometría

Para evaluar este componente fue necesario realizar actividades que nos permitieran conocer el comportamiento del flujo subterráneo del recurso hídrico. En la cual, realizó una campaña piezométrica que nos permitió medir el nivel estático de 19 sitios de un total de 25, correspondientes a norias y pozos que existen en la zona. Lo anterior se comparó con información de los niveles estáticos

de manantiales, norias y pozos obtenidos de la carta hidrológica de aguas subterráneas de Matehuala, F14-1 a escala 1:250,000.

2.1.1.2 Exploración geofísica

Otra de las actividades que se realizó fue con el objetivo de determinar las dimensiones, conexión hidráulica, continuidad y disposición de la litología en la zona de estudio. En la cual se empleó uno de los métodos de prospección geofísica denominado método eléctrico en la modalidad de Sondeo Eléctrico Vertical con arreglo Schlumberger, el cual consiste en introducir una corriente eléctrica en el terreno mediante un par de electrodos (denominados A y B) y se mide la diferencia de potencial con otro par de electrodos, (llamados M y N), como se indica en la Figura 2.1.

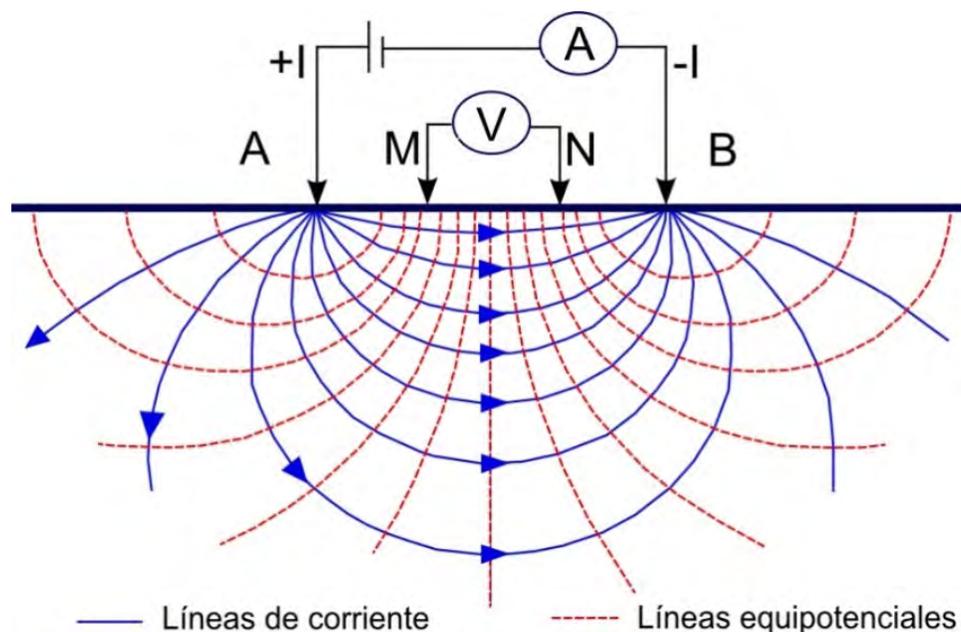


Figura 2.1.- Esquema del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).
Tomado de: Núñez & Rossini et al., 2013.

Donde la correlación de estas dos propiedades proporciona una resistividad que depende de las propiedades físicas (disposición, porosidad, textura, grado de fracturamiento, tipo de roca, etc.) y químicas (composición, contenido y tipo de humedad) de las rocas. La resistividad describe el comportamiento de un material al paso de una corriente eléctrica. Por lo anterior, en la prospección geoelectrica se realizaron 17 sondeos eléctricos verticales con un resistivímetro modelo

SYSCAL KID switch 24 de la marca IRIS Instruments. Las características del equipo son: salida de voltaje máximo de 200 V, salida de corriente máxima de 500 mA, precisión estándar de 1%, impedancia de entrada de 22 M Ω , rango estándar de entrada de voltaje de -2.5 V a +2.5 V y la medición de resistencia del terreno varía de 10⁻³ a 10⁺⁵ Ω m. Además, en el equipo se incluye cuatro carretes con cable conductor de base aislada y de baja resistencia, dos de 460 m y dos de 100m, dos cintas métricas de 100 m, cuatro electrodos de acero inoxidable que funcionan como electrodos de corriente y de potencia. También se hizo uso de martillos, radios para comunicar los cambios en las distancias de los electrodos, GPS's para la ubicación de los SEV's y medición de las distancias entre los diferentes electrodos, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 2.2.- Carretes, electrodos, receptor y transmisor SYSCAL KID,

Las distancias entre los electrodos de potencial (MN) varió de 1.2 – 160 m, para los electrodos de emisión de corriente (AB) se abrieron de 2 – 914 m. Además, las separaciones entre los electrodos de emisión de corriente (AB/2) que se emplearon en la realización de los SEV's fueron de: 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m,

8 m, 10 m, 13 m, 16 m, 20 m, 25 m, 32 m, 40 m, 50 m, 65 m, 80 m, 100 m, 125 m, 160 m, 200 m, 250 m, 320 m, 400 m y 457 m, alcanzando profundidades de investigación desde 0.5 – 150 m. La ubicación de cada uno de los SEV's que se realizaron en toda el área de estudio se muestran en la Figura 2.3.

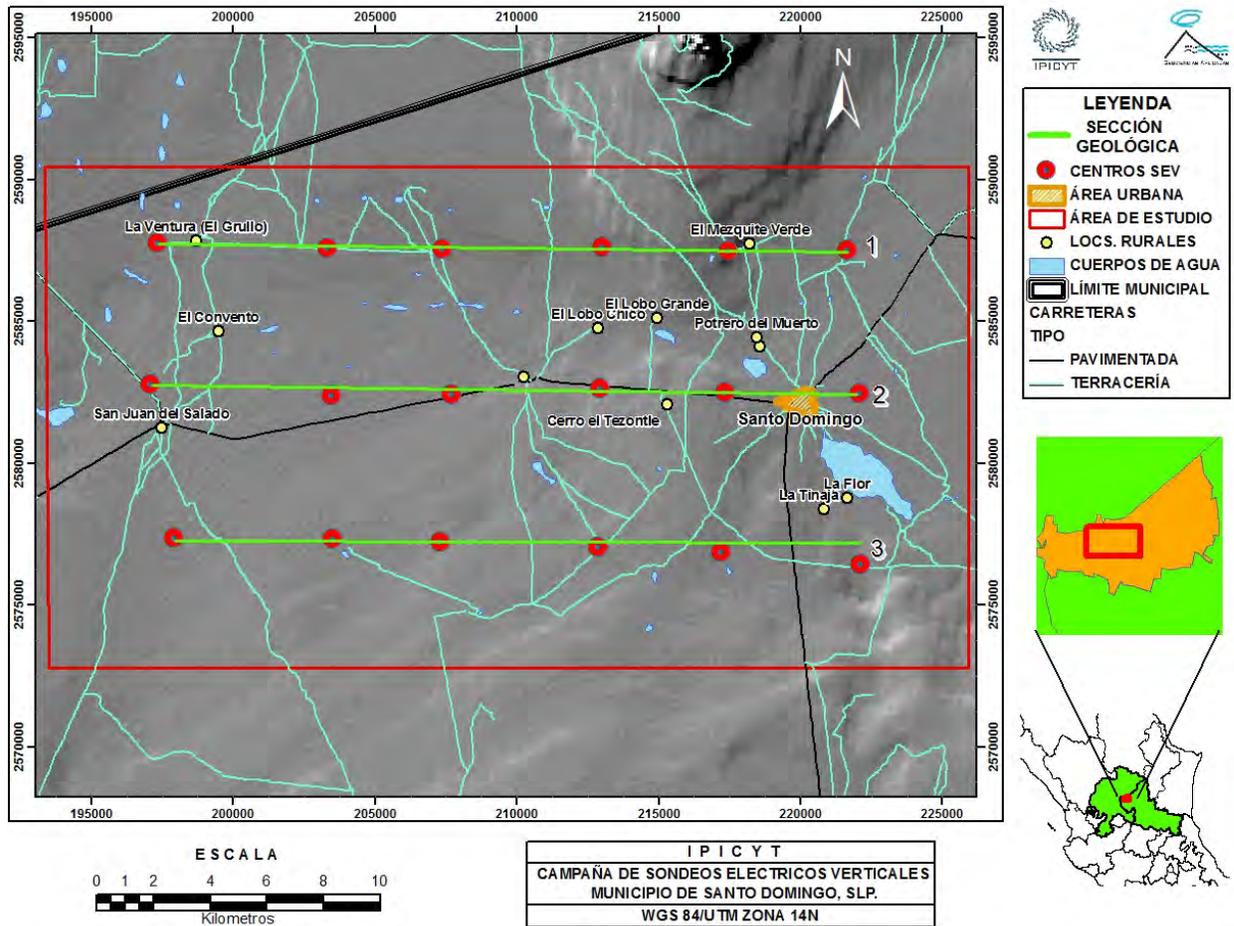


Figura 2.3.- Campaña de sondeos eléctricos verticales en el área de estudio, Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

Una vez adquiridas las mediciones de campo se procesaron en el software denominado IPI2Win donde se calcularon los tipos de curva de los diferentes SEV's, las resistividades reales, número y espesores de cada capa. Finalmente, los resultados se presentaran en 3 secciones: la primera sección es una distribución de la resistividad a diferentes aperturas de $AB/2$, la segunda sección consiste en cada una de las unidades geoelectricas y la tercera sección es la interpretación geológica del subsuelo.

Por último, para el componente de Recurso que nos indica la disponibilidad física del agua que existe en el área de estudio y que es utilizada en diferentes actividades humanas. Se evaluó tomando en consideración dos subcomponentes: agua superficial y agua subterránea. El peso establecido para cada subcomponente se relaciona al porcentaje de uso (1% agua superficial y 99% agua subterránea), como se muestra a continuación:

$$R = 0.01A_{sup} + 0.99A_{sub} \quad (4)$$

En (4), el agua superficial se define como:

$$A_{sup} (Mm^3) = \frac{Vol.almacenado}{Vol.de precipitación anual} \quad (5)$$

Dónde, el volumen de precipitación anual se establece como:

$$Vol.Precipitación\ anual = \frac{(Precipitación\ media\ anual\ del\ área \times Área\ de\ estudio)}{1'000,000} \quad (6)$$

En (4), el agua subterránea se definió como:

$$A_{sub} = \frac{Recarga - Extracción}{2Extracción} \quad (7)$$

Dónde, la recarga se estimó como la infiltración que se define en un balance hidrológico, como se señala la siguiente ecuación:

$$P - ETR - Es - I = 0 \dots\dots\dots (8)$$

$$\therefore P - ETR - Es = I$$

Donde:

P = Precipitación media anual en millones de metros cúbicos por año (Mm³/año).

ETR = Evapotranspiración (Mm³/año).

Es = Escurrimiento (Mm³/año).

I = Infiltración (Mm³/año).

2.1.2 Componente Calidad (Q)

2.1.2.1 Campaña de muestreo de agua subterránea

Con el objetivo de determinar el tipo, la calidad y distribución espacial de las características químicas del agua, se llevó a cabo una campaña de muestreo de agua subterránea del 1 – 3 de Octubre del 2013, con un total de 25 muestras, de

las cuales 12 corresponden a pozos y 13 a norias, los sitios de muestreo se ilustran en la Figura 2.4.

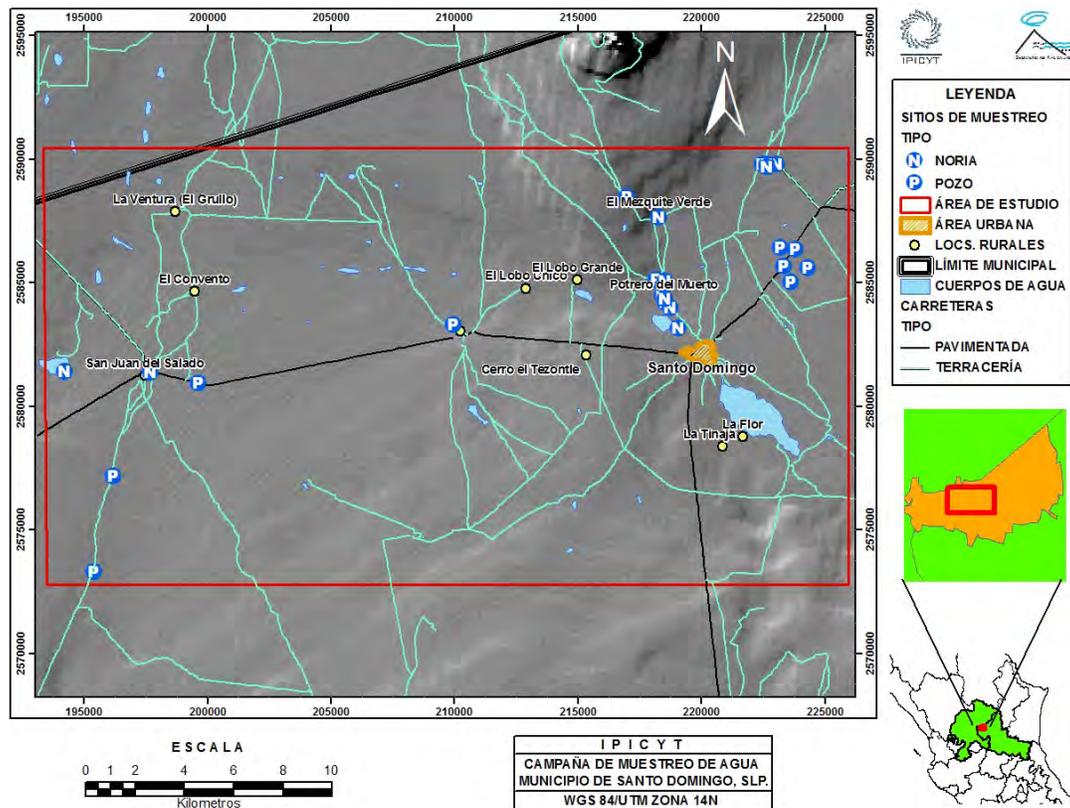


Figura 2.4.- Campaña de muestreo de agua subterránea en el área de estudio. Municipio de Santo Domingo. S.L.P.

Los parámetros físico-químicos como: alcalinidad, conductividad eléctrica, pH, potencial redox, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, temperatura del ambiente y de la muestra fueron medidos en el sitio de muestreo. La preservación del total de las muestras se realizó a una temperatura $< 4^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, las muestras recolectadas para cationes y elementos traza fueron acidificadas con HNO_3 concentrado para obtener un $\text{pH} < 2$.

Las muestras recolectadas se analizaron para determinar aniones mayoritarios (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{-2}) por medio de colorimetría en el laboratorio de Petrofísica del IPICYT, utilizando un colorímetro multiparamétrico SMART 2 marca La Motte, en el cual se utilizan 10 ml de solución para su análisis y reactivos específicos para cada parámetro a determinar. Este instrumento mide directamente la absorbancia de luz de una solución, a una longitud de onda específica del haz de

luz emisor, lo cual, se basa en el principio de absorción de la luz conocida como la ley de Bouguer-Lambert-Beer, la cual establece que la absorbancia está directamente relacionada con las propiedades intrínsecas del analito, con su concentración y con la longitud de la trayectoria del haz de radiación al atravesar la muestra. Los cationes mayoritarios (Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} y Na^+) y elementos traza fueron enviados al laboratorio de geoquímica ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México, los cuales fueron determinados por cromatografía e ICP-EOS, respectivamente.

Las unidades de concentración, en los resultados de los análisis, se manejaron en mg/L ó meq/L. Por una parte, los resultados obtenidos se ocuparon para determinar las familias de agua y procesos hidrogequímicos mediante el Diagrama de Piper y Stiff; en este último diagrama nos permite visualizar el agrupamiento de las familias de agua y su distribución de manera espacial. Por último, se utilizó el diagrama de Schoeller para determinar que aniones o cationes son predominantes en las muestras; así como, su agrupamiento.

Por otro lado, se evaluó la calidad del agua para uso potable y doméstico; así como, para uso agrícola; los cuales están descritos en el apartado del componente de calidad para el cálculo del IPA.

Al obtener las características químicas del agua, estas se emplearon en cuenta para evaluar el componente de Calidad que determina el grado de confiabilidad del recurso en las actividades en que se utiliza. Para ello se consideró el Índice de Calidad del Agua (ICA), que indica el grado de contaminación del recurso, y la calidad del recurso para uso agrícola relacionando la salinidad y la relación de adsorción de Sodio (SAR) propuesto por el laboratorio de salinidad de Estados Unidos (USLS).

1) Índice de Calidad del Agua (ICA).

Para este índice se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: Potencial de Hidrógeno (pH), Temperatura de la muestra, Conductividad eléctrica, Sólidos totales disueltos, Cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{2-}), Nitratos (NO_3^-), Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}); dichos parámetros son categorizados en base

a sus concentraciones e influenciados por factores de ponderación, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (9)$$

Donde:

I_i : índices de calidad por parámetro.

W_i : pesos ó factores de ponderación.

Posteriormente, para cada valor de ICA se clasifica como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 2.2 Clasificación del ICA

<u>VALOR</u>	<u>CALIDAD</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
90 – 100	EXCELENTE	No requiere purificación para su consumo.
80 – 90	ACEPTABLE	Requiere purificación menor.
70 – 80	LEVEMENTE CONTAMINADA	Dudoso su consumo sin purificación.
50 – 70	CONTAMINADA	Tratamiento de potabilización indispensable.
40 – 50	FUERTEMENTE CONTAMINADA	Dudoso para su consumo.
0 – 40	INACEPTABLE	Inaceptable para su consumo humano.

Tomado de: Morán, 2010.

2) Relación de Salinidad y Sodicidad.

Para este subcomponente se tomó en cuenta la Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS; meq/L) para cada una de las muestras, como se describe a continuación:

- Conductividad eléctrica.

Esta propiedad se consideró como peligro de salinidad debido a que las altas concentraciones de sales provocan un efecto osmótico y disminución en el rendimiento de cultivos. Para lo cual se clasificaron las diferentes concentraciones establecidas en el Diagrama de Wilcox, como se muestra en la siguiente Tabla 2.3:

Tabla 2.3 Clasificación de la conductividad eléctrica.

<u>CLASE</u>	<u>CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (μS/cm)</u>	<u>PORCENTAJE DE CONFIABILIDAD</u>	<u>CLASIFICACIÓN</u>
C1	100 – 2	100 – 75	MUY CONFIABLE
C2	250 – 750	75 – 50	CONFIABLE
C3	750 – 2,250	50 – 25	RESTRINGIDA
C4, C5, C6	2,250 – 10,000	25 – 0	INACEPTABLE

- Relación de Adsorción de Sodio (RAS).

Esta propiedad se consideró como peligro de sodicidad (sodificación o alcalinización) ya que provoca deterioro en la estructura del suelo debido al porcentaje de sodio intercambiable y se define como se muestra en la siguiente ecuación:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (10)$$

Para lo cual se clasificaron las diferentes concentraciones establecidas en el Diagrama de Wilcox, como se muestra en la siguiente Tabla 2.4:

Tabla 2.4 Clasificación del RAS.

<u>CLASE</u>	<u>RAS (meq/l)</u>	<u>PORCENTAJE DE CONFIABILIDAD</u>	<u>CLASIFICACIÓN</u>
S1	0 – 10	100 – 75.1	MUY CONFIABLE
S2	10.1 – 18	75 – 50.1	CONFIABLE
S3	18.1 – 26	50 – 25.1	RESTRINGIDA
S4	26.1 – 32	25 – 0	INACEPTABLE

Después de determinar tanto la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio junto con el ICA, se procedió a calcular el valor del componente de Calidad en base a la siguiente fórmula:

$$Q = W_{agr}X_{iagr} + W_{ap}X_{iICA} \dots\dots\dots (11)$$

$$X_{iagr} = 0.5RAS + 0.5CE \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

W_{agr} : peso por el uso del agua en la agricultura.

X_{iagr} : relación de la sodificación y salinidad.

W_{ap} : peso por el uso del agua en recurso potable.

X_{iICA} : valor del índice de calidad del agua.

2.1.3 Componente Uso (U)

Este componente relaciona el uso de agua respecto a las diferentes actividades que se realizan en la zona, las variables que se consideraron fueron: el porcentaje del volumen de agua para las actividades agrícolas y domésticas, así como el porcentaje del valor de la producción agrícola en el Municipio de Santo Domingo. Lo cual representa la eficiencia en el uso del agua. Por lo que a cada uno de estos subcomponentes se describen a continuación:

1) Uso del agua en las actividades domésticas.

En este subcomponente se consultó el Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento de la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) donde especifica los consumos domésticos per cápita en base al clima y condición socioeconómica. Estos valores de consumo se utilizan para calcular el uso del agua a nivel doméstico en base a la siguiente fórmula:

$$U_d = 1 - \left[\frac{(X_i - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \right] \quad (13)$$

Donde:

X_i = consumo de agua (l/hab/día) para la clase socioeconómica media.

X_{min} = consumo mínimo de agua (l/hab/día) para la clase socioeconómica media.

X_{max} = consumo máximo de agua (l/hab/día) para la clase socioeconómica media.

2) Uso del agua en la actividad agrícola.

Para este subcomponente se tomó en cuenta el porcentaje de la producción agrícola del municipio de Santo Domingo que se obtuvo del Servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP) del portal web de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), y el porcentaje del volumen de agua usado en la agricultura obtenido en base a la información desplegada en el Registro Público de

Derechos del Agua (REPDA) del portal web de la CONAGUA. Estos dos valores se utilizaron para calcular el uso del agua en la actividad agrícola, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$U_{agr} = \frac{\% Producción agrícola municipal}{\% Volúmen de agua para uso agrícola} \quad (14)$$

Por lo tanto, los dos subcomponentes anteriores se utilizan para calcular el valor del componente de Uso, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Uso = 0.05U_d + 0.88U_{agr} \quad (15)$$

2.1.4 Componente Acceso (A)

En este componente se toma en cuenta la relación que existe entre las necesidades básicas de agua y saneamiento para los países basados en la agricultura relativamente pobres, reconociendo que la disponibilidad de agua para el cultivo es tan importante como para el consumo doméstico y humano. Por lo tanto, se consideraron 3 subcomponentes a evaluar, de los cuales se obtuvo lo siguiente:

- 1) Porcentaje de la población con acceso a agua potable (A_{ap}).
- 2) Porcentaje de la población con acceso a saneamiento (A_s).
- 3) Relación de las tierras cultivables entre las tierras con acceso al riego (A_r).

Los tres subcomponentes se combinan en la siguiente expresión matemática:

$$A = 0.8A_{ap} + 0A_s + 0.2A_r \quad (16)$$

2.1.5 Componente Capacidad (C)

Este componente se relacionan las variables socioeconómicas de la población, como el índice de ingresos, el Coeficiente de Gini, la mortalidad infantil y el índice de educación; que tienen un impacto sobre el acceso y la calidad del agua, así como tener en cuenta una medida sobre la distribución variable de los ingresos. Por lo que a cada uno de estos subcomponentes se describen a continuación:

- 1) Índice de ingresos (I_i).

Este parámetro nos define la variabilidad económica en ingresos corrientes monetarios y no monetarios. Este se calcula el índice de ingreso (I_i), utilizando la siguiente fórmula:

$$I_i = \frac{\log(\text{ingreso promedio per cápita mpal.}) - \log(\text{ingreso mínimo})}{\log(\text{ingreso máximo}) - \log(\text{ingreso mínimo})} \quad (10)$$

Donde: el ingreso mínimo y máximo son valores establecidos por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) de 100 y 40,000 dólares PPC, respectivamente. Al resolver la ecuación (10) se obtuvo un valor de 0.549.

2) Mortalidad infantil (M_i).

En este subcomponente se consideró la relación entre el número anual de muertes infantiles dividido por el número total de nacimientos, natalidad.

3) Índice de educación (I_e).

Este subcomponente se consideró para medir el progreso relativo de una zona en materia de alfabetización de adultos y asistencia escolar, dichos parámetros se definen de la siguiente forma:

$$Tasa\ de\ asistencia\ escolar = \frac{Población\ de\ 6\ a\ 24\ años\ de\ edad\ que\ asiste\ a\ la\ escuela}{Población\ de\ 6\ a\ 24\ años\ de\ edad} \quad (11)$$

$$Tasa\ de\ alfabetización = \frac{Población\ de\ 15\ y\ más\ años\ de\ edad\ alfabetizada\ (sabe\ leer\ y\ escribir)}{Población\ de\ 15\ y\ más\ años\ de\ edad} \quad (12)$$

Enseguida estos parámetros se utilizan para calcular el Índice de Educación mediante la siguiente ecuación:

$$I_e = \frac{2}{3} tasa\ de\ alfabetización + \frac{1}{3} tasa\ de\ asistencia\ escolar \quad (13)$$

4) Coeficiente de Gini (C_G).

Dicha variable mide la desigualdad económica de una sociedad, mediante la exploración del nivel de concentración que existe en la distribución de los ingresos entre la población; donde sus valores varían de 0 a 1, cuando tienden a cero refleja mayor igualdad en la distribución del ingreso y cuando tiende a uno mayor desigualdad en la distribución del ingreso.

Por lo tanto, los cuatro subcomponentes se combinan en la siguiente expresión matemática:

$$C = 0.3I_i + 0M_i + 0.5I_e + 0.2C_G \quad (14)$$

2.1.6 Componente Ambiente (E)

Este componente trata de englobar un número de indicadores ambientales que reflejan el suministro y gestión del agua, así como su grado de calidad y contaminación. Además, permite determinar el grado de importancia en que el agua y ambiente en general; así como, otra información relacionada, forman parte

del marco estratégico y normativo de un país. Para nuestro caso, se optó por evaluar este componente mediante imágenes satelitales Landsat 5 que se obtuvieron de la página web: <http://glovis.usgs.gov/> para dos periodos de tiempo 2001 y 2011. A dichas imágenes se les realizó un pretratamiento, el cual consistía en convertir los números digitales en reflectancia con el fin de eliminar cualquier perturbación del medio generada cuando se captó la imagen, cabe señalar que este procedimiento se realiza para las bandas 1, 2, 3 4, 5 y 7. Para lo cual, en primera instancia, se calcula la radiancia (L_{λ}) mediante la siguiente fórmula:

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * (Q_{cal} + B_{rescale}) \quad (22)$$

Donde:

L_{λ} = radiancia espectral ($W/(m^2*sr*\mu m)$).

Q_{cal} = valor del pixel en número digital.

$G_{rescale} = (L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}) / Q_{cal\ max}$

$B_{rescale} = L_{MIN\lambda}$

$L_{MAX\lambda}$ = valor de radiancia escalado con respecto al valor mínimo de número digital (0) en ($W/(m^2*sr*\mu m)$).

$L_{MIN\lambda}$ = valor de radiancia escalado con respecto al valor máximo de número digital (255) en ($W/(m^2*sr*\mu m)$).

Posteriormente, se calcula la reflectancia (ρ_p) como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\rho_p = \left(\frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos\theta_z} \right) \quad (23)$$

Donde:

ρ_p = reflectancia planetaria.

L_{λ} = radiancia espectral.

d = distancia tierra-sol en unidades astronómicas.

$ESUN_{\lambda}$ = media de la irradiancia solar exoatmosférica.

θ_z = ángulo del cenit solar en grados ($\theta_z = 90 - \theta_s$; θ_s es el ángulo de elevación del sol).

A partir de este punto, se utilizaron las bandas 3 (0.63-0.69 μm) y 4 (0.76-0.90 μm) para calcular el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) debido a que estas representan el rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) del espectro electromagnético, respectivamente; presentan un mayor contraste en la respuesta de identificar la vegetación sana, como se define en la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R)} \quad (24)$$

Por otra parte, se realizó un pretratamiento en la banda 6 (10.40-12.50 μm) debido a que representa el infrarrojo lejano o térmico del espectro electromagnético, calculando la radiancia como se muestra en la ecuación (18) y prosiguiendo a calcular la Temperatura superficial del Suelo (LST) como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Brillantez (Temperatura de brillo)} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{\text{Radiancia}} + 1\right)} \quad (25)$$

$$\varepsilon \text{ (Emisividad)} = F_v 0.98 + F_v 0.93 \quad (26)$$

$$F_v = N^2 = \left(\frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}}\right)^2 \quad (27)$$

$$\text{Temperatura superficial del Suelo (LST)} = \left(\frac{\text{Brillantez}^4}{\text{Emisividad}}\right)^{0.25} - 273 \quad (28)$$

Al obtener el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado y la Temperatura Superficial del Suelo, los cuales se relacionan en un concepto triangular espacial que determina el Índice de Humedad del Suelo (SWI), como se muestra en la siguiente figura:

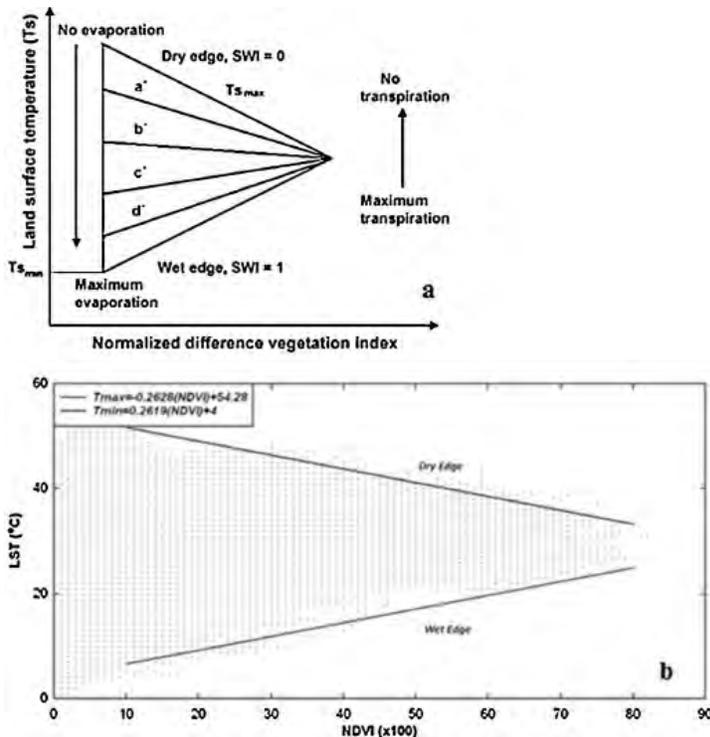


Figura 2.5.- Diagrama conceptual de la relación triangular entre LST-NDVI para determinar el Índice de Humedad del Suelo.

Tomado de: Keshavarz et al., 2014.

A partir de esta relación se determinan las ecuaciones lineales de la temperatura máxima ($T_{\max(i)} = b + a(\text{NDVI}_{(i)})$) y mínima ($T_{\min(i)} = d + c(\text{NDVI}_{(i)})$) con respecto al NDVI, donde a y c son las pendientes y; b y d son los valores de las líneas diagonales

compensados en los límites secos y húmedos, respectivamente. Finalmente, se determina el SWI como se muestra en la siguiente ecuación:

$$SWI_i = \frac{(T_{\max(i)} - T_{s(i)})}{(T_{\max(i)} - T_{\min(i)})} \quad (29)$$

Donde $T_{s(i)}$ es la temperatura superficial del suelo e i es en número de píxeles. Los valores que se asignan a este parámetro varían de 0 – 100%.

Finalmente, al obtener cada uno de los valores de los componentes que constituyen al IPA, se grafican en un esquema hexagonal con valores de 0 – 1; definiendo a 0 como un componente deficiente y 1 como eficiente, como se muestra en la siguiente figura:

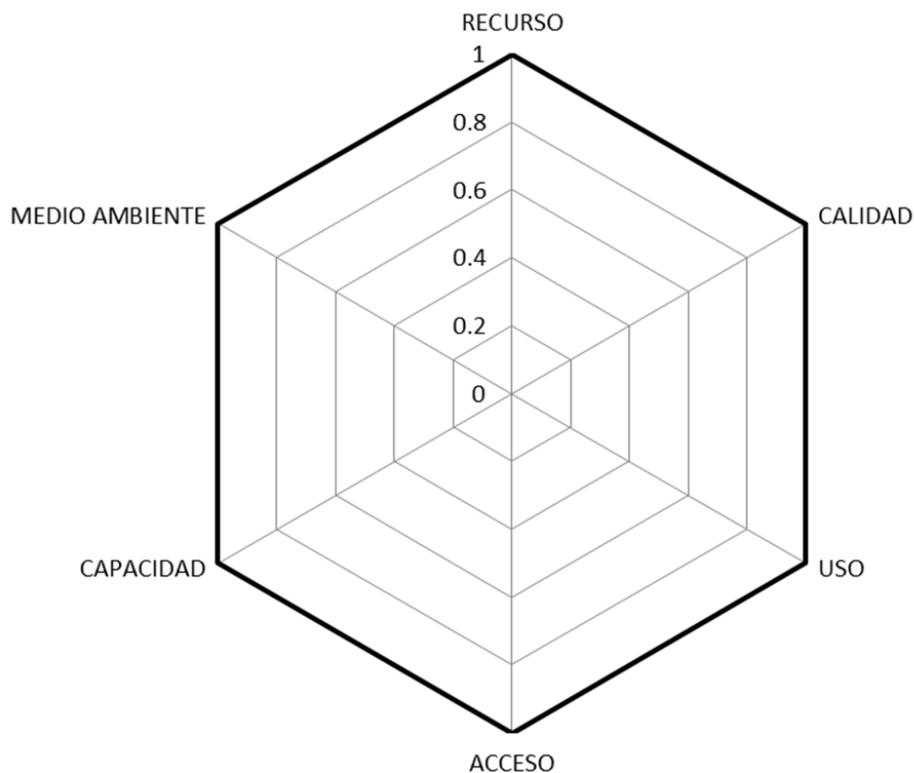


Figura 2.6.- Diagrama del Índice de Pobreza del Agua (IPA).
Tomado de López et al., 2013.

3 MARCO HIDROGEOLÓGICO

3.1 Geología

Fisiográficamente, el área de estudio se localiza en la Provincia de la Mesa Central. La cual se caracteriza por la presencia de cadenas montañosas de rocas mesozoicas plegadas, en la porción norte y centro-sur destaca la presencia de realces topográficos denominados como la Sierra del Sabino y el Cerro del Tezontle con altitudes de 2,460 y 2,040 m.s.n.m, respectivamente. Además de extensas planicies de pendientes suaves con una elevación media de 1,975 m.s.n.m. Aunado a esta zona, concurren dos unidades tectonoestratigráficas: El Terreno Sierra Madre es conformado por sedimentos mesozoicos deformados que afloran en la Sierra del Sabino ocupando la porción noreste y El Terreno Guerrero representado por rocas pelíticas fuertemente plegadas y parcialmente metamorfizadas que afloran en la zona de Montaña de Manganeso ocupando la porción suroeste. Además, se manifiesta un cuerpo intrusivo hipabisal de composición riolita-granito que aflora en la parte sur de la Sierra del Sabino; así como, coladas de basaltos fluidales, sedimentos lacustres y una extensa cubierta de rellenos recientes como conglomerados de talud y polimícticos, gravas y limos, caliche y materiales aluviales de planicie (CRM, 2001); como se muestra en la Figura 3.1.

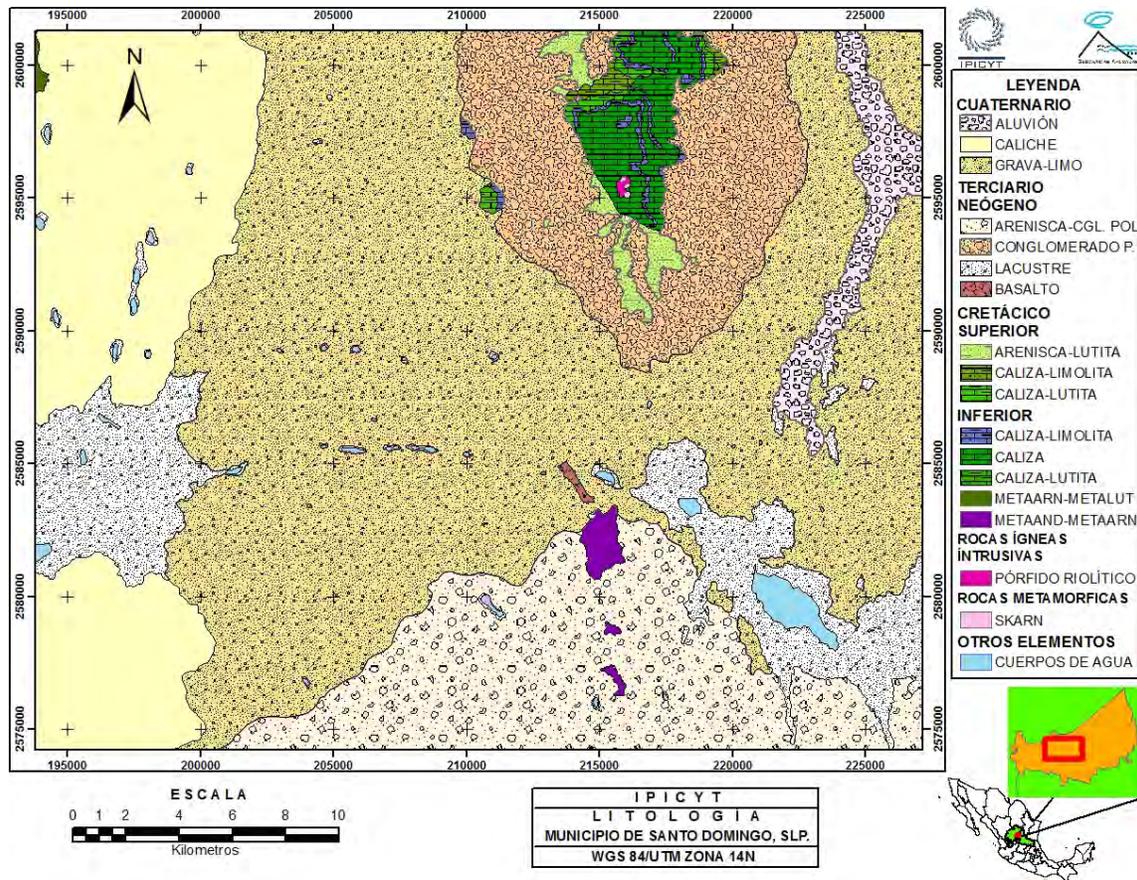


Figura 3.1.- Mapa geológico en el Municipio de Santo Domingo, S.L.P. Tomado del SGM.

TERRENO GUERRERO

Andesita-Arenisca (Kbe(?)MA-MAr)

Esta representa una de las unidades litológicas más antiguas de la zona y está conformada por una sucesión de estratos de lavas andesíticas, arenas, jaspes y radiolaritas fuertemente tectonizados (porfiroblastos); con respecto a las lavas, fueron transformaron a filitas por metamorfismo dinámico, y paquetes de rocas silicificadas con estratificación relictas; según Alfaro y Alexandri (1976), correspondieron a antiguas lutitas reemplazadas por sílice. Además, se señala que debido al tamaño, ± 5 m, de los bloques de jaspe podrían representar un “macrobdinage” ligado a fenómenos tectónicos de carácter regional o sedimentario original. El espesor de dicha secuencia se desconoce pero excede 50 m ya que la profundidad de las obras en la mina “Montaña de Manganeso” es de 63 m. Se cree que un conjunto de rocas metamórficas del Triásico subyacen a

estas rocas pues se presentan en los subterrenos Zihuatanejo y Teloloapan. La edad correspondiente a esta secuencia no está bien definida pero es asignado al Berriasiano (inicios del Cretácico inferior) por correlación con otras áreas situadas más al occidente; además, es contemporánea con las Formaciones Taraises y Cupido del Terreno Sierra Madre, aunque se depositaron distintos medios probablemente en cuencas de antearco paralelamente al borde continental en el que se desarrolló el depósito de la Cuenca Mesozoica del Centro de México. Se manifiesta en superficie a los alrededores de la mina conocida como Montaña de Manganeso y en la posición centro-sur de la zona.

Arenisca-Lutita (Kbe(?)MAr-MLu)

Esta litología sobreyace a las metaandesitas-metaareniscas, está conformada por un conjunto de estratos de areniscas y lutitas plegadas con algunas calizas arcillosas subordinadas. Particularmente, las areniscas son inmaduras (grauvacas) donde las micas pueden representar hasta una proporción del 10% del total, las lutitas presentan un color gris verdoso a café y la fracción arcillosa gradúa a calizas que tienen coloración que tiende al gris claro. Las capas son consideradas laminares y delgadas pues alcanzan espesores de hasta 8 cm. Respecto a la edad de esta secuencia no se precisa pero según Cserna (1976) señala, de manera informal, una relación respecto a la Formación Valdecañas conformada por grauvacas intercaladas con lutitas en capas muy delgadas cuya edad es estimada a inicios del Neocomiano; su ambiente de depósito se trata de una cuenca de arco. Esta litología se manifiesta en superficie en la esquina noroeste de la Figura 7 pero se extiende hacia el oeste en la litología contigua.

TERRENO SIERRA MADRE

Formación Taraises (KbevCz-Lu)

En esta zona, representa la litología más antigua del Terreno Sierra Madre que está conformada, en su parte inferior, por calizas de color gris con abundantes amonoides y, en su parte superior, por calizas delgadas y arcillosas de color gris con abundantes fósiles hacia la base. De forma global, consiste de wackestones

arcillosos de color gris claro, finamente bandeados con espesor de 15 a 20 cm de espesor, abundantes quiebres de limolitas calcáreas y lutitas de color violáceo y gris claro, laminare y susceptibles de deformación intensa generada por cizallamiento. El espesor no se define muy bien porque no aflora el contacto inferior y presentan numerosos pliegues horizontales y de arrastre pero se estima entre 150 – 200 m. Con respecto a su edad se clasifica del Berriasiano – Valanginiano en base a su contenido faunístico. El ambiente de depósito se atañe en un ambiente de mar abierto con aguas claras y oxigenadas, las laminaciones y la estratificación ondulante son evidencia de inestabilidad de zonas cratónicas de aporte e irregularidades del piso marino. Su manifestación en superficie se detecta en la porción norte y oeste de la Sierra del Sabino.

Formación Cupido (KhbCz)

Esta secuencia sobryace a la Formación Taraises (Kbev Cz-Lu). Algunos autores la denominan como la Formación Tamaulipas inferior debido a que corresponde a facies de cuenca, es decir, rocas sedimentarias de ambientes de mar abierto, arrecife y plataforma. De tal manera, que se identifican tres miembros: el miembro inferior está compuesto por capas delgadas, menores a 15 cm, de calizas arcillosas (mudstones) con lentes de pedernal negro, limolitas e incluso areniscas calcáreas de color café amarillento con tonos gris y violeta con foliación; en el miembro medio, el más característico, está compuesto por capas de mudstones de color gris claro con abundantes nódulos irregulares de pedernal de color rojizo, gris, rosa, amarillo, café y negro; incorporados a capas de 15 a 50 cm hasta 1.2 m y caracterizándose por estilolitas paralelas a la estratificación y un contenido abundante de belemnítidos; y en el miembro superior, es una zona de transición hacia la Formación La Peña compuesto por capas de wackestones de color gris a gris oscuro con espesores de 10 – 15 cm hasta 30 ó 40 cm, pueden aparecer nódulos de pedernal gris, blanco y rosa, terminándose cuando son más frecuentes las capas con amonitas típicas de la Formación La Peña. El espesor de la formación no es bien definido ya que comúnmente se encuentra en contacto por falla normal o inversa, algunos autores lo limitan a 100 – 500 m ó 300 – 400 m

pero se estima que por lo menos alcanza 250 a 300 m en la zona. La edad asignada corresponde entre Hauteriviano – Barremiano debido a su contenido faunístico y a su correlación con la Formación Tamaulipas inferior, entre otras. Esta formación se extiende ampliamente y se manifiesta en superficie en el núcleo de la Sierra del Sabino.

Formación La Peña (KapaCz-Lm)

Esta formación está compuesta por calizas arcillosas muy plegadas (wackestones) francamente laminadas en capas de 5 – 15 cm con bandas delgadas continuas de pedernal negro y abundantes quiebres de limolitas calcáreas en lechos de espesor de 50 cm; estos últimos toman coloraciones rojizas, gris claro, violetas o blancas. Al distintivo de esta litología es la presencia de impresiones de amonitas desenrolladas, en algunas capas son muy abundantes, de 2 ó 3 mm hasta 4 cm; además, son clasificadas como planispirales o achatadas. Debido a su incompetencia y plegamiento, el espesor correspondiente no excede más de 60 m. Esta litología es utilizada como horizonte índice, stratigráfico y tectónico, para determinar las principales deformaciones; es cubierta por la Formación Cuesta del Cura y sobreyace a la Formación Cupido, en ocasiones esta última cabalga a la Formación la Peña. En base al contenido faunístico y su posterior análisis, en algunas muestras, la edad se define entre Aptiano y la base de Albiano. Su ambiente de depósito se relaciona al de mar abierto, en aguas tranquilas y poco reductoras; con aporte de terrígenos y desarrollo de fauna; los materiales de relleno provinieron de zonas más accidentales por alineamiento de arcos volcánicos eventualmente transportados tectónicamente. Su distribución se centra en la Sierra del Sabino y en frentes de cabalgadura funcionando como lubricante en los desplazamientos tectónicos subhorizontales.

Formación Cuesta del Cura (KaceCz-Lu)

Esta formación está conformada por capas de calizas arcillosas (wackestones) de color gris oscuro y negro con gran cantidad de fauna (amonitas, hamites, turritélidos y foraminíferos recristalizados); además, presenta quiebres arcillosos

de color gris claro y blanco, estratificación ondulante y delgadas bandas de pedernal negro. El espesor se estima en 200 m, otros autores designan un valor entre 80 – 300 m. Esta cubre transicionalmente a la Formación La Peña y, en la parte superior, es transicional a la Formación Indidura. La edad de dicha secuencia corresponde entre en el Albiano superior–Cenomaniano debido a su contenido faunístico; correlacionándose con las Calizas Fortuna y Cerro Gordo de la región Zacatecas y con la Caliza El Abra de la Plataforma Valles–San Luis Potosí. El ambiente de depósito se definió como de mar abierto e inestable por la presencia de foraminíferos planctónicos y en la zona de talud por la presencia de turbiditas y laminaciones; el aporte sucede desde el occidente debido a la denudación del complejo de arcos volcánicos activos. La máxima subsidencia pudo ocurrir en la época de depósito pues las formaciones subsecuentes muestran inestabilidad y levantamiento de la misma. Esta litología se manifiesta en superficie en la porción norte y noreste de la Sierra El Sabino.

Formación Indidura (KtCz-Lm)

Esta litología está compuesta por capas de calizas arcillosas en color gris claro con tonalidades violetas pero predominan lechos de limolitas que intemperizan de violeta a rosa. El rompimiento en lajas es una característica importante, así como, la presencia de *Inoceramus*. Se presenta fuertes deformaciones en el contacto superior de la Formación Caracol donde se presentan imbricaciones tectónicas. En ocasiones se observan areniscas calcáreas intercaladas entre las lajas de limolitas. El espesor de dicha formación se estima en 100m. El contacto superior puede ser tectónico y transicional con la Formación Caracol, el inferior es transicional a la Formación Cuesta del Cura. Debido a su contenido faunístico, su edad se establece en el Turoniano pero puede considerarse desde el Cenomaniano tardío por la presencia de globigerínidos; además, se correlaciona con la Formación Soyatal de la Plataforma Valles–San Luis Potosí y la Formación Agua Nueva de la Cuenca de Tampico–Misantla. Esta formación se considera con un ambiente de depósito de inestabilidad de cuenca por persistencia de condiciones batiales y aporte de terrígenos provenientes del occidente que se

incrementan hacia la cima marcando predominio clástico, así las capas más tardías de la formación dan señal de una fase de regresión y levantamiento propiciado por la denudación de los terrenos volcánicos occidentales. Dicha formación se presenta en superficie en la parte más al norte de la Sierra el Sabino.

Formación Caracol (KseAr-Lu)

La Formación Caracol está conformada por una secuencia de estratificación de areniscas (grauvacas), areniscas conglomeráticas, limolitas, lutitas y, en ocasiones, tobas híbridas. Presentan marcas de rizaduras, huellas de oleaje y calcos de carga. La mayor parte de los afloramientos presentan fuerte deformación pero las charnelas de los ejes de plegamiento muestran solamente una etapa orogénica. Particularmente, en alguno de estos constituyentes como las areniscas conglomeráticas, los feldespatos y fragmentos de roca se observa recristalización y deformación en la biotita siendo un indicador de procesos de metamorfismo. Respecto a la toba, considerada silicificada en base a un análisis petrográfico, explica la cercanía a diques de pórfido riolítico que pudieran generar dicha alteración. Por último, se identificó una pizarra micácea hematizada proveniente de un plano de arrastre donde sus componentes están laminados. El espesor no se mide con precisión porque parte de los afloramientos están incompletos, erosionados o tectonizados pero se estima por lo menos 300 m o más. Esta litología cubre transicionalmente a la Formación Indidura, el contacto superior está ausente pero es cubierta discordantemente por gravas y conglomerados de talud. La edad asignada es a causa de su posición estratigráfica designándose en el Cretácico superior (Piso Senoniano: Coniaciano–Campaniano) donde su depósito ocurre antes del inicio de la fase compresional laramídica. El ambiente de depósito se asocia al relleno de una cuenca de avance en proceso de deformación cuyos aportes provienen de la acelerada denudación de los terrenos volcánicos occidentales acrecionados al continente, por lo que esta formación fue una zona de inestabilidad tectónica y un depósito rápido de materiales volcánicos. Esta litología aflora en lomeríos bajos en la porción este de

la Sierra del Sabino y, frecuentemente, en los lechos de los arroyos cubierta discordantemente por materiales de relleno.

A partir de este punto, los terrenos Guerrero y Sierra Madre son cubiertos por depósitos continentales de origen lacustre y fluvial.

Lacustres (ToQptla)

Esta litología se conforma por una intercalación de limos, arcillas, arenas y caliche de color café claro, amarillo y blanco parcialmente consolidados caracterizado por su contenido de carbonato de calcio como matriz o cementate. Hacia la base está compuesta de gravas y conglomerados mal consolidados de calizas, jaspes y caliche con algo de yeso supergénico que evidencia el carácter evaporítico de la secuencia. El espesor de estos materiales varía de centímetros a un máximo de 20 m pero pueden alcanzar cientos de metros cuando constituyen el relleno principal de fosas tectónicas. Por otra parte, cubre discordantemente a las Formaciones Caracol e Indidura, así como, los sedimentos del Terreno Guerrero. La edad de los depósitos lacustres es relativamente reciente ya que materiales similares en la geología contigua están cubiertas por ignimbritas del Oligoceno hasta el Pleistoceno por su correlación con la Ignimbrita Guanamé. El ambiente de depósito de estos sedimentos fue por su acumulación en lagunas y hondonadas como producto del retrabajo de gravas y arena en la zona peneplaneada, con clima desértico, en condiciones favorables para la acumulación temporal de agua, que al evaporarse, decantan y evapora las sales contenidas en los sedimentos. Estos depósitos afloran en las cuencas y lagunas naturales como las de El Muerto–El Salado al sur de la Villa de Santo Domingo, la de San Juan El Salado, Ursula García, El arrastradero, El Chaparro, El Lobo, El Quemado y La Colorada.

Conglomerados polimícticos (TplCgp)

Estos depósitos denominados como abanicos de talud se conforman de una carpeta de sedimentos mal consolidados y mal clasificados compuestos por un tamaño que abarca bloques hasta limos derivados de la erosión de las rocas subyacentes, predominando el tamaño de las gravas. Los componentes de estos

sedimentos, que presentan una esfericidad redondeada, subredondeada a subangulosa, son: calizas, pedernal, pórfido riolítico, caliche, areniscas y lutitas. En menores cantidades se observaron hematita, material de veta, skarn, cuarcitas y conglomerados retrabajados. Todo este conjunto se encuentra cementado parcialmente por arcillas, caliche y arenas, en ocasiones muestra gradación y cierta compacidad. Además, se observan algunas huellas de corrientes, así como trazas de estratificación diagonal, lo cual muestra estancamiento de agua, antes de su evaporación y escurrimiento aguas abajo. El espesor de esta litología varía de 1–2 m cuando está cerca de la sierra y donde los afloramientos son más lejanos alcanzan hasta 20 m. Unidades litológicas del Terreno Sierra Madre son cubiertas en discordancia angular por esta litología, hacia la parte superior se observan una delgada cubierta de limos y caliche que fue incluida en la unidad. La edad se designó en el Pleistoceno debido a su posición y características de relleno erosional al borde de la Sierra del Sabino que se correlaciona con depósitos del mismo tipo en áreas adyacentes. El ambiente de depósito es continental de talud y pie de monte. Este material aflora a los costados de la Sierra del Sabino formando una aureola de pie de monte (talud) que se extiende por 4.5 Km.

Areniscas–Conglomerados polimícticos (TplQptAr–Cgp)

Esta unidad corresponde a un conjunto de areniscas y conglomerados con un tamaño de 0.02 a más de 2 mm, similar a los depósitos de talud, medianamente clasificados y cementados que conforman suaves lomeríos. Los principales componentes son jaspes, calizas, metaareniscas, caliche, cuarzo, pedernal y, en menor proporción, metalavas y rocas volcánicas (riolitas y basaltos). En los afloramientos más al sur, el conglomerado tiene mayor aporte de rocas volcánicas. En la parte superior de la litología, los materiales se encuentran menos consolidados, aglutinados y clasificados, hasta el contacto con las gravas y arenas que la cubren. Su disposición de forma casi horizontal con basculamientos locales con 10° de inclinación. El espesor de esta unidad varía entre 1 – 15 m, en ocasiones hasta 20 m. Además, cubre en discordancia angular parte de la secuencia del Terreno Guerrero, así como, a rocas volcánicas terciarias u otra

unidad metavolcánica del mismo terreno. Su edad se designa desde el Plioceno hasta el Pleistoceno debido a su correlación con manifestaciones similares en las litologías contiguas. El ambiente de depósito es continental por acumulación y compactación de la erosión de rocas preexistentes. Los afloramientos de esta litología se presentan al sur de la zona.

Gravas y limos (Qpthogr–lm)

Esta secuencia está compuesta por un conjunto extenso de fragmentos del tamaño de gravas escasamente clasificados, pero de componentes como calizas, pedernal negro, jaspes, areniscas, rocas volcánicas, skarn, materiales de veta, calcita y cuarzo blanco translúcido. Lo cual señala que son producto de la erosión del propio conglomerado y de rocas preexistentes. El espesor varía de 1 – 6 m pero contando con un horizonte de caliche en la superficie. Esta es cubierta por caliche y limos aluviales. Debido a que su origen es de relleno mecánico por erosión, la edad asignada es del Pleistoceno–Holoceno. El ambiente de depósito se considera continental como producto de la erosión en ambiente desértico. Estos materiales cubren la mayor parte de la zona que conforma zonas prácticamente planas con suaves pendientes.

Caliche (Qhoca)

La unidad se compone de laminaciones y delgados lentes horizontales de caliche de color blanco que aglutinan a fragmentos del tamaño de arenas con componentes de cuarzo, jaspe, areniscas, calizas y, a veces, pedernal negro. Muestra una estructura arriñonada y, en parte, a estructuras almohadilladas. Su espesor puede variar de centímetros hasta 2 metros. Cubre a la unidad de gravas y limos, los depósitos lacustres y, en discordancia angular, a sedimentos del Terreno Guerrero; Al caliche, lo cubren una delgada película de limos y gravilla rojiza de origen eólico y pluvial que se lavan en épocas de lluvia. La edad se designa en el Holoceno. El ambiente de depósito es continental, característico depósito químico por precipitación por CaCO_3 , ya que es particular de las regiones semiáridas en las que la acción capilar permite el ascenso de aguas

saturadas con carbonato de calcio que al evaporarse, forma delgadas costras de caliche en capas arriñonadas. Sus manifestaciones en superficie se localizan en la porción oeste de la zona.

Aluvión (Qhoal)

Esta secuencia se constituye de limos, suelos, arcillas y gravilla de diferente composición (cuarzo, areniscas, calizas, caliche) que se depositan en amplios cauces de arroyos muy planos, donde se observan extensos pastizales y zonas de sembradíos. Su espesor se estima entre uno a dos m. Su edad se asigna al Holoceno por su posición y ser la litología más reciente. El ambiente de depósito es continental debido a que es producto del retrabajo y erosión de las gravas y arenas que conforman las llanuras. Esta litología se manifiesta en superficie hacia la porción noreste de la zona.

La presencia de las rocas ígneas en la zona, también se manifiestan en la porción norte de la Sierra del Sabino y a 1.5 km al noroeste de la Montaña de Manganeseo.

Pórfido Riolítico (Te(?)PR)

Este cuerpo intrusivo es representado por riolitas porfídicas con clivaje de enfriamiento. Sus componentes son cuarzo (50%), feldspatos (30%), plagioclasas (10%) y minerales opacos y biotita (5–10 %). La forma del afloramiento es elíptica y está asociado a metamorfismo de contacto con las calizas de la Formación Cupido donde las alteraciones son del tipo skarn, se compone de granates (grosularita), hematita, magnetita y calcita. Su relación estratigráfica se relaciona a la intrusión y corte de las calizas de la Formación Cupido y algunos diques afectan a la Formación Caracol. Dada la profusión de magmatismo post tectónico que afectó a la Cuenca Mesozoica del Centro de México, se infiere que este tipo de rocas cristalinas se emplazaron en una época posterior al Paleoceno, asignándose al Eoceno. Respecto al ambiente de depósito, son intrusiones de enfriamiento lento cerca de la corteza terrestre probablemente el ápice de un cuerpo de mayores dimensiones a mayores

profundidades, por ejemplo, los apófisis del Cerro de La Bufita. Este intrusivo aflora en la porción sur de la Sierra del Sabino. A los alrededores del intrusivo, se presenta una red de diques dispuesta en forma radial respecto al centro de magmatismo. La mayoría corta a la Formación Cupido y Caracol.

Basalto (TmB)

Estos basaltos (andesitas basálticas) de color gris a negro con pátina de color café oscuro por oxidación, con rasgos de flujo que se orientan al NW-30°. Se observan vesículas, matriz afanítica, microlitos de plagioclasas cálcicas y olivino, magnetita, lajas y disposición de flujo de lavas. Debido a los microlitos existentes se clasifica como un basalto fluidal. Las coladas atraviesan y se disponen por encima de la secuencia de andesitas-areniscas del Terreno Guerrero y, más hacia el este a 30 Km del afloramiento de basaltos en el poblado de Cerritos de Bernal, cubren en discordancia a la Formación Caracol y Toba La Herradura, estos basaltos son cubiertos por gravas y limos discordantemente. Su edad es designada en el Mioceno debido a su correlación con el Basalto Cabras de los campos volcánicos de San Luis Potosí y Santa María del Río, asociados a la vez al vulcanismo bimodal que inició en el Oligoceno superior donde sobre una ignimbrita riolítica descansan los flujos de basaltos. Por su carácter fluidal, la ausencia de aparatos volcánicos en la zona, como su disposición alineada al NW-30°, se alude un origen ígneo extrusivo fisural. Los afloramientos de esta litología se localizan a un kilómetro al norte de la Montaña de Manganeso y al noreste del poblado de Santa Matilde.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

CUATERNARIO

- Qho al Aluvión
- Qho ca Caliche

- Qptho gr-lm Grava - limo

TERCIARIO NEOGENO

- Tpl Qpt Ar-Cgp Arenisca - Conglomerado polimictico
- Tpl Cgp Conglomerado polimictico
- Tm B Basalto

- To Qpt la lacustre

CRETACICO SUPERIOR

- Kse Ar-Lu Arenisca - Lutita
- Kt Cz-Lm Caliza - Limolita
- Kae Cz-Lu Caliza - Lutita

INFERIOR

- Kapa Cz-Lm Caliza - Limolita
- Kkb Cz Caliza
- Kbev Cz-Lu Caliza - Lutita
- Kbe(?) Ar-Lu Arenisca - Lutita
- Kbe(?) A-Ar Andesita - Arenisca

ROCAS INTRUSIVAS

- Te(?) PR Pórfido Riolítico

ROCAS METAMORFICAS

- Sk Skarn

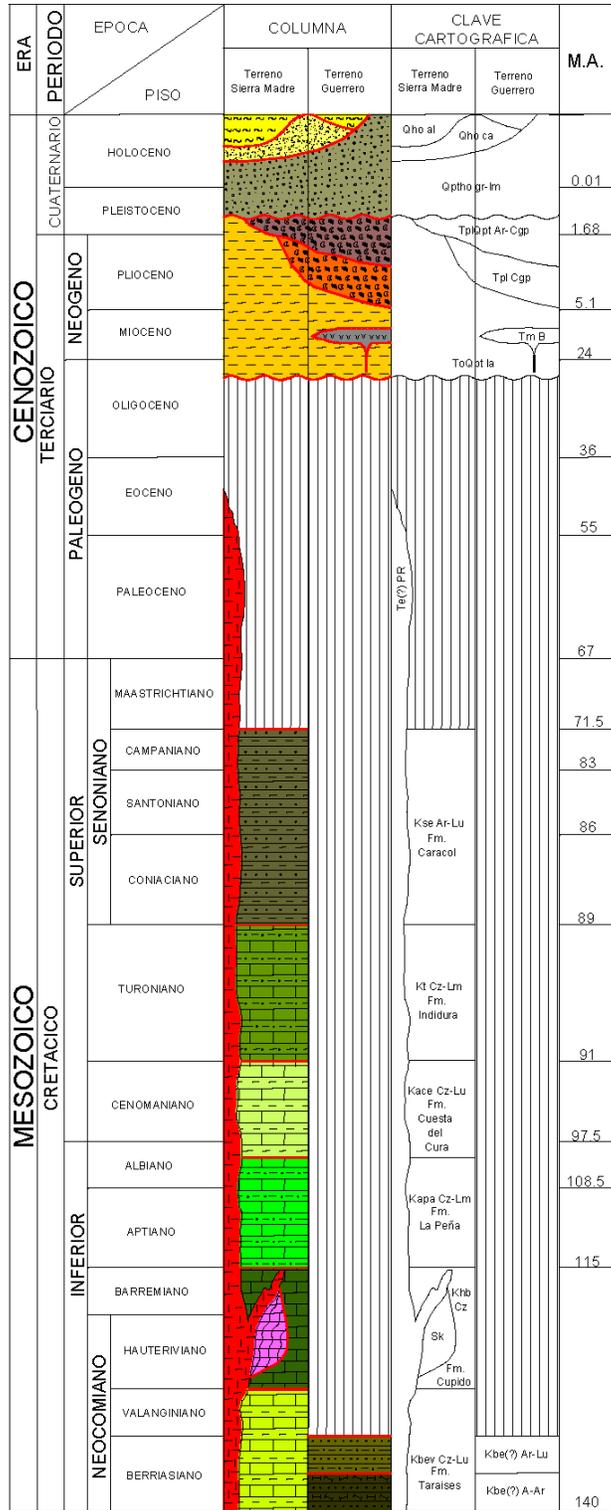


Figura 3.2.- Columna estratigráfica en la zona de estudio, Municipio de Santo Domingo, S.L.P. Tomado del SGM.

3.2 Hidrogeología

El área de estudio forma parte del acuífero El Barril, que cuenta con una superficie de 3,153.30 Km², hacia la porción norte. De este acuífero, en base a estudios realizados anteriormente, se tienen diferentes percepciones y se explica continuación (CONAGUA, 2002; INEGI, 2007):

El sistema hidrogeológico, se constituye por tres acuíferos. El primero, el más importante y superficial, consta de los rellenos del valle (arenas, gravas, limos y arcillas) que sobreyacen a sedimentos continentales terciarios, los cuales forman el segundo acuífero pero presenta interdependencia hidrogeológica con el primero. El tercero presenta baja permeabilidad y lo constituyen las lutitas y areniscas de la formación Caracol. El flujo del agua subterránea adopta una dirección general de sur a norte, con aportaciones laterales del este y oeste; las líneas de corriente confluyen hacia las partes topográficamente más bajas, donde se forman las lagunas, cerca de los poblados de Illescas y Santa Clara. Para el año de 1977, la CONAGUA se reporta un censo de aprovechamientos subterráneos identificándose 192 pozos, 279 norias, un manantial y un tajo; donde las profundidades de los pozos variaba de 80 – 200 m con un mayor porcentaje de frecuencia de 100 m. Por otro lado, las norias presentan una profundidad de 3 – 54 m.

El acuífero El Barril está constituido por tobas arenosas y conglomerados poco cementados del Terciario, así como de material aluvial del Reciente, con una geometría irregular y dimensiones variadas. Estos se limitan hacia la porción sur y, lateralmente, por las formaciones impermeables Cretácicas (Cuesta del Cura, Indidura y Caracol), que fueron intrusionadas por rocas volcánicas y que a su vez constituyen el basamento del acuífero granular, con un espesor mayor a 300 m (CONAGUA, 1981).

Regionalmente, se comporta como acuífero libre, aunque localmente presentan confinamiento debido a la presencia de lentes arcillosos. Estos materiales tienen un coeficiente de almacenamiento del orden de 0.20, debido al predominio de material fino (CONAGUA, 1981). La transmisividad varía de 10^{-3} a 17×10^{-3} (CONAGUA, 1981). Para la década de los 80's el número de

aprovechamientos se incrementó de tal manera que la CONAGUA (1981) reporta 229 pozos, 283 norias, un manantial y un tajo; de los pozos se tenía un volumen de extracción de 53 millones de metros cúbicos anuales ($Mm^3/año$), de los cuales 1.38 $Mm^3/año$ se consideraron que corresponden al uso público, urbano y el restante al agrícola en el cual se incluyen volúmenes ínfimos al uso doméstico y abrevadero ya que no hay ninguno destinado al uso industrial; la mayor densidad de pozos se ubican en la porción centro-oeste en el ejido El Barril. En el caso de las norias, se dispersan entre los poblados de Los Hernández y El Naranjal, donde se extraen volúmenes inferiores al de los pozos para usos domésticos y pecuarios (CONAGUA, 1981). La profundidad de los niveles de agua era de 15 a más de 60 m (CONAGUA, 1981). En la porción norte era menor a 30 m, decrece gradualmente de sur a norte, hacia la mitad de la porción sur es de 30 a más de 60 m. Por otro lado, las elevaciones del nivel estático desde 1,950 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en el poblado El Barril a 2,040 m.s.n.m. al sur de Salitral de Carrera. El flujo subterráneo tiene una dirección Este–Oeste y no tiene salidas; entre El Barril y La Concepción existe un cono de abatimiento, así como otro pequeño cono en Salitral de Carrera (CONAGUA, 1981).

Durante 1977 – 1981, el aprovechamiento de los pozos originaron abatimientos de 2 – 7 m en el área El Barril, de 4 – 8 m en el área del Zacatón (CONAGUA, 1981). El ritmo de abatimiento en la zona de bombeo fue de 0.5 – 2 m/año. La recarga natural del acuífero en el área de estudio principalmente es por la infiltración de los escurrimientos procedentes de las sierras que limitan a la zona; otra recarga al acuífero era la del flujo horizontal procedente de la zona Chupaderos–Villa de Co, Zac.; una tercera fuente de recarga al acuífero era la de retornos por riego, dando como resultado una estimación de 15 – 20 $Mm^3/año$. El almacenamiento de los acuíferos es drenado al ritmo de 30 $Mm^3/año$ (CONAGUA, 1981), ocasionando el descenso de los niveles en la porción occidental del área. Para fines prácticos, la zona de “El Barril” se puede considerar independientemente de las zonas adyacentes, debido a su baja

transmisividad de los rellenos, por lo que los efectos del bombeo se propagan lentamente.

En el Valle de Santo Domingo está constituido litológicamente por material granular de tamaño y composición heterogénea que rellena las partes topográficamente bajas y forma una extensa planicie en donde sobresalen algunos pequeños cerros de origen volcánico, sedimentario y metamórfico, como testigos de la erosión. El espesor del relleno aluvial y su grado de permeabilidad se desconoce, aunque por sus características puede afirmarse que funciona como acuífero de tipo libre. La configuración de elevación al nivel estático para 1997, muestra el máximo de 2,020 m.s.n.m. en la periferia del valle y un mínimo de 1,920 m.s.n.m. en el poblado de San Juan El Salado, denotando un cono de abatimiento. Respecto a la profundidad del nivel estático, 1997, muestra un máximo de 70 m al sur del valle, la cual decrece en dirección al norte hasta 20 m hacia los límites con el Edo. De Zacatecas. Al noreste del valle, a inmediaciones del poblado Juan Sarabia se tiene una profundidad de 50 m, desde donde decrece a 20 m al este de la Sierra El Sabino. La evolución del nivel estático para 1996–1997 tiene una recuperación en el almacenamiento del acuífero que varía de 0.5 a 2.5 m donde la máxima evolución es al suroeste de San Juan El Salado (INEGI, 2007).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se describirán a detalle cada uno de los componentes del IPA; así como, los estudios que complementaron a alguno de estos, como es el caso de los componentes de Recurso, Ambiente y Calidad.

4.1 Componente Recurso

4.1.1 Piezometría

Como parte del comportamiento del recurso hídrico en la zona de estudio, el análisis de la evolución del nivel piezométrico mostró lo siguiente:

A nivel regional, los niveles estáticos mostrados en la carta hidrológica de aguas subterráneas de Matehuala, F14-1 a escala 1:250,000; como se muestra en la Figura 4.1.

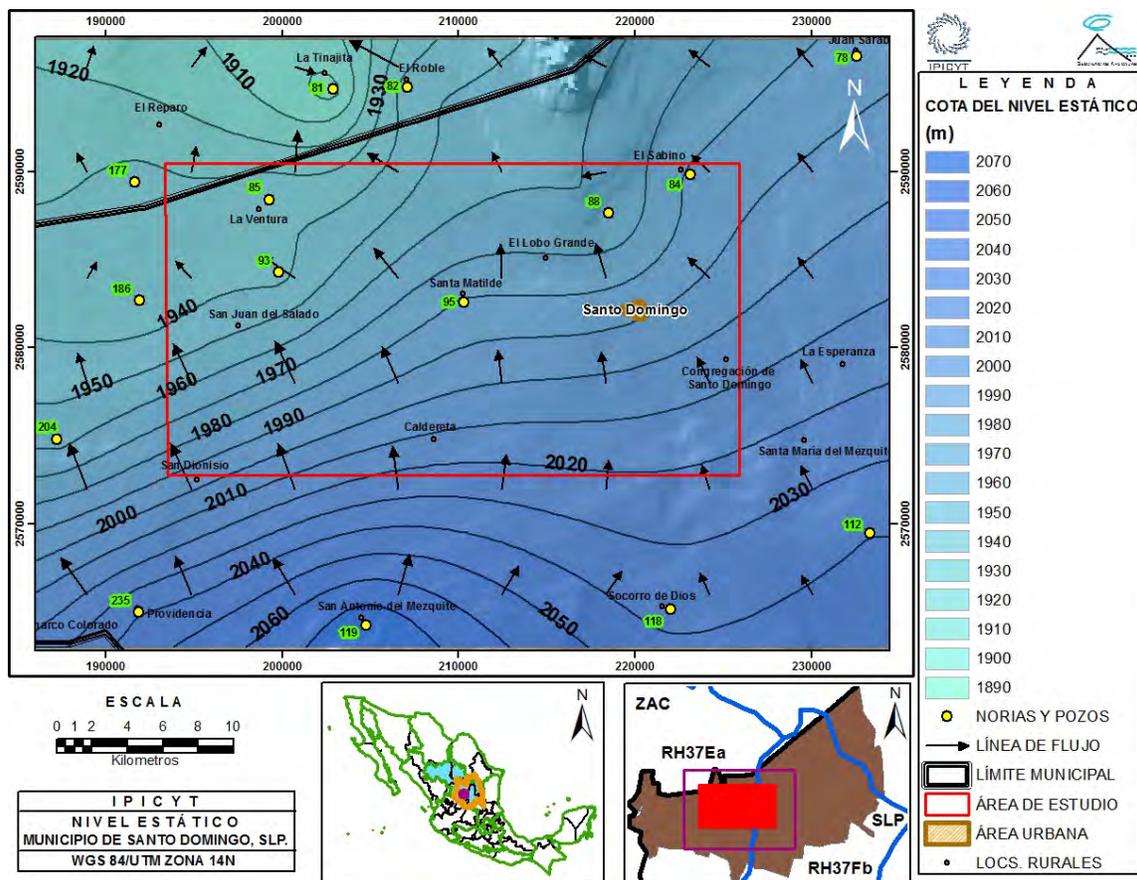


Figura 4.1.- Cota del nivel estático en norias y pozos en el Municipio de Santo Domingo, S.L.P. Tomado del INEGI.

En la Figura 4.1, se observa que la elevación del nivel estático fluctúa de 1890 – 2070 m.s.n.m. de la porción noroeste a la porción suroeste; el nivel estático disminuye de Sur a Norte, específicamente hacia la porción Noroeste. Cabe señalar que las norias y pozos con número 78, 81, 82, 88, 118, 177 y 204 presentan las mayores profundidades en el nivel estático que varían de 20 – 80 m, donde la noria #204 es la mínima y la noria#81 es la máxima. Las norias con número 85, 93, 95, 112, 119, 186 y 235; y el pozo#84, presentan las mínimas profundidades del nivel estático que varían de 3 – 14 m, donde la noria# 95 es la mínima y la noria#93 es la máxima.

Los niveles piezométricos obtenidos durante la campaña del censo piezométrico en este estudio, se ilustran en la Figura 4.2.

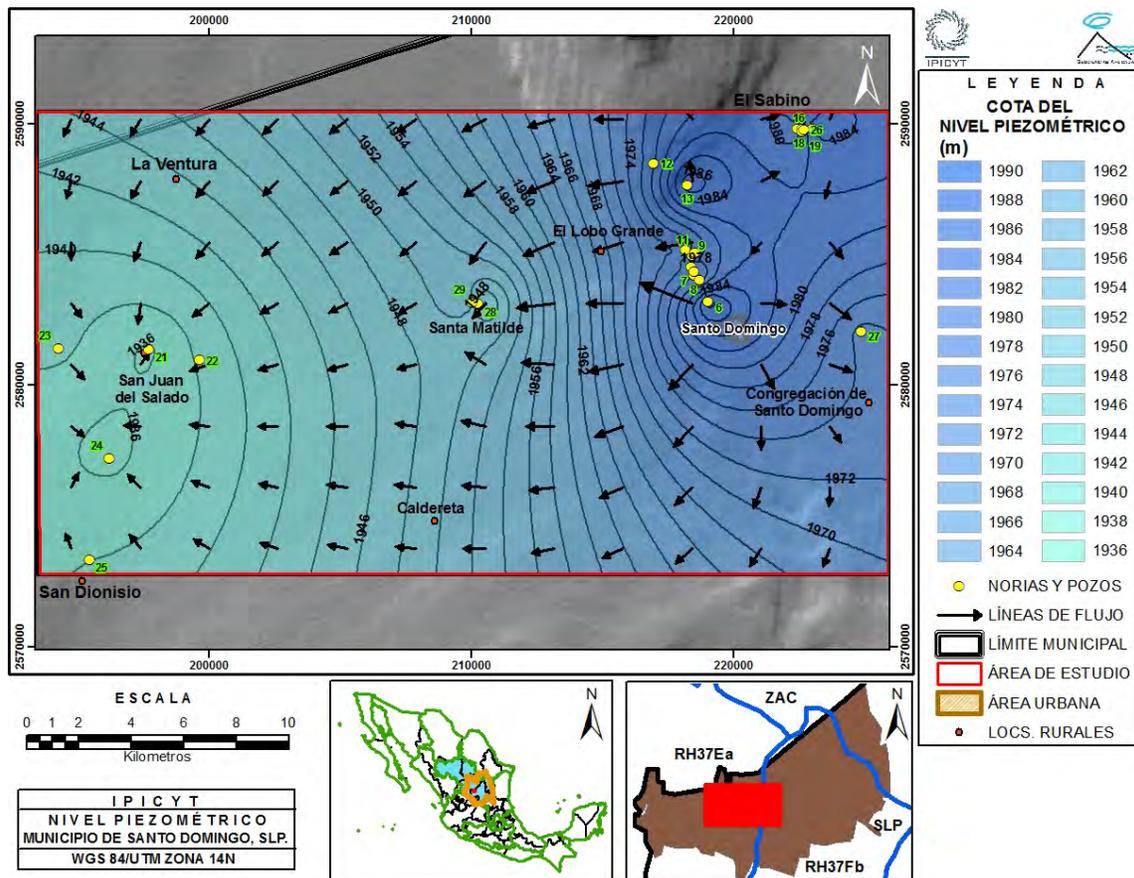


Figura 4.2.- Cota del nivel piezométrico en norias y pozos en la campaña de muestreo de agua subterránea en el Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

En la Figura 4.2, se observa que la elevación del nivel piezométrico fluctúa de 1936 – 1990 m.s.n.m.; en su mayoría tiene una tendencia de la porción este a la porción oeste al igual que la disminución del nivel piezométrico. Cabe señalar que las norias y pozos identificados con el número 12, 13, 22, 24, 25, 27, 28 y 29; localizados en la porción noreste, centro y suroeste; presentan las mayores profundidades en el nivel piezométrico que varían de 23.65 – 48 m, donde el pozo #27 es la mínima y el pozo#25 es la máxima. Las norias identificadas con el número 9, 11, 15, 16, 17, 18, 19 y 26, además del pozo#10; que se localizan en la porción noreste de la zona de estudio; presentan profundidades del nivel piezométrico que varían de 10.78 – 17.5 m, donde la noria#15 es la mínima y las norias# 17 y 26 son las máximas. Las norias con número 6, 7, 14, 21 y 23, además del pozo#8; que se localizan a los alrededores de la Cabecera municipal de Santo Domingo y al este de la zona de estudio; presentan las mínimas profundidades del nivel piezométrico que varían de 2.38 – 9.27 m, donde la noria#23 es la mínima y la noria#14 es la máxima.

Como se aprecia en las Figuras 4.1 y 4.2, hay diferencia en la dirección de flujo, sin embargo, hay que tomar en cuenta que las escalas son diferentes. En este estudio, el flujo tiene una dirección Este – Oeste donde se presenta un cono de abatimiento hacia el Oeste en el poblado de San Juan del Salado. Además, las mayores elevaciones se localizan en las cercanías de la localidad de Santo Domingo, en donde existen cuerpos de agua superficiales.

4.1.2 Exploración geofísica

Otra de las actividades de gran importancia fue la exploración geofísica que se enfocó a determinar las dimensiones y comportamiento de las diferentes litologías presentes en la zona de estudio; por lo que se obtuvieron 3 secciones que la cubren. Cada una de ellas se describirá a continuación:

4.1.2.1 Sección 1 (SEV16-SEV1)

Esta sección se ubica al norte de la zona de estudio. La constituyen los SEV's 1, 4, 7, 10, 13 y 16, las aperturas máximas de los electrodos AB/2 utilizadas fueron de 450 m, la dirección que sigue la sección es E-W con una separación entre cada SEV de 2.5 a 7 km.

La sección es perpendicular a las estructuras que se manifiestan en superficie en la Sierra El Sabino. Los tipos de curvas que componen la sección son las de tipo KQQ, KQH, KQQQ y KQ.

En la pseudosección de resistividades aparentes (Figura 4.3a) se observa una zona más resistiva (200 – 350 Ωm) ubicada entre los SEV's 13, 10 y 7. En las regiones laterales de la sección se observan zonas con resistividades bajas (150 – 50 Ωm) ubicadas en los SEV's 16 y 1.

La sección geoelectrica 16-1 (Figura 4.3b) interpretada en base a resistividades reales se identificaron 4 unidades geoelectricas. Sin embargo, en la superficie a poca profundidad se denotan 2 unidades extras que muestran valores de resistividad de 10.84 – 607 Ωm y 886 – 11,154 Ωm , respectivamente; además, sus espesores varían 0.5 a 1 m.

La primera unidad geoelectrica se observa a lo largo de la sección con valores de resistividad de 23.8 – 248 Ωm con variaciones de espesor de 32 m al W (SEV 16), 59 a 45 m al centro (SEV's 13 y 7) y 11 m al E (SEV 1). La segunda unidad geoelectrica solo se localiza a las regiones laterales de la sección (SEV's 16 y 1) con resistividades de 18.5 y 10.3 Ωm ; y espesores de 154 y 92.6 m, respectivamente. La tercera unidad geoelectrica se manifiesta en la mayoría de los SEV's menos en el SEV 16 con resistividades de 1.16 – 9.06 Ωm y espesores de 71.3 m al W (SEV 13), 58.1 m al E (SEV 4) y espesores indefinidos al centro y E de la sección (SEV's 1, 7 y 10). La cuarta unidad geoelectrica se manifiesta en los SEV's 4 y 13 infrayaciendo a las unidades antes mencionadas con resistividades de 1,605 y 272 Ωm , respectivamente.

En la sección geológica (Figura 4.3c) interpretada a partir de las resistividades reales, se interpreta que los valores de 1605 y 272 Ωm , de los SEV's 4 y 13, corresponde a la Formación Indidura (calizas arcillosas con limolitas) constituyendo el basamento rocoso en la sección. Las resistividades de 1.16 a 9.06 Ωm , SEV's 4, 7, 10 y 13, se correlacionan con la Formación Caracol (areniscas-lutitas). Con resistividades de 10.3 y 18.45 Ωm , SEV's 16 y 1, corresponden a depósitos lacustres (intercalaciones de limos, arcillas, arenas y caliche). Posteriormente, las resistividades que abarcan de 23.8 a 78.1 Ωm se

identificó como conglomerado. Hacia la parte superficial se presentan resistividades de 1,341.4 hasta 11,154 Ωm se le asigna caliche que en algunas ocasiones se manifiesta en superficie; sobreyaciendo a esta se identifican resistividades que varían de 10.84 Ωm a 607 Ωm correspondiente a una delgada capa de aluvi3n.

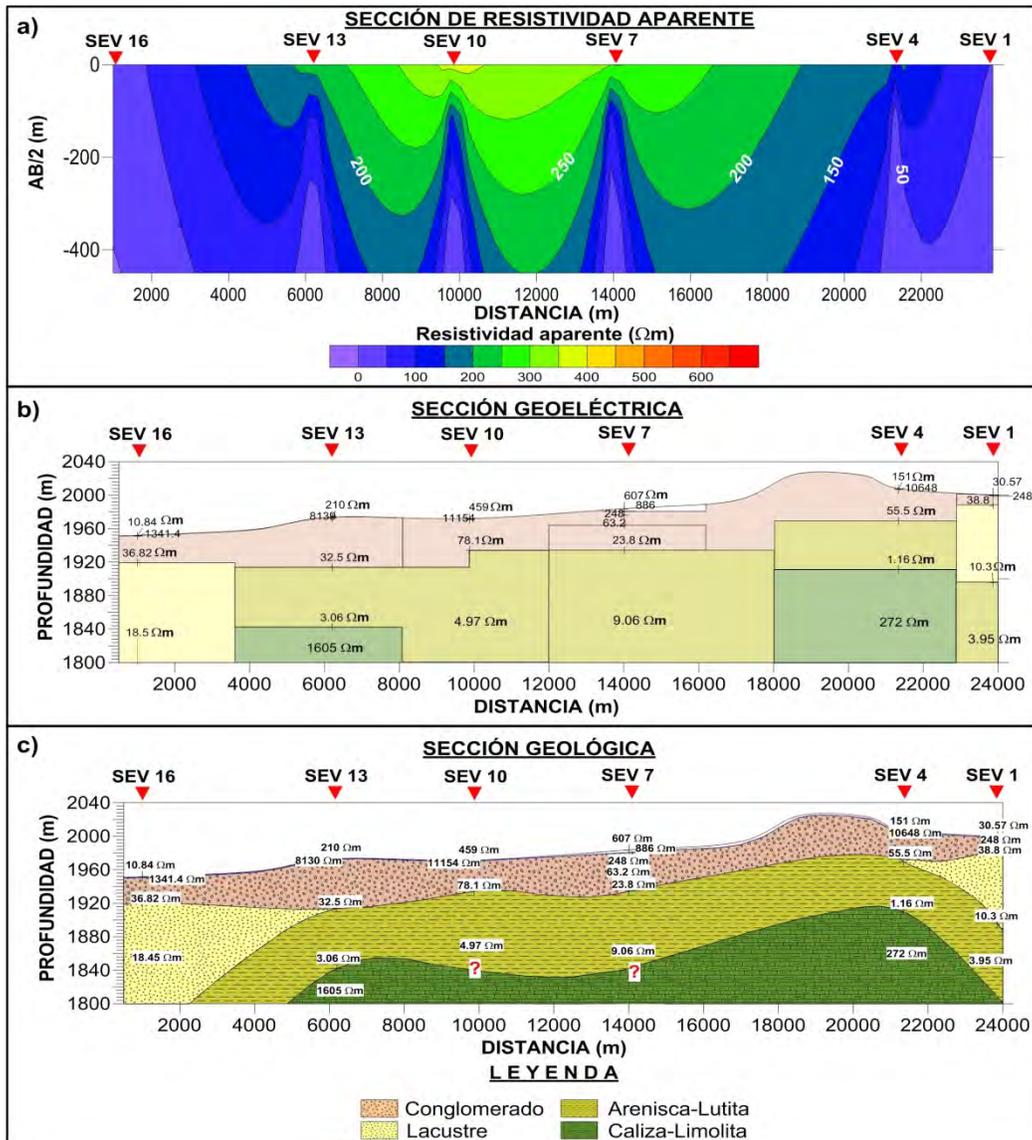


Figura 4.3.- Sección 1 (SEV16-SEV1); a) Pseudosección de resistividad aparente, b) Sección geoelectrica, c) Sección geológica.

En la Figura 4.3, se observa que basados en las resistividades reales obtenidas, se considera que el SEV-16 se alcanzó una unidad con condiciones favorables (18.45 Ωm); sin embargo, lateralmente no tiene continuidad. En el caso del

conglomerado, este muestra valores de resistividad aceptables, pero por su posición estratigráfica funciona como transmisor.

Por otro lado, puede observarse que aunque la caliza pudiera funcionar como acuífero, esta es cubierta por una unidad de baja conductividad hidráulica que impide su posible recarga.

4.1.2.2 Sección 2 (SEV17-SEV2)

Esta sección se ubica al centro de la zona de estudio. La constituyen los SEV's 2, 5, 8, 11, 14 y 17, las aperturas máximas de los electrodos AB/2 utilizadas fueron de 450 m, la dirección que sigue la sección es E-W con una separación entre cada SEV de 4 a 5.5 km.

La sección es perpendicular a las estructuras que se manifiestan en superficie en la Sierra El Sabino. Los tipos de curvas que componen la sección son las de tipo HAKH, KQH, KH y KHKH.

En la pseudosección de resistividades aparentes (Figura 4.4a) se observa que la zona de mayor resistividad (80 – 130 Ω m) ubica en la porción central de la sección entre los SEV's 5, 8, 11 y 14. En las regiones laterales de la sección se observan las zonas menos resistivas (20 – 70 Ω m) ubicadas en los SEV's 2 y 17.

La sección geoelectrica 17-2 (Figura 4.4b) interpretada en base a resistividades reales se identificaron 6 unidades geoelectricas. Sin embargo, en la superficie se denotan 2 unidades extras que muestran valores de resistividad de 27.3 – 162.63 Ω m y 3,035 – 24,980 Ω m, respectivamente; además, sus espesores varían 0.3 a 2 m.

La primera unidad geoelectrica se observa en los SEV's 2, 5 y 11 con valores de resistividad de 9.1, 49.2 y 49.9 Ω m, respectivamente; presentan variaciones de espesor de 53.7 m al Centro (SEV 11), 18 m (SEV 5) y 45.2 m (SEV 2) al E. La segunda unidad geoelectrica se localiza en los SEV's 8 y 14 con resistividades de 495 y 557.5 Ω m; y espesores de 36 y 90 m, respectivamente. La tercera unidad geoelectrica se manifiesta en las regiones laterales de la sección, SEV's 2, 5 y 17, con resistividades de 0.1 – 4.9 Ω m; donde los espesores varían de 71, 22 y 76 m, respectivamente. La cuarta unidad geoelectrica se manifiesta en los SEV's 5, 11 y

17 con resistividades de 17.3, 4.92 y 18.3 Ωm donde solo su espesor se define en el SEV 11 con 76 m ya que en los demás no se alcanza definir su espesor. La quinta unidad geoelectrica se manifiesta en los SEV's 2 y 14 con resistividades 275 y 190.0 Ωm , solo en el SEV 14 se define su espesor en 100 m. La sexta unidad geoelectrica se manifiesta solo al centro de la seccion (SEV's 8 y 11) con resistividades de 809.21 y 3,259 Ωm , cabe mencionar que la ultima capa definida en el en el SEV 14 mostró una resistividad de 906.99 Ωm que podría ser la continuacion de esta unidad geoelectrica.

En la seccion geologica (Figura 4.4c) interpretada a partir de las resistividades reales, se muestra que los valores de 809.21 y 3,259 Ωm , SEV's 8 y 11, corresponde a las rocas metamorficas (metaandesita-metaarenisca) del Terreno Guerrero que se manifiestan en superficie dentro de la zona de estudio denominada Montaña de Manganeso y que constituye el basamento rocoso en la seccion. Las resistividades de 275 y 190.9 Ωm , SEV's 2 y 14, se correlacionan con la Formacion Indidura (calizas arcillosas con limolitas). Las resistividades de 17.3, 4.92 y 18.3 Ωm , SEV's 5, 11 y 17, se correlacionan con la Formacion Caracol (areniscas-lutitas). Con resistividades de 0.1 – 4.9 Ωm , SEV's 2, 5 y 17, corresponden a depositos lacustres (intercalaciones de limos, arcillas, arenas y caliche). Posteriormente, las resistividades que abarcan entre 495 a 557.7 Ωm se identifican como basaltos (andesitas basalticas). Las resistividades 9.1, 49.2 y 49.9 Ωm , SEV's 2, 5 y 11, se identifican como gravas y limos. Hacia la parte superficial se presentan resistividades de 3,035 hasta 24,980 Ωm se le asigna a una capa de caliche que en algunas ocasiones se manifiesta en superficie; sobreyaciendo a esta se identifican resistividades que varian de 27.3 – 162.63 Ωm correspondiente al deposito de aluvion.

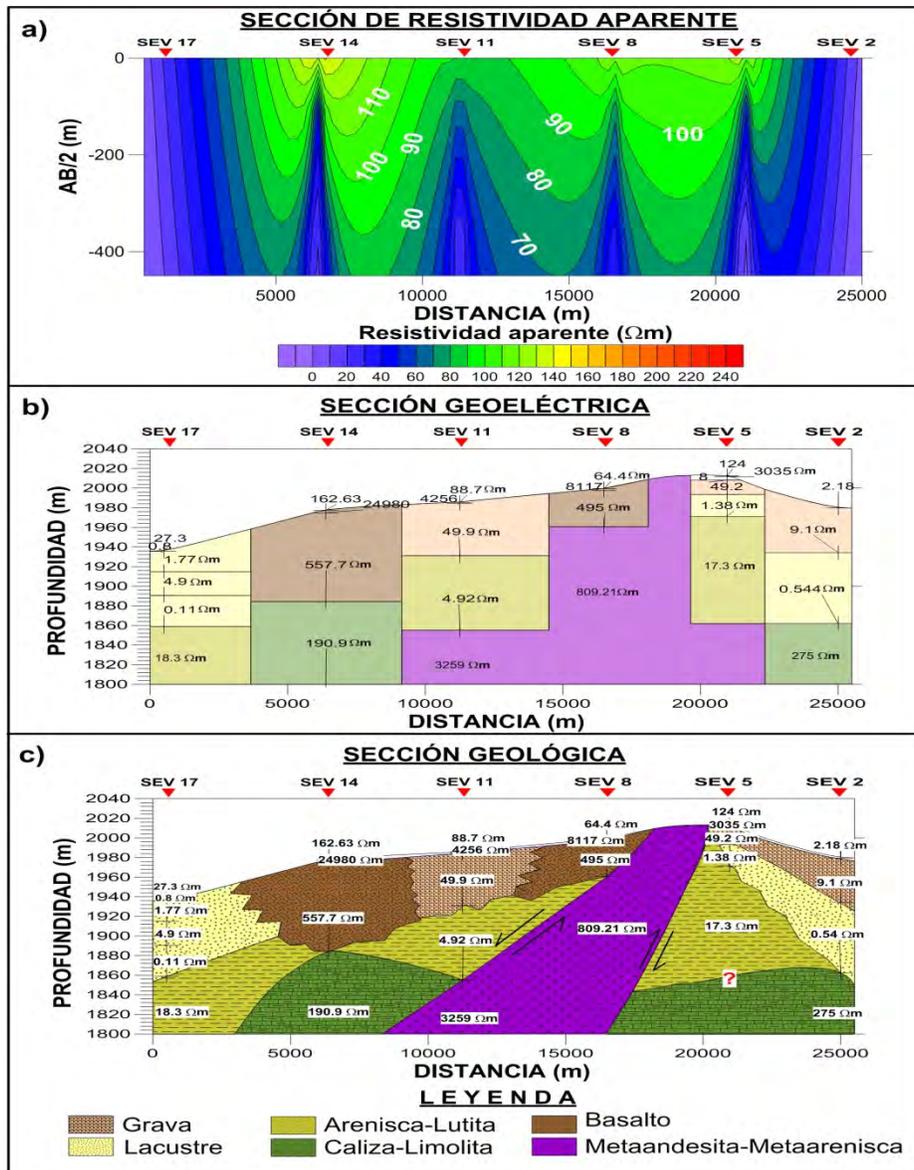


Figura 4.4.- Sección 2 (SEV17-SEV2); a) Pseudosección de resistividad aparente, b) Sección geoelectrica, c) Sección geológica.

Como puede verse en la sección geológica, la región ha sido fuertemente afectada por eventos tectónicos, de tal manera que no hay continuidad lateral de las unidades con condiciones favorables, como es el caso de la caliza (190-275 Ωm) que se encuentra interrumpida por un material muy resistivo que involucra una muy baja conductividad hidráulica, aunado a esto, es cubierta por otra unidad sedimentaria (arenisca-lutita) poco permeable, lo cual impide su recarga. Otras

unidades con resistividades aceptables se encuentran muy superficialmente y no tienen continuidad lateral.

Por otro lado, en algunas unidades se registraron resistividades muy bajas (1.77-0.54 Ωm) que son indicativas de presencia de aguas muy salinas (salmueras) en las unidades superiores.

4.1.2.3 Sección 3 (SEV18-SEV3)

Esta sección se ubica al Sur de la zona de estudio. La constituyen los SEV's 3, 6, 9, 12 y 18, las aperturas máximas de los electrodos AB/2 utilizadas fueron de 450 m, la dirección que sigue la sección es E-W con una separación entre cada SEV de 2.25 a 13.5 km; en la separación mayor fue debido a que en la zona en que se designó el SEV 15 es propiedad privada.

La sección es perpendicular a las estructuras que se manifiestan en superficie en la Sierra El Sabino. Los tipos de curvas que componen la sección son las de tipo KQH, KQQH, KQHK y KHKH.

En la pseudosección de resistividades aparentes (Figura 4.5a) se observa que la zona de mayor resistividad (210 – 410 Ωm) ubica en las porciones laterales de la sección en los SEV's 3, 6 y 18. En la parte central de la sección se observan resistividades menores (190 – 50 Ωm) ubicadas en los SEV's 6, 9, y 12.

La sección geoelectrica 18-3 (Figura 4.5b) interpretada en base a resistividades reales se identificaron 6 unidades geoelectricas. Sin embargo, en la superficie se denotan 2 unidades extras de poco espesor que muestran valores de resistividad de 120 – 663.84 Ωm y 1968.1 – 55,186 Ωm , respectivamente; además, sus espesores varían 0.5 a 2.9 m.

La primer unidad geoelectrica se observa en los SEV's 6, 9 y 12 con valores de resistividad de 28.6, 319, 99.4 y 98.1 Ωm , respectivamente; presentan variaciones de espesor de 23.7 m al Este (SEV 6), 65.6 m y 11.6 m (SEV 9) y 21.1 m (SEV 12) al centro. La segunda unidad geoelectrica sólo se localiza en los SEV's 9 y 12 con una resistividad de 7.9 Ωm y espesor de 16 m. La tercera unidad geoelectrica sólo se manifiesta en la región lateral de la sección, SEV 3, con resistividades de 682.12 y 5213.5 Ωm ; su espesor es de 19 m. La cuarta unidad geoelectrica se

manifiesta en los SEV's 6, 9 y 12 con resistividades desde 0.15 – 11.9 Ωm donde su espesor varía de 140 m en el SEV 9 a 194 m en los SEV's 6 y 12. La quinta unidad geoelectrica se manifiesta en los SEV's 3 y 18 con resistividades 310.7 - 2,821.4 Ωm , sus espesores varían de 42.7 m (SEV 3) y mayor a 140 m (SEV 18). La sexta unidad geoelectrica se manifiesta sólo en el SEV 3, al Este de la sección, con una resistividad de 69,595 Ωm , cabe mencionar que la última capa definida en el en el SEV 18 mostró una resistividad de 85,356 Ωm que podría ser la continuación de esta unidad geoelectrica.

En la sección geológica (Figura 4.5c) interpretada a partir de las resistividades reales, se muestra que el valor de resistividad de 69,595 Ωm , SEV 3, corresponde a las rocas metamórficas (metaandesita-metaarenisca) del Terreno Guerrero que se manifiestan en superficie al sur de la Montaña de Manganeso que constituye el basamento rocoso en la sección. Las resistividades de 310.7 – 2,821.02 Ωm , SEV's 3 y 18, se correlacionan con la Formación Indidura (calizas arcillosas con limolitas). Las resistividades de 0.15 – 11.9 Ωm , SEV's 6, 9 y 12, se correlacionan con la Formación Caracol (areniscas-lutitas). Las resistividades de 682.12 y 5213.5 Ωm , SEV 3, corresponden a un depósito de gravas que sobreyacen a la Formación Caracol. Subsecuentemente, se presentan valores de resistividad de 28.6, 319, 99.4 y 98.1 Ωm correspondiente a un conglomerado. En intercalación con el conglomerado se presenta un depósito lacustre (intercalaciones de limos, arcillas, arenas y caliche) con valores de resistividad de 7.9 Ωm . Hacia la parte superficial se presentan resistividades de 1968.1 – 55,186 Ωm se le asigna a una capa de caliche que en algunas ocasiones se manifiesta en superficie; sobreyaciendo a esta se identifican resistividades que varían de 120 – 663.84 Ωm correspondiente al depósito de aluvión.

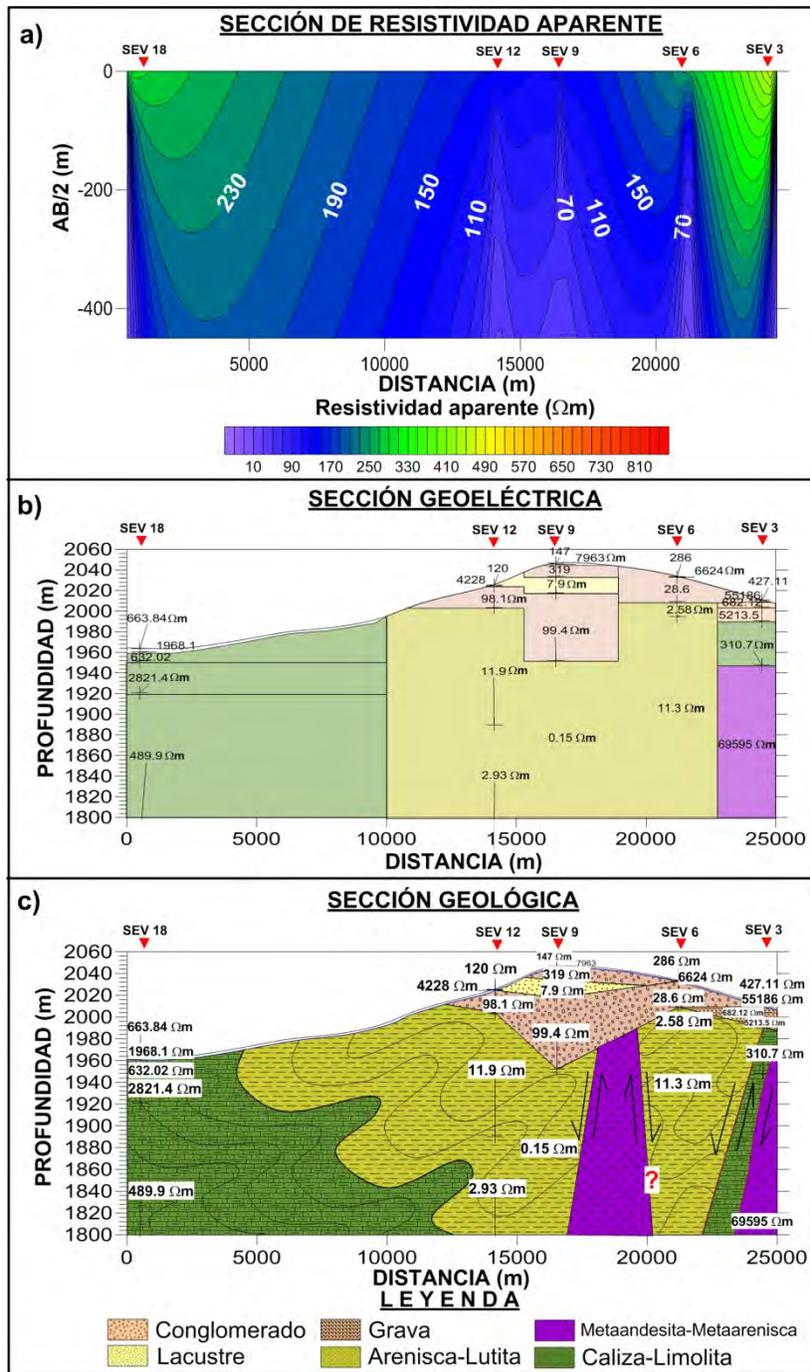


Figura 4.5.- Sección 3 (SEV17-SEV2); a) Pseudosección de resistividad aparente, b) Sección geoelectrica, c) Sección geológica.

En esta unida también puede verse los efectos de del tectonismo, las unidades favorables no tienen continuidad, se encuentran plegadas e interrumpidas por unidades muy resistivas (metamórficas) o de baja resistividad (lutitas) que impiden el flujo subterráneo. Por otro lado, algunas unidades sedimentarias con

condiciones favorables (conglomerados) pero están muy cerca de la superficie, son de pocas dimensiones y no tienen continuidad lateral.

Al correlacionar la información hidrogeológica que propone la CONAGUA respecto a los resultados obtenidos en las secciones geológicas del presente estudio, presentan diferencias importantes, debido a que los tres acuíferos que describe la CONAGUA, no se identificaron en ninguna de las secciones propuestas. En la mayoría de las secciones geológicas propuestas, la litología no presenta continuidad lateral y poco espesor. Aunado, que a profundidad se identificaron intercalaciones de areniscas y lutitas que limitan a la zona por desempeñarse como una capa impermeable. Por otro lado, la geometría de las unidades litológicas en la región es compleja y heterogénea, lo cual dificulta la presencia de unidades litológicas de grandes dimensiones que funcionen como acuíferos.

En este componente se indica la disponibilidad física del agua que existe en el área de estudio y que es utilizada en diferentes actividades humanas. Se consideraron dos subcomponentes: agua superficial y agua subterránea.

Considerando que la precipitación en la región es baja (369 mm/año) y se tienen los valores de radiación más altos de la región (De la Torre-Moreno, 2006), de tal manera que la evapotranspiración de 358 mm/año, por el método de Turc es cercana a la precipitación. La recarga neta ($RN=P-ETR$) es de 11 mm/año.

Al realizar el balance hidrológico como se muestra en la Tabla 4.1, se obtuvo un déficit de 304.67 Mm³/año, el cual es indicativo de una nula recarga al acuífero.

Tabla 4.1 Balance hidrológico en el acuífero el Barril

VARIABLE	VOLUMEN (Mm³/año)
Precipitación media anual	5,993.8
Evapotranspiración	5,786.8
Escurrimiento	511.7
Infiltración	-304.671

El valor de la extracción se calculó en 21.22 Mm³, en base al número y volúmenes de los pozos concesionados en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

Al resolver las ecuaciones (5) y (7), el valor calculado para el agua superficial y el agua subterránea es 0.000171 y 0.25, respectivamente. Por lo tanto, el valor total del componente Recurso, al resolver la ecuación (4), es de 0.248. Traduciendo este valor como una alta restricción en la disponibilidad del recurso.

Por otro lado, aunado al déficit del recurso, como se pudo ver con la información geofísica: el aspecto estructural, la falta de continuidad lateral y vertical de las unidades con condiciones favorables, afectan las condiciones de recarga y almacenamiento del agua subterránea. De tal manera que la cuenca hidrogeológica es compleja y no presenta una geometría continua; así mismo, no tiene grandes espesores y no hay unidades con condiciones favorables para el almacenamiento subterráneo del recurso.

4.2 Componente Calidad (Q)

4.2.1 Hidrogeoquímica

La interpretación de la interacción química entre la geología y el agua nos permite entender y conocer la dinámica de los acuíferos y, a su vez, lograr una mejor planeación en su exploración y explotación. Para ello, en el Valle de Santo Domingo existe escasa información al respecto. Por lo cual, se describirá la clasificación del agua subterránea en base a los resultados obtenidos en la campaña de muestreo realizado en este estudio. En el área de estudio se muestrearon 12 pozos y 13 norias que se localizan en las localidades de El Sabino, Mezquite Verde, San Juan El Salado y Santo Domingo.

En primera instancia, se utilizó el diagrama de Piper, el cual nos permite determinar el porcentaje de concentración para cada anión mayoritario, ubicados en el triángulo derecho inferior, y catión mayoritario, ubicados en el triángulo izquierdo inferior; así como, determinar familias de agua y procesos hidrogequímicos que se plasman en el gráfico en forma de diamante. Los resultados obtenidos para este diagrama se muestran en la Figura 4.6.

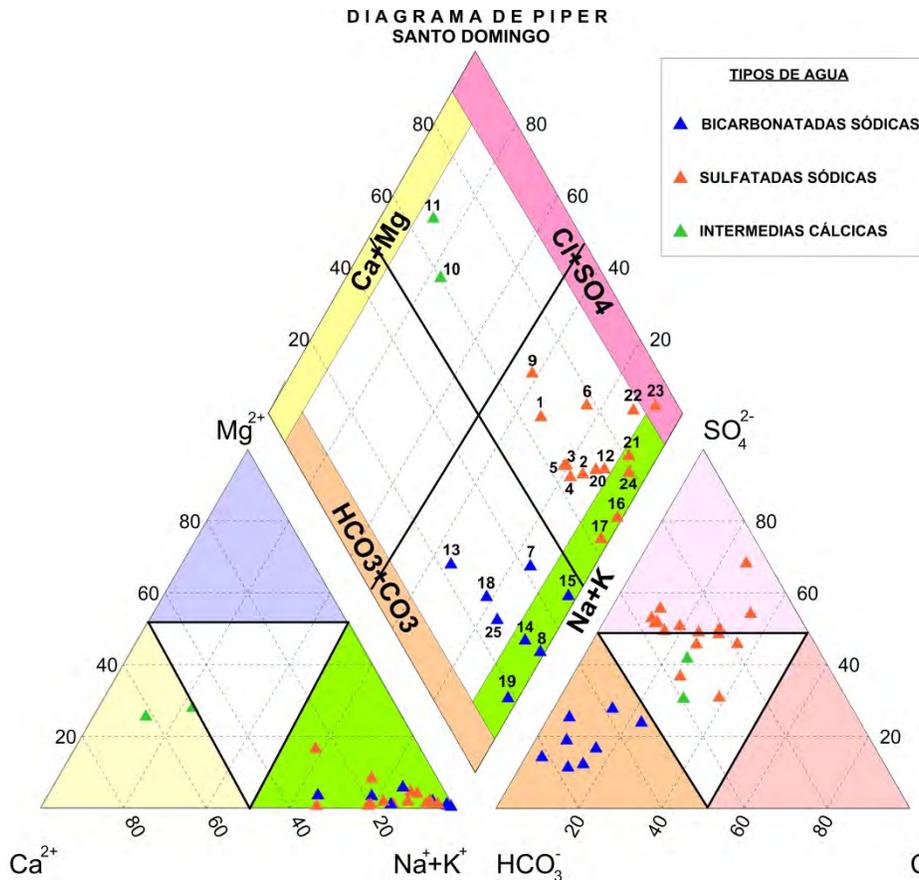


Figura 4.6.- Diagrama de Piper. Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

En la Figura 4.6, se observan que 15 muestras de agua que se clasifican como sulfatadas sódicas, ocho muestras se clasifican como bicarbonatadas sódicas y dos muestras como aguas intermedias cálcicas. Cabe señalar que cuatro muestras clasificadas como sulfatadas sódicas se ubican como intermedias. De forma general, en base a la disposición de las muestras en los triángulos inferiores y al rombo superior, las muestras presentan los procesos químicos como: intercambio iónico con calcita y/o yeso, además, de precipitación de calcita (Hounslow, 1995).

Específicamente, las aguas sulfatadas son aguas consideradas de evolución intermedia con cierto grado de salinidad, la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) presenta valores de 687 – 5,642 mg/L; como el anión sulfato (SO_4^{2-}) es el predominante su procedencia se asocia a la solución materiales sedimentarios salinos y/o la disolución de yeso pues es acorde a la zona de

estudio que presenta alta evaporación que permite la formación de horizontes salinos.

Para el caso de las aguas bicarbonatadas son consideradas de reciente infiltración con predominancia de carbonatos alcalinos, la concentración de TDS varía de 396 – 1,535 mg/L; como el anión bicarbonato (HCO_3^-) es el predominante su procedencia se asocia a la disolución de calizas y dolomías y, en menor medida, la hidrólisis de silicatos. Generalmente, este anión está regido por procesos de disolución-precipitación.

Como las aguas sulfatadas y bicarbonatadas son denominadas como sódicas, donde el catión Sodio (Na^+) procede de la meteorización de silicatos y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y evaporítico. Específicamente para las aguas bicarbonatadas sódicas no presentan problemas de toxicidad pero no son adecuadas para el riego debido a la incorporación de Sodio al terreno, produciendo la alcalinización del suelo.

Finalmente, para las aguas consideradas como intermedias cálcicas no se presenta predominancia sobre algún anión pero, por la ubicación de las muestras en el diagrama de Piper, tienen mayor influencia por una mezcla aniones sulfatados y bicarbonatados; estas muestras presentan concentraciones de 1,068 – 1,132 mg/L. Por otro lado, el catión Calcio (Ca^{2+}) predomina, el cual, está controlada por los procesos de disolución-precipitación en el sistema carbonato-bicarbonato y por el intercambio catiónico con la fase sólida (Na^+ , Mg^{2+} , etc.).

Otro diagrama que se empleó fue el propuesto por H. A. Stiff, el cual despliega la composición de aniones y cationes mayoritarios de una muestra de agua. En el diagrama se dibuja una figura poligonal que muestra dicha composición en miliequivalentes sobre litro (meq/L); de lado izquierdo, los cationes, y del lado derecho, los aniones. Además, permite corroborar la relación espacial y grupal de las muestras de agua en la zona de estudio; y determinar las familias de agua, como se muestra en la Figura 4.7.

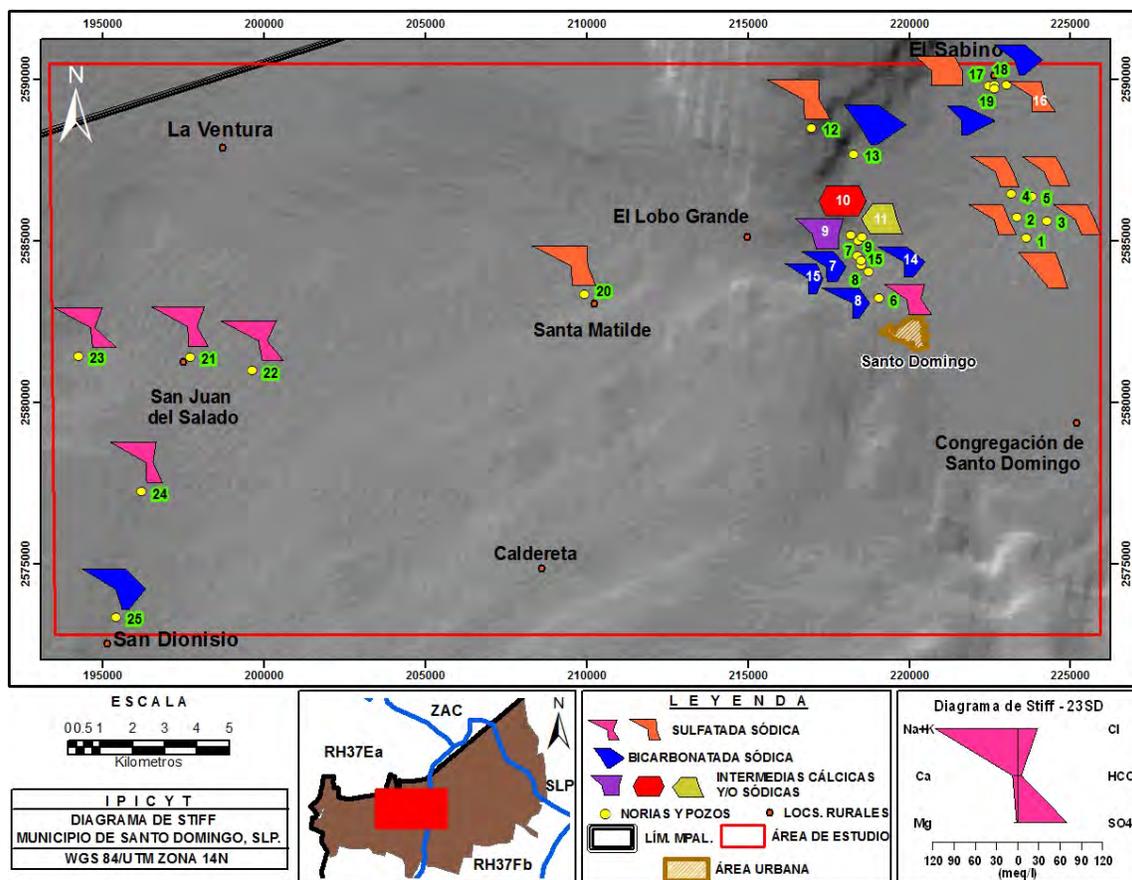


Figura 4.7.- Diagramas de Stiff. Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

En la Figura 4.7, se observa que las muestras se agrupan en diferentes familias, las cuales son: Bicarbonatada sódica (polígono azul), Sulfatadas sódicas (polígonos anaranjados y rosas) e intermedias sódicas y cálcicas (polígonos amarillo, rojo y morado). Para las aguas Bicarbonatadas sódicas se localizan en la porción noreste y, parcialmente, la porción suroeste. Por otro lado, las aguas Sulfatadas se diferenciaron porque presentan como segundo anión dominante al bicarbonato, polígonos azules, y al anión cloruro, polígonos anaranjados; de forma grupal, son las aguas que presentan mayor predominancia en la zona de estudio, ubicándose a las porciones noreste, centro y este. Por último, las aguas intermedias se localizan al centro de la porción noreste y se clasifican como bicarbonatada cálcica (polígono rojo), sulfatada cálcica (polígono amarillo) y clorurada sódica (polígono morado).

Finalmente, se realizó el diagrama de Schoeller, es un diagrama semilogarítmico de las concentraciones de los aniones y cationes mayoritarios, en unidades de meq/L. En el diagrama, las concentraciones de cada ion en cada muestra son representadas por puntos sobre siete líneas verticales espaciadas equitativamente donde los puntos son conectados por una línea. Además, nos indica la correlación grupal de las muestras de agua, así como identificar la jerarquía entre los aniones y cationes, como se muestra en la Figura 4.8.

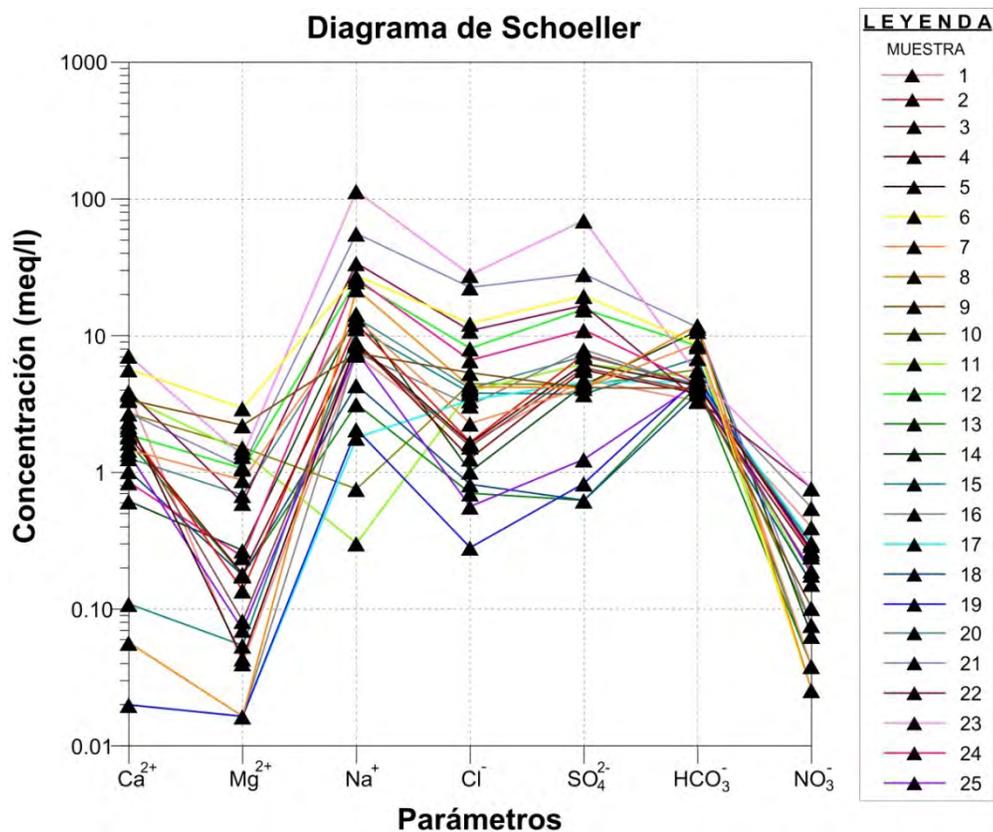


Figura 4.8.- Diagramas de Schoeller. Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

En la Figura 4.8, se puede apreciar que los aniones más predominantes son los sulfatos y bicarbonatos, donde estos últimos presentan una concentración más constante. Con respecto a los cationes más predominantes son el sodio y calcio donde ambos presenta una concentración más dispersa. Por otro lado, la clasificación de agua que se genera en este diagrama coincide con la clasificación propuesta con el diagrama de Stiff y difiere con la clasificación planteada en el Diagrama de Piper para las muestras de agua clasificadas como intermedias.

4.2.2 Calidad del agua para uso humano y agrícola.

En el componente de calidad se evalúan y caracterizan las características químicas del agua para determinar el grado de confiabilidad del recurso en las actividades en que se utiliza. Para ello se consideró los niveles de referencia de la NOM-127-SSA1-1994 y el Índice de Calidad del Agua (ICA), que indica el grado de contaminación del recurso, y la calidad del recurso para uso agrícola relacionando la salinidad y la relación de adsorción de Sodio (SAR) propuesto por el laboratorio de salinidad de Estados Unidos (USLS).

1) Índice de Calidad del Agua (ICA).

Para este índice se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: Potencial de Hidrógeno (pH), Temperatura de la muestra, Conductividad eléctrica, Sólidos totales disueltos, Cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{2-}), Nitratos (NO_3^-), Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}); dichos parámetros son categorizados en base a sus concentraciones e influenciados por factores de ponderación. Por lo tanto, al resolver la ecuación (9) para cada muestra se obtiene un mínimo de 11.78 y un máximo de 74.64, en promedio se obtiene un valor de 47.86; dicho valor se considera con una calidad de agua denominada fuertemente contaminada para la zona de estudio. El valor obtenido para este índice debería clasificarse como excesivamente contaminada que indica que su uso para consumo humano es inaceptable, como se puede también verse en las siguientes gráficas:

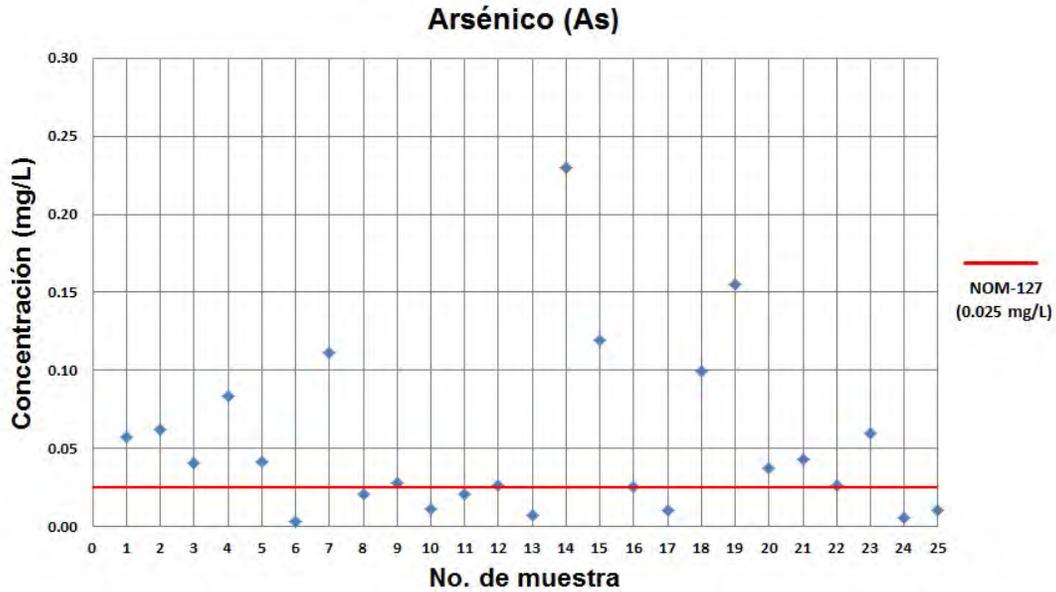


Figura 4.9 Concentración de Arsénico en las muestras del área de estudio con respecto a la NOM-127-SSA1-1994.

En la Figura 4.9, podemos observar que el 68% de las muestras rebasan el límite máximo permisible (0.025 mg/L) para la concentración de Arsénico que estipula la NOM-127-SSA1-1994 que establece los límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. En el área de estudio se registraron valores hasta de 0.23 mg/L, que es un orden de magnitud por encima de la NOM-127-SSA1-1994.

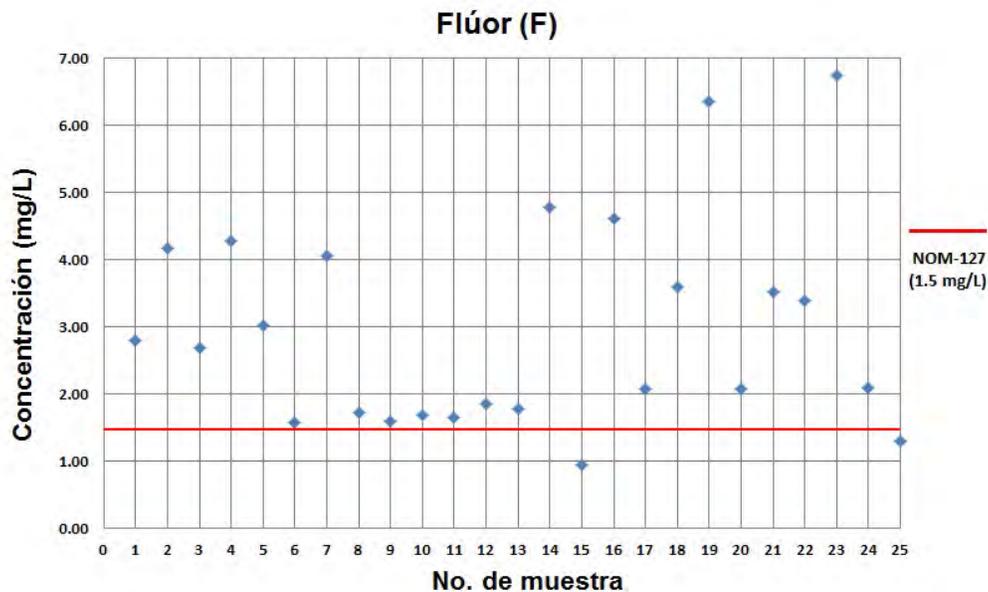


Figura 4.10 Concentración de Flúor en las muestras del área de estudio. con respecto a la NOM-127-SSA1-1994.

En la Figura 4.10, podemos observar que el 92% de las muestras rebasan el límite máximo permisible (1.5 mg/L) para la concentración de Flúor que estipula la NOM-127-SSA1-1994. En este caso, se obtuvieron concentraciones del orden de 6.9 mg/L, es decir, más del cuádruple establecido por NOM-127-SSA1-1994.

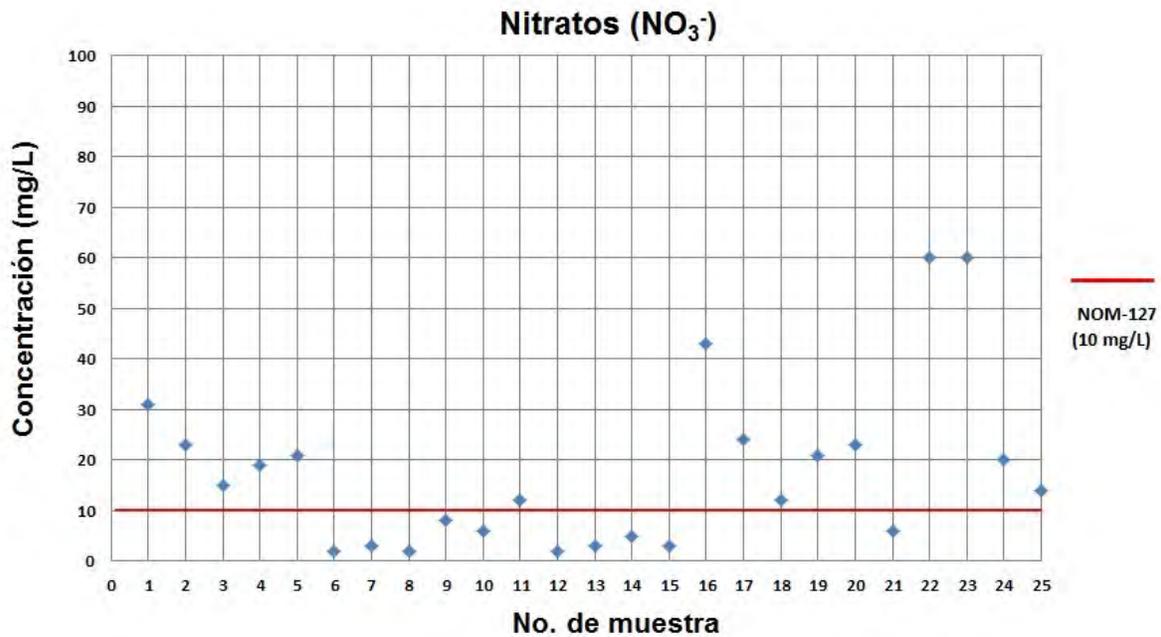


Figura 4.11 Concentración de Nitratos en las muestras del área de estudio con respecto a la NOM-127-SSA1-1994.

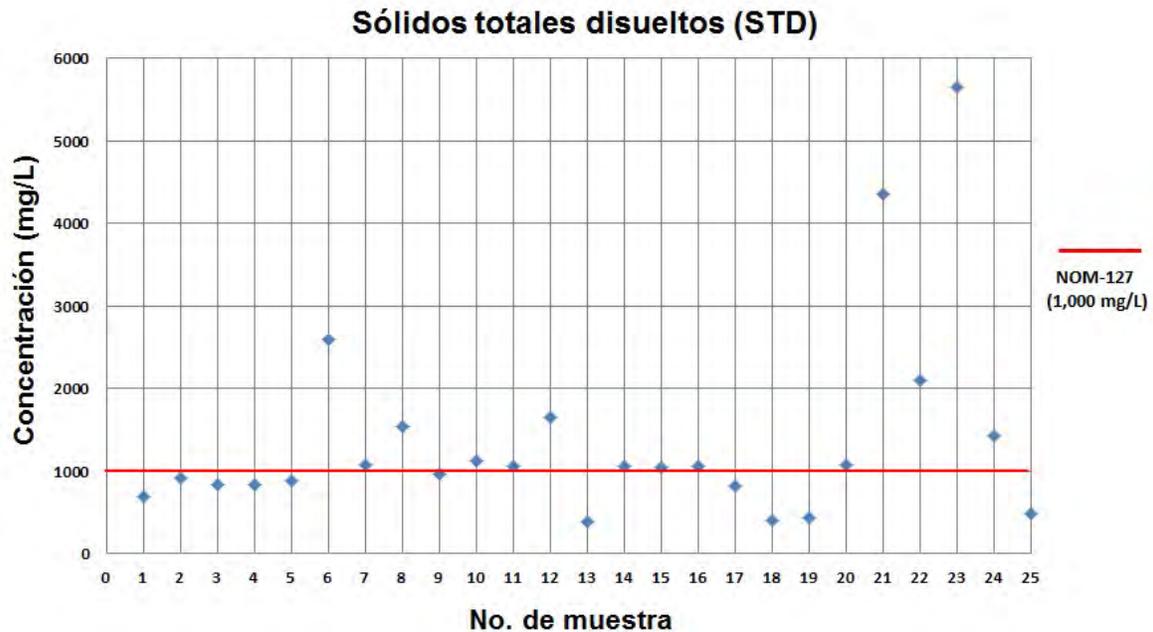


Figura 4.12 Concentración de Sólidos totales disueltos en las muestras del área de estudio con respecto a la NOM-127-SSA1-1994.

En la Figura 4.11, podemos observar que el 60% de las muestras rebasan el límite máximo permisible (10 mg/L) para la concentración de Nitratos que estipula la NOM-127. El muestreo reveló que algunas muestras están seis veces por encima de la norma.

En la Figura 4.12, podemos observar que el 56% de las muestras rebasan el límite máximo permisible (1,000 mg/L) para la concentración de Sólidos totales disueltos que estipula la NOM-127. Los resultados analíticos muestran que en el área de estudio hay agua con contenidos de este parámetro cinco veces por encima de la norma.

También se identificaron dos muestras que rebasan el límite máximo permisible (0.15 mg/L) para la concentración de Manganeseo que estipula la norma antes mencionada. Dichas muestras son las números 6 y 13, con concentraciones de 0.18003 mg/L y 0.18636 mg/L, respectivamente.

En general, el agua subterránea del acuífero de Santo Domingo presenta fuertes problemas de contaminación natural que en algunos de los casos rebasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994. Lo cual es congruente con los resultados obtenidos en el ICA. Durante la campaña de muestreo se observó que algunas poblaciones no cuentan con plantas potabilizadoras ó purificadoras. En general, los centros poblaciones consumen este recurso a pesar de que la calidad del agua es inaceptable en la mayoría de los casos.

2) Relación de Salinidad y Sodicidad.

Para este subcomponente se tomó en cuenta la Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS; meq/l) para cada una de las muestras. Después de determinar tanto la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio para cada una de las muestras, se grafican en la siguiente figura:

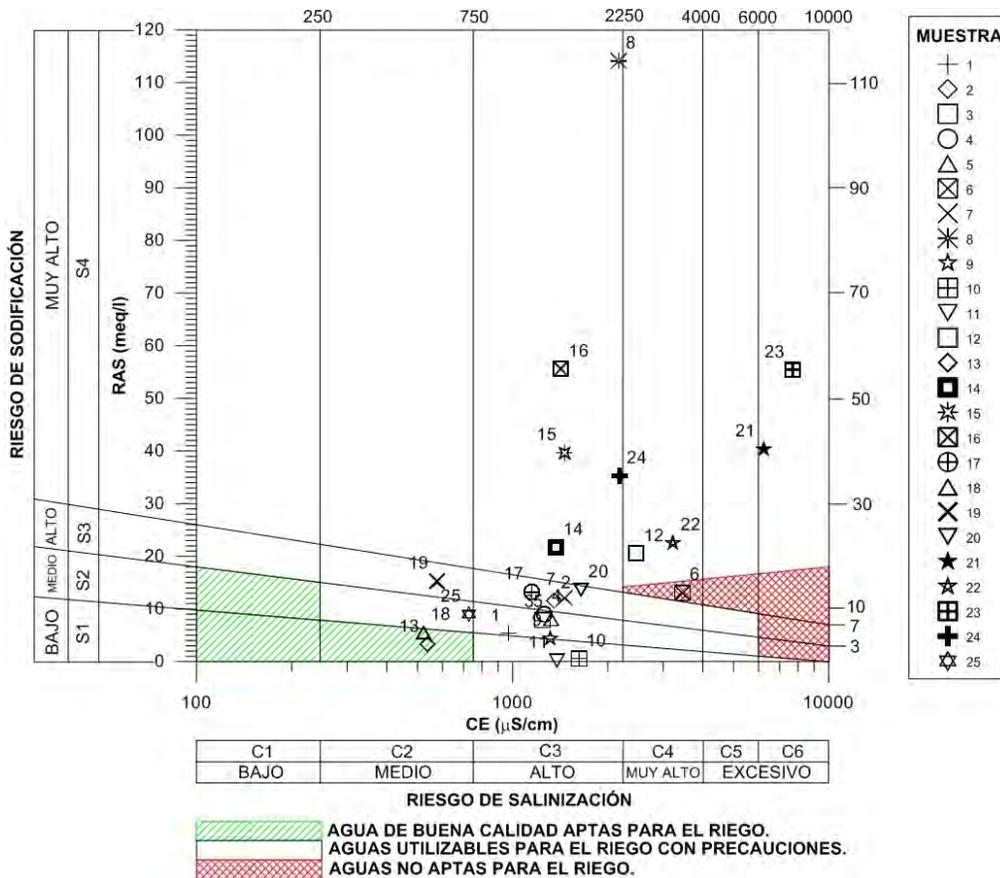


Figura 4.13.- Relación de Salinidad y Sodicidad en muestras de agua del Municipio de Santo Domingo, S.L.P.

En la Figura 4.13, se observa que solo dos muestras (8% del total), 13 y 18, se clasifican como agua de buena calidad apta para riego. Además, 13 muestras (52% del total) se clasifican como agua utilizable para el riego pero con ciertas precauciones, las cuales son denominadas con el número 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 17, 19, 20 y 25. Por otra parte, las 10 muestras restantes (40% del total) manifiestan valores de altos a muy altos en salinidad y sodificación que se clasifican como aguas no aptas para el riego, dichas muestras se denominan con el número 6, 8, 12, 14, 15, 16, 21, 22, 23 y 24.

Por último, para calcular el valor general para la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio se promediaron todos valores de las muestras para cada parámetro, independientemente. De este modo, se obtuvo una conductividad eléctrica promedio de 1,949.88 $\mu\text{S/cm}$ y una relación de adsorción de sodio de

21.51 meq/L; a tales valores se les asignó un porcentaje de confiabilidad del 50 y 25 %, respectivamente, que se clasifica como restringido para uso agrícola.

Al obtener la calidad del agua para consumo humano de la ecuación 28, se obtuvo un valor de 0.057 lo cual refleja los graves problemas de calidad que tiene la región. En cuanto a la calidad del uso agrícola se determinó un valor de 0.37, que también indica serios problemas para esta actividad.

Al resolver las ecuaciones (11) y (12), se obtuvo un valor de 0.350 para el componente de Calidad, el cual refleja la baja calidad del agua utilizada para uso agrícola y consumo humano ya que presenta valores altos en sodicidad y salinidad. Además, en la clasificación del ICA se denomina como fuertemente contaminada.

Por otro lado, esto es congruente con los valores de resistividad muy baja, detectado en la exploración geofísica en la cual la presencia de salmueras en algunas unidades limita su uso para consumo humano y agrícola.

4.3 Componente Uso (U)

Este componente relaciona el uso de agua respecto a las diferentes actividades que se realizan en la zona, las variables que se consideraron fueron: el porcentaje del volumen de agua para las actividades agrícolas y domésticas, así como el porcentaje del valor de la producción agrícola en el Municipio de Santo Domingo. Lo cual representa la eficiencia en el uso del agua. Por lo que a cada uno de estos subcomponentes se describen a continuación:

1) Uso del agua en las actividades domésticas.

En este subcomponente se consultó el Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento de la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) donde especifica los consumos domésticos per cápita en base al clima y condición socioeconómica; por lo tanto, el clima seleccionado es templado en base a su temperatura media anual con un valor de 17.5 °C y se clasificó a la población como una clase socioeconómica media. Al interactuar estas condiciones nos arroja un consumo de 195 litros/habitante/día (l/hab/día), con un consumo máximo de 250 l/hab/día y un consumo mínimo de 100 l/hab/día.

Al resolver la ecuación (13) para obtener el uso del agua a nivel doméstico, se obtiene un valor de 0.367.

2) Uso del agua en la actividad agrícola.

Para este subcomponente se tomó en cuenta el porcentaje de la producción agrícola del municipio de Santo Domingo que asciende al 2.1%; el cual se obtuvo del Servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP) del portal web de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), y el porcentaje del volumen de agua usado en la agricultura que ascendió al 88%, el cual se obtuvo en base a la información desplegada en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) del portal web de la CONAGUA.

Al resolver la ecuación (14) para calcular el uso del agua en la actividad agrícola se obtuvo un valor de 0.024.

Por lo tanto, al resolver la ecuación (15) , los dos subcomponentes para el uso del agua, se obtiene un valor de 0.038, el cual es coherente pues a pesar de utilizar más del 80% del agua subterránea en la agricultura, la producción agrícola del municipio representa un bajo porcentaje en la producción a nivel estatal. Además, que menos del 1% del agua subterránea es utilizada en las necesidades básicas de la población.

4.4 Componente Acceso (A)

En este componente se toma en cuenta la relación que existe entre las necesidades básicas de agua y saneamiento para los países basados en la agricultura relativamente pobres, reconociendo que la disponibilidad de agua para el cultivo es tan importante como para el consumo doméstico y humano. Por lo tanto, se consideraron 3 subcomponentes a evaluar, de los cuales se obtuvo lo siguiente:

1) Porcentaje de la población con acceso a agua potable (A_{ap}).

En este primer parámetro se obtuvo que el 43% de la población tiene acceso a agua potable según el plan de desarrollo municipal (2009 – 2012).

2) Porcentaje de la población con acceso a saneamiento(A_s).

En el municipio de Santo Domingo, no existe infraestructura destinada al saneamiento de las aguas residuales por lo que su destino es a cuerpos de agua y resumideros generando contaminación y riesgos de salud en las personas que viven a las inmediaciones (CEFIM, 2012; Ayuntamiento de Santo Domingo, 2009).

3) Relación de las tierras cultivables entre las tierras con acceso al riego (A_r).

En este concepto se consultó el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) que proporciona la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) donde se tiene un registro, para el año 2010, de 32,495 Ha de superficie agrícola total del municipio de Santo Domingo de las cuales 1,400 Ha son superficie agrícola destinada a riego.

Por lo tanto, al resolver la ecuación (9) se obtiene un valor total del componente Acceso de 0.353. Este valor es acorde al área de estudio debido a diferentes datos estadísticos, por ejemplo: menos del 50% de la población (5,178.5 habitantes) del municipio de Santo Domingo reciben agua potable, no existe infraestructura destinada para el saneamiento de las aguas residuales generadas en el municipio que ascienden a 1'761,288.75 litros/día y, para el año 2010, la superficie de las tierras destinadas para riego es aproximadamente 11.5 veces menor que la superficie que destina el municipio con mayor producción, Villa de Ramos 16,160 Ha.

4.5 Componente Capacidad (C)

Este componente se relacionan las variables socioeconómicas de la población, como el índice de ingresos, el Coeficiente de Gini, la mortalidad infantil y el índice de educación; que tienen un impacto sobre el acceso y la calidad del agua, así como tener en cuenta una medida sobre la distribución variable de los ingresos. Por lo que a cada uno de estos subcomponentes se describen a continuación:

1) Índice de ingresos (I_i).

Este parámetro nos define la variabilidad económica en ingresos corrientes monetarios y no monetarios. Para lo cual, en base a la información que

desplegada en la página web del INEGI, se obtuvo el ingreso bruto del municipio con un valor de \$34, 704 para el año 2010. Este valor se ajusta al Índice Nacional Bruto (INB) proveniente del Sistema de Cuentas Nacionales del INEGI, determinándose anualmente, en dólares PPC (Paridad de Poder de Compra).

Al resolver la ecuación (17) para calcular el índice de ingreso, se obtuvo un valor de 0.549.

2) Mortalidad infantil (M_i).

En este subcomponente se consideró la relación entre el número anual de muertes infantiles dividido por el número total de nacimientos, natalidad, en dicha zona. Dichos valores se obtuvieron del portal web interactivo denominado Banco de información del INEGI donde el número de defunciones en niños menores de un año para el 2010 fue de cero y para la natalidad fue de 285 nacimientos. Por lo tanto la mortalidad infantil resultante es de cero.

3) Índice de educación (I_e).

Este subcomponente se consideró para medir el progreso relativo de una zona en materia de alfabetización de adultos y asistencia escolar. Los datos utilizados para las ecuaciones (18) y (19) se obtuvieron del Censo de Población y Vivienda del 2010.

De la ecuación (20), para calcular el índice de educación, se obtuvo un resultado de 0.787.

4) Coeficiente de Gini (C_G).

Este subcomponente se obtuvo del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Dicha variable mide la desigualdad económica de una sociedad, mediante la exploración del nivel de concentración que existe en la distribución de los ingresos entre la población; donde sus valores varían de 0 a 1, cuando tienden a cero refleja mayor igualdad en la distribución del ingreso y cuando tiende a uno mayor desigualdad en la distribución del ingreso. Para el municipio de Santo Domingo se tiene un valor de 0.369.

Por lo tanto, los cuatro subcomponentes se combinan y al resolver la ecuación (21) se obtiene un valor total del componente Acceso de 0.632. Este valor toma relevancia por el hecho de que la mortalidad infantil es nula, el valor del índice de ingreso es intermedio y, la relación entre la asistencia escolar y el alfabetismo es alta.

4.7 Componente Ambiente (E)

El componente de Medio ambiente fue evaluado usando sensores remotos. Con esta técnica se determinó el índice de humedad del suelo para dos periodos (2001 y 2011), para los meses de Abril y Octubre, periodos de estiaje y lluvia, respectivamente. Para estos dos periodos se obtuvieron promedios representativos de la región.

Considerando para el mes de abril que corresponde a la época de estiaje y el mayor consumo de agua es de origen subterráneo, en el 2001 se obtuvo un SWI de 0.11975 y para el 2011 el SWI fue de 0.3763, lo que indica que hubo un incremento de 0.25 en el SWI, considerando que cada uno de los promedios del SWI representa una característica específica de humedad en la región la cual se asocia para zonas agrícolas de riego, así como a zonas vegetación abundante y vigorosa de tipo arbustiva y de matorral, es decir, la agricultura se vio beneficiada en el incremento de esta actividad en la región. Por otro lado, los valores mayores de SWI se asocia a lugares de mayor reflectividad como a los depósitos salinos que prevalecen en la región y son puntuales. Esta misma respuesta, se correlacionaban a los cuerpos de agua, a la vegetación muy densa y vigorosa; y áreas urbanas, estas variaciones se muestran la Figura 4.14 y 4.15.

Cabe mencionar que el promedio de precipitación (estación climatológica “San Juan El Salado”) para el mes de abril de 2001 fue de 10 mm, y para el mismo mes en 2011 fue de 1.5 mm. Lo que implica que la precipitación disminuyó; sin embargo, la humedad obtenida para SWI se incrementó, por lo cual se asocia a una actividad antropogénica.

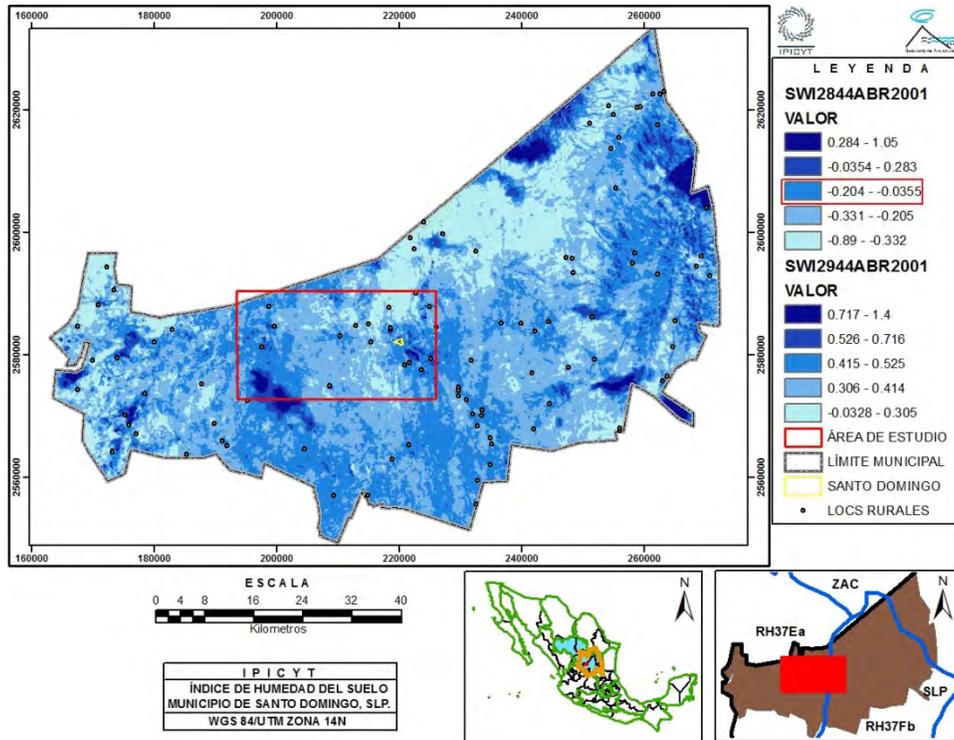


Figura 4.14 Índice de Humedad del suelo (SWI) en el mes de Abril del 2001, Mpio. de Santo Domingo.

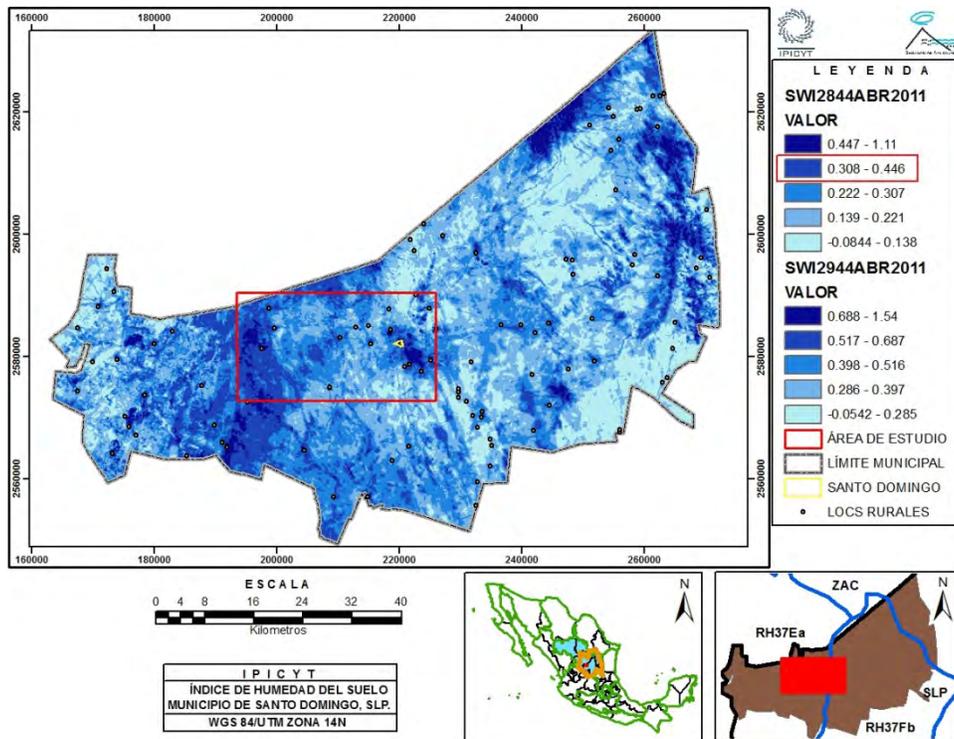


Figura 4.15 Índice de Humedad del suelo (SWI) en el mes de Abril del 2011, Mpio. de Santo Domingo.

Para el mes de Octubre que corresponde a la época de lluvias y el mayor consumo de agua disminuye, en el 2001 se obtuvo un SWI de 0.6583 y para el 2011 el SWI fue de 0.616, lo que indica que durante la temporada de lluvias, esta región se ve poco beneficiada con el recurso hídrico, debido a que no existe un incremento significativo del SWI. Esto se ve reflejado en el incremento de los valores del SWI que se asocian a la vegetación que predomina en los cauces, así como en los cuerpos de agua superficiales existentes en la región, estas variaciones se muestran la Figura 4.16 y 4.17.

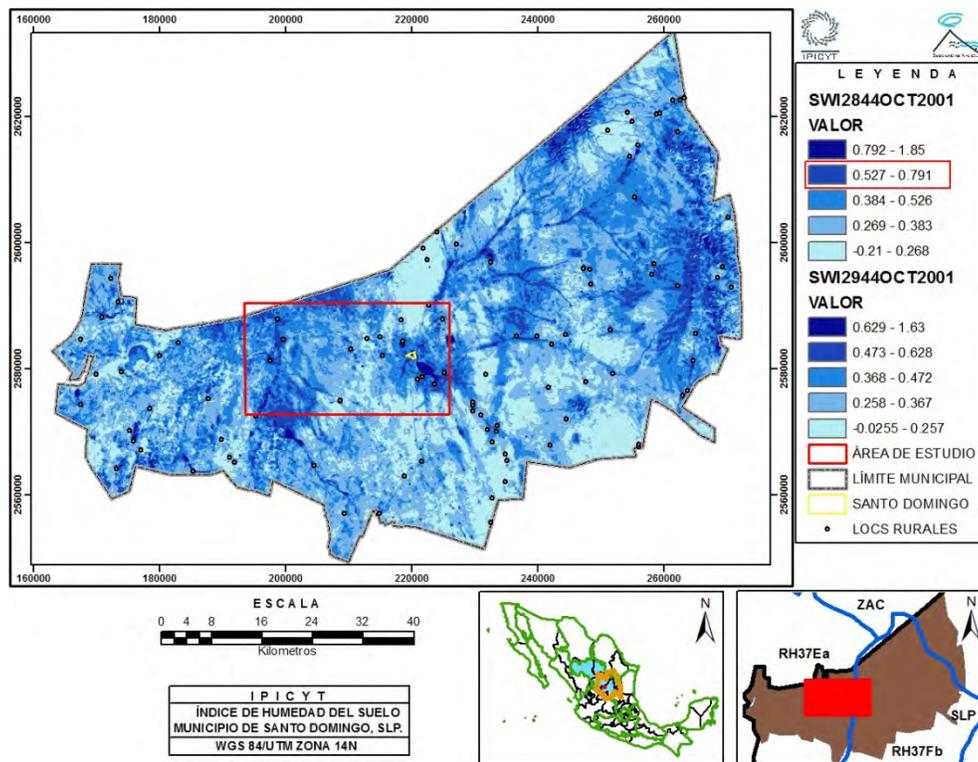


Figura 4.16 Índice de Humedad del suelo (SWI) en el mes de Octubre del 2001, Mpio. de Santo Domingo.

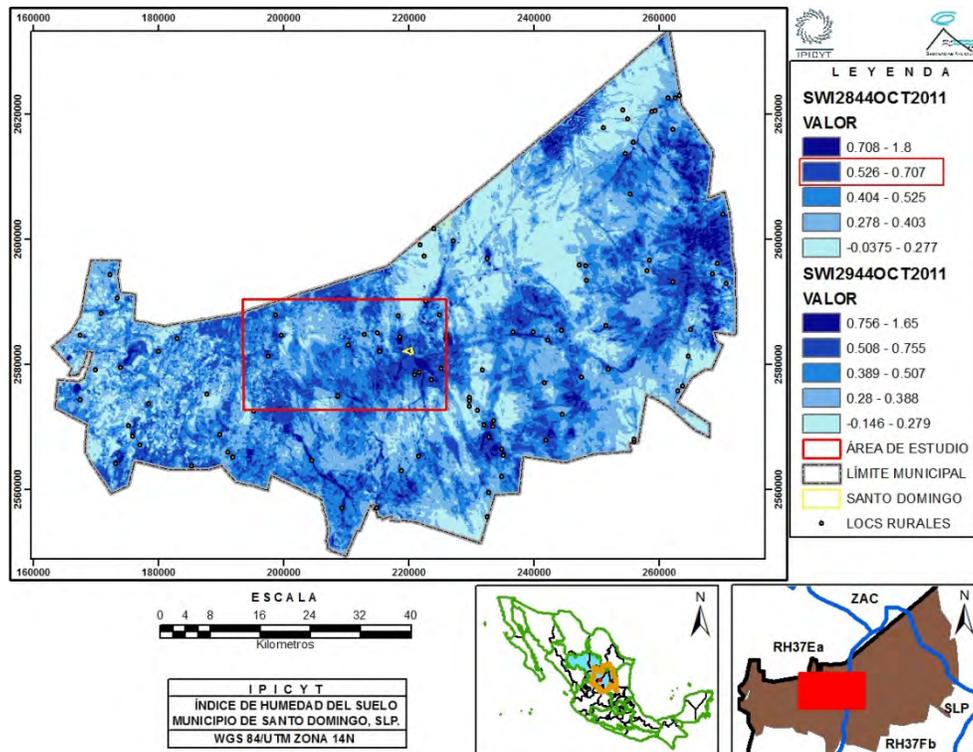


Figura 4.17 Índice de Humedad del suelo (SWI) en el mes de Octubre del 2011. Mpio. de Santo Domingo.

Cabe mencionar que el promedio de precipitación (estación climatológica “San Juan El Salado”) para el mes de octubre del 2001 fue de 1.5 mm y para el mismo mes en 2011 fue de 1.5 mm. Lo que implica que la precipitación se mantuvo en la región y lo cual es congruente con el valor obtenido de SWI que fue negativo, cercano a cero.

Como se pudo apreciar en la comparativa de los 10 años transcurridos, el aumento del SWI puede estar relacionado al incremento en la extracción del agua subterránea, lo cual se traduce en un deterioro del medio ambiente; debido en el que algunos casos se utiliza agua con problemas de salinidad que provoca una disminución en la fertilidad de los suelos.

4.7 Índice de Pobreza del Agua para el Acuífero de Santo Domingo.

En la Tabla 4.2, se presenta la puntuación obtenida para cada componente y su peso; así como, el resultado global del Índice de Pobreza del Agua para para el acuífero de Santo Domingo, S.L.P., cuyo valor fue de 0.28 puntos.

Tabla 4.2. Valores obtenidos para cada componente del IPA para el acuífero de Santo Domingo, S.L.P.

Componente	Calificación	W	IPA
Recurso	0.25	0.3	0.28
Calidad	0.38	0.2	
Uso	0.04	0.2	
Acceso	0.35	0.1	
Capacidad	0.63	0.1	
Medio Ambiente	0.25	0.1	

En general todos los componentes del IPA salen muy bajos, lo cual muestra las condiciones precarias en las que se encuentra el recurso, las condiciones socioeconómicas y ambientales de la región (Figura 4.18).

El polígono resultante para el área de estudio, muestra que el componente de Uso del recurso (0.04) es el más bajo debido a que la producción agrícola en el municipio solo representa el 2% de la producción estatal aunque el porcentaje del volumen del agua para actividades agrícolas sea alto, 88%. Por otro lado, el porcentaje del volumen del agua para actividades domésticas solo representa el 5%. Otro componente que afecta fuertemente al IPA es el recurso (0.25) que como se describió, las condiciones climáticas y geológicas de la región que inciden en la recarga y almacenamiento del recurso. La calidad de agua alcanzó valores bajos (0.38) debido a la salinidad que ésta presenta. Aunque la calidad del agua es mala tanto para uso doméstico, pecuario y agrícola, la población hace uso de ella a causa de la necesidad del recurso.

El Acceso sólo alcanzó un valor de 0.35 debido a que menos del 50% de la población cuenta con agua entubada y el resto tiene un bajo suministro del recurso. Por otro lado, no existe presencia de infraestructura para saneamiento de las aguas residuales que se generan en los centro poblacionales y, por último, la superficie agrícola con disposición de agua para riego representa sólo el 4.3% del total a nivel municipal. El medio ambiente obtuvo un valor de 0.25 debido a las condiciones precarias de los ecosistemas de la región que a su vez se relaciona con las condiciones climáticas de la región. El componente de Capacidad que aunque obtuvo el valor más alto (0.63) no deja de ser precario debido a que el ingreso en ciertos puntos de la población se concentra para actividades agrícolas y el resto se concentra en las actividades terciarias (comercio y servicios). Por otro lado, hay cierta igualdad respecto a la distribución del ingreso y variabilidad económica de la población. Además, este componente es favorecido por el bajo índice de mortalidad infantil.

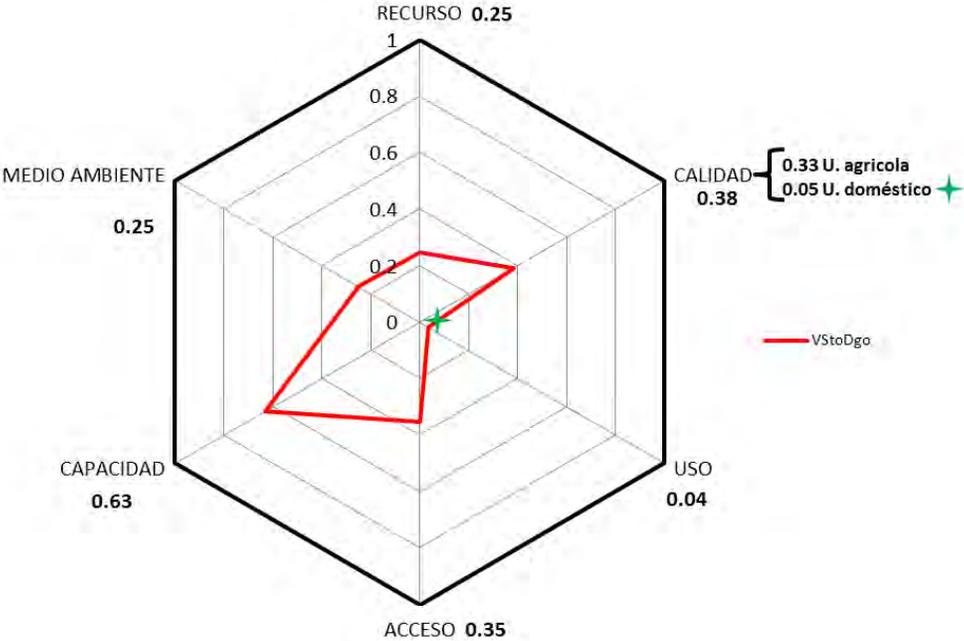


Figura 4.18. Hexágono del IPA normalizado para para el acuífero de Santo Domingo, S.L.P.

Si comparamos este valor, con los normalizados obtenidos por Lawrence et al. 2002, el IPA acuífero de Santo Domingo, S.L.P. (0.28), se encuentra por debajo de los niveles de países subdesarrollados considerados con pobreza hídrica como

Haití (0.351), comparado con otros índices de la región como en el caso de Valle de San Luis Potosí (López-Álvarez, 2013), también es bajo (0.59).

Al compararse el IPA de acuífero de Santo Domingo con el de Valle de San Luis Potosí (VSLP), se puede observar que aunque el VSLP está en condición de minado el acuífero de Santo Domingo se encuentra tiene un escenario más adverso.

En ambos casos el recurso es escaso y el medio ambiente se encuentra deteriorado; sin embargo, el uso para acuífero de Santo Domingo es mucho más bajo que en VSLP, en Calidad, Capacidad y Acceso, se encuentra mejor ubicado el VSLP, como se observa en la Figura 4.19.

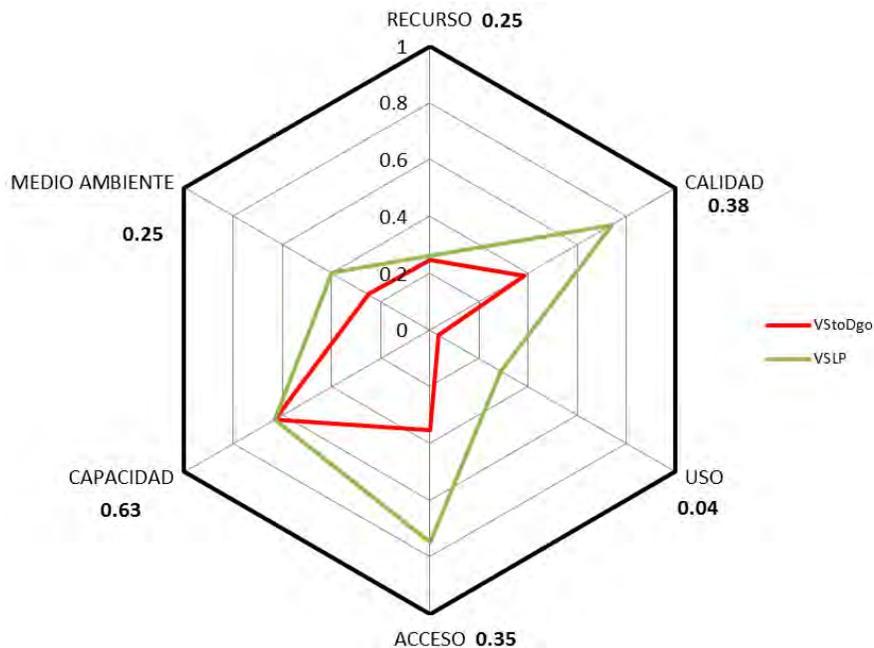


Figura 4.19. Hexágono del IPA normalizado para acuífero de Santo Domingo (VStoDgo) y Valle de San Luis Potosí (VSLP).

El análisis anterior, muestra que aunque ambas zonas tengan problemas con el recurso hay pequeñas diferencias en el manejo del mismo y por otro lado también influye las condiciones socioeconómicas de cada región.

5 Conclusiones

Las condiciones climáticas y geológicas son factores que afectan a la recarga, almacenamiento y calidad del recurso. Por otro lado, el acceso, distribución, manejo y gestión del recurso han sido mal orientadas para el beneficio de la población.

El “acuífero” de Santo Domingo presenta una de las condiciones naturales y antropogénicas más adversas de la región.

En esta región, la precipitación es escasa y la evapotranspiración alcanza valores cercanos a ésta. De tal manera, que la disponibilidad de agua para la recarga del acuífero es casi nula. Debido a la poca agua que alcanza la superficie del terreno, una parte se evapora y una mínima cantidad es infiltrada con efectos de evaporación; lo cual da origen a las salmueras en el acuífero.

Las condiciones sedimentarias en que se formaron las rocas de la región (rocas marinas de cuenca); así como, los procesos tectónicos que la han afectado; hacen que la geometría del acuífero sea compleja y restrinja la conectividad hidráulica de los materiales favorables para el almacenamiento del agua en el subsuelo.

Los resultados de la exploración geofísica mostraron que las rocas favorables para almacenamiento no tengan continuidad lateral ni vertical debido a la presencia de materiales muy resistivos (impermeables).

En algunos sondeos eléctricos verticales se evidenció la presencia de materiales de muy baja resistividad que se correlacionan con la presencia de salmueras en las capas someras.

El análisis químico del agua subterránea permitió clasificar dos principales grupos de agua: uno sulfatado sódico y otra bicarbonatada sódica.

La valoración del Recurso hídrico alcanzó un valor de 0.25 que reflejan las condiciones naturales adversas al área de estudio.

La Calidad del agua obtuvo un valor de 0.38; sin embargo, para el subcomponente para consumo humano se obtuvo un valor de 0.05 debido a presencia de elementos y compuestos tóxicos como el Arsénico, Flúor, Nitratos, Sólidos Totales Disueltos, entre otros.

El Uso del agua presentó el valor más bajo debido a la inequidad de uso para las diferentes actividades del área de estudio.

El Acceso al agua registró un valor de 0.35 debido a que menos de la mitad de la población cuenta con agua entubada y no existe infraestructura para saneamiento de las aguas residuales.

La Capacidad al recurso alcanzó el valor más alto de los componentes del IPA (0.63), debido a que en la región se presenta un alto índice de educación y bajo índice de mortalidad infantil.

El componente de Medio ambiente obtuvo un valor de 0.25, debido a que la zona de estudio se encuentra en una zona árida, éste ecosistema es sensible a las condiciones climáticas y actividades antropogénicas.

El IPA para el “acuífero” de Santo Domingo obtuvo un valor muy bajo de 0.28 debido a que en general todos los componentes del IPA se encuentran en condiciones adversas en las que se encuentra el recurso; así como, a las condiciones ambientales y socio-económicas de una región rural de San Luis Potosí.

Finalmente, esta herramienta multidisciplinaria no solo cuantifica los factores naturales y socioeconómicos nos permite identificar deficiencias en ellos, que en los cuales se pueden traducir como áreas de oportunidad para orientar, en tiempo y forma, estrategias de desarrollo, gestión y manejo del recurso.

6 Referencias

1. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2009, *AGUA: Guía para organismos operadores (agua potable, alcantarillado y saneamiento)*, Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C., México, DF., pp. 14.
2. Owen O., 2000, *Conservación de recursos naturales*, Editorial Pax México, 2da. Edición, México, DF., pp. 22.
3. Miller-Tyler Jr. G., 2002, *Ciencia ambiental: preservemos la Tierra*, International Thomson Editores, 5ta. Edición, México, DF., pp. 64.
4. López-Álvarez B., Ramos-Leal J., Santacruz-De León G., Morán-Ramírez J., Carranco-Lozada S., Noyola-Medrano C. y Pineda-Martínez L., 2013, *Cálculo del Índice de Pobreza del agua en zonas semiáridas: caso valle de San Luis Potosí*, Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 29 (4), pp.250.
5. Sullivan C. A., Meigh J. R., Giacomello A. M., Fediw T., Lawrence P., Samad M., Mlote S., Hutton C. Alan J. A., Schulze R. E., Dlamini D. J. M., Cosgrove W., Delli Priscoli J. Gleick P., Smouth I. Cobbing J., Calow R., Hunt C., Hussain A., Acreman M. C., King J. Malomo S., Tate E. L., O'Regan D., Milner S. y Steyl I., 2003, *The water poverty index: development and application at the community scale*, Natural Resources Forum, 17, pp. 189.
6. Sullivan C. A., 2001, *The potential for calculating a meaningful water poverty index*, International Water Resources Association, Water international, 30 (4), pp. 472.
7. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2012, *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*, Editorial: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México, DF.
8. Pineda-Martínez L. F., Carbajal N., Medina-Roldán E., 2007, *Regionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of México using principal component analysis (PCA)*, Revista Atmósfera, 20 (2), pp. 133 – 145.
9. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2003, *Programa Hidráulico Regional 2002 -2006. Región VII Cuencas Centrales del Norte*, CONAGUA, México, D.F., pp. 34.

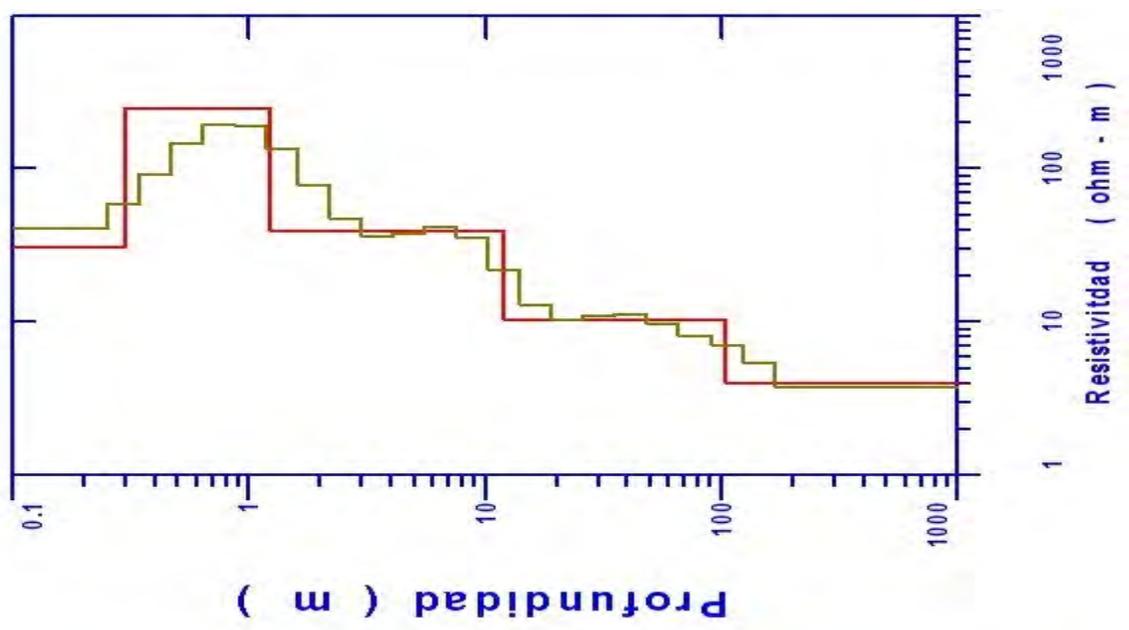
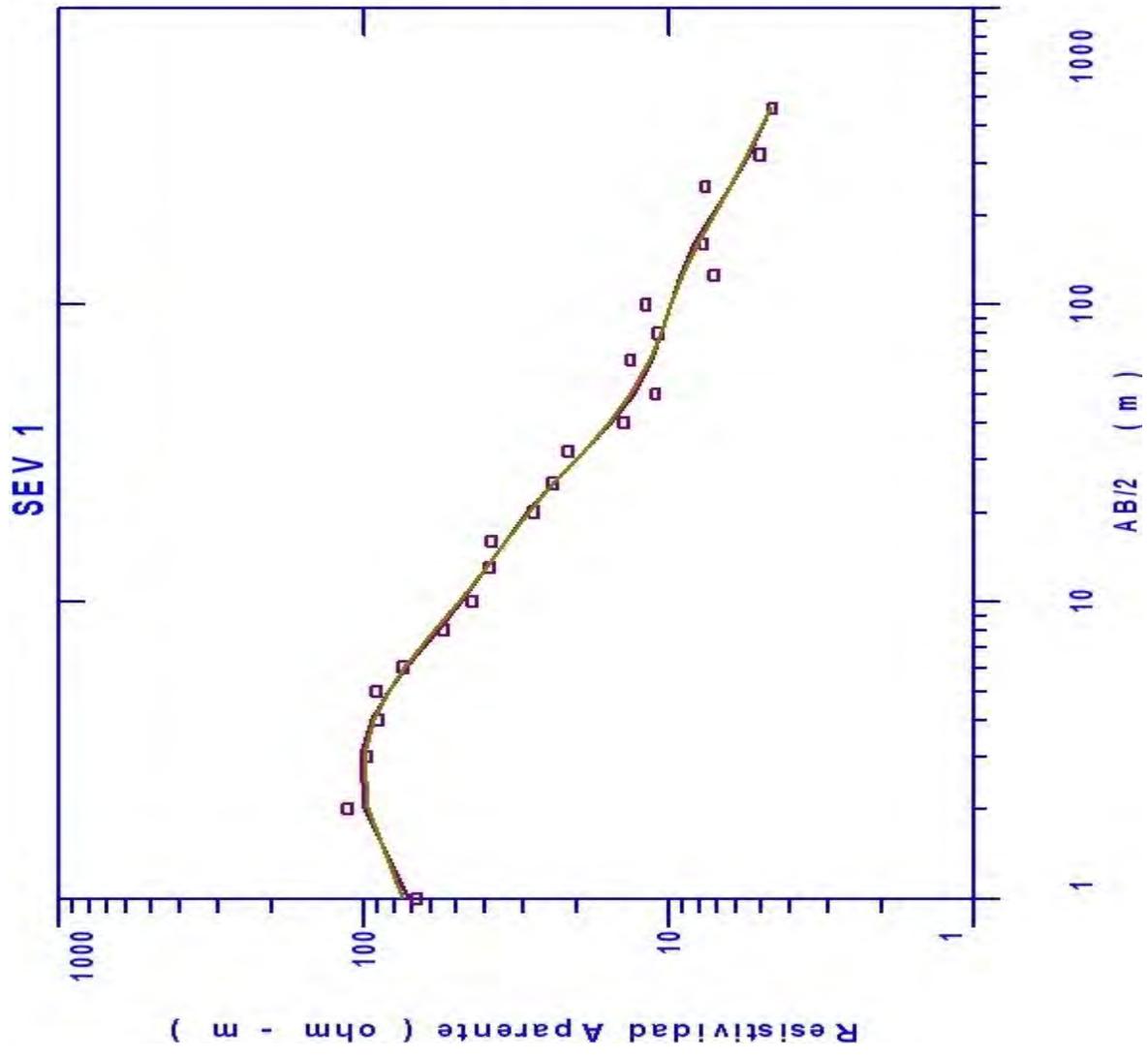
10. Núñez Enrique A., Ruiz M., Chuk D. y Rossini B., 2013, *Determinación de perfiles de humedad en suelos homogéneos a través de un método geoeléctrico*, Ciencia del suelo, 31 (2), pp. 271 – 277.
11. Lawrence P., Meigh J., Sullivan C., 2002, *The Water Poverty Index: an International Comparison*, Keele Economics Research Papers, 19, pp. 1 – 16.
12. Consejo de Recursos Minerales (CRM), Mayo 2001, *Informe final de la carta geológico-minera Villa de Santo Domingo F14-A31 escala 1:50,000*, Pachuca, Hidalgo.
13. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2002, *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero “El Barril”, Estado de San Luis Potosí*, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, México, D.F., Abril.
14. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007, *Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí*, INEGI, Aguascalientes, Ags., pp. 24 – 25.
15. Coordinación Estatal para el Fortalecimiento Institucional de los Municipios (CEFIM), 2012, *Monografías de los Municipios de México: Santo Domingo, San Luis Potosí*, CEFIM, San Luis Potosí, S. L. P., pp. 23.
16. Ayuntamiento de Santo Domingo, 2009, *Plan de Desarrollo Municipal 2009 – 2012: Santo Domingo*, Ayuntamiento de Santo Domingo, San Luis Potosí, S. L. P., pp. 27.
17. Hounslow, Arthur W., 1995, *Water Quality data: analysis and interpretation*, Lewis Publishers (CRC PRESS LLC), U.S.A, pp. 99 – 116.
18. Morán Ramírez J., 2010, *Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí*, Universidad del Noreste (Área de Ciencias de Químico Biológicas), Tesis, Tamaulipas, Tamps., pp. 30.
19. Mohammad Reza Keshavarz, Majid Vazifedoust, Amin Alizadeh, 2014, *Drought monitoring using a Soil Wetness Deficit Index (SWDI) derived from MODIS satellite data*, Agricultural Water Management, 132, pp. 37 – 45.
20. De la Torre Moreno Alma Angélica, Carbajal Pérez José Noel, 2006, *Método para el estudio de la climatología en el estado de San Luis Potosí aplicando*

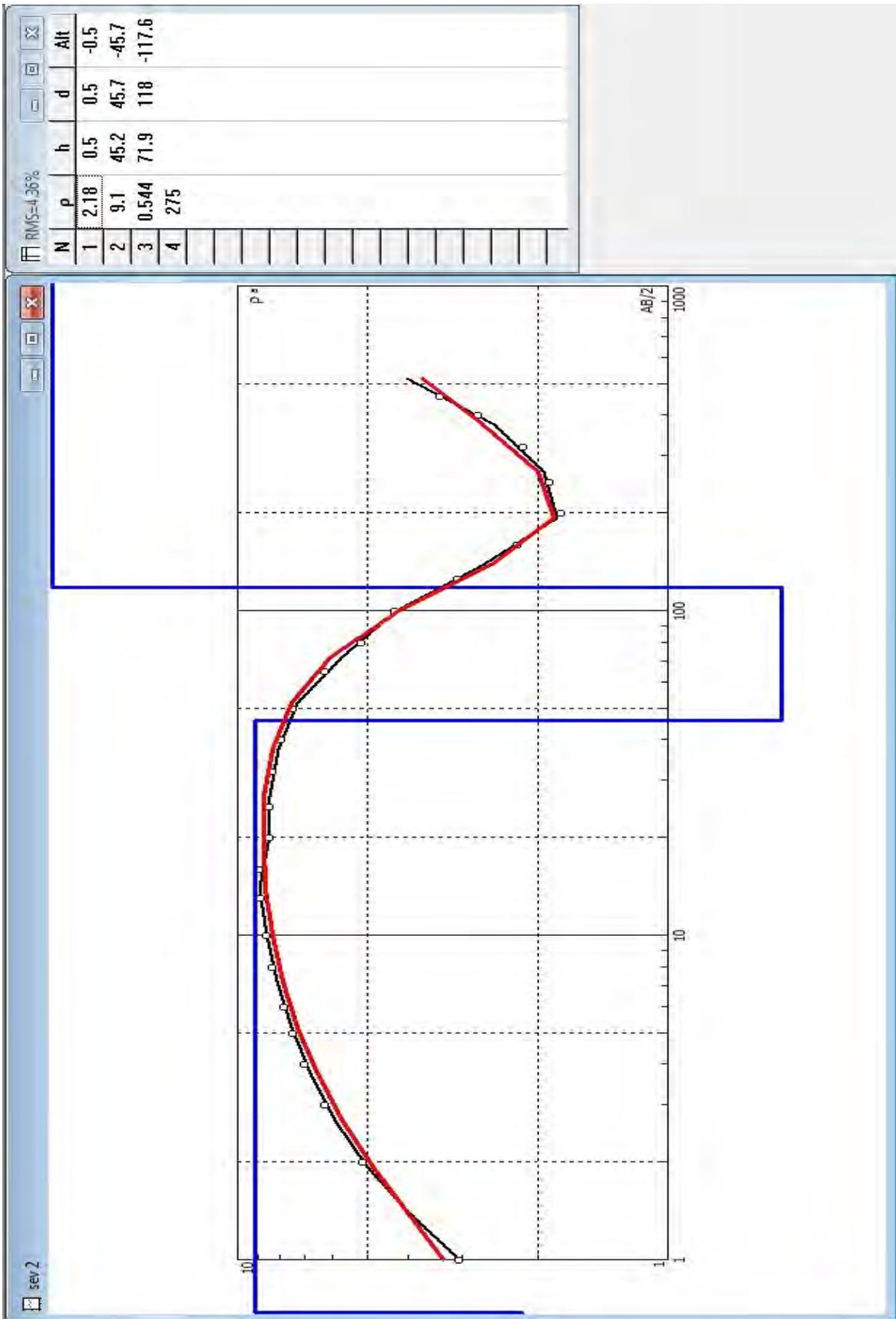
el modelo de circulación atmosférica MM5, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. (IPICYT), Tesis de Maestría, pp. 67-72.

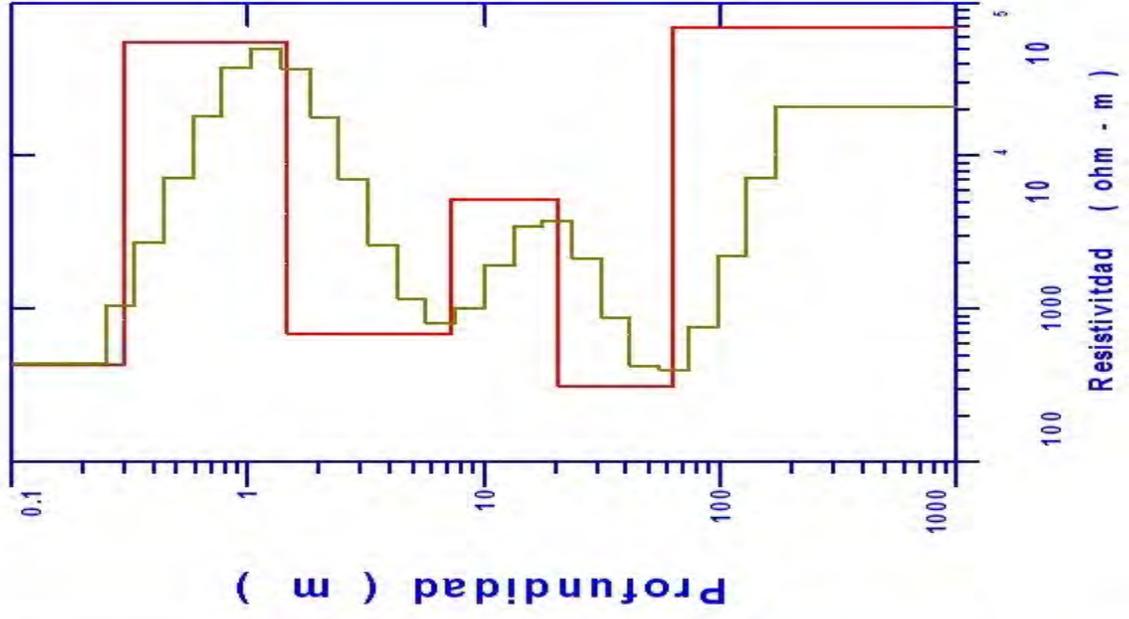
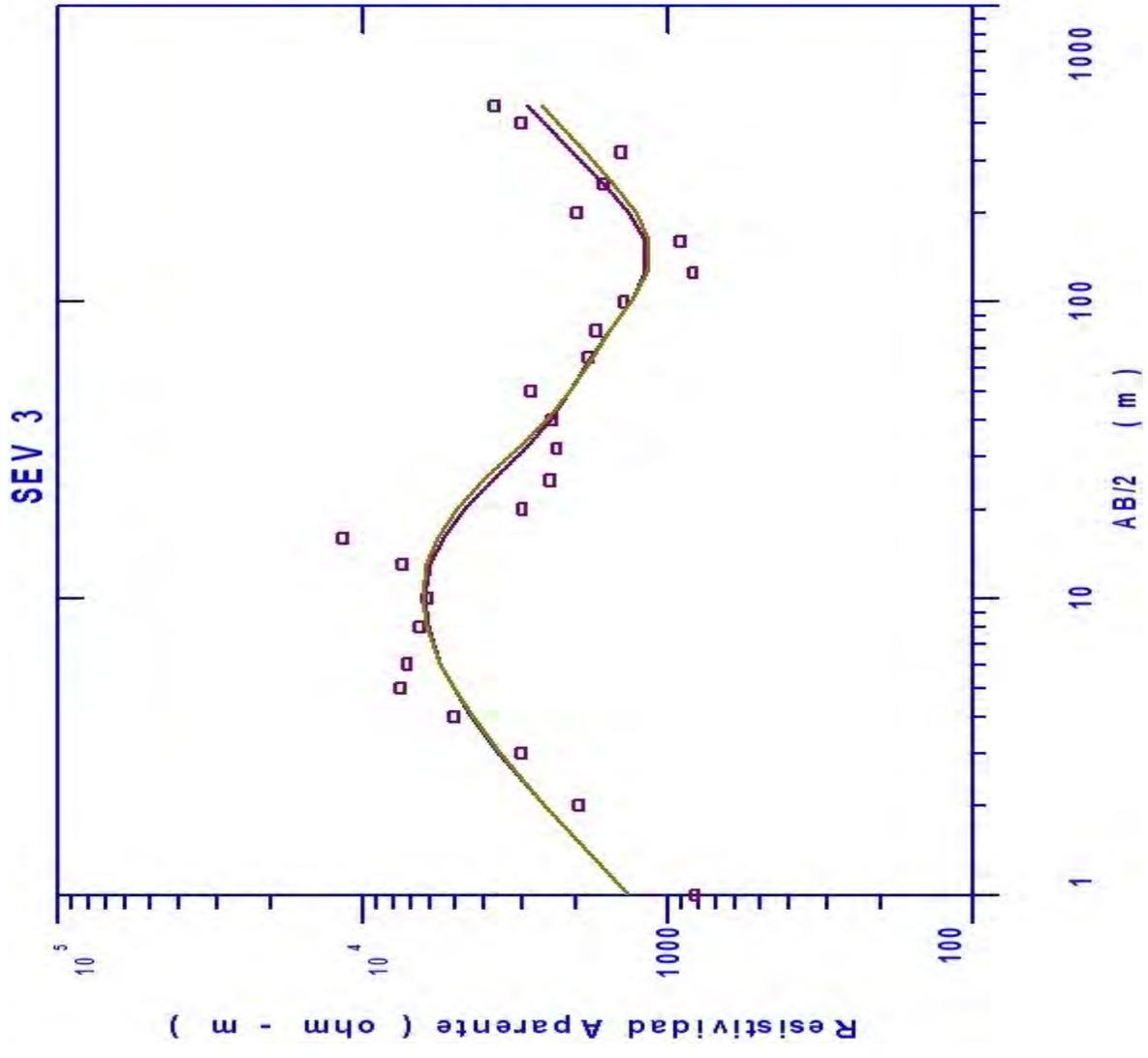
21. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), 2013, *El problema de la desertificación*, Revista Claridades Agropecuarias, No. 238, pp. 32. (<http://www.infoserca.gob.mx/claridades/revistas/238/ca238.pdf>).

7. Anexo

**Modelos de capas resistivas,
curvas de campo y teórica**

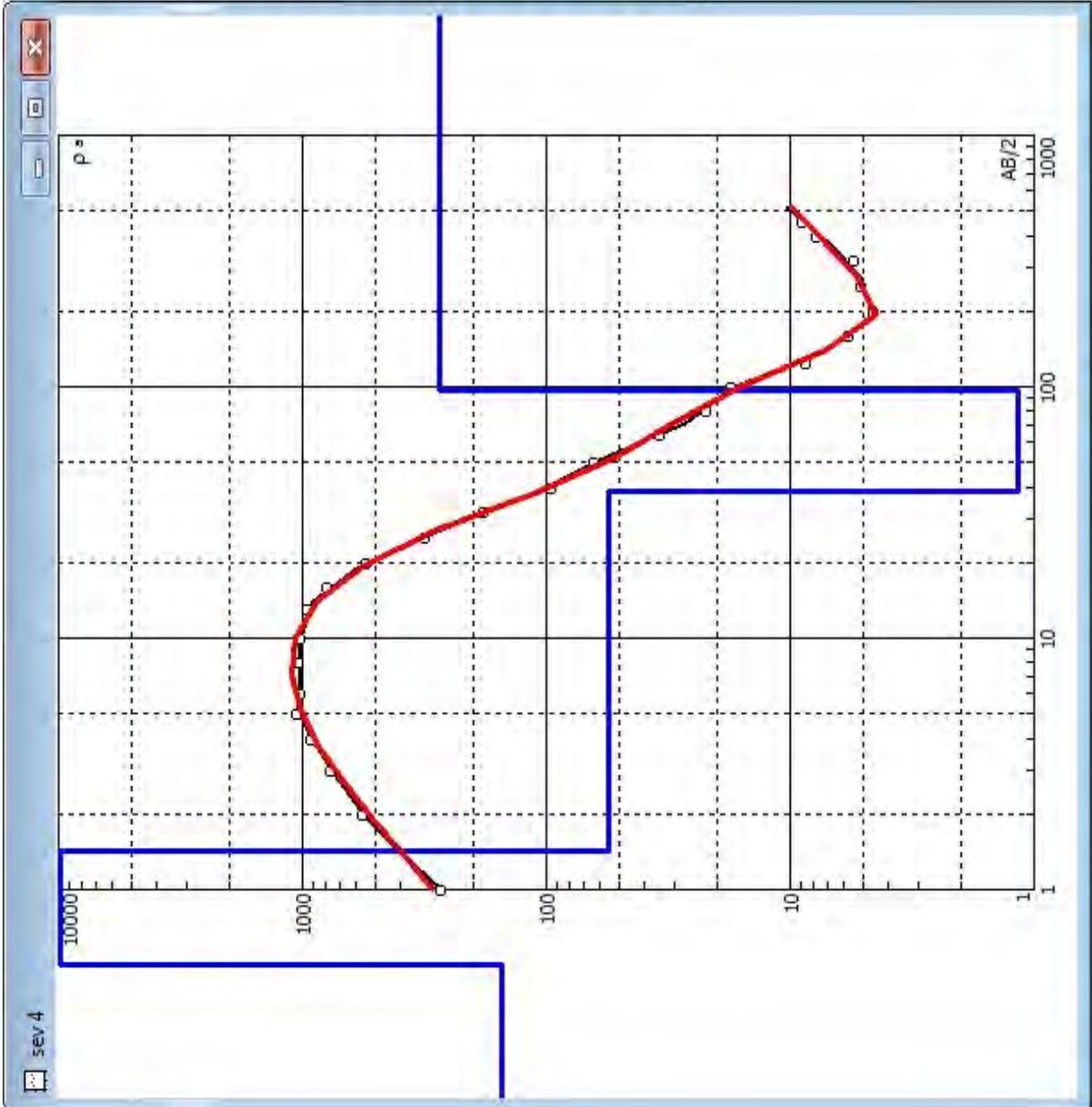


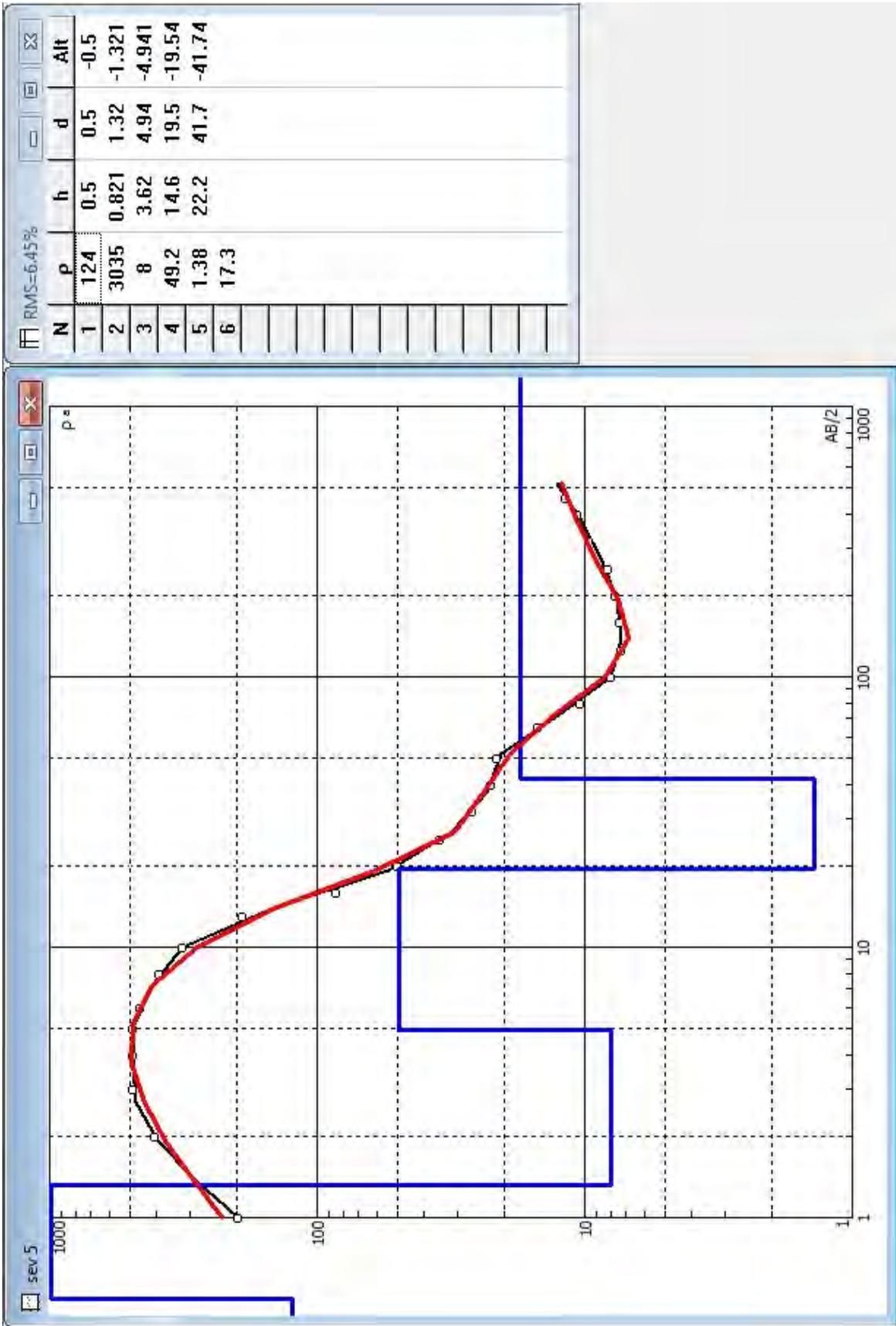


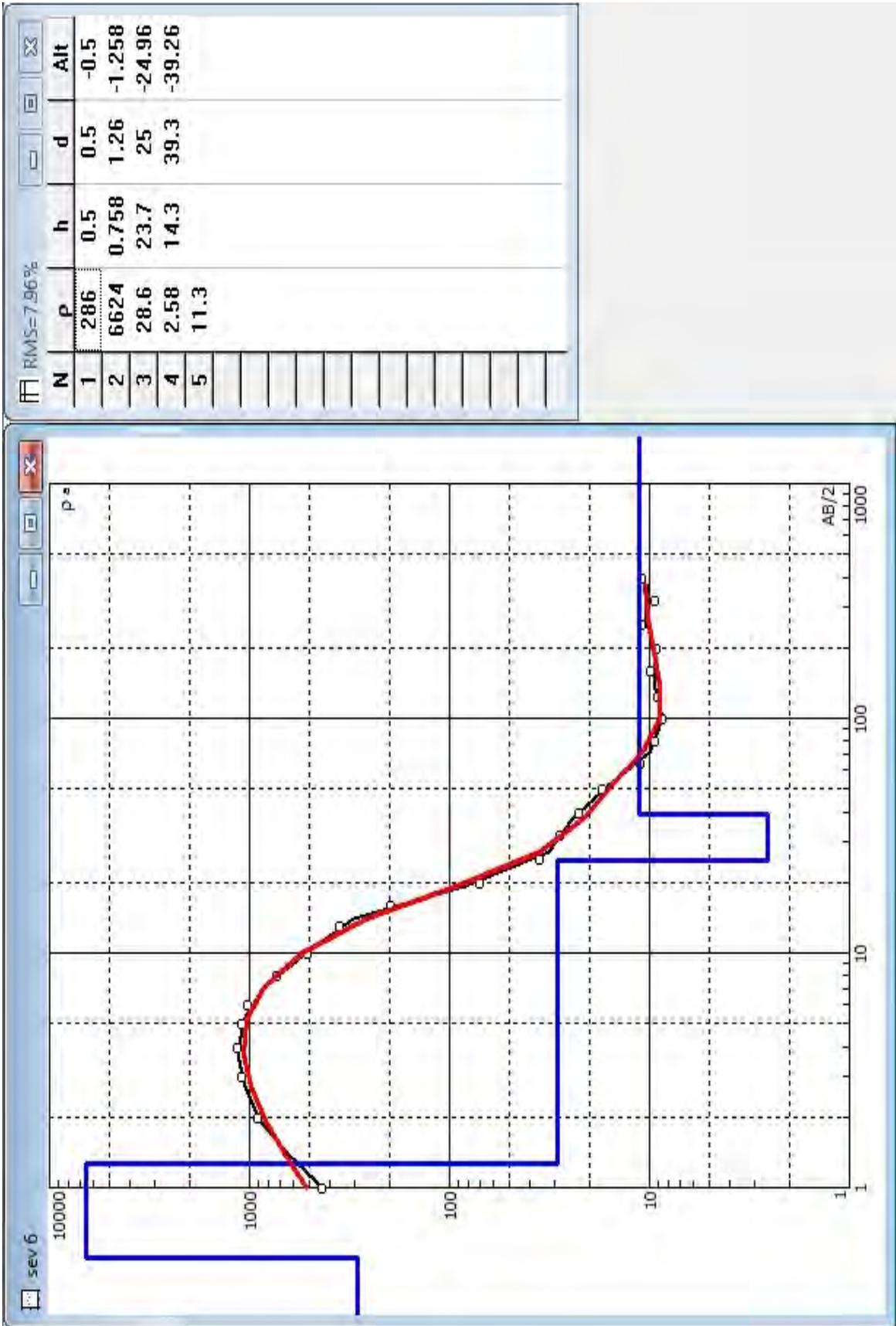


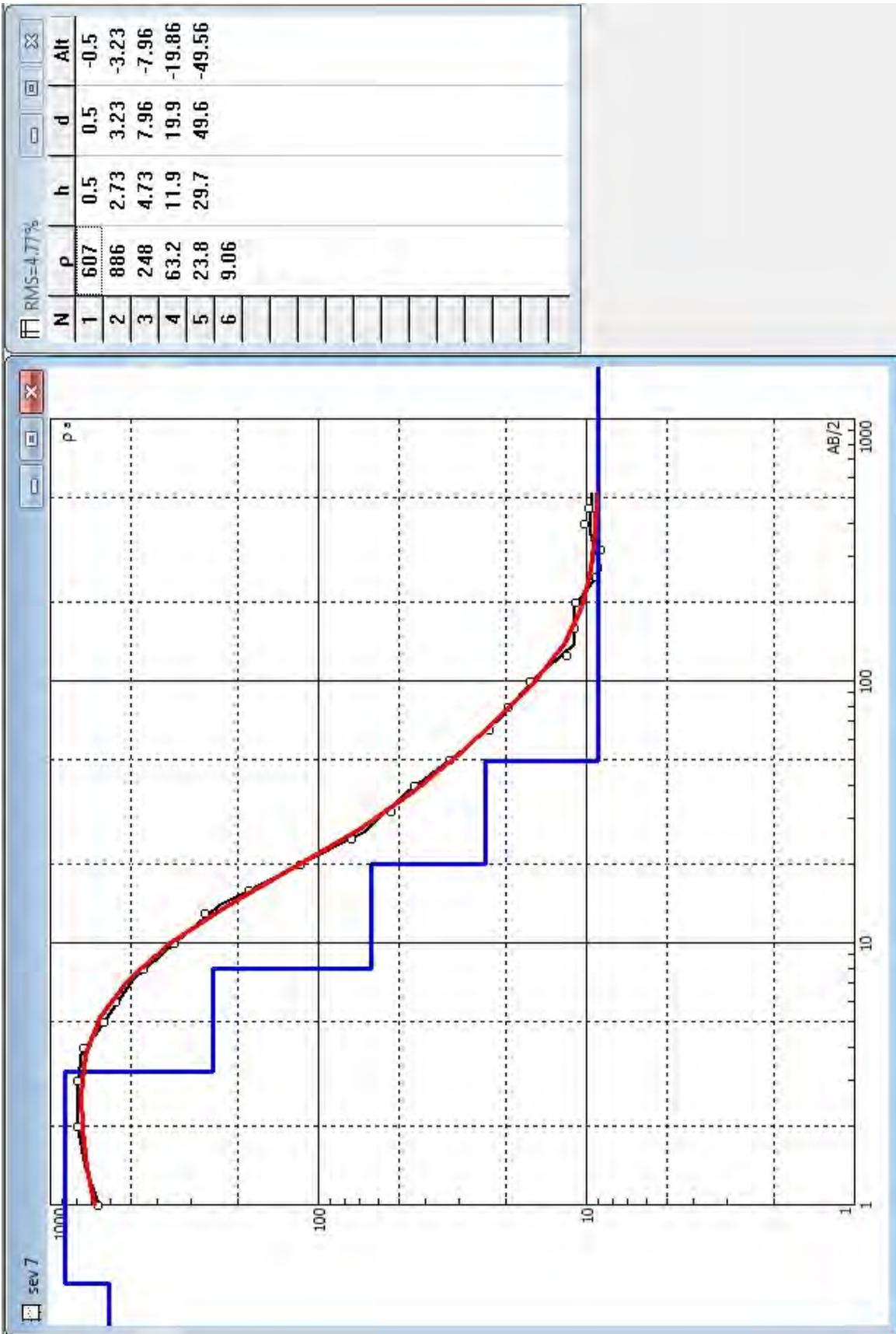
RMS=5.39%

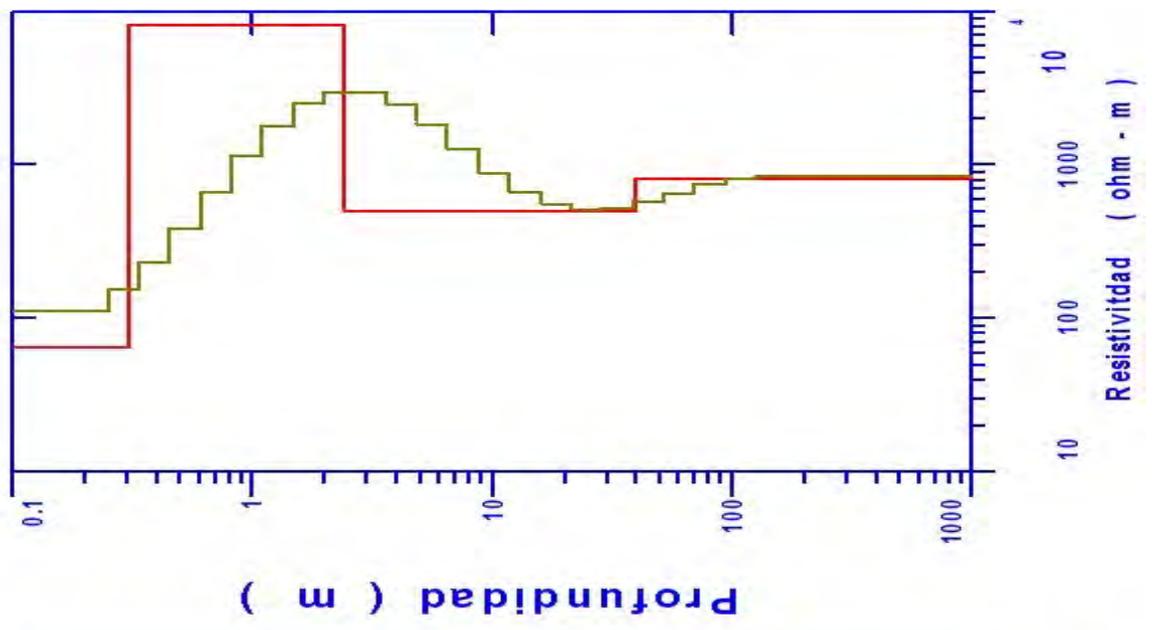
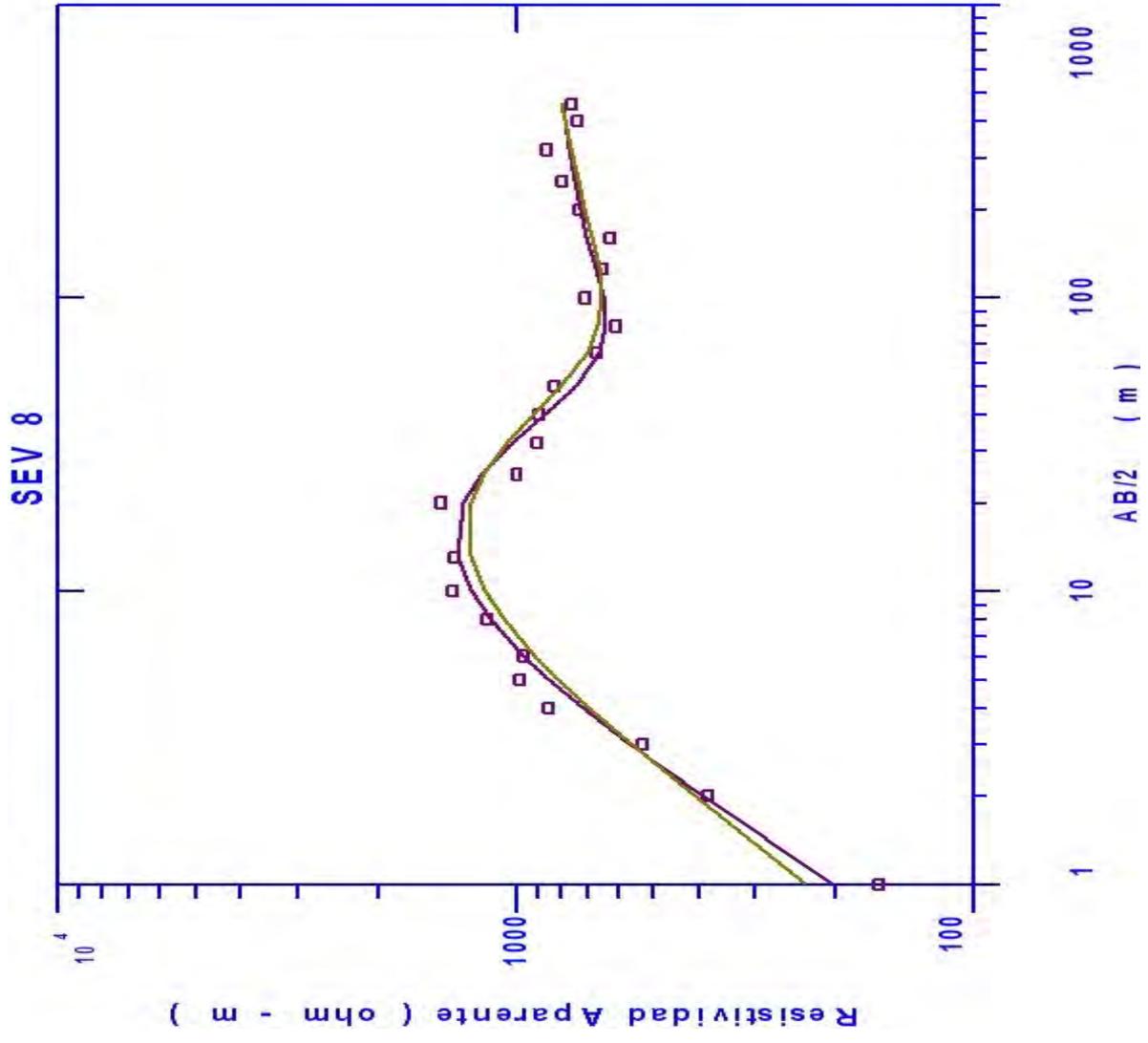
N	P	h	d	Alt
1	151	0.5	0.5	-0.5
2	10648	0.928	1.43	-1.428
3	55.5	37.1	38.5	-38.53
4	1.16	58.1	96.6	-96.63
5	272			

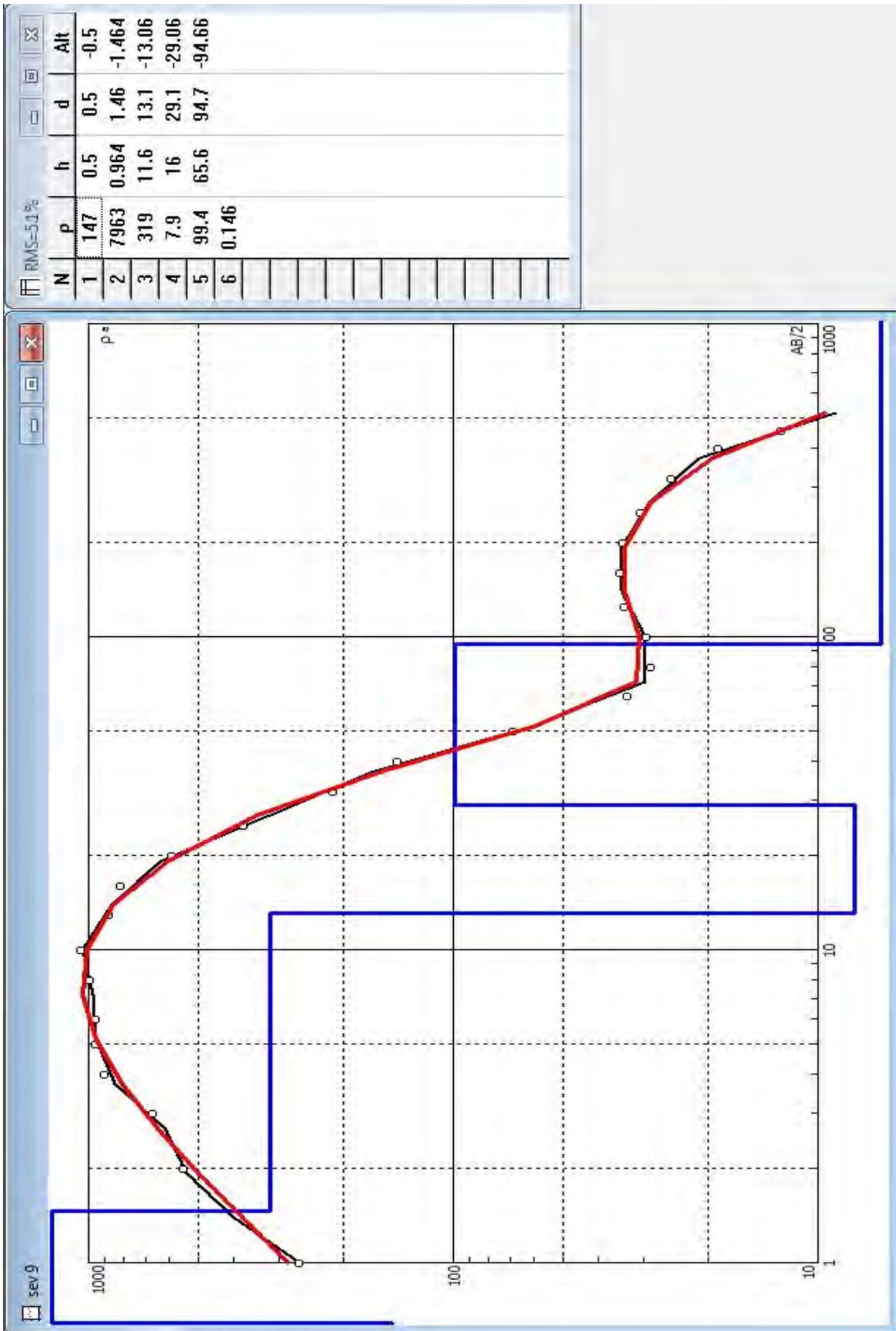












RMS=5.13%

N	p	h	d	Alt
1	459	0.5	0.5	-0.5
2	11154	0.79	1.29	-1.29
3	78.1	36.6	37.9	-37.89
4	4.97			

